

동해 울릉분지 가스하이드레이트 침니의 탄성과 특성

강동호^{1,*} · 천종화¹ · 유동근¹ · 김지수² · 구남형¹ · 김원식¹ · 이보연¹ · 이호영¹

¹한국지질자원연구원 석유해저연구본부

²충북대학교 지구환경과학과

요 약

동해 울릉분지에서는 폭이 200-1,000 m의 탄성과 침니(seismic chimney) 구조가 발달하며, 이곳에서 가스 하이드레이트가 집중적으로 충전된 것이 확인되었다. 일부 탄성과 침니 구조는 내부 반사면의 풀업(pull-up) 구조와 수직적인 음향공백대(vertical acoustic blank zone)의 특징을 보여준다. 이 연구에서는 탄성과 자료의 진폭변화를 강조한 색상처리를 통하여, 해저면 부근에서의 천부 가스하이드레이트와 천부가스의 존재를 보다 확실하게 나타낼 수 있었다. 탄성과 침니 구조에서 해저면 부근에서 발달한 강한 양의 음향이상대는 해저면 부근의 천부 가스하이드레이트 부존을 지시하며, 그 하부에 나타나는 강한 음의 음향이상대는 천부가스의 부존을 지시하는 것으로 해석된다. 탄성과 침니에서는 해저면 부근에서 가스하이드레이트 안정영역까지 고체상태의 가스하이드레이트가 충전되어 있지만, 일부에서는 기체 상태의 가스가 존재함이 진폭이상 분석에 의해서 유추되었다.

주요어: 울릉분지, 탄성과 침니, 음향이상대, 가스, 하이드레이트

Dong-Hyo Kang, Jong-Hwa Chun, Dong-Geun Yoo, Ji-Soo Kim, Nam-Hyung Koo, Won-Sik Kim, Bo-Yeon Yi and Ho-Young Lee, 2013, Seismic characteristics of the gas hydrate chimney in the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 605-615

ABSTRACT: Seismic chimneys ranging in width from 200 m to 1,000 m are observed in the seismic sections obtained in the Ulleung Basin, East Sea. Concentrations of gas hydrates were discovered within the chimneys. The seismic facies of the some chimneys show the pull-up structure and acoustic blanking. The existence of near-seafloor gas hydrate and gas within the chimneys is certainly shown by using the seismic section displayed in multiple gradational colors which could highlight amplitude changes. It can be interpreted that strong positive amplitude anomalies recognized near the seafloor indicate the existence of near-seafloor gas hydrate and strong negative amplitude anomalies indicate the presence of gas trapped below the near-seafloor gas hydrate. In the seismic chimneys, the solid state gas hydrate exists from the seafloor to the base of gas hydrate stability zone. However, by the analysis of amplitude anomaly, it can be inferred that the surficial sediments could be partially charged with gas.

Key words: Ulleung Basin, Seismic chimney, Acoustic anomaly, Gas, Hydrate

(Dong-Hyo Kang, Jong-Hwa Chun, Dong-Geun Yoo, Nam-Hyung Koo, Won-Sik Kim, Bo-Yeon Yi and Ho-Young Lee, Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea; Ji-Soo Kim, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

1. 서 론

가스하이드레이트는 영구동토 지역이나, 수심 300 m 이상 되는 해양지역에서의 저온, 고압의 조건

에서 천연가스와 물이 결합하여 형성된 물질이다 (Sloan and Koh, 2008). 우리나라에서는 미래 에너지원(Milkov, 2004) 및 해저사면 안정성(Paull *et al.*, 1996)에 미치는 영향 등에 대한 관심으로 많은 연구가

* Corresponding author: +82-42-868-3339, E-mail: dhkang@kigam.re.kr

진행되었으며(Kang *et al.*, 2009; KIGAM, 2009; Ryu *et al.*, 2009; Kim, 2012) 울릉분지에서의 심해시추작업(UBGH1&2: Ulleung Basin Gas Hydrate Expedition 1&2)을 통해 가스하이드레이트 실물도 확인되었다(Park *et al.*, 2008; Ryu *et al.*, 2010). 가스하이드레이트는 해저모방반사면 직상부층, 침니, 단층대 내부, 진흙화산 주변부, 투수율이 좋은 사질층에서 발견된다(Hyndman, 2006; Milkov and Sassen, 2002). 울릉분지에서는 심해시추 지역 중 7곳의 침니(chimney)에서 모두 가스하이드레이트 부존이 확인되어(KIGAM, 2008; Ryu *et al.*, 2010), 침니가 가스하이드레이트가 집중적으로 발달된 곳의 하나임을 확인하였다.

침니의 탄성과 단면에서 일반적으로 관찰되는 탄성파적 특성은 음향공백대와 내부 반사면이 위로 볼록한 풀업 구조이다(Yoo *et al.*, 2008; Matsumoto and Hiromatsu, 2011). 또한 심부에서 해저면까지 연결되어 나타나는 침니에서 획득한 지화학 및 로깅 자료 분석과 모델 결과는 탄성과 단면에서 모자 혹은 그릇 형태를 보이는 강한 양의 진폭이상대가 해저면 부근에서 생성된 가스하이드레이트 캡(cap)에 해당됨을 보여준다(Riedel *et al.*, 2006b; Chun *et al.*, 2011). 우리나라에서도 다중빔 후방산란 강도(backscatter intensity) 이상대를 보여주는 곳에서 피스톤 코어로 해저면 하부 50 cm 깊이에서 가스하이드레이트가 채취되었으며 이러한 이상대는 침니와 연결되어 있음을 보여주었다(Bahk *et al.*, 2009).

해저면까지 연장되어 나타나는 침니 해저면 부근 퇴적물에 가스하이드레이트나 가스가 존재하면 물리적 특성이 달라져서 반사계수의 차이가 발생하여 반사신호의 극성 및 진폭에 변화가 생긴다. 해저면 부근 가스하이드레이트나 가스로 인해 침니에서는 음향이상이 나타날 수 있지만 탄성과 단면에서 흔히 사용하는 색상처리로는 뚜렷이 보이지 않는다.

이 연구에서는 침니에서 가스하이드레이트나 가스와 같은 이상체 유무를 파악하기 위해 특별한 전산처리 없이 탄성과 단면에 진폭변화를 강조한 색상처리를 적용하였고, 탄성과 단면에서 어떻게 파악되는지를 제시하고자 한다. 해저면 가스하이드레이트와 가스가 탄성과 단면에서 쉽게 인지된다면 침니에서 가스하이드레이트 부존 유무는 보다 쉽게 해석이 가능할 것이다.

2. 연구지역

연구지역인 울릉분지(Ulleung Basin)는 동아시아 대륙과 일본 열도(Japan Arc)에 의하여 둘러싸인 반폐쇄성 주변해(semi-closed marginal sea)인 동해의 남서부에 위치한 울릉분지로 심해저 평원이다(그림 1). 평균수심 약 1,350 m, 최대수심이 약 3,700 m을 보이는 동해에는 지형적 고지대(topographic high)에 의하여 일본분지(Japan Basin), 야마토분지(Yamato Basin), 울릉분지 등 세 개의 해양퇴적분지가 발달해 있다(Chough, 1983). 울릉분지는 북쪽으로는 한국대지(Korea Plateau), 동쪽으로는 오키뱅크(Oki Bank), 서쪽으로는 한반도와 가파른 경사로, 남쪽으로는 일본 열도(Japan Arc)와 완만한 경사로 접하고 있으며, 울릉도와 독도 사이에 발달된 "Korea Gap (Lee *et al.*, 2007)"을 통해 일본분지와 연결된다.

연구지역인 울릉분지 북쪽과 서쪽 경계부는 경사가 급하여 대규모의 사면침식, 사면붕락(slump), 사면사태(slide), 그리고 암설류 퇴적체(debris flow deposit)가 특징적으로 발달하고 있으며 남쪽과 동쪽 경계부는 다소 경사가 완만하지만 역시 다양한 사면침식과 사면붕락, 사면사태, 소규모 협곡이 발달하고 있다. 탄성과 탐사자료에 의하면 울릉분지에 분포된 제3기(Tertiary) 퇴적층의 두께는 분지의 중앙부에서는 약 5 km 정도이나 남쪽으로 가면서 두꺼워져 최대 10 km에 달한다(Chough, 1983).

울릉분지의 천부퇴적층은 중력류에 의해 대륙사면에는 암설류 퇴적물이 넓게 분포하고 분지평원에는 하부의 암설류 퇴적물 위에 저탁류 및 반원양성 퇴적물이 우세하게 분포한다(Chough *et al.*, 1997). 암설류 퇴적물은 암설류 로브(debris lobe) 형태로 중첩되어있으며 지역에 따라 저탁류 퇴적물 또는 반원양성 퇴적물이 암설류 로브 사이에 분포한다. 연구 주 대상지역인 3차원 탐사지역은 울릉분지의 중앙부에 위치하며 천부지층은 저탁류 퇴적물 또는 반원양성 퇴적물로, 그 아래에는 주로 암설류 퇴적층으로 구성되어있다.

3. 연구자료 및 방법

연구에 이용된 자료는 울릉분지에서 수행된 2차원 탄성과 탐사자료, 분지 중앙부에서 수행된 300 km²

(12 km x 25 km)의 3차원 탄성과 탐사자료다.

2차원 탄성과 탐사자료는 길이 3 km, 그룹간격 12.5 m, 채널수 240의 수신기(streamer)와 1,035 in³ 용량의 에어건(airgun) 음원을 사용하여 획득하였다. 자료는 샘플링(sampling) 간격 1 ms로 기록되었으며, 발파간격은 25 m로 하였다. 3차원 탄성파탐사의 자료취득 변수는 2차원 탐사와 동일하다.

취득된 자료처리를 위해 미국 랜드마크 그래픽(Landmark Graphics)사의 프로맥스(ProMax) 소프트웨어가 사용되었다. 자료처리 과정은 기본전산 처리 과정인 트레이스 편집(trace editing), 주파수 필터링(frequency filtering), 이득회수(gain recovery), 속도분석(velocity analysis), 중합(stack)으로 이루어졌다. 이 중 이득회수는 자동이득조절을 수행하지 않고 구형 발산에 의한 진폭 감쇠 및 흡수에 의한 감쇠 효과만 보상하여 실 진폭(true amplitude)에 가까운 탄성파 단면을 제작하였다. 전산처리된 2차원, 3차원 자료는 탄성파탐사자료 전문해석프로그램인 랜드마크 그래픽사의 지오그래픽스(GeoGraphix) 프로그

램을 사용하여 해석되었다.

반사계수는 입사파의 진폭과 반사파의 진폭과의 비로 상층의 밀도와 속도를 ρ_1, V_1 이라 하고, 하층의 밀도와 속도를 ρ_2, V_2 라 할 때 $(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)$ 으로 나눈 값으로 표현된다. 단파의 하이드레이트의 P파 속도는 3.2~3.6 km/s이고 하이드레이트를 함유한 퇴적층의 속도 또한 1.7~3.5 km/s로 가스하이드레이트를 함유하지 않은 천부퇴적층의 속도보다 높다. 퇴적층이 가스를 함유하고 있을 때는 P파의 속도가 1.4~1.6 km/s로 가스를 함유하고 있지 않을 때보다 P파의 속도는 낮다(Goldberg *et al.*, 2000). 이러한 가스하이드레이트와 가스의 물리적 특성에 의해 해저면 부근의 퇴적층에 가스하이드레이트와 가스가 존재할 때는 함유하지 않은 퇴적층과 반사계수의 차이를 보이게 된다. 즉 해저면 부근에 가스하이드레이트가 존재할 때는 그렇지 않을 때보다 더 큰 양의 반사계수를 보여주며 가스를 함유한 퇴적층에서는 음의 반사계수를 보여주게 된다.

반사계수의 차이로 인한 진폭변화를 탄성파 단면

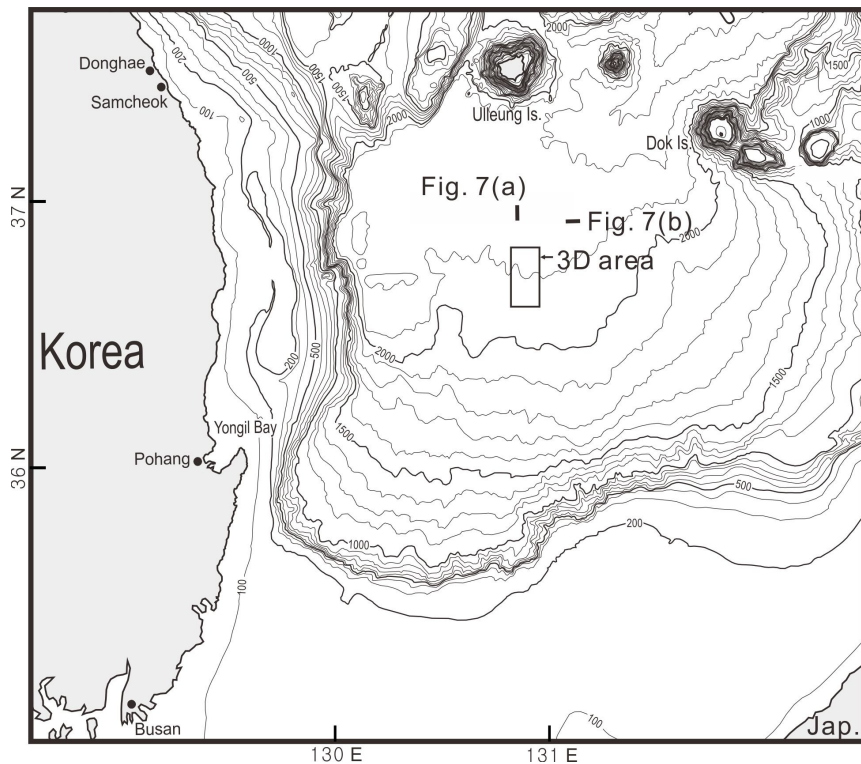


Fig. 1. Bathymetry of the Ulleung Basin and locations of seismic profiles shown in Fig. 7. Inset is the 3D seismic survey area.

에 잘 보여주기 위해 탄성과 단면에서 신호의 극성과 진폭을 표현하는 팔레트(palette)를 목적에 맞게 잘 설계하여 적용하면 특별한 전산처리 없이도 침니 상부 해저면에 존재하는 강한 양의 반사층으로 나타나는 가스하이드레이트와 그 아래 나타나는 음의 반사 특성을 나타내는 자유가스층을 용이하게 식별하게 할 수 있다. 보통 탄성과 단면은 검정색(혹은 파란색), 흰색, 빨강색과 이들의 계조색으로 표현이 되어 양이나 음의 진폭 변화를 뚜렷이 관찰할 수 없으나(그림 2(a)) 탄성과 단면을 표현하는 색을 다채롭게 변화시키면 같은 양의 진폭도 이상체가 존재할 때 진폭차이를 확인할 수 있다(그림 2(b)). 이러한 과정은 특별한 전산처리가 필요치 않고 색상변화로만 가능하기 때문에 누구나 비교적 쉽게 진폭변화를 인지할 수 있다. 그러나 이 방법만으로는 정량적인 분석이나 가스하이드레이트와 가스의 부존을 확정할 수는 없다.

3차원 탐사지역에서는 해저면 반사면에 대한 진폭 값의 크기를 색상으로 표현하였다. 이를 통해 해저면에 나타나는 원형 혹은 타원형의 음향이상대를 확인하였다. 또한 음향이상대는 침니와 연결되어 있음을 확인하였고 해저면 가스하이드레이트와 연관되어 있음을 유추하였다.

4. 다채널 탄성과탐사자료 분석

4.1 탄성과 단면 색상조절에 의한 음향이상대

그림 2는 침니가 해저면까지 연장되어 발달해 있

음을 보여준다. 침니 상부의 해저면 반사면에서 주위 해저면과 비교해 강한 양의 음향이상대가 나타난다. 이곳은 피스톤 코어로 우리나라에서 최초로 가스하이드레이트 시료가 채취된 UBGH1-10 시추지역과 바로 인접한 곳이다. 외국의 경우 캐나다 밴쿠버 섬의 카스카디아 마진(Cascadia margin)을 대상으로 한 국제해저지각 시추프로그램(integrated ocean drilling program; IODP) Exp. 311 침니 시추결과에서 해저면 근처에서 가스하이드레이트 부존이 확인되었고 물리검층 결과에서도 가스하이드레이트에 의한 높은 비저항값이 잘 나타나며, 모델 연구를 통해 단열이 발달한 침니를 따라 이동한 가스에 의해 해저면 부근에 두터운 하이드레이트 캡이 형성될 수 있음이 제시되었다(Riedel *et al.*, 2006a, 2006b).

탄성과 단면에서 해저면에 보이는 강한 진폭변화는 퇴적물 조성의 차이와 해저면의 경사가 바뀔 때 나타날 수 있다. 그러나 침니와 연결되어 있는 해저면에서 주위 해저면에 비해 강한 양의 음향이상대가 나타나는 경우에는 위의 경우처럼 천부 가스하이드레이트의 부존을 지시한다.

4.2 3차원 탄성과 지역 해저면 음향이상대

그림 3은 3차원 탐사지역에서의 해저면 진폭 값의 크기를 색상으로 나타낸 것이다. 해저면에서 가장 강한 진폭 값은 파란색, 가장 약한 진폭 값은 빨간색, 중간값은 하얀색, 그리고 사이 값들은 그들의 계조색으로 표시하였다. 특징적으로 원형 혹은

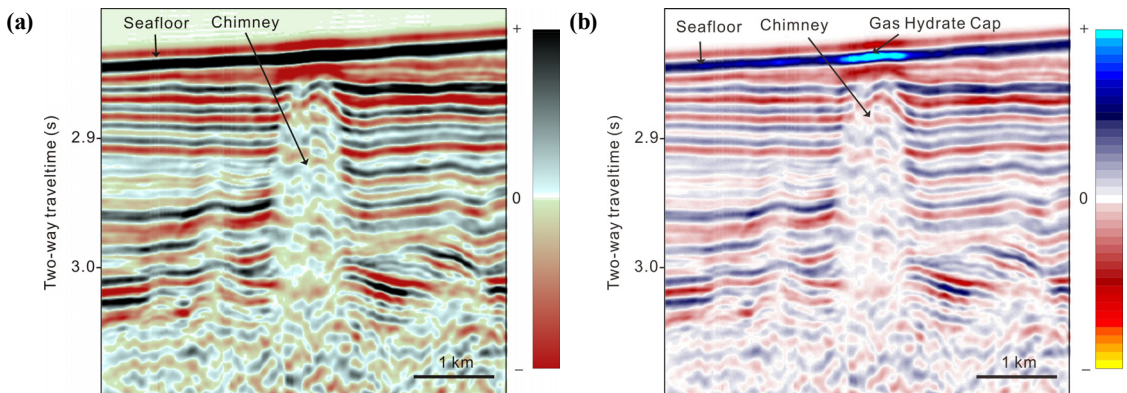


Fig. 2. A seismic profile showing a chimney structure located in 3D seismic area. An amplitude anomaly at the seafloor is clearly defined by changing the color palette from (a) continuous normal to (b) gradational. This amplitude anomaly is interpreted as a gas hydrate cap. Near-seafloor gas hydrate is discovered in this chimney site. See Fig. 3 for the location of the profiles.

타원형의 형태를 보이면서 파란색의 음향이상대가 독립적으로 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 음향이상대를 지나는 탄성과 단면을 보면 해저면의 음향이상대는 침니와 연결되어 있음을 알 수 있다 (그림 3, 4, 5). 침니를 통과하는 시추지역의 해저면은 화학합성 생물군집(chemosynthetic communit

ity)이 없는 니질의 퇴적물로 덮여있으며 시추결과에서 침니 상부에서 가스하이드레이트 및 가스하이드레이트와 연관되어 생성되는 자생 탄산염광물(authigenic carbonate)이 발견되었다(KIGAM, 2008; Ryu *et al.*, 2010). 그러므로 파란색의 음향이상대는 해저면 근처에 생성된 가스하이드레이트

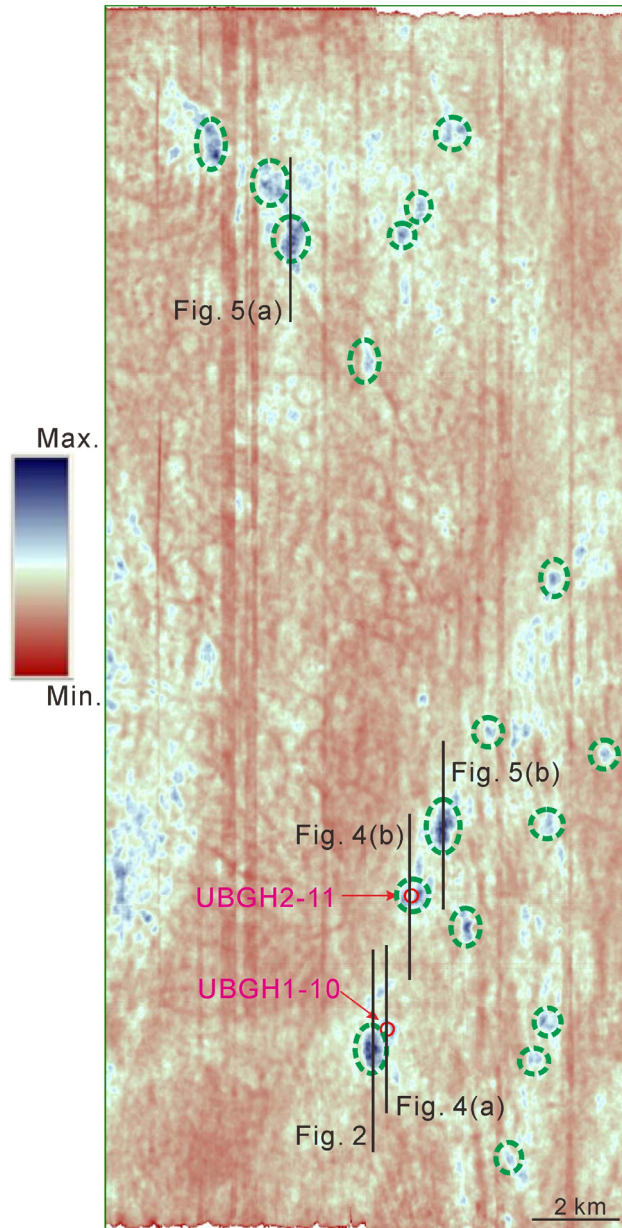


Fig. 3. Elliptical reflection amplitude anomalies (dotted green circle) on the seafloor of the 3D seismic area. They are linked by chimneys and same as strong positive reflector on the seafloor in seismic profiles (Figs 2, 4 and 5).

와 자생 탄산염광물에 의한 것으로 해석할 수 있다. 특히 검층자료에서 해석하면 부근의 가스하이드

레이트 부존을 잘 나타내고 있어 음향이상대의 주된 원인이 가스하이드레이트에 의한 것으로 유추

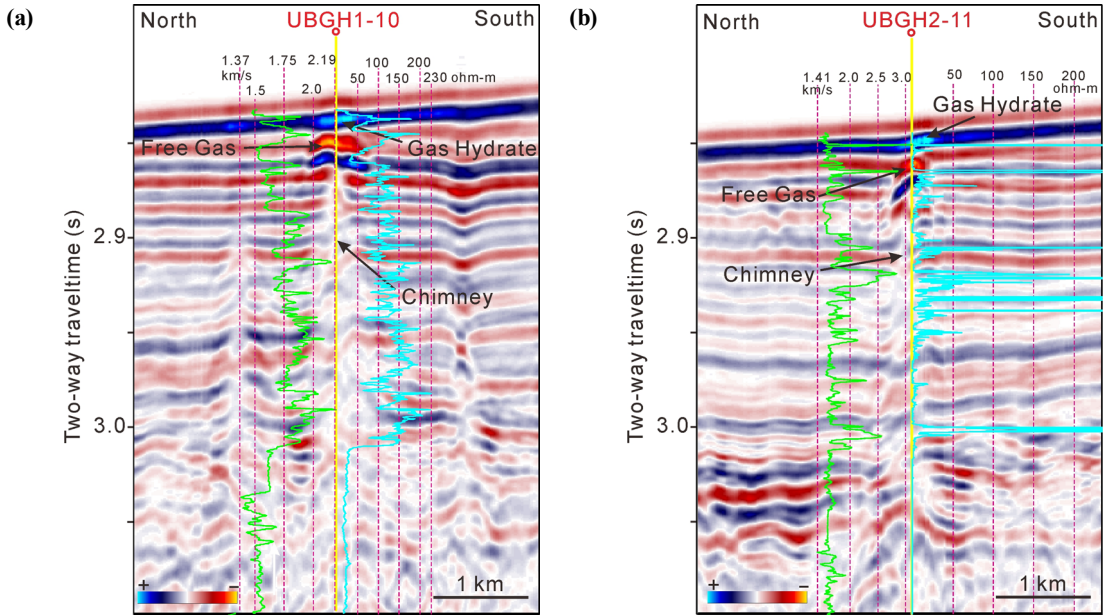


Fig. 4. Seismic profiles showing UBGH1-10 and UBGH2-11 drill sites with the sonic log (green) and resistivity (cyan) curves which show strong positive reflector on the seafloor and strong negative reflector beneath seafloor within the chimney. Strong positive reflector with high resistivity and velocity is interpreted as with near-seafloor gas hydrate. Strong negative reflector is interpreted as the gas trapped beneath near-seafloor gas hydrate. However, association with low velocity with strong negative reflector is not evident. See Fig. 3 for the location of the profiles.

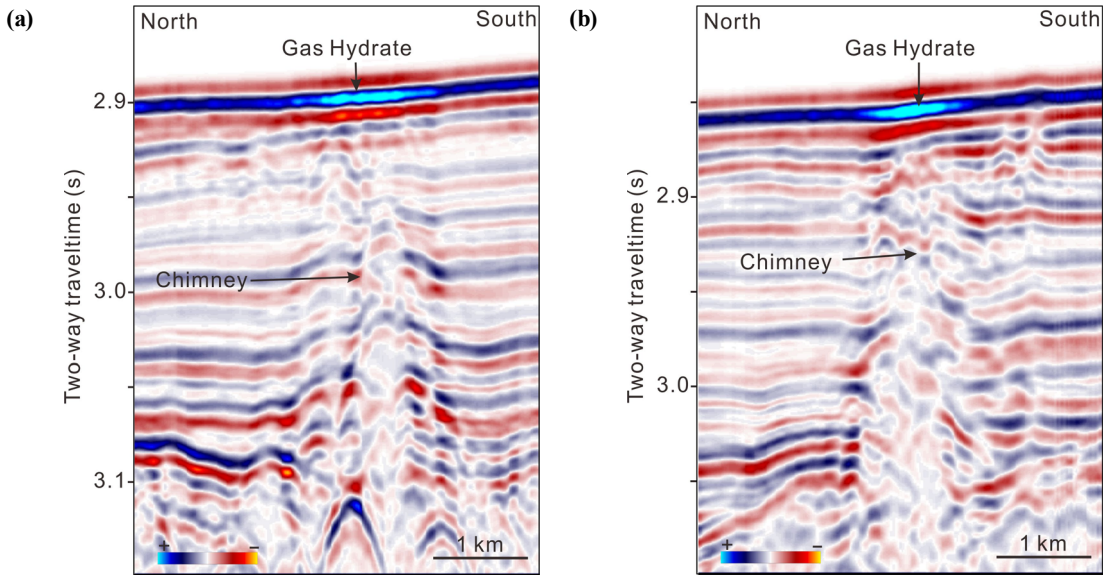


Fig. 5. Seismic profiles showing strong positive reflector on the seafloor. This reflector is interpreted as near-seafloor gas hydrate. See Fig. 3 for the location of the profiles.

할 수 있다.

4.3 해저면 근처 침니 내부의 강한 음향이상대

그림 4는 3차원 탐사지역 중 침니를 통과하는 두 시추지점 UBGH1-10과 UBGH2-11의 탄성과 단면이다. 두 시추지점 모두 해저면 가까운 곳에서 가스하이드레이트가 발견된 곳으로 다양한 색상으로 표현된 탄성과 단면을 보면 해저면 및 해저면과 인접한 침니 최상부에서 침니 내부가 아닌 곳과 비교해서 수평적으로 강한 진폭변화를 볼 수 있다. 먼저 양의 강한 진폭이 침니 상부의 해저면에 나타나고 음의 강한 진폭이 바로 밑에 나타난다. 그림 6(a)는 그림 4(a)의 침니 지역 가운데 부분을 지나는 3개의 탄성과 트레이스를 보여주며 그림 6(b)는 스파이킹 디컨볼루션(spike deconvolution) 후 이들 트레이스의 반사계수를 보여준다(Kim, 2007). 파형 요소 추출 결과 음원신호의 파장(wavelength)은 24~27

ms이다. 이를 통해서 탄성과 단면에 나타나는 음향이상대가 양의 값을 보이는지 음의 값을 보이는지 보다 정확히 알 수 있다. 스파이킹 디컨볼루션 후의 반사계수를 보면 해저면 파란색의 음향이상대는 양의 진폭값을 보여주며 바로 아래의 붉은 색의 음향이상대는 음의 진폭값을 가짐을 잘 보여주고 있다.

일반적으로 탄성과 단면에서 침니 내부에서는 반사면의 풀업구조 및 음향공백대의 탄성파적 특징을 보여준다. 더불어 탄성과 자료의 진폭변화를 강조한 색상처리를 통하여, 해저면 부근에서 침니는 가스하이드레이트와 가스를 잘 표현할 수 있는 음향이상대인 강한 양과 음의 탄성파적 특성 또한 보여줄 수 있음을 알 수 있다.

가스하이드레이트가 부존하지 않는 곳에서의 퇴적물의 전기비저항은 1.0~1.5 ohm·m이며(Hyndman *et al.*, 1999) P파의 속도는 1.55 km/s (Kim *et al.*, 2007)이다. 가스하이드레이트가 부존하는 곳에서는

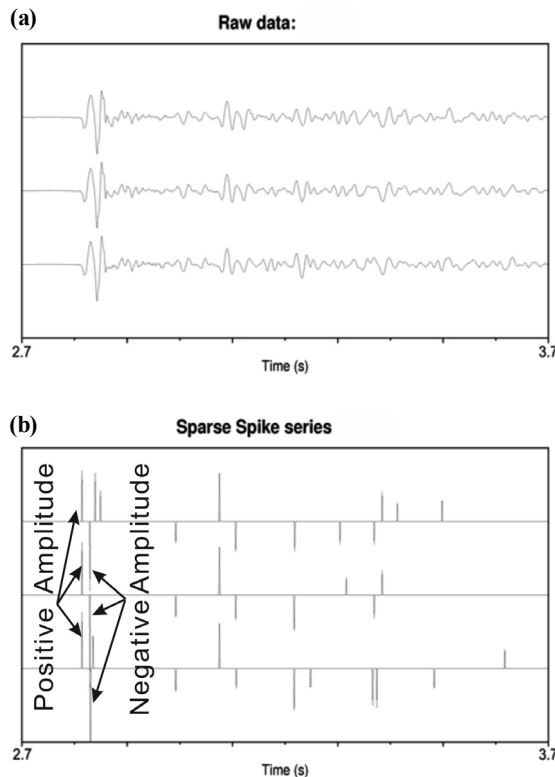


Fig. 6. Three traces (a) before and (b) after sparse spike deconvolution. These traces are located within the chimney of Fig. 4(a). Positive amplitude of seafloor and negative amplitude of free gas are distinctly shown (Modified from Kim *et al.*, 2007).

비저항값과 P파의 속도값이 큰 특징이 있으며 자유 가스는 P파의 속도가 낮은 특징이 있다. 검층 결과로 나타나는 전기비저항(ring resistivity)과 P파의 속도는 탄성파 단면에서 가스하이드레이트 캡으로 해석되는 곳에서 높은 값을 가진다(그림 4). UBGH1-10 시추공에서는 P파의 속도가 2 km/s, 비저항값은 180 ohm·m 부근 값을 가지며 UBGH2-11 시추공에서도 P파의 속도가 3 km/s, 비저항값은 100 ohm·m 이 넘는, 가스하이드레이트 부존을 지시하는 큰 값을 가진다. 울릉분지에서 발견되는 해저면까지 연장되는 침니에는 가스하이드레이트가 해저면에서 가스하이드레이트 안정영역 하부 경계면 부근까지 넓은 범위에 존재하여(UBGH1-10의 경우 2,077 m에서 2,220 m까지, UBGH2-11의 경우 2,085 m에서 2,230 m까지) P파의 속도나 비저항값이 전반적으로 모두 높아 검층값만으로는 가스하이드레이트 캡이 뚜렷이 구별되지 않으나 높은 비저항값과 속도값이 함께 나타나는 것으로 보아 해저면 음향이상대에 가스하이드레이트가 부존하고 있음을 알 수 있다. 그러나 탄성파 단면에 나타나는 자유가스로 해석되는 음의 음향이상대는 검층값에서 쉽게 구별되지 않는다. 이는 자유가스는 퇴적층내에 1%로만 존재하더

라도 탄성파 단면에서 음향이상대를 보여주기 때문에 P파의 속도가 급격히 낮아지는 현상을 보여주지 않는 것으로 해석된다. 이는 음의 진폭을 보이는 해저모방반사면이 하부의 가스에 의해 나타난 것이지만 검층 결과로는 해저모방반사면의 경계가 잘 파악이 안 되는 것과 유사하다. 검층결과에서 P파의 속도가 급격히 낮아지지 않는데 가스나 해저모방반사면과 같은 음향이상대가 왜 탄성파단면에 잘 나타나는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 탄성파 단면에서 침니 최상부에 나타나는 강한 음향이상대는 가스하이드레이트나 자유가스가 그 곳에 존재하고 있다는 것을 유추할 수 있지만 확정할 수는 없으며 또한 정량적으로 얼마나 많이 혹은 두텁게 존재하는지는 알려주지 않는다.

측선이 지나는 위치에 따라 침니를 지나는 탄성파 단면에는 해저면 가스하이드레이트 및 가스의 음향이상대를(그림 4) 모두 보여주거나 혹은 가스하이드레이트의 음향이상대만(그림 2와 5) 보여주거나 혹은 가스의 음향이상대만(그림 7) 보여준다. 그림 4의 탄성파 단면의 경우 해저면 가까이 양과 음의 음향이상대를 잘 보여주었지만 침니를 지나는 다른 탄성파 단면에서도 항상 잘 나타나지는 않는다. 그림 2

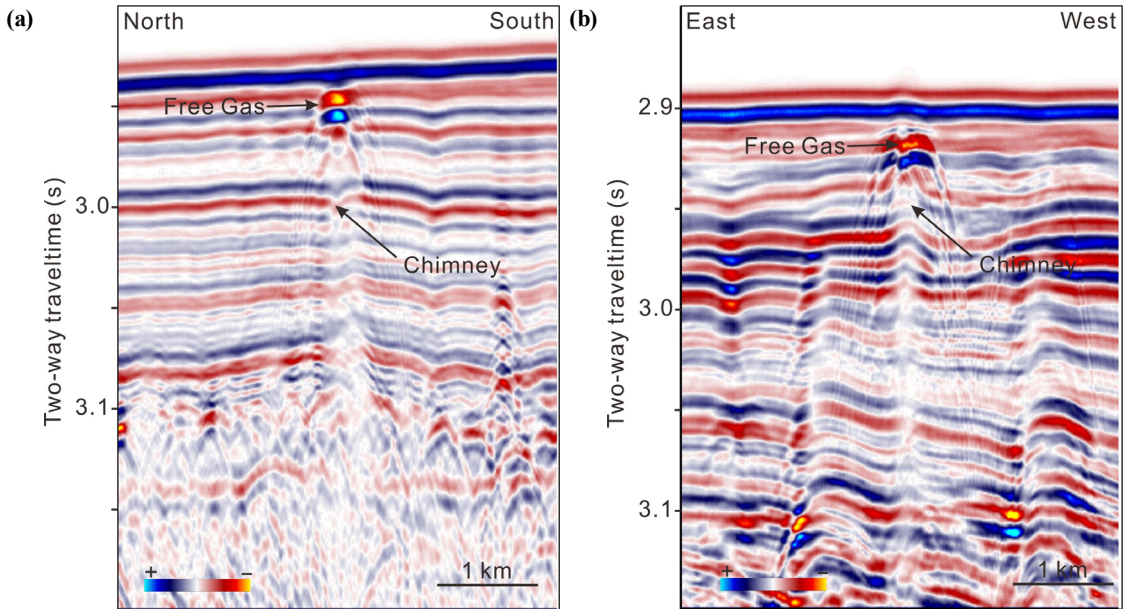


Fig. 7. Seismic profiles showing strong negative reflector beneath the seafloor. This reflector is interpreted as the gas trapped beneath possible near-seafloor gas hydrate. Free gas migrates to seafloor through the faults and fractures developed in chimney.

와 5에서 보듯이 두 개의 탄성과 단면은 해저면에서 강한 양의 음향이상대를 보여주며 상대적으로 그 아래에 트랩되어 있을 것으로 보이는 자유가스의 지지자인 음의 강한 진폭변화가 잘 나타나지 않는다. 실제로 자유가스가 존재하지 않아서 나타나지 않을 가능성도 있다. 그림 5에서는 시추가 이루어지지 않아 해저면 가스하이드레이트의 존재 유무를 직접 확인하지 못하였지만 음향이상대의 형태가 해저면 가스하이드레이트가 발견된 그림 2와 유사하다. 또한 그림 7은 가스하이드레이트 탐사목적으로 취득한 2차원 탄성과 단면으로, 해저면의 가스하이드레이트로 볼 수 있는 양의 강한 음향이상대는 나타나지 않고 가스를 지지하는 음의 강한 음향이상대를 잘 볼 수 있다.

4.4 해저면 가스하이드레이트 및 가스 생성 모식도

침니가 해저면까지 연장될 때, 해저면과 가까운 침니 최상부에는 가스하이드레이트가 부존하고 있음을 시추결과를 통해서 확인하였고 침니내에서의 가스하이드레이트 형성 모델들이 제시되었다(Riedel *et al.*, 2006b; Chun *et al.*, 2011). 이들 모델에서는 특히 위치차이는 있지만 해저면과 인접한 곳에서 가스하이드레이트 캡이 형성되고 있음을 보여 주고 있다. 그리고 자유가스가 단열면을 따라 침니 내부로 이동하고 있음을 보여 주고 있으나 가스하이드레이트 캡 아래에 자유가스가 트랩되어 나타날 수 있음을 보여주고 있지는 않다. Riedel의 모델에 의하면 가스는 거미줄 같은 단열면(web-like)에만 존재하는 것으로 해석하였다.

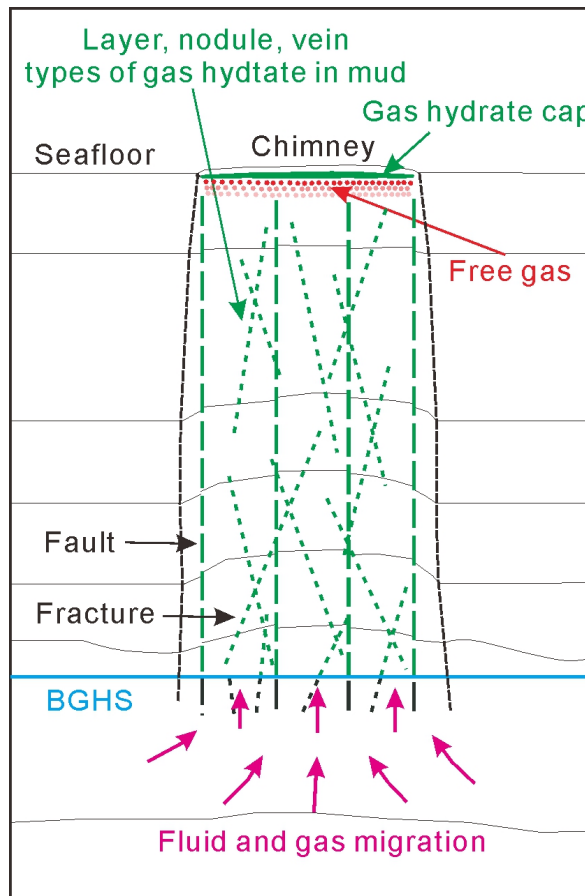


Fig. 8. Schematic diagram for the occurrence of near-seafloor gas hydrate and gas on the chimney. Fractures and faults are interpreted to be the upward migration pathways of free gas in the chimney. Near-seafloor gas hydrate could be built as hydrate cap and free gas is trapped beneath hydrate cap. Gas hydrate take the forms of layer, nodule, vein in mud within the faults and fractures.

그림 5의 탄성과 단면에서 보듯이 일부 침니 내부에는 단층이 발달해 있고 시추 결과 침니 내부의 많은 곳에서 층(layer), 노들(nodule), 베인(vein) 형태의 가스하이드레이트가 발견된 것으로 보아 탄성과 단면에는 보이지는 않지만 많은 단열이 존재할 것으로 해석된다. 이러한 단열 및 단층을 따라 침니 내부에서 자유가스가 상부로 이동하여 해저면 근처에서 탄성과 단면의 음향이상대로 나타나는 가스하이드레이트 캡이 형성되고 자유가스가 가스하이드레이트 캡 아래에 트랩되는 것으로 생각된다.

그림 8은 탄성과 단면에서 침니 상부의 해저면 근처에 나타나는 가스하이드레이트와 가스층의 형성을 도시한 것이다. 가스하이드레이트 캡은 해저면이나 바로 하부에 생성되기 때문에 탄성과 단면에서는 해저면 반사면과 동일선상에서 나타난다. 그리고 하부에서 단층 및 단열면을 따라 이동한 자유가스가 가스하이드레이트 캡 아래에 트랩되어 가스층이 형성된다. 이에 따라 가스하이드레이트 캡은 탄성과 단면에서 강한 양의 음향이상대를 보이고 자유가스는 바로 아래에 강한 음의 음향이상대로 나타난다.

5. 결론

3차원 탄성과 탐사에서 얻어진 해저면 반사 진폭도면에는 해저면에 원형의 강한 양의 음향이상대를 볼 수 있다. 탄성과 단면에서 보면 음향이상대는 침니와 연결되어 있으며 해저면 직하부에 존재하는 천부 가스하이드레이트에 의한 것으로 해석된다. 탄성과 단면을 양과 음의 진폭값으로 표현하더라도 진폭변화를 강조한 색상처리를 통하여, 매질의 성질에 따른 진폭변화를 더 자세히 알 수 있다. 이를 가스하이드레이트 부존이 확인된, 해저면까지 연장된 침니가 나타나는 탄성과 단면에 적용해 보면 해저면과 가까운 곳에서 강한 양의 음향이상대가 나타나고 바로 하부에는 음의 음향이상대가 나타난다. 탄성과 단면에서 해저면에 나타나는 강한 양의 음향이상대는 가스하이드레이트 캡에 의한 것이며 하부의 강한 음의 음향이상대는 침니를 따라 이동한 자유가스가 가스하이드레이트 캡 하부에 트랩되어 나타난 것으로 해석된다. 탄성과 단면이 침니를 통과하는 위치에 따라 양과 음의 음향이상대가 동시에 나타나기도 하고, 혹은 양의 음향이상대만, 혹은 음의 음향이상

대만 나타나기도 한다. 울릉분지에서 침니내의 천부 퇴적층에 나타나는 음향이상대는 내부 반사면의 폴업구조, 음향공백대와 더불어 침니내부의 탄성과 특성을 잘 보여주며 또한 해저면 부근에 가스하이드레이트 및 가스가 퇴적층내에 부존하고 있음을 보여주는 지시자 역할을 한다.

사 사

이 연구는 산업통상자원부와 가스하이드레이트 개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행된 “가스하이드레이트 환경영향 분석 연구” 및 “가스하이드레이트 부존평가 및 저류층 특성 연구” 사업결과의 일부이며 자료취득에 도움을 준 탐해2호 승조원 및 도움을 주신 가스하이드레이트연구팀, 해저물리탐사연구팀에게 감사드립니다. 논문의 심사를 맡아주시고 유익한 조언을 해주신 김한준 박사님과 익명의 심사위원님, 편집위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Bahk, J.J., Kim J.H., Kong, G.S., Park, Y., Lee, H., Park, Y. and Park, K.P., 2009, Occurrence of near-seafloor gas hydrates and associated cold vents in the Ulleung Basin, East Sea. *Geosciences Journal*, 13, 371-385.
- Chough, S.K., 1983, *Marine Geology of Korean Seas*. Boston: IHRD, 157 p.
- Chough, S.K., Lee, S.H., Kim, J.W., Park, S.C., Yoo, D.G., Han, H.S., Yoon, S.H., Oh, S.B., Kim, Y.B. and Back, G.G., 1997, Chirp (2-7 kHz) echo characters in the Ulleung Basin. *Geoscience Journal*, 1, 143-154.
- Chun, J.H., Ryu, B.J., Son B.K., Kim, J.H., Lee, J.Y., Bark, J.J., Kim, H.J., Woo, K.S. and Nehza, O., 2011, Sediment mounds and other sedimentary features related to hydrate occurrences in a columnar seismic blanking zone of the Ulleung Basin, East Sea, Korea. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1787-1800.
- Goldberg, D., Collet, T.S. and Hyndman, R.D., 2000, Ground Truth: In-situ Properties of Hydrate. In: Max, M.D., (eds.), *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments*, Kluwer Academic Publishers, 295-310.
- Hyndman, R.D., Yuan, T. and Morgan, K., 1999, The concentration of deep sea gas hydrates from downhole electrical resistivity logs and laboratory data. *Earth Planet Science Letter*, 172, 167-177.
- Hyndman, R.D., 2006, Marine Gas Hydrate off W.Canada and Some Comparisons with the East Sea off Korea. *in*

- Thematic Session & 2nd International Symposium on Gas Hydrate Technology at the 43rd CCOP Annual Session(Abstracts), Daejeon, Korea, November 1-2.
- Matsumoto, R. and Hiromatsu M., 2011, Fluid flow and evolution of gas hydrate mounds of Joetsu basin, eastern margin of Japan sea: constraints from high-resolution geophysical survey by auv. Proceedings of the 7th International conference on gas hydrate. Edinburgh, July 17-21.
- Kang, D.H., Yoo, D.G., Park, J.J., Ryu, B.J., Koo, N.H., Kim, W.S., Park, K.S. and Kim, J.S., 2009, The occurrence patterns of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea, 45, 143-155 (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 2008, Analysis of Gas Hydrate Deep-drill Cores and Studies on Gas Hydrate Stability and Geohazards. NP2008-003-2008(1), 240 p (in Korean with English abstract).
- KIGAM, 2009, Studies on Gas Hydrate Geology, Geochemistry, and Stability. NP2008-003-2009(2), 353 p (in Korean with English abstract).
- Kim, D.H., 2012, Relationships between Gas Hydrate Occurrence Types and Sediment Characteristics in Ulleung Basin, East Sea, Chungnam National University master's thesis, 73 p (in Korean with English abstract).
- Kim, G.Y., Yoo, D.G., Lee, H.Y., Lee, Y.J. and Kim, D.C., 2007, The relationship between silica diagenesis and physical properties in the East/Japan Sea: ODP Legs 127/128. Journal of Asian Earth Science, 30, 448-456.
- Kim, H.J., 2007, Analysis of high-resolution reflectivity of proposed drilling sites for gas hydrates. KIGAM contract research report, 48 p (in Korean with English abstract).
- Lee, K.S., Park, K.W. and Yoon, O.K., 2007, Marine Geography of the East Sea. In: Ocean Atlas of KOREA. National Oceanographic Research Institute, 32-51.
- Milkov, A.V., 2004, Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? Earth-Sci. Rev, 66(3-4), 183-197.
- Milkov, A.V. and Sassen, R., 2002, Economic geology of offshore gas hydrate accumulations and provinces. Marine and Petroleum Geology, 19, 1-11.
- Park, K.P., Bahk, J.J., Kwon, Y., Kim, G.Y., Riedel, M., Holland, M., Schultheiss, P., Rose, K. and UBGH-1 Scientific Party, 2008, Korea national program expedition confirms rich gas hydrate deposits in the Ulleung Basin, East Sea, in U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Spring, Methane Hydrate Newsletter, 6-9.
- Paull, C.K., Buelow, W., Ussler, W. and Borowski, W.S., 1996, Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments. Geology, 24, 143-146.
- Riedel, M., Collett, T.S., Malone, M.J. and Expedition 311 Scientists, 2006a, Proceeding of the Integrated Ocean Drilling Program: Volume 311 Expedition Reports Cascadia Margin Gas Hydrates. IODP.
- Riedel, M., Spence, G.D., Hyndman, R.D., Chapman, R.N. Solem, R.C. and Lewis, T., 2006b, Geophysical and geochemical signatures associated with gas hydrate-related venting in the northern Cascadia margin. Geol. Soc. Am. Bull., 118, 23-38.
- Ryu, B.J., Riedel, M., Kim, J.H., Hyndman, R.D., Lee, Y.J., Chung, B.H. and Kim, I.S., 2009, Gas hydrates in the western deep-water Ulleung Basin, East Sea of Korea. Marine and Petroleum Geology, 26, 1483-1498.
- Ryu, B.J., Kim, G.Y., Chun, J.H., Bahk, J.J., Lee, j.y., Kim, J.H., Yoo, D.G., Collett, T.S., Riedel, M., Torres, M.E., Lee, S.R. and the UBGH2 Scientists, 2010, The second ulleung basin gas hydrate drilling expedition (UBGH2). Expedition report, 666 p.
- Sloan, E.D. and Koh, C.A., 2008, Chathrate hydrate of natural gases(Third edition). CRC Press, New York, 721 p.
- Yoo, D.G., Kang, D.H., Koo, N.H., Kim, W.S., Kim, G.Y., Kim, B.Y., Chung, S.H., Kim, Y.J., Lee, H.Y., Park, K.P., Lee, G.H. and Park, S.C., 2008, Geophysical Evidence for the occurrence of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 44, no. 5, 645-655 (in Korean with English abstract).

투 고 일 : 2013년 10월 24일

심 사 일 : 2013년 10월 24일

심사완료일 : 2013년 10월 31일