

해양 다성분 탄성과 자료를 이용한 가스하이드레이트 유망지역의 BSR 상하부 S파 속도 도출

김병엽^{1,2*} · 변중무²

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부, ²한양대학교 공과대학 자원환경공학과

S-wave Velocity Derivation Near the BSR Depth of the Gas-hydrate Prospect Area Using Marine Multi-component Seismic Data

Byoung Yeop Kim^{1,2*} and Joong Moo Byun²

¹Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Mineral, Petroleum & Environmental Engineering, Hanyang University

S-wave, which provides lithology and pore fluid information, plays a key role in estimating gas-hydrate saturation. In general, P- and S-wave velocities increase in the presence of gas-hydrate and the P-wave velocity decreases in the presence of free gas under the gas-hydrate layer. Whereas there are very small changes, even slightly increases, in the S-wave velocity in the free gas layer because S-wave is not affected by the pore fluid when propagating in the free gas layer. To verify those velocity properties of the BSR (bottom-simulating reflector) depth in the gas-hydrate prospect area in the Ulleung Basin, P- and S-wave velocity profiles were derived from multi-component ocean-bottom seismic data which were acquired by Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) in May 2009. OBS (ocean-bottom seismometer) hydrophone component data were modeled and inverted first through the traveltimes inversion method to derive P-wave velocity and depth model of survey area. 2-D multi-channel stacked data were incorporated as an initial model. Two horizontal geophone component data, then, were polarization filtered and rotated to make radial component section. Traveltimes of main S-wave events were picked and used for forward modeling incorporating Poisson's ratio. This modeling provides S-wave profiles and Poisson's ratio profiles at every OBS site. The results shows that P-wave velocities in most OBS sites decrease beneath the BSR, whereas S-wave velocities slightly increase. Consequently, Poisson's ratio decreased strongly beneath the BSR indicating the presence of a free gas layer under the BSR.

Key words : gas-hydrate, multi-component seismic survey, S-wave velocity, ocean-bottom seismometer (OBS), bottom-simulating reflector (BSR).

가스하이드레이트 부존량 평가에 있어서 해당 부존 지역의 S파 속도 정보는 암상과 공극유체의 정보를 파악하는데 결정적인 역할을 한다. 만일 퇴적층 내에 가스하이드레이트가 존재한다면 이 층에서의 P파 속도와 S파 속도는 동시에 증가하게 되며, 그 하부에 자유가스가 존재하는 경우 P파의 속도는 감소한다. 하지만 S파의 경우 공극을 채우고 있는 유체의 영향을 받지 않고 순수하게 매질을 통해서 진행하므로 하이드레이트 층의 하부에 자유가스층이 존재한다고 해도 그 속도가 변하지 않거나 오히려 매질의 영향으로 그 속도가 증가한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 확인하기 위해 울릉분지의 가스하이드레이트 유망지역 중 탄성과 단면상에서 BSR(해저면 모방 반사면)이 강하게 분포하는 한 지점에서 한국지질자원연구원이 2009년 5월에 OBS(해저면 탄성과 기록계)를 이용하여 취득한 해저면 다성분 탄성과 자료를 이용하여 가스하이드레이트 부존 심도 부근의 P파 및 모드전환 S파의 속도를 구하였다. OBS의 하이드로폰(hydrophone) 성분에 기록된 P파 자료를 이용하여 탄성과 주시 역산법을 수행하여 P파 속도 및 심도 구조를 도출하였다. 해당지역에 취득한 2차원 반사법 탐사 자료는 기본 전산처리를 통해 구한 탐사지역의 기본 층서모형을 초기모델로 삼았다. 여기에 수평 2성분 지오폰(geophone)에 기록된 자료의 극성 분석을 통해 S파의 에너지가 최대로

*Corresponding author: bykim@kigam.re.kr

모인 radial 성분 단면도를 생성하고 여기서 발췌한 주요 S파 이벤트의 주시를 이용해 포아송 비 정도모델링을 수행하여 OBS가 위치한 지점에서의 포아송 비와 S파 속도구조를 최종적으로 도출하였다. 본 연구를 통해 탐사지역의 가스 하이드레이트 존재로 인한 BSR 상하부 층의 P파 속도 역전 현상과 P파와는 달리 BSR 상부에서 하부로 갈수록 S파의 속도가 약간 증가하는 경향을 보여 결과적으로 자유가스층의 존재로 인한 BSR 하부에서 포아송 비 감소현상이 뚜렷함을 확인하였다.

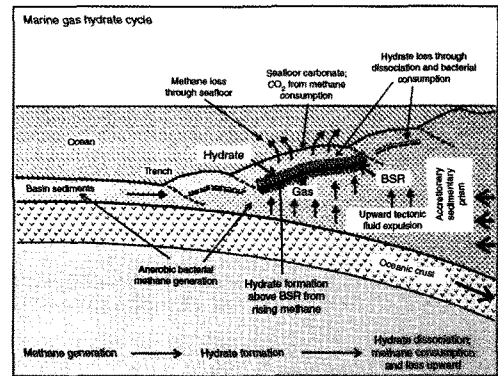
주요어 : 가스하이드레이트, 다성분 탄성과 탐사, S파 속도, 해저면 탄성과 기록계, 해저면 모방반사면(BSR)

1. 서 론

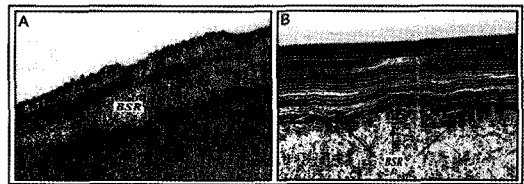
가스하이드레이트(gas-hydrate)는 천연가스가 저온 또는 고압하에서 물분자와 결합하여 형성된 얼음과 같은 고체물질로 낮은 온도 환경을 가진 영구동토층이나 고압·저온 환경의 심부 해저 퇴적층에 주로 분포한다(Sloan, 1998; Max *et al.*, 2006). 가스하이드레이트는 전 세계 약 10조 톤에 이르는 매장량과 환경 친화적인 장점으로 인하여 차세대 에너지원으로 각광을 받고 있다(KIGAM, 2005). 이러한 천연 가스하이드레이트는 탄성과 단면상에서 해저면 모방 반사면(BSR)의 존재 여부로 그 부존을 추측할 수 있다(Shipley *et al.*, 1979; Spence *et al.*, 1995; Büntz S. *et al.*, 2005). 가스하이드레이트 안정영역 하부 경계면 아래에 존재하는 자유 가스(free gas)층에서의 탄성과 속도와 밀도는 안정영역에서의 속도와 밀도보다 매우 낮기 때문에 두 층 사이의 경계면에서는 강한 P파 음향 임피던스의 차이가 발생한다. 또한 가스하이드레이트의 안정영역의 깊이는 해저면 이하 깊이에 따라 거의 일정하게 증가하는 지열구배의 영향을 받기 때문에 탄성과 단면도에서의 안정영역의 하부 경계면은 해저면과 평행하게 발달하며 음의 극성을 가진 반사층 형태로 나타나기 때문에 BSR이라고 하며 일반적으로 그 위에서의 P파 속도는 증가하다가 BSR을 경계로 아래의 자유 가스층의 속도는 급격히 감소하는 경향을 띤다(Shipley *et al.*, 1979; Holbrook *et al.*, 1996). 탄성과 단면에 나타나는 가스하이드레이트 부존 특성으로는 BSR 이외에도 안정영역에서의 진폭 감소(amplitude blanking), 안정영역 하부에서의 반사도 증가(enhanced reflection)등의 특성들이 있으나 무엇보다 해저 환경에서 정확한 속도 분포를 규명하는 것이 가스하이드레이트와 자유가스층의 존재를 밝히는데 중요한 역할을 한다(Tinivella *et al.*, 1998). Fig. 1(a)는 심해저 환경에서의 가스하이드레이트의 형성과정과 부존 양상을 보여주고 있는데(Hyndman and Davis, 1992), 가스하이드레이트가 부존한 층의 하부에 자유가스층이 형성되어 있고 그 두

층의 경계에서의 임피던스 차이가 탄성과 단면상에서 BSR을 형성하게 된다. Fig. 1(b)는 2005년 동해에서 취득한 가스하이드레이트 탐사자료로 탄성과 단면상에서 해저면과 평행하게 발달한 전형적인 BSR을 보여주고 있다.

가스하이드레이트 탐사를 위해 수행되는 통상적인 해수면 다중채널 탄성과 탐사는 공통 중간점간의 거리가 짧고 중합도가 높아 적절한 자료처리를 거친다면 고품질, 고해상도의 단면을 얻을 수가 있어 지금까지 전 세계적으로 가스하이드레이트 조사에 가장 많이 활용되고 있는 방법이다. 하지만 수중에서의 하이드로폰에는 대부분 P파만 기록되기 때문에 P파만으로는 규명할 수 없는 지역 즉, 가스 침니(chimney)나 BSR 하부 자유가스층의 탐사 시에는 신뢰할 만한 결과를



(a)



(b)

Fig. 1. (a) A general model for deep-sea gas hydrate formation (after Hyndman and Davis, 1992) and (b) example of BSR on seismic section (KIGAM, 2006). The BSR represent strong evidence of gas-hydrate existence.

얻지 못하는 경우가 많은데, 가스층을 전파해온 P파의 경우 심한 감쇠를 일으키거나 파선의 변형(distortion)이 발생하기 때문에 결과적으로 단면의 해상도와 정확도가 많이 떨어지게 되며(Ikelle and Amundsen, 2005), 여기서 구한 속도 정보 또한 신뢰할 수 없게 된다. 이러한 경우 S파를 이용하여 탐사를 하는데, S파의 경우 파의 진행시 공극내의 유체에 별로 영향을 받지 않기 때문에 P파로 볼 수 없는 지역의 단면이나 물성정보를 효과적으로 도출해 낼 수 있다.

해양의 경우 육상 탐사와는 달리 S파 음원을 발생시키기가 어렵고 해수층의 존재로 인해 S파의 기록 또한 어려웠다. 그러나 1970년대부터 해저면에 직접 다성분(multi-component) 수진기를 설치하여 탄성파를 기록하는 방법이 사용되기 시작하여 최근에는 OBS나 OBC(ocean-bottom cable) 등 첨단 해저면 기록 장치들이 개발되어 다양한 분야에서 해양 S파 탐사를 실시해오고 있다. 특히 가스하이드레이트의 부존량 평가에 있어서 해당 부존 지역의 S파 속도 정보는 암상(lithology)과 공극유체의 정보를 파악하는데 결정적인 역할을 한다(Bünz *et al.*, 2005). 만일 퇴적층 내에 가스하이드레이트가 존재한다면 이 층에서의 P파 속도와 S파 속도는 동시에 증가하게 되며, BSR 하부에 자유가스가 존재하는 경우 P파의 속도는 감소하지만 S파의 속도는 변화가 없거나 변화량이 P파보다 훨씬 적다(Kumar, 2005). 이는 S파는 유체를 진행하지 않기 때문에 공극내 가스층의 영향을 받지 않고 오로지 매질의 영향만 받기 때문이다. S파 분석을 통해 취득한 이러한 정보는 P파 단면에서 결정하기 어려운 부존 지역 또는 부존형태를 보다 높은 신뢰도를 가지고 규명할 수 있다. 이에 본 연구에서는 한국지질자원연구원이 울릉분지 가스하이드레이트 유망지역에서 취득한 다성분 OBS 자료를 이용하여 BSR 상부의 하이드레이트 영역과 하부 자유가스지역으로 추정되는 심도에서의 P파와 S파 속도 분포를 도출하였다. 궁극적으로 2차원 다중채널 탄성과 단면상에서 보이는 BSR 부근에서의 P파 속도 역전현상이 실제 매질에 의한 것인지 아니면 자유가스의 존재로 인한 것인지 규명하였다.

2. 다성분 탄성과 자료

2009년 5월에 울릉분지내 강한 BSR을 보이는 지역 중 한 지점(Fig. 2)에서 6대의 OBS를 사용하여 광각(wide angle) 해저면 탄성과 자료를 취득하였다. OBS에는 1성분의 하이드로폰, 1성분의 수직 지오폰 및 2성

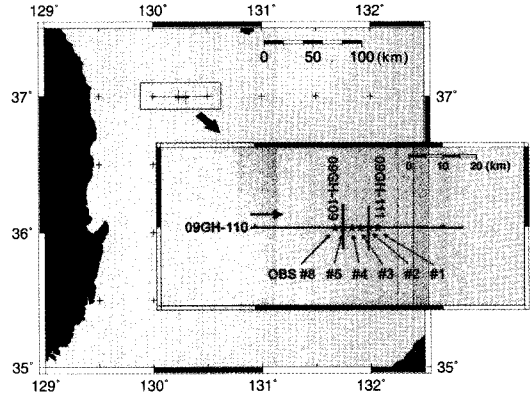


Fig. 2. Location map of coincident 48 channel seismic and OBS data acquisition. OBS locations and line names are shown in the yellow box.

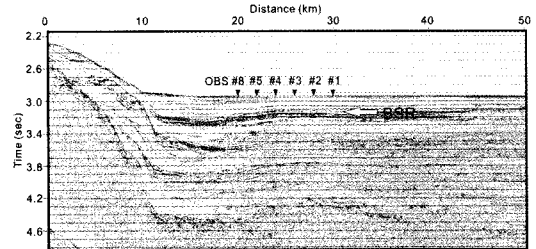


Fig. 3. Stacked time section from 48 channel seismic data, the white arrow indicates a strong BSR. OBS locations are marked by black triangles.

분의 수평지오폰도 장착되어 있어 해저면에서의 압력 및 3 방향의 매질의 변위 측정이 가능하다. 50 L-km의 주축선(09GH-110)상에 모두 6대의 OBS를 2 km 간격으로 설치하고 1,254 in²의 음원을 25 m마다 등간격 발파하였다. OBS내부의 A/D 변화기와 기록계(recorder)는 각 성분(2개의 수평성분, 1개의 수직 성분, 하이드로폰)의 자료를 각각 5 ms의 샘플간격으로 하드디스크에 기록하는 방식이고 자료는 7초 동안 기록하였다. OBS탐사와 동시에 48채널 2차원 반사법 탐사도 동시에 수행하여 탐사지역의 기본 층서구조 자료로 활용하였다(Fig. 3).

2차원 탐사의 경우, 탄성파가 서로 다른 음향임피던스를 지닌 두 매질의 경계면을 수직입사가 아닌 비스듬히 입사할 때 P파가 SV파로 혹은 SV파가 P파로 변환되는 현상을 모드전환(mode conversion)이라 한다. 이 경우 모드전환은 경계면에서 투과 혹은 반사되어 나올 때 발생하는데 입자의 운동방향이 기준평면에 한정되어 있는 P파 혹은 SV파에서만 발생한다. SH파는

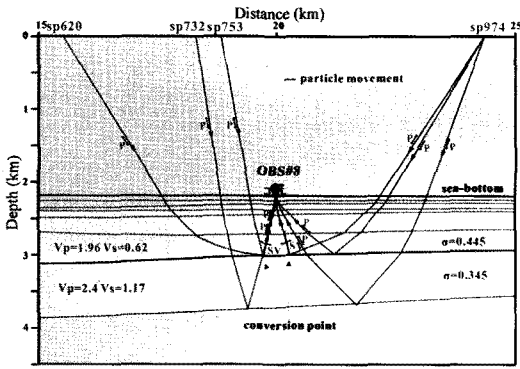


Fig. 4. Mode-converted ray diagram at OBS #8 derived from final model after this study.

입자의 운동이 기준평면을 벗어나기 때문에 모드 전환 되지 않는다. OBS에 기록된 S파는 대부분 에어건에서 발생한 P파가 해수층을 거쳐 매질을 진행하다가 매질의 경계면에서 모드전환되어 해저면의 수진기에 기록되는 SV파이다. Fig. 4는 본 연구를 통해 최종적으로 도출한 속도모델 상에서 OBS #8의 주시데이터를 이용하여 제7층과 8층 경계사이를 진행하는 P파와 모드 전환파의 파선을 도시한 것이다. OBS 왼편으로는 서로 다른 음원에서 발생한 파가 모드전환 후 같은 S파로 OBS에 도달하는 파선들을 도시한 것이며, 오른편에는 한 음원에서 발생하여 OBS에 도달하는 P파와 모드전환 S파를 동시에 도시한 그림이다. P파로 입사하여 S파로 모드전환되어 반사하는 파는 그 반사 각도가 입사각보다 훨씬 작다. 그림에서 원거리 즉, shot point 620(또는 shot point 974)에서 발생한 음원은

거의 OBS 근처에 와서 모드전환이 일어남을 알 수 있다. 즉, 5 km 이상의 오프셋에서 발생함 P파는 OBS 근처 수 백 m 이내에서 모드전환되어 기록되므로(그림에서 두 conversion point 사이 범위) P파보다 좁은 반사면을 형성한다. 그래서 본 연구와 같이 적은 수의 OBS를 사용하여 S파 탐사를 실시하는 경우에는 2-D 구조보다는 1-D 구조를 도출하는 편이 낫다. 모드 전환 후 반사되어 나오는 파 이외에도 다시 투과하는 파들도 있지만 본 연구의 관심 대상인 모드 전환된 S파는 해당 층의 경계면에서 모드전환되어 반사해 온 파만 고려한 것이다. 해당 층의 경계에서 모드 전환되어 투과한 후 다시 하부 층에서 반사되어 나온 S파는 그 에너지가 약하고 모드전환 후 반사되는 경우의 수가 너무 많기 때문에 고려하지 않았다. P파로 입사한 에너지는 모드전환을 거치면서 다양한 모드의 파로 나누어지면서 에너지 또한 나누어지게 된다. 서로 다른 속도와 밀도를 가진 두 매질에서의 모드전환 에너지의 분할 비율은 Zoeppritz's 식에 의해 구할 수 있는데 (Tatham and McCormack, 1991), Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 파선에서 발생한 입사 P파의 반사 및 투과 계수 그리고 모드전환파의 반사 및 투과 계수의 변화량과 그 에너지 비율을 Zoeppritz's 식을 이용하여 도시한 것이다. 여기서 Layer 7과 Layer 8의 밀도는 각각 2.0 g/cm³ 과 3.0 g/cm³로 하였다. 약 60° 이후의 입사각에서 S파의 에너지가 증가하고 그 양은 약 입사 P파의 20%정도로 나오는데 이는 상하부의 S파 속도의 비가 크지 않기 때문에 상대적으로 반사 S파 에너지가 작음을 말해준다. 물론 정확한 밀도 값이 주어진다면

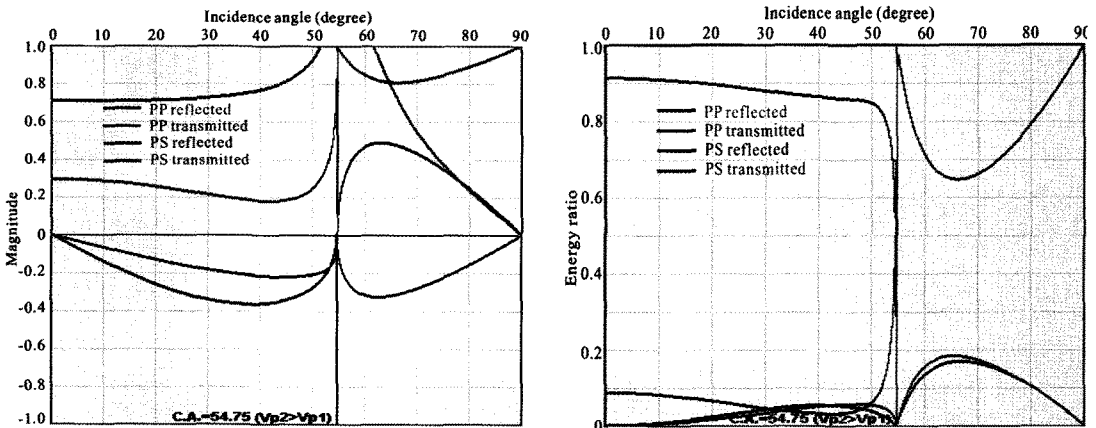


Fig. 5. (left) Reflection and transmission coefficient change and (right) amount of energy ratio of various waves in the interface between layer 7 and layer 8 of OBS #8 site (refer to Fig. 4).

그 양상은 달라지겠지만 임계각은 밀도의 영향을 받지 않기 때문에 S파의 주시 발체는 입사각이 약 60°~80° 범위인 오프셋에서 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

3. P파 속도 및 층서모델

S파 속도를 구하기 위해서는 우선 정확한 P파 모델이 만들어져야한다. 대부분 P파 속도 기반에서 포아송비(Poisson's ratio, σ)를 변화시켜가면서 P파 이벤트와 S파 이벤트를 정렬하는 방식으로 S파 속도를 구하기 때문이다. 본 연구에서는 OBS 하이드로폰으로 기록된 광각 P파를 이용하여 탄성과 주시역산법(Zelt C. A., 1992; Kim and Byun, 2009)을 적용하여 P파 속도모델을 구하였다. 우선 주시역산법을 사용하는데 있어서 기본 층서 정보 및 속도 구조 정보를 알기 위해

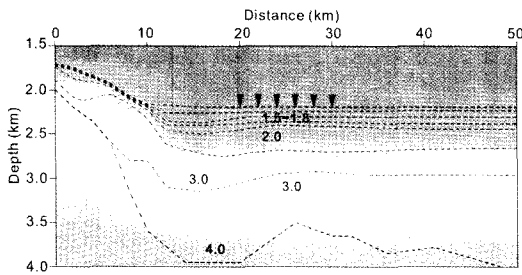


Fig. 6. Initial depth and velocity model derived from 48 channel seismic reflection data. Black triangles are OBS positions.

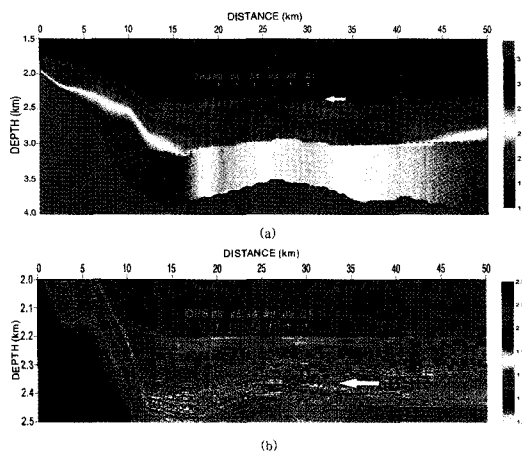


Fig. 7. (a) Final structural and velocity model after modeling and travelttime inversion and (b) velocity structure of BSR depth to encompass the BSR at the depth of 2.0 ~ 2.5 km. Low velocity zone are shown around 25 km offset. Yellow triangles indicate the positions of OBSs.

실시한 48채널 2차원 반사법 자료에 대해 기본 전산처리를 수행하여 2차원 단면을 제작하고, 이를 초기 심도 모델로 사용하였고, 초기 속도 모델의 경우 실제 속도 구조와 근사한 값을 사용할 경우 수렴이 빠르기 때문에 2차원 반사법 자료에 semblance 속도 분석을 실시하고, 여기서 얻은 평균제곱근(rms) 속도를 구간속도로 전환하여 이를 층서모델에 적용하였다(Fig. 6). 모델은 모두 9개의 층으로 구성하였고, 최상층(layer 1)은 해수층으로서 해당지역의 평균 물속도(1.47 km/s)를 적용하고 해저면의 경우 그 심도가 정확한 값이기 때문에 심도 노드를 고정시켰다. 해저면과 BSR 상부층 사이에 3개의 층을 나누고, 제 5층과 제 6층은 각각 BSR과 자유가스층의 하부경계를 나타내는 가장 중요한 반사층으로 모델의 심도와 속도 값 모두가 역산 시 새로운 값으로 갱신될 수 있도록 모델 변수로 적용하였다. 이렇게 구한 최종 모델은 Fig. 7과 같다. (a)는 전체 모델 심도인 4 km까지의 속도 구조이고 (b)는 BSR 부근의 속도분포를 확대한 것이다. BSR이 뚜렷한 지역이지만 26 km 오프셋을 중심으로 좌측의 경우 BSR 상부는 고속도, 하부는 저속의 뚜렷한 속도 역전현상이 나타나지만 그 우측은 오히려 BSR 상부가 저속도, 하부가 고속의 경향을 보이나 평균적으로 BSR 상하부에서 P파의 속도가 1.84 km/s에서 1.73 km/s로 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 이렇게 구한 최종 P파 속도 및 층서 모델의 검증을 위해 각 OBS에서의 파선과 주시를 나타낸 그림이다. 그림에서 파선은 매 30 개마다 하나씩 그린 것이며 주시는 속도를 오프셋에 따라 2 km/s 감쇠시킨 감쇠주시 단면에 나타내었다. 주시단면상에서의 검

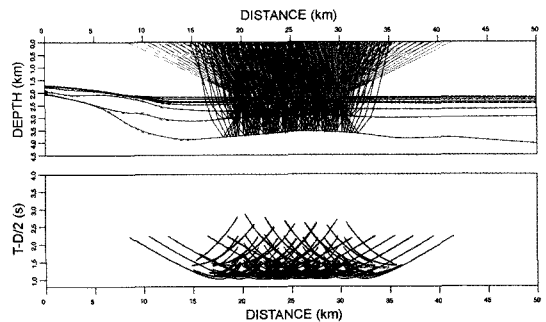


Fig. 8. P-wave velocity and structural model and its P-wave ray diagrams for each layer after inversion. Every 30th rays are displayed. Colored thick line in time domain means picked real data with 10 ms' uncertainties and solid black lines are predicted time curves. Modeling and inversion were carried out in 'layer stripping' fashion.

은색 선은 예측주시를 나타내며 유색(colored) 주시곡선은 실제 발체한 주시로 불확실정도를 나타내는 10 ms의 두께로 표시하였다. 각 OBS가 위치한 지점에서의 1차원 P파 속도 구조는 뒤에 나오는 S파 속도 분포와 같이 나타냈다(Fig. 13).

4. 수평성분 극성분석 및 트레이스회전

Fig. 5의 오른쪽 그림에서 볼 수 있듯이 임계각을 넘어선 입사각에서도 최대 S파 반사 에너지는 입사 P파의 20%정도 밖에 되지 않기 때문에 비록 수평성분 지오폰으로 기록된 데이터일지라도 이중에 반사 S파 에너지는 그리 크지 않다. 이러한 수평성분의 기록으로부터 S파 에너지를 최대한으로 추출하기 위해 극성분석과 트레이스 회전(trace rotation)을 실시하였다. 해저면에 자유낙하 한 OBS는 수진기의 방향을 임의로 조절할 수 없기 때문에, 자료 회수 후에 수평성분에 기록된 자료를 가지고 hodogram 분석을 실시하여 OBS 수평 지오폰의 배열방향을 계산하고 그 각도만큼 트레이스를 회전시켜줌으로써(Gaiser J. E., 1999) 음원-수진기 방향과 나란한 inline 성분($H1(\theta)$)과 cross-line 성분($H2(\theta)$)으로 분리하였다(Fig. 9).

Fig. 10은 OBS #4에 기록된 수직성분 지오폰 자료와 수평 2 성분 지오폰 자료를 보여주고 있다. 수직 성분 자료(Fig. 10 (a))는 대부분 매질을 진행한 후 수직으로 들어온 P파를 기록하기 때문에 다중반사파와 굴절파가 기록되어 있다. 하지만 수평성분 자료(Fig.

10 (b~c))에는 S파 성분이 많기 때문에 해수층으로 인한 다중반사파는 거의 기록이 되지 않고 굴절파도 상당히 미미하다. 또한 수평자료를 보면 OBS가 위치한 정점부근에서 위상이 역전이 되는데 이는 음원이 OBS를 지나면서 P파가 해저면을 진동시키는 수평 방향을 바꾸기 때문인데 그렇다고 이것이 모두 S파는 아니다. 여기서 수평 2 성분을 Fig. 9와 같은 방법으로 음원-수진기 방향으로 모든 트레이스를 일괄적으로 회전시키면 Fig. 10(d~e)와 같은 inline과 crossline 성분으로 분리된다. inline 성분에는 S파의 에너지가 많이 집중되어 있지만 OBS가 위치한 정점 거리에서 위상이 역전되는데 효율적인 S파 도출을 위해서는 이를 다시 음원이 위치한 방향으로 모든 트레이스를 회전시켜 주어야 한다. Fig. 10(f~g)와 같이 모든 트레이스를 음원 방향으로 재배열시켜주면 S파 성분의 에너지가 가장 많이 집중된 radial 성분과 이를 제외한 나머지 에너지가 모인 transverse 성분으로 분리되며, 최종 S파 속도분석에는 이 radial 성분을 사용하게 된다. Radial 성분은 모든 OBS의 수평 지오폰 축이 음원을 향하기 때문에 OBS가 위치한 정점 거리에서 위상이 역전되지 않는다. 잡음 수준을 낮추고 뚜렷한 S파 이벤트를 선별하기 위하여 모든 회전트레이스에 예측 디콘볼루션(0.1초의 예측길이, 0.25초의 연산자 길이) 필터를 적용하였다. Radial 성분을 살펴보면 오프셋이 작을수록(OBS가 위치한 부근으로 갈수록) S파의 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 이는 입사각이 어느 정도가 되지 않으면 모드전환파가 거의 발생하지 않거나

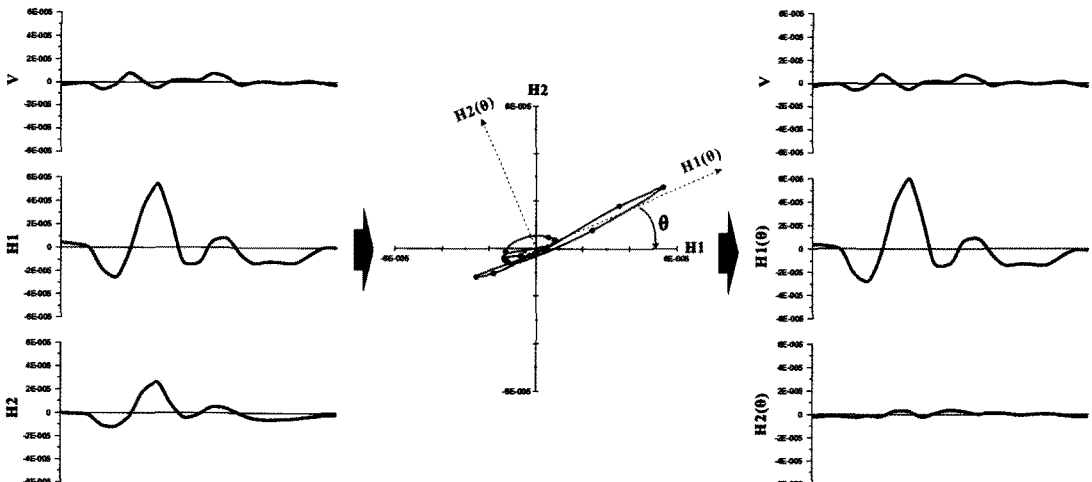


Fig. 9. H1 and H2 of OBS #4 are rotated by estimated angle(θ). The energy of $H1(\theta)$ maximized and that of $H2(\theta)$ minimized after rotation.

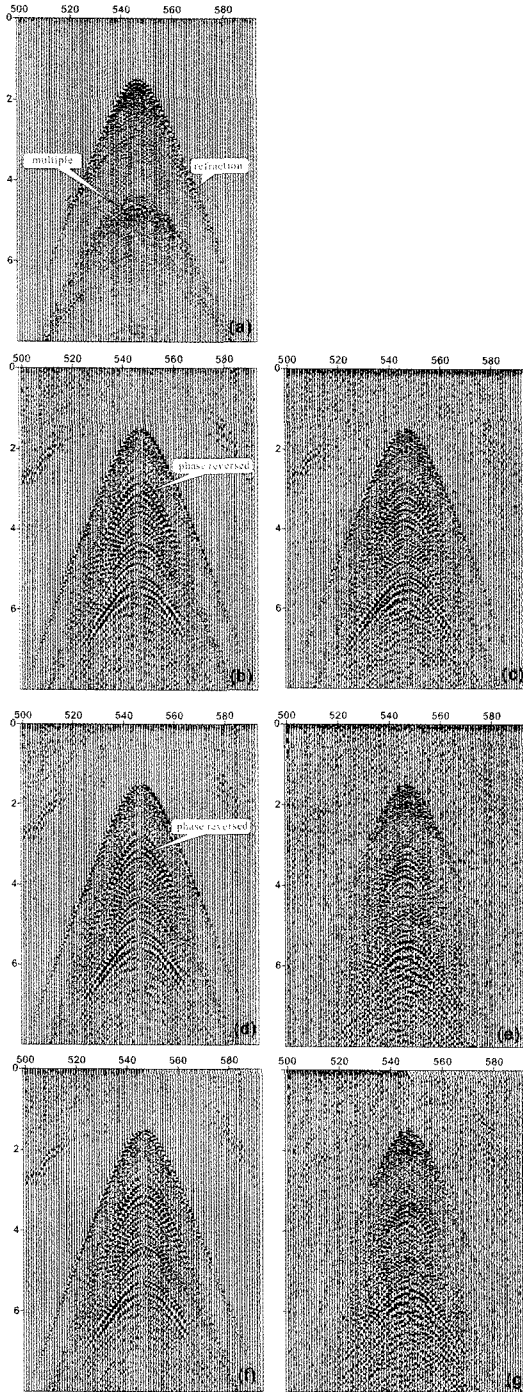


Fig. 10. (a) Vertical, (b) H1 and (c) H2 components of component of OBS #4. Every 10th traces are displayed. (d) inline and (e) crossline section of OBS #4 after trace rotation with single constant rotation angle. (f) is finally source oriented radial section and (g) transverse section of OBS #4. The radial section is used for S-wave velocity analysis. Every 10th traces are displayed.

아주 미미한 양임을 알 수 있다.

5. 모드전환 S파 주시 발체 및 포아송비 모델링

모드전환 S파의 속도를 도출하기 위해 S파 주시를 사용한 포아송 비 정 모델링(forward modeling)을 실시하였다. 이는 P파 주시역산 결과로 도출한 모델에서 임의의 초기 포아송 비를 부여하고 해당 OBS 위치에서 S파 파선추적을 실시하여 주시를 계산한 후 실제 Radial 단면상에서 발체한 S파 주시와 오차범위 내에

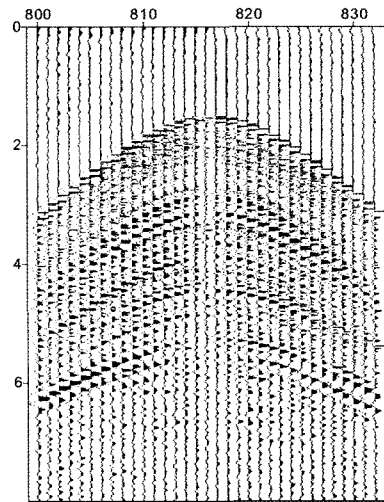


Fig. 11. Converted S-wave traveltime picking from the radial component of OBS #4 (red dotted line) after constant Poisson's ratio modeling and hodogram test. Every 10th trace was displayed.

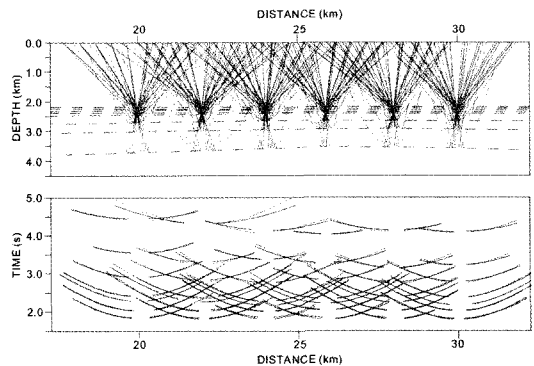


Fig. 12. (Upper) Converted S-wave ray diagram for all OBSs on the final model and (lower) its traveltime after modeling. Colored thick lines represent the picked data with uncertainties(0.01 sec) and solid line represent the calculated traveltime of S-wave.

서 일치할 때까지 각 층의 포아송 비를 변화시켜가면서 모델링을 반복하는 방법이다(Zelt and Smith, 1992). P파 단면상에서 선정된 주요 이벤트와 일치하는 S파 이벤트를 선별하기 위해 총 8개 층에 대해 포아송 비를 일정하게 고정 시킨 뒤 모델링을 실시하여 그 주시를 얻어 실제 radial 단면에서 P파 이벤트와 대응한다고 판단되는 S파 이벤트 군을 1차 선별하였고, 이들 이벤트들 중 수직성분과의 hodogram 분석을 실시하여 수직방향으로 입자의 운동이 최소화 되는 이벤트(SV파)를 최종적으로 선택하여 모델링에 사용하였다(Fig. 11). 최종 모델상에서 실시한 각 OBS에서의 S파 파선 추적과 그 주시 곡선 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 해수면에 위치한 에어건에서 발생한 P파가 해수층 및 매질을 진행하다가 각 층의 경계면에서 S파로 모드전환되어 해저면에 위치한 OBS에 기록되는 파선을 도시한 것이며, 파선은 매 30 개마다 하나씩 나타낸 것이다. 주시단면상에서의 검은색 선은 계산주시를 나타내며 유색(colored) 주시곡선은 실제 발췌한 주시로 불확실정도를 나타내는 10 ms의 두께로 표시하였다. 각 층에 대한 모델링 결과는 Table 1에 나타내었다.

최종적으로 도출한 포아송 비는 탄성상수 계산식에 의해 Vs 단면으로 도출 할 수 있다. 이렇게 구한 최종 Vp, Vs 및 포아송 비 단면은 Fig. 13에 나타내었다. 결과를 보면, BSR 상부에서의 평균 S파 속도는 0.52 km/s로 나오고 있으며 BSR 하부에서의 평균 속

도는 0.77 km/s이다. P파의 경우 BSR 상하부 속도가 각각 1.84 km/s, 1.73 km/s로 나로 나오는 것을 볼 때, Vp/Vs 값이 BSR 하부에서 3.83에서 2.28로 급격히 감소함을 확인할 수 있다. 이는 가스하이드레이트 하부에 자유가스가 존재하는 경우의 Vp/Vs 거동과 거의 일치한다.

6. 결과 및 고찰

울릉분지 내에서 탄성과 단면상에 강한 BSR이 존재하는 가스하이드레이트 유망지역 중 한 지점에 대하여 다성분 OBS를 이용하여 해저면 탄성과 탐사를 실시하고 이를 통해 취득한 하이드로폰 자료와 수평 2성분 자료를 분석하여 P파 및 모드전환 S파의 속도분포를 도출하였다. P파의 경우 하이드로폰 성분에서 기록된 OBS 음원모음 상에서 주요 반사이벤트 및 BSR을 선별하고 이에 대한 주시를 발췌하여 탄성과 주시역산을 통해 속도구조를 구하였다. 그리고 수평 2성분 지오폰에 기록된 자료에 대해 극성분석을 실시한 뒤 도출한 최종 radial 단면상에서 주요 S파 이벤트의 주시를 발췌하여 앞서 구한 P파 속도 구조 및 심도 모델상에서 포아송 비 정모델링을 수행하여 OBS가 위치한 지점에서의 최종 S파 속도 분포를 도출하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 이벤트의 길이가 상대적으로 긴 광각 해저면 탄

Table 1. Modeling results (no. pts = no. of points used, $Trms$ = RMS travelt ime residual, χ^2 = normalized chi-square)

phase	OBS #8			OBS #5			OBS #4		
	no. pts	$Trms$	χ^2	no. pts	$Trms$	χ^2	no. pts	$Trms$	χ^2
2	120	0.013	1.822	144	0.018	3.356	107	0.034	11.381
3	163	0.015	2.294	222	0.026	6.635	195	0.011	1.182
4	159	0.012	1.505	202	0.018	3.244	185	0.012	1.545
5	170	0.019	3.464	170	0.017	2.828	169	0.030	9.127
6	141	0.022	4.872	158	0.024	5.808	190	0.033	11.029
7	104	0.010	1.089	130	0.032	10.193	101	0.020	4.178
8	138	0.028	7.740	188	0.111	122.77	131	0.040	16.508
total	995	0.018	3.286	1214	0.048	23.298	1078	0.027	7.337
phase	OBS #3			OBS #2			OBS #1		
	no. pts	$Trms$	χ^2	no. pts	$Trms$	χ^2	no. pts	$Trms$	χ^2
2	144	0.031	9.751	133	0.015	2.358	172	0.023	5.287
3	173	0.008	0.598	176	0.009	0.822	141	0.007	0.496
4	188	0.014	1.969	150	0.013	1.764	161	0.016	2.430
5	151	0.011	1.171	170	0.024	5.623	153	0.016	2.604
6	125	0.016	2.677	135	0.024	5.965	151	0.024	5.671
7	145	0.039	15.370	129	0.037	13.861	98	0.031	9.865
8	75	0.014	2.022	122	0.021	4.656	105	0.031	9.871
total	1001	0.022	4.736	1015	0.022	4.739	981	0.022	4.686

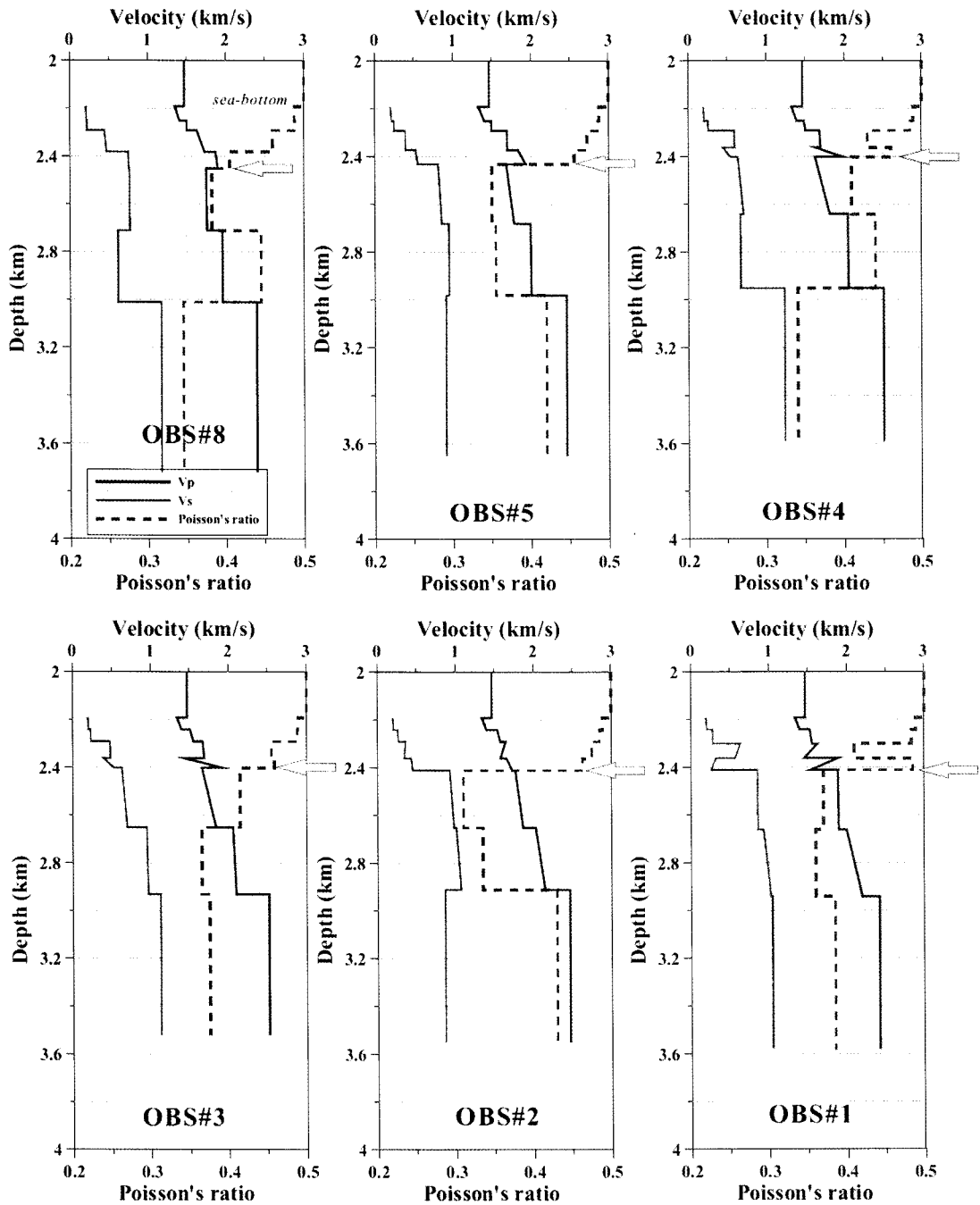


Fig. 13. Final 1-D Vp and Vs profiles of all OBS locations. Poisson's ratio profile is also overlaid in green. Yellow arrows indicate estimated BSR depth.

성파 자료를 통해 구한 P파 속도는 전반적으로 가스하이드레이트 부존 심도에서는 증가하다가 BSR 하부에서 그 속도가 감소하는 경향(평균 1.84→1.73 km/s)을 보인다.

2) S파 속도의 경우 BSR 상부 즉, 가스하이드레이트 부존지역에서부터 BSR 하부까지 계속 증가하는 경향(평균 0.52→0.77 km/s)을 보인다.

3) 위의 두 결과를 종합해볼 때, BSR 하부에서의 P

파 속도 감소 원인은 유체 즉 가스층의 영향을 받지 않는 S파의 진행 특성상 S파의 속도는 감소하지 않았으므로 자유가스층의 영향에 기인한다고 볼 수 있다. 이는 BSR 하부에서 포아송 비(평균 0.45→0.37)나 V_p/V_s 비(평균 3.83→2.28)가 감소하는 특성(Bünz *et al.*, 2005)과 일치한다.

최근 해외에서 수행되고 있는 가스하이드레이트와 관련한 탄성파 탐사에서 OBS와 같은 장비를 활용하여 해저면 이하의 S파 정보를 연구하는 사례가 늘고 있고 이들 대부분 충분한 수의 장비를 사용하여 높은 커버리지(coverage) 또는 높은 차원(2차원 또는 3차원)의 데이터를 취득한다. 이렇게 취득한 S파 자료는 매질의 물성을 연속적이고도 정확하게 도출할 수 있는데 특히 가스하이드레이트 부존 지역에 대한 포화도나 매장량 계산에 결정적인 변수 값을 제공할 수 있다. 향후 국내에서도 충분한 수의 OBS 노드를 이용하여 해저면 다 성분 자료를 취득하여 분석한다면 울릉분지 가스하이드레이트의 분포를 도출하는데 많은 도움이 될 것이다.

사 사

본 연구는 가스하이드레이트 개발 사업단의 2011년 '가스하이드레이트 지구물리탐사 연구' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Bünz, S., Mienert, J., Vanneste, M. and Andreassen, K. (2005) Gas hydrate at the Storegga Slide: Constraints from an analysis of multicomponent, wide-angle seismic data, *Geophysics*, v.70, B19-B34.
- Gaiser, J.E. (1999) Application for vector corrdinage systems of 3-D converted-wave data, *The Leading Edge*, Nov. 1999, p.1290-1300.
- Holbrook, W.S., Hoskins, H., Wood, W.T., Stephen, R.A., Lizarralde, D. and Party, L.S. (1996) Methane hydrate and free gas on Blake Ridge from vertical seismic profiling, *Science*, v.273, p.1840-1843.
- Hyndman, R.D. and Davis, E.E. (1992) A mechanism for the formation of methane hydrate and seafloor bottom-simulating reflectors by vertical fluid expulsion, *J. Geophys. Res.*, v.97, p.7025-7041.
- Ikelle, L.T. and Amundsen, L. (2005) Introduction to Petroleum Seismology, SEG, p.273-285.
- KIGAM (2005) Studies on Gas Hydrates Development Technology, 2005 Annual Report.
- KIGAM (2006) Studies on Geophysical Exploration of Gas Hydrate, 2006 Annual Reprot.
- Kim, B.Y. and Byun, J.M. (2009) P-wave Velocity Analysis Around the BSR Using Wide-angle Ocean-bottom Seismic Data, *Geophysics and Geophysical Exploration*, v.12, p.173-182.
- Kumar, D. (2005) Analysis of Multicomponent Seismic Data from the Hydrate Ridge, Offshore Oregon, PhD thesis, The University of Texas at Austin.
- Max, M.D., Johnson, A.H. and Dillon, W.P. (2006) Economic Geology of Natural Gas Hydrate, Springer, p.45-46.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Bufer, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L. (1979) Seismic evidence for widespread possible gas hydrate horizon continental slopes and rises, *AAPG Bull.*, v.63, p.2204-2231.
- Sloan, E.D. JR. (1998) Physical/chemical properties of gas hydrates and application to world margin stability and climatic change, In: Henriet J. P. and Mienert J. (eds) Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change, Geological Society, London, Special Publication, v.137, p.31.
- Spence, G.D., Minshull, T.A. and Fink, C. (1995) Seismic studies of methane gas hydrate, offshore Vancouver Island, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, v.146, p.163-172.
- Tatham, R.H. and McCormack, M.D. (1991) Multicomponent Seismology in Petroleum Exploration, SEG.
- Tinivella, U., Lodolo, E., Camerlenghi, A. and Boehm, G. (1998) Seismic tomography study of a bottom simulating reflector off the South Shetland Islands(Antarctica), In: Henriet, J.P. and Mienert, J. (eds) Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change, Geological Society, London, Special Publication, v.137, p.151.
- Zelt, C.A. and Smith, R.B. (1992) Seismic traveltime inversion of 2-D crustal velocity structure, *Geophys. J. Int.*, v.108, p.16-34.

2011년 5월 2일 원고접수, 2011년 6월 21일 게재승인