

수치 모델링 기술을 이용한 심해 가스 하이드레이트의 탄성과 특성 연구

신성렬^{1*} · 여은민¹ · 김찬수¹ · 박근필² · 이호영² · 김영준²

¹한국해양대학교 해양과학기술대학 해양개발공학부

²한국지질자원연구원

Seismic Properties Study of Gas Hydrate in Deep Sea using Numerical Modeling Technique

Sung Ryul Shin^{1*}, Eun Min Yeo¹, Chan Su Kim¹,
Keun Pil Park², Ho Young Lee² and Young Jun Kim²

¹Korea Maritime University, Dept. of Energy & Resources Eng.

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Petroleum & Marine Resources Div.

요약: 본 연구에서는 가스 하이드레이트 부존 예상지역인 한반도 동해 지역의 탄성과 탐사자료 처리 및 해석결과를 근거로 하여 가스 하이드레이트의 탄성과 탐사자료의 특성, 지층 정보 및 속도를 규명하기 위해서 탄성과 수치모형 실험을 실시하였다. Staggered grid를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링 기법으로 통상적인 다중채널 탄성과 탐사, OBC 탐사 그리고 VCS 탐사에 대하여 적용하였다. 본 연구 결과 staggered grid를 이용한 유한차분법은 P파와 S파 그리고 밀도에 대한 변수를 자유롭게 적용할 수 있어서 심해저 가스 하이드레이트의 부존상황에 대한 탄성과 모델링 적용이 용이하였으며, 가스 하이드레이트의 부존 증거인 BSR (Bottom Simulating Reflector)과 같이 가스 하이드레이트층과 자유 가스(Free Gas) 층 사이의 경계면에서 높은 임피던스 차이로 인한 큰 진폭의 반사파와 위상역전 현상을 관찰할 수 있었다. 그리고 수치모형 실험을 이용하여 획득한 자료에 대하여 수진기와 음원의 거리에 따른 반사계수를 계산하였으며 수치 모델링으로 획득한 인공합성 탄성과기록의 반사계수와 Shuey (1985)의 근사식에 의해 구해진 반사계수의 값이 거의 일치하였다.

주요어: 가스 하이드레이트, 수치모형실험, Staggered grid, BSR, 반사계수

Abstract: We had conducted a numerical modeling to investigate seismic properties of gas hydrate with field parameters acquired over the East sea in 1998. We used a 2-D staggered grid finite difference method to generate synthetic elastic seismograms for multi-channel seismic survey, OBC (Ocean Bottom Cable) survey and VCS (Vertical Cable Seismic) survey. The results of this study showed that the method using staggered grid yielded stable results and could be used to seismic imaging. We could find out the high amplitude anomaly and the phase reversal phenomenon of reflection wave at interface between the gas hydrate layer and free gas layer such a BSR (Bottom Simulating Reflector) which is the evidence for existence of gas hydrate in seismic reflection data. And we computed the reflection coefficients at the incident angles corresponding to offset distance with the synthetic seismograms. The reflection coefficients acquired from the numerical modeling were nearly consistent with the reflection coefficient computed by Shuey's equation.

Keywords: Gas hydrate, Seismic numerical modeling, Staggered grid, BSR, Reflection coefficient

서 론

가스 하이드레이트는 고압 저온 조건하에서 물과 메탄가스가 결합하여 형성된 고체상 화합물로 부존 가능 지역은 추운 극지방의 육지 및 대륙붕의 동토와 해수의 온도가 낮은 심해

저 지역의 대륙사면 및 대륙대에 퇴적된 미 고결 퇴적층 등이다(Makogon, 1997). 이러한 가스 하이드레이트는 재래형 석유와 천연가스의 대체할 수 있는 미래의 에너지원으로 매우 중요하며, 또한 기후협약에 따른 청정 에너지원의 수요 증가로 인하여 높은 관심을 받고 있다.

우리나라 관할해역에 부존하는 가스 하이드레이트의 연구 및 개발은 국가 경제력의 향상은 물론 에너지의 안보측면에서도 매우 중요하다(허대기, 2005). 가스 하이드레이트의 부존확인 방법으로는 탄성과 단면도상에 하이드레이트로 포화된 퇴적층과 하부에 존재하는 가스 또는 물로 포화된 퇴적층 사이에서

2006년 2월 15일 접수; 2006년 5월 26일 채택

*Corresponding author

E-mail: srshin@mail.hhu.ac.kr

Address: Dept. of Energy & Resources Eng.,

Korea Maritime University,

Dongsam-Dong, Youngdo-Ku, Busan, 606-791 Korea

탄성과 속도 및 밀도 차이 때문에 상·하 음향계수 차가 커서 나타나는 BSR (Kvenvolden and Barnard, 1983) 그리고 입사각에 따른 진폭변화를 나타내는 AVO (Amplitude Versus Offset) 해석(Ostrander, 1984; 양동우와 양승진, 1996) 등이 있다.

본 연구는 가스 하이드레이트의 탄성과 진폭특성 규명 및 속도정보 파악을 목적으로 하고 있다. 그러므로 한반도 동해의 가스 하이드레이트 부존 지역의 해양 탄성과 탐사의 자료 처리 결과를 근거로 하여 가스 하이드레이트의 탄성과 탐사자료의 특성분석, 지층 정보 및 속도를 규명하기 위해서 수치모형실험을 수행하였다. 이러한 실험은 가스 하이드레이트 부존 지역에 대한 탄성과 진폭특성 규명 해석기술에 기초가 될 것이다.

탄성과 수치모형실험

본 연구에서는 1998년 한반도 동해의 탄성과 탐사 자료 처리 및 해석(장성형 등, 1999), 가스 하이드레이트의 탄성과 복소분석(장성형 등, 2005) 그리고 가스 하이드레이트 층에서의 탄성과 AVO 특성 연구(양승진 등, 2000)를 근거로 하여 지질모형을 설정하였고, 가스 하이드레이트 탄성과 탐사 자료의 특성분석과 속도를 규명하기 위해서 가스 하이드레이트가 부존하지 않는 수평 3층 모델과 가스 하이드레이트층과 자유 가스(free gas)층이 존재하는 수평 5층 모델에 대해서 수치모형실험을 수행하였다. 각각의 모델에 대해서 다중채널 탄성과 모델링, OBC (Ocean bottom cable) 또는 OBS (ocean bottom seismometer) 모델링 그리고 VCS (vertical cable seismic) 모델링을 적용하였다.

이론 및 방법

본 연구에서 사용한 수치모형실험 방법은 staggered grid를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링 기법으로 이러한 staggered grid에 의한 유한차분법 모델링은 유체역학 분야 및 전자기파의 전파모델링에서 많이 사용되고 있으며, 특히 해양탄성과 탐사와 유사한 상황인 유체-고체 매질인 경우에도 안정적인 해를 구할 수 있는 장점이 있다(신성렬 등, 1997).

2차원 직교좌표계(cartesian system)인 등방매질에서 P-SV의 탄성과동은 변위(displacement)에 관한 2차 편미분방정식으로 유도될 수 있으며 변위-응력(displacement-stress)관계일 때는 아래의 식을 만족한다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

$$\tau_{xx} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\tau_{zz} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

$$\tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)$$

이 때, (u_x, u_z) 는 변위벡터이며 $(\tau_{xx}, \tau_{zz}, \tau_{xz})$ 는 응력텐서, $\rho(x, z)$ 는 매질의 밀도를 그리고 $\lambda(x, z)$ 와 $\mu(x, z)$ 는 Lamé의 상수이다.

파동방정식을 수치해석학적인 방법으로 해를 구할 때 모델의 인위적인 경계에서는 원하지 않는 반사파가 생기는 것을 방지하기 위해 음향 및 탄성과동방정식 모두 효과적으로 적용할 수 있는 스펀지 경계조건(신창수 등, 1993)을 사용하였다. 변위에 관한 탄성과동방정식의 경우 이러한 인위적인 경계면 외에도 매질의 물성이 변하는 경계면에서 경계면 상하의 격자에서 변위 및 응력이 연속이라는 경계조건을 적용해야한다. 이러한 내부경계조건은 모델이 바뀌면 이에 상응하도록 내부경계조건 또한 바뀌어야한다는 매우 성가신 작업을 필요로 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 staggered grid를 이용한 속도-응력에 대한 파동방정식의 경우 내부경계조건을 자동적으로 만족하여 별도의 작업이 필요하지 않기 때문에 실제 적용성 및 안정성이 매우 뛰어나다는 장점을 가지게 된다(신성렬 등, 1997).

탄성과 수치모형실험의 적용

가. 다중채널 탄성과 탐사자료

순수 하이드레이트, 해수, 얼음과 가스의 탄성과 물성은 Table 1과 같으며 일반적으로 가스 하이드레이트가 포함된 지층에서의 P파 속도는 2,010 ~ 4,500 m/s, S파는 140 ~ 1,250 m/s 그리고 밀도는 1.15 ~ 2.4 g/cm³으로 알려져 있다. 이러한 물성치를 이용하여 staggered grid에 의한 유한차분법 모델링을 Fig. 1(a)와 (b) 같은 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 적용하였다.

Fig. 1(a)에서 첫 번째 층은 해수 층이며, 두 번째 층과 세 번째 층은 퇴적층으로 해당하는 탄성과 파라미터들은 그림에 나타낸 바와 같다. Fig. 1(b)에서의 세 번째 층과 네 번째 층은 가스 하이드레이트층과 자유가스(free gas)층을 의미한다.

모델은 7,500 m × 3,750 m의 크기이며, 에어건(air gun)과 같은 P파 음원을 사용한 음원의 위치는 해수면 바로 하부지점(3,000 m, 6 m)이다. 수신기의 위치는 일반적인 해양 탄성과 탐사를 위한 심도 6 m에 15 m 간격으로 500개를 설치하였으며, 사용된 음원은 중심주파수가 25 Hz인 가우스 1차 미분 파형이다. 수평/수직 방향의 격자간격($\Delta x = \Delta z$)은 3 m이며, 시간

Table 1. Elastic properties of water, pure hydrate, ice and gas (Ecker, 1998).

Material	Vp [m/s]	Vs [m/s]	ρ [k/m ³]
Water	1,500	-	1
Pure hydrate	3,450	1,770	0.767
Ice	3,310	1,670	0.916
Gas	375	-	0.1

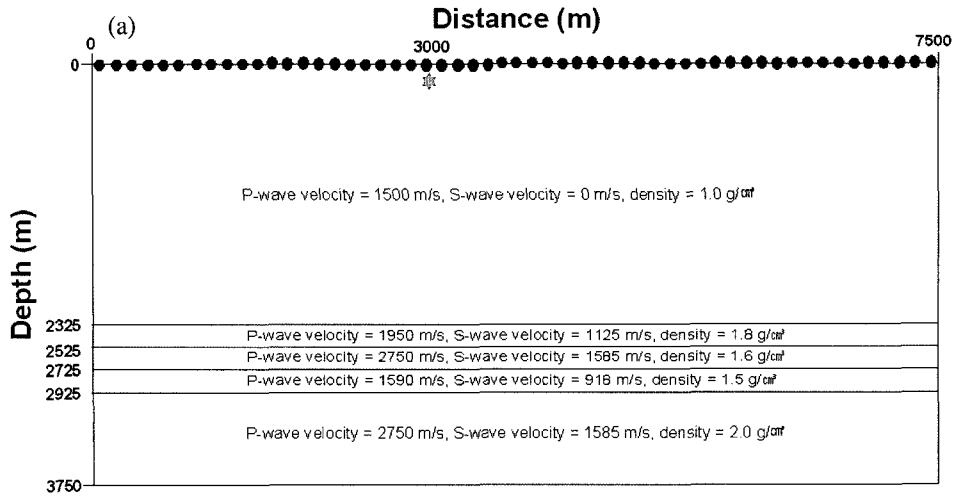


Fig. 1. (a) A horizontal three layered model. The symbol ★ and ● denote source position and receiver position respectively.

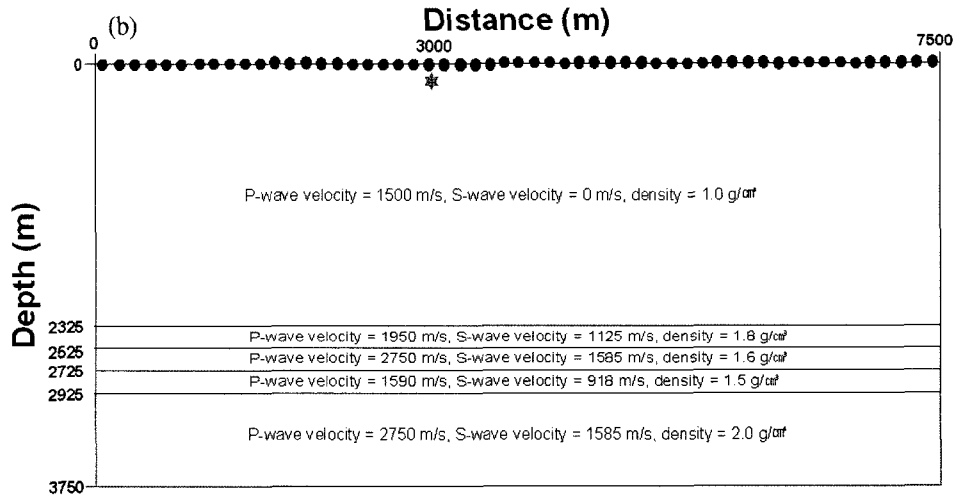


Fig. 1. (b) A horizontal five layered model with a gas hydrate layer and a free gas layer.

간격은 750 μ s이다. 근사를 통한 유한차분법 모델링을 할 때 격자간격 및 시간간격의 크기에 따라 필연적으로 수치분산이 발생한다. 통상적인 유한차분법 모델링에서의 안정조건은

$$\sqrt{V_p^2 + V_s^2} \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \text{ 이나 staggered grid의 경우 } V_p \frac{\Delta t}{\Delta x} < \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ 이 된다.}$$

staggered grid의 경우가 안정조건을 만족시키기 위한 시간간격이 작아야 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 인위적인 반사파를 제거하기 위하여 모델의 좌우 및 하부에 격자 150개의 스펀지 경계대를 설정하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대한 시간의 진행에 따라 나타난 순간포착(snapshot) 파동장을 나타낸 것으로 D는 직접파, R1은 첫 번째 층과 두 번째 층의 경계면에서의 반사파, R2는 두 번째 층과 세 번째 층의 경계면에서 반사파, R3는 세 번째 층과 네 번째 층의 경계면에서 반사파, R4는 네 번째 층과 다섯 번째 층의 경계면에서 반사파, M은

다중반사파 그리고 C는 모드 전환파(mode conversion wave)를 각각 의미한다.

Fig. 4는 수평 3층 모델에 대한 인공합성 탄성파 기록이며 Fig. 5(a)와 (b)는 수평 5층 모델에 대한 인공합성 탄성파 기록과 트레이스이다. Fig. 4와 5에서 직접파와 1차 반사파, 다중 반사파 그리고 모드 전환파(mode conversion)등을 관찰할 수 있다. Fig. 4에서 PPSP 또는 PSPP는 두 번째 경계에서 모드 전환파이며 이러한 모드 전환파는 탄성파가 매질의 경계면에 비스듬히 입사할 때 종파가 수직 횡파로 또는 수직 횡파가 종파로 전환되는 현상이다. 그리고 PPPPPP는 첫 번째 퇴적층 내에서 생긴 단거리 다중반사파(peg-leg), PPSPPP와 PPSSPP는 첫 번째 퇴적층 내에서 생긴 단거리 다중반사파 가운데 모드 전환파이다. Fig. 5(a)에서 PPPSSP, PSSSSPPP, PSSSSSSP는 단거리 다중반사파들로 모드 전환된 반사이벤트이다. Fig. 5에서 볼 수 있는 여러 가지 반사파 가운데 특히 R3는 BSR과 같

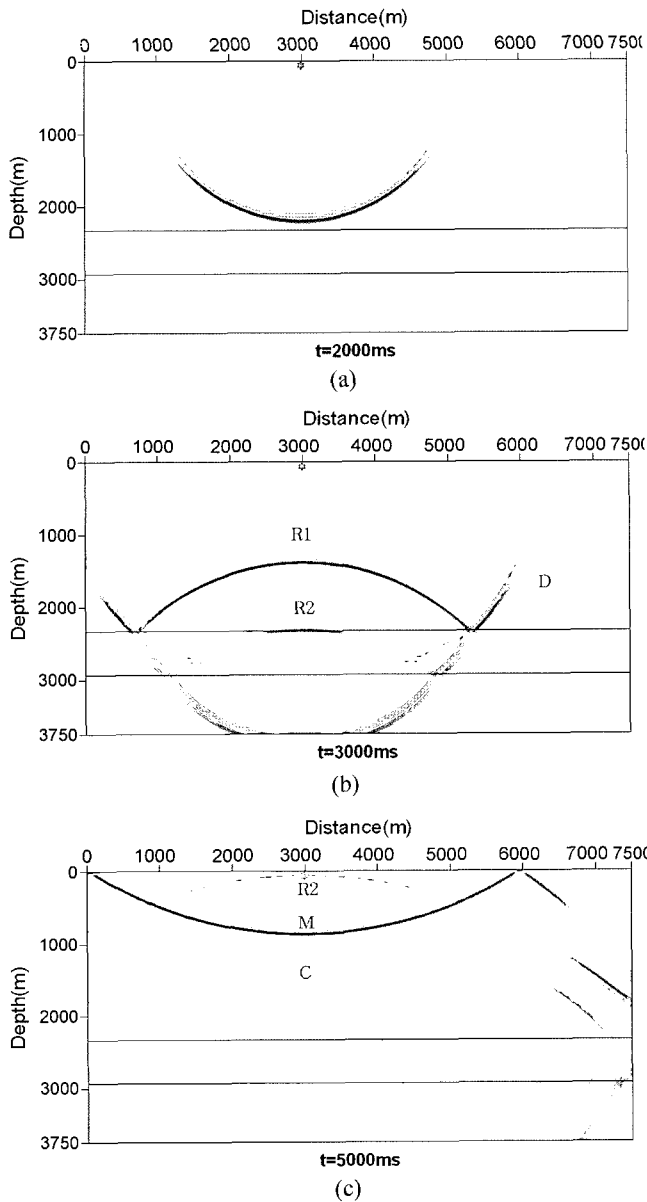


Fig. 2. A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1(a). R is primary reflection, M is multiple, C is mode conversion, and D is direct wave.

은 가스 하이드레이트층과 자유 가스층 사이의 경계면에서 높은 임피던스 차이로 인한 큰 진폭의 반사파로 위상역전 현상을 확인할 수 있다.

나. OBC 탐사자료

Fig. 6(a)와 (b)와 같이 OBC 탐사형태로 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 유한차분법 탄성과 모델링을 적용하였다. 모델은 7,500 m × 3,500 m의 크기이며, 음원의 위치는 해저면 위(3,000 m, 6 m)에 위치한다. 수신기의 배열은 OBC 탐사를 위하여 심도 2,325 m에 15 m의 간격으로 500개를 설치하였다. 사용된 음원의 중심주파수는 25 Hz의 가우스 1차미분파형이며, 수평/수직 방향의 격자간격($\Delta x = \Delta z$)은 3 m이고 시간

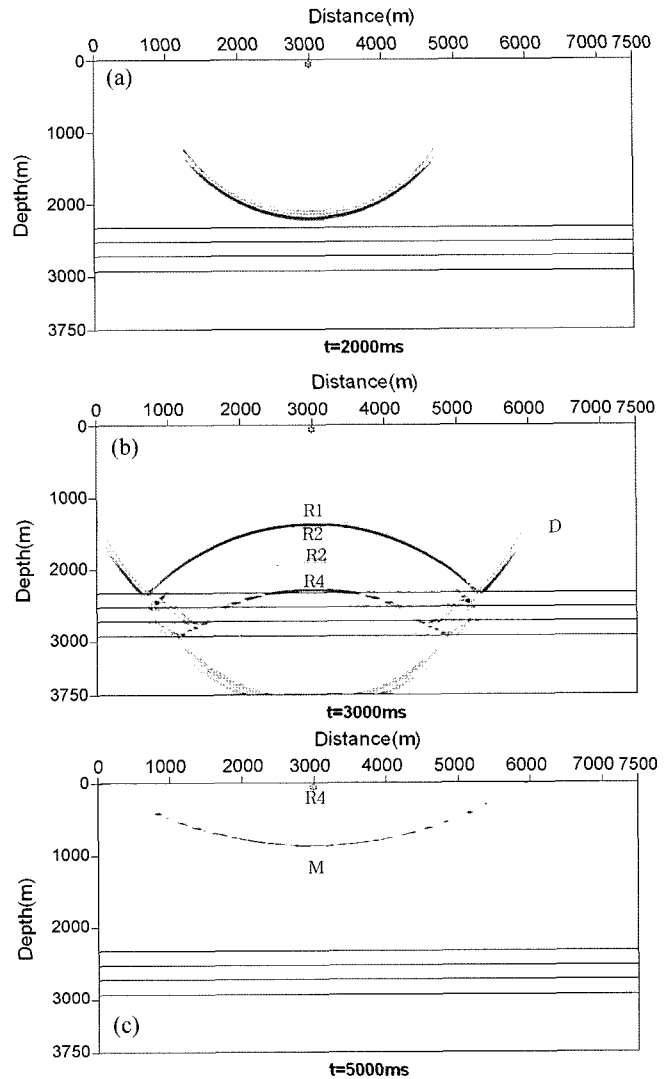


Fig. 3. A succession of snapshots based on the model shown in Fig. 1(b).

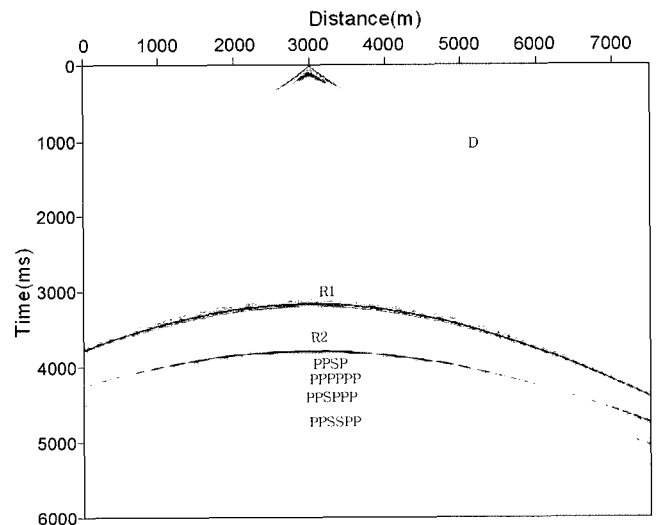


Fig. 4. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1(a).

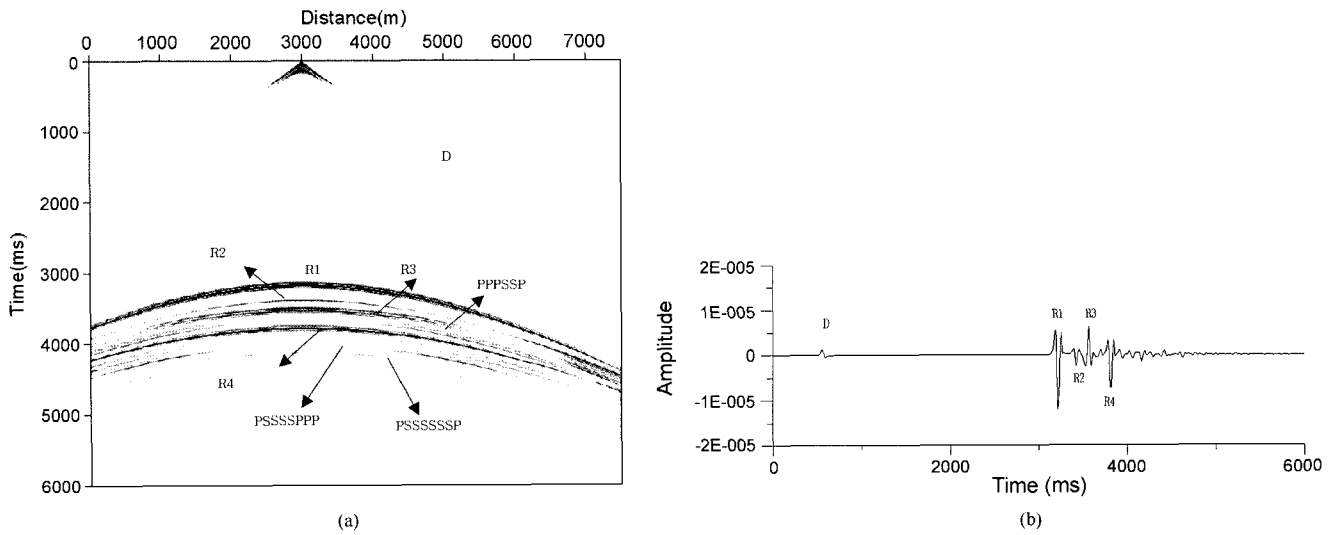


Fig. 5. (a) Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 1(b) and (b) a trace of channel No. 250.

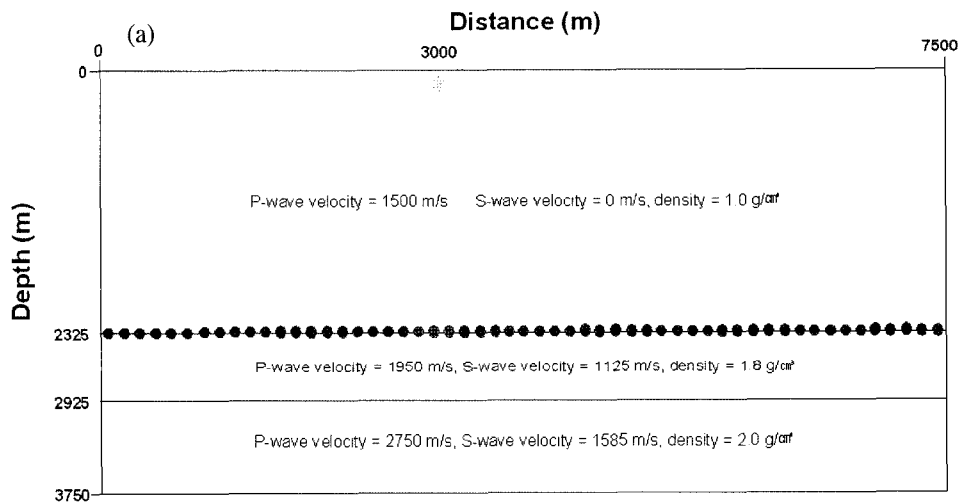


Fig. 6. (a) A horizontal three layered model for OBC survey.

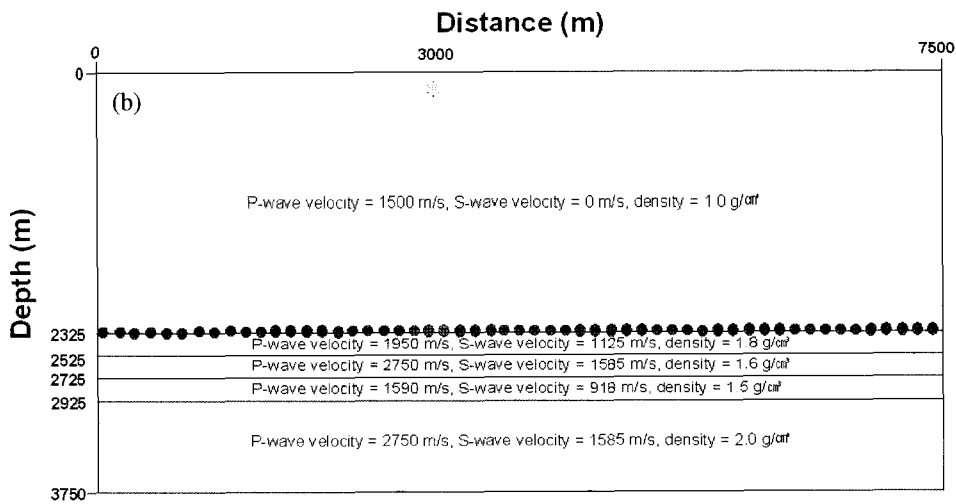


Fig. 6. (b) A horizontal five layered model for OBC survey.

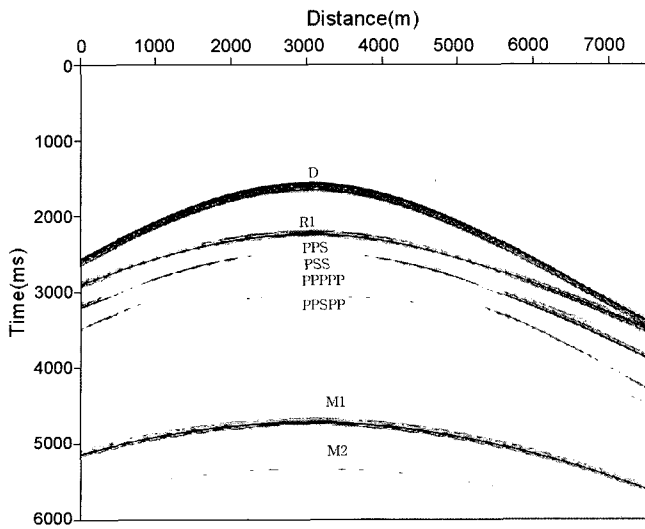


Fig. 7. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6(a).

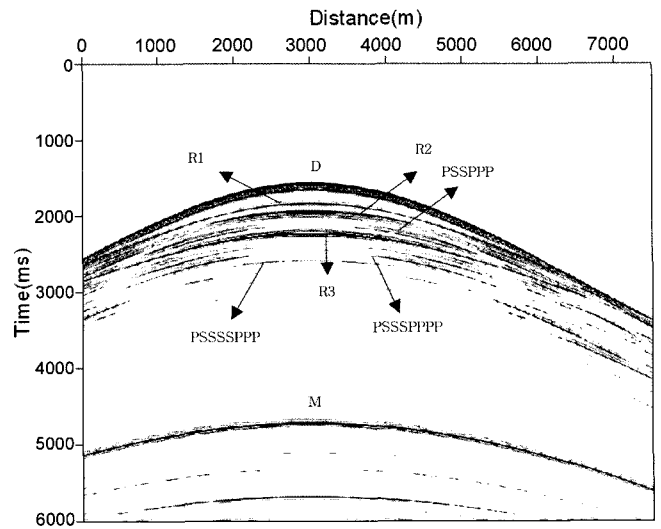


Fig. 8. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 6(b).

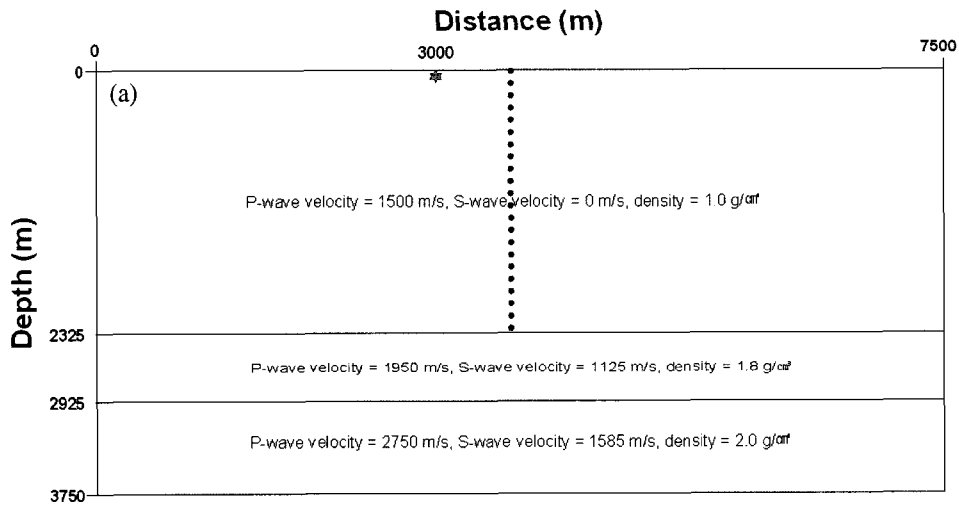


Fig. 9. (a) A horizontal three layered model for VCS survey.

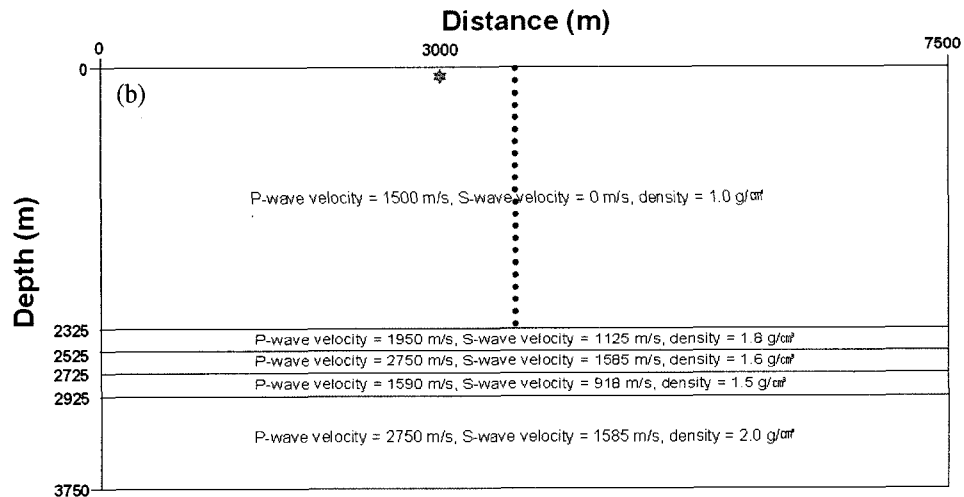


Fig. 9. (b) A horizontal five layered model for VCS survey.

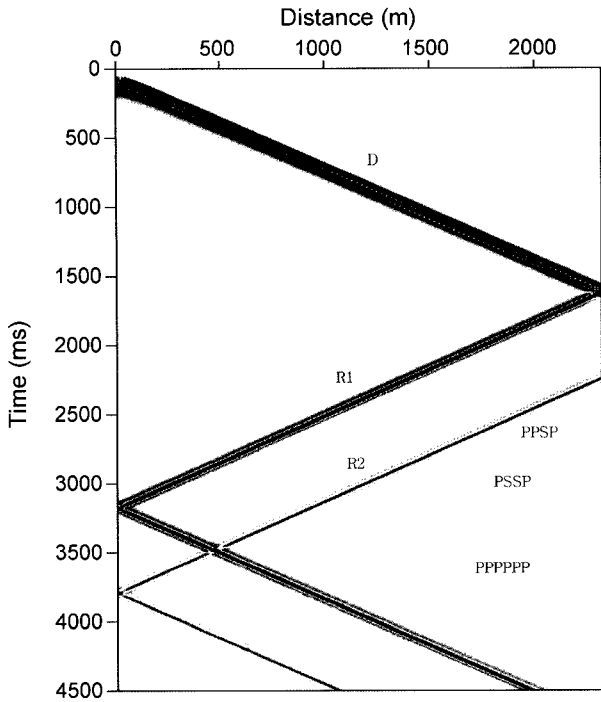


Fig. 10. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9(a).

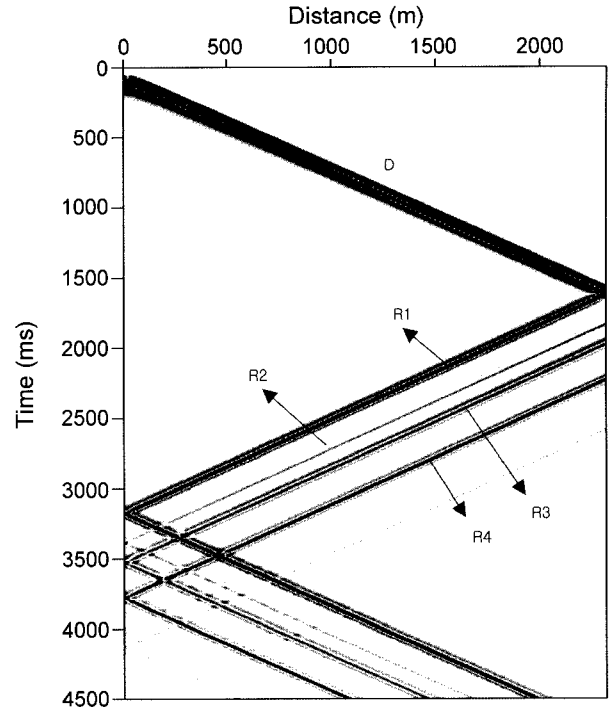


Fig. 11. Synthetic seismogram obtained from the model shown in Fig. 9(b).

간격(Δt)은 750 μs 이다. 또한 인위적인 반사파를 제거하기 위해 모델 하부 및 좌우의 경계면에 150개의 스펀지 경계대를 설정하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 OBC 탐사의 인공합성 탄성파기록으로 해저면에 설치된 수신기에서 직접파(D), 다중반사파, 모드 전환파 그리고 각층에 대한 반사 이벤트를 관찰할 수 있다. Fig. 7에서 해수와 첫 번째 지층의 임계굴절각은 약 50°, 두 번째 경계면에서의 임계굴절각은 약 45° 이기 때문에 직접파 D와 반사파R1의 진폭이 음원으로부터 수신기의 거리가 멀어짐에 따라 반사파의 진폭이 감소하다가 각 층의 임계굴절각 부근에서부터 전반사로 인하여 진폭이 크게 됨을 관찰할 수 있다. PPS와 PSS는 모드 전환된 반사파이며 PPSPP는 지층 내에서 발생한 단거리 다중반사파, PPSPP는 모드 전환된 단거리 다중반사파이며, M1과 M2는 해저면과 지층경계에서 반사된 파가 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파이다. Fig. 8에서는 직접파 D와 각 지층에서의 반사파 R1, R2, R3 및 단거리 다중반사 및 모드 전환된 파를 관찰할 수 있고 4,800 ms 이후에는 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파 군들이 나타난다. 반사파의 진폭은 음원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하다가 지층들의 임계굴절각에 해당하는 음원으로부터의 거리에 설치된 수신기에서 전반사로 인한 진폭의 증가를 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 8에서 가스 하이드레이트층과 자유 가스층 사이 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 기인한 위상역전 현상을 동반한 강진폭의 반사면을 확인할 수 있다. 그리고 통상적인 다중채널 탄성과 탐사를 통하여 획득한 인공합성 탄

성파기록에 비하여 비교적 해상도가 높았으며 입사각에 따른 진폭의 변화가 큰 영역까지 확인이 가능하였다.

다. VCS 탐사자료

통상적인 VSP탐사는 지표면에 음원을 설치하고 시추공에 수신기를 설치하거나 또는 이와 반대로 지표면에 수신기를 시추공에 음원을 설치하여 지층의 수직적인 탄성과 속도를 파악하는 탐사방법이다. 본 연구에서는 심해에서의 탐사라는 환경 조건이기 때문에 수신기의 한 끝단을 해저에 고정시키고 수직으로 수신기를 설치하여 해수면과 지층경계면 사이에서 직접 물성을 측정할 수 있는 탐사방법인 VCS (Krail, 1994) 탐사에 대하여 실험하여 보았다. Fig. 9(a)와 (b)는 VCS 탐사를 수평 모델에 적용한 그림으로 모델의 크기 및 음원의 위치는 OBC 경우와 동일하게 탐사매개변수를 설정하였다. 수신기의 배열은 음원에서 50 m 떨어진 곳(3,050 m)에 15 m의 간격으로 수직으로 155개를 설치하였다. 이러한 VCS 탐사를 이용하여 수평 3층 모델과 수평 5층 모델에 대하여 staggered grid에 의한 유한차분법 탄성과 모델링을 적용하였다. Fig. 10은 이때의 인공합성 탄성과 기록을 나타낸 것으로 D는 하향의 직접파, R1은 해저면에서 상향 반사파, R2는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계면에서 상향 반사파, PPSP와 PSSP는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계면에서 모드 전환된 상향의 반사파, PPSPPP는 첫 번째 지층과 두 번째 층의 경계 안에서 생긴 단거리 다중반사파(inter-leg), M은 해수면에서 다시 반사된 장거리 다중반사파이다. Fig. 11에서도 Fig. 10과 동일한 반사파와 모드 전환파 및 다중반사파를 확인할 수 있으며, R3는 가스하이드레

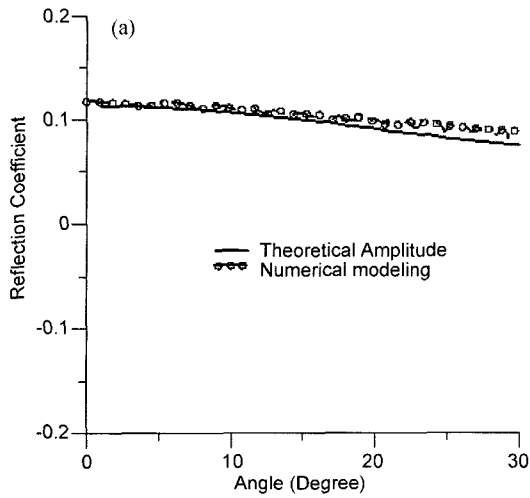


Fig. 12. (a) Amplitude variation versus incident angle at the interface between sediment and gas hydrate layer. A solid line represents the estimated the theoretical coefficient. Circle (○) represents the numerical modeling relative amplitude.

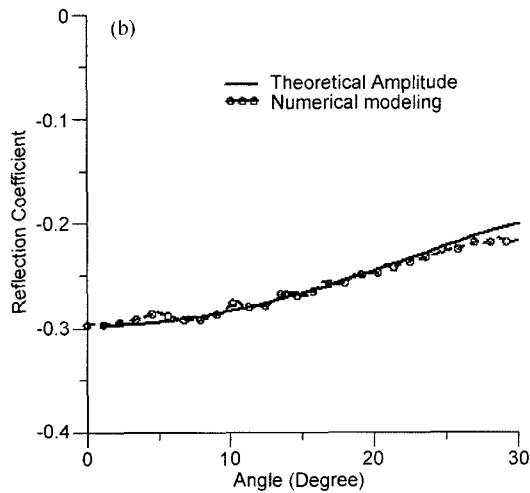


Fig. 12. (b) Amplitude variation versus incident angle at the interface between gas hydrate layer and free gas layer.

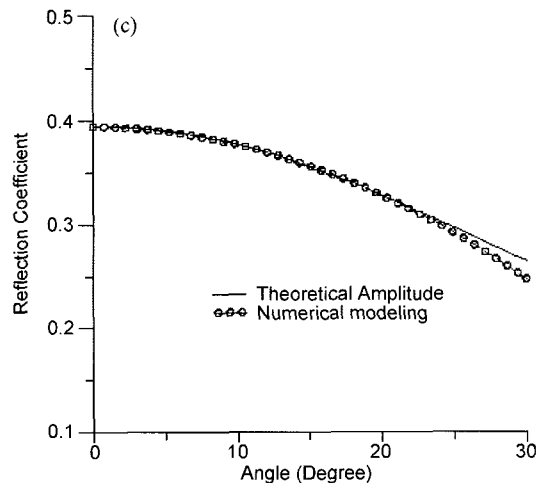


Fig. 12. (c) Amplitude variation versus incident angle at the interface between free gas layer and sediment.

이트층과 자유 가스층 사이에서 만들어진 반사파이며, R4는 자유 가스층과 하부 지층 경계면에서 반사파이며, 모드 전환파 및 단거리 다중반사파가 매우 복잡한 양상으로 나타나고 있다. 특히 R3 반사파는 다중채널 탐사 및 OBC 탐사의 인공 합성 탄성과 기록과 같이 가스 하이드레이트층과 자유 가스층 사이 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 기인한 위상역전 현상을 동반한 강진폭의 반사면을 확인할 수 있다.

입사각에 따른 반사파 진폭특성

입사각 또는 음원-수진기 거리에 따른 반사파 진폭은 반사면 상하 지층의 탄성과 속도와 밀도 등 물성에 의해 결정되며, 반사계수와 지층 물성과의 관계를 고찰해 보기 위해서 Shuey (1985)는 복잡하게 계산되는 Zoeppritz (1919)식을 대신하여 아래의 식과 같이 근사하였다.

$$R_{pp}(\theta) \approx R_p + \left(A_0 R_p + \frac{\Delta\sigma}{(1-\sigma)^2} \right) \sin^2\theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_{p1}} (\tan^2\theta - \sin^2\theta) \quad (1)$$

여기서

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \sigma_a = (\sigma_2 + \sigma_1)/2$$

$$\Delta V_p = V_{p2} - V_{p1}, V_{pa} = (V_{p2} + V_{p1})/2$$

$$R_p = (\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}) / (\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}) \quad (2)$$

$$A_0 = B_0 - 2(1 + B_0) \left(\frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma} \right)$$

$$B_0 = \frac{(\Delta V_p / V_{p1})}{(\Delta V_p / V_{pa}) + (\Delta\sigma / \sigma_a)} \quad (3)$$

위 식에서 θ 는 P파의 입사각, V_{p1} 및 V_{p2} 는 제 1층 및 제 2층의 P파 속도, ρ_1 과 ρ_2 는 제 1층 및 제 2층의 밀도, 는 포아송 비이다. 가스 하이드레이트층에서의 탄성과 AVO (amplitude versus offset) 특성은 가스 하이드레이트층과 상·하 지층의 P 파 및 S파 그리고 밀도의 차이에 의하여 결정된다(Shingley *et al.*, 1979; Andreassen *et al.*, 1997). Fig. 12는 입사각에 따른 진폭의 변화를 Shuey의 근사식을 이용하여 계산한 반사 진폭과 수치 모형실험을 통하여 획득한 통상적인 다중채널 탄성과 탐사자료(Fig. 5)의 반사 진폭을 비교한 그림이다. Fig. 12(a)는 가스 하이드레이트층과 가스 하이드레이트층 상부 퇴적층의 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 입사각이 증가함에 따라서 반사계수는 약 0.1을 나타냈으며 근사식에 의한 반사계수와 실험을 통하여 획득한 반사계수가 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 12(b)는 가스 하이드레이트층과 자유 가스층 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수를 나타낸 것으로 -0.2 ~ -0.3의 반사계수를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며 입사각이 증가함에 따라서 반사계수도 점진적으로 증가하였다. 그리고 (c)는 자유 가스층과 하부 퇴적층 경계면에서의 입사각에 따른 반사계수로서 입사각이 증가함에 따라 반사계수의 값이 비교적 크게 감소하는 것을

확인할 수 있다. 통상적인 다중채널 탄성과탐사를 실시할 때 음원과 수신기 최대 이격거리가 어느 정도 제한적일 수 밖에 없는 실정이고 수심이 약 2,000 m 이상인 심해저에 부존된 가스 하이드레이트 탐사의 경우 입사각이 제한되기 때문에 최대 30°의 입사각 범위에서 분석을 하는 것이 타당할 것이다. 본 연구에서 사용한 지질모델의 경우 수직입사에서 최대의 진폭을 나타내고 최대 입사각인 30°에서 최소 진폭이 되며, 진폭 변화율은 최대 약 40~50%의 변화율을 보이므로 현장자료의 AVO 분석할 때 진폭을 매우 주의 깊고 세심하게 취급해야 할 것이다.는 것을 확인할 수 있었다.

결 론

수심 2,000 m 이상의 심해저에 부존이 예상되는 동해지역 가스 하이드레이트 탄성과탐사 자료를 근거로 하여 가스 하이드레이트가 부존하지 않는 수평 3층 모델과 가스 하이드레이트가 부존하는 수평 5층 모델에 대하여 탄성과 수치모형실험을 실시하였고, 획득한 탄성과 자료에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. Staggered grid를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링 기법으로 통상적인 다중채널 탄성과 탐사, OBC 탐사 그리고 VCS 탐사에 대하여 적용하였으며, 이러한 방법은 P파, S파 그리고 밀도에 대한 변수를 자유롭게 적용할 수 있고 심해저 가스 하이드레이트의 부존상황에 대한 탄성과 수치모형실험에 용이하였다.

2. 탄성과 수치모형실험을 통하여 가스 하이드레이트층과 자유 가스층이 존재하는 수평 5층 모델의 경우, 가스 하이드레이트 부존을 의미하는 일반적인 특성인 BSR과 같이 두 층사이의 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 의한 큰 진폭의 반사파와 위상역전 현상을 관찰할 수 있었다.

3. 합성탄성과 기록으로부터 얻은 반사 진폭과 Shuey의 근사식에 의해 구해진 반사계수의 값이 거의 일치하였으며, Shuey의 근사식을 이용한 가스 하이드레이트의 AVO (Amplitude Variation with Offset)분석 방법이 유용하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 심해조건에서의 탄성과탐사는 입사각이 제한적이고 또한 입사각에 따른 반사파 진폭의 변화율이 작으므로 AVO분석 시 진폭을 매우 주의 깊고 세심하게 취급하여야 한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 ‘국가 지질 조사 및 자원탐

사사업’의 가스 하이드레이트 관련 위탁 연구과제의 결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 신성렬, 신창수, 서정희, 1997, Staggered를 이용한 유한차분법 탄성과 모델링, 한국자원공학회지, **34**, 168-174.
- 신창수, 박관순, 박근필, 조철현, 1993, 수치모형 프로그램에 의한 인공탄성과 합성 및 완전파형 역산연구, KR-93(T), 과학기술처.
- 양동우, 양승진, 1996, AVO 및 복소분석에 의한 천연가스 저류층 탐지에 관한 연구, 한국자원공학회지, **33**, 340-348.
- 양승진, 서태공, 유해수, 장재경, 2000, 하이드레이트 층에서의 탄성과 AVO 특성 연구, 한국자원공학회지, **37**, 213-223.
- 장성형, 서상용, 정부흥, 류병재, 1999, Geobit를 이용한 가스 하이드레이트 탐사자료 처리, 폴리탐사, **2**, 184-190.
- 장성형, 서상용, 류병재, 2005, 가스 하이드레이트 탄성과 자료 복소분석 해석, 한국지구시스템공학회지, **42**, 180-190.
- 허대기, 2005, 가스하이드레이트 기술개발 현황, 한국지구시스템공학회지, **42**, 206-213.
- 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.
- Ecker, C., 1998, Seismic characterization of methane hydrate structure, Stanford Exploration Project (1/21/1998).
- Krail, P. M., 1994, Vertical cables as a subsalt imaging tool, *The Leading Edge*, **46**, 885-887.
- Kvenvolden, K. A., and Barnard, L. A., 1983, Gas hydrate of the Blake Ridge Outer Ridge, Site 533, Deep Sea Drilling Project Leg 76, In Sheridan R. E., and Gradstein F. W. *et al.* eds., Initial Report, DSDP 76, U.S Government Printing Office, Washington, D.C., 353-365.
- Makogon, Y. F., 1997, *Hydrate of hydrocarbons*, PeenWellPubl. Tulsa, Oklahoma, US., p.482.
- Ostrander, W. J., 1984, Plane wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angle of incidence, *Geophysics*, **49**, 1637-1648.
- Shipley, T. H., and Didyh, B. M., 1982, Occurrence of methane hydrates offshore southern Mexico, Initial Report, DSDP Leg 66, U.S Government Printing Office, Washington, D.C., 547-555.
- Shuey, R. T., 1985, A simplification of Zoeppritz equations, *Geophysics*, **50**, 609-614.
- Zoeppritz, K., 1919, Erdbebenwellen VIII B, On the reflection and propagation of seismic waves, *Gottinger Nachrichten*, **1**, 66-84.