

동해 울릉분지 침니 구조 내에 발달하는 가스하이드레이트 함유 퇴적층 특성 연구

이진혁^{1,2,*} · 박장준^{1,2}

¹과학기술연합대학원대학교 석유자원공학

²한국지질자원연구원 석유해저연구본부

요 약

본 연구에서는 제 2차 울릉분지 가스하이드레이트 심부시추(The 2nd Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition: UBGH2)에서 확인된 세 개의 침니(chimney) 지점(UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11)에서 취득한 물리검층 및 시추 자료를 분석하여 가스하이드레이트 산상을 파악하고 그 조절요인을 규명하였다. 세 지점은 전반적으로 유사한 암상을 보이나 단열을 충전하는 가스하이드레이트 부존구간의 심도 및 단열의 발달양상, 가스하이드레이트 포화도 등에서 차이를 보인다. 가스하이드레이트 부존구간은 분지 중앙에 위치한 UBGH2-11 지점에서 134 m로 가장 두껍고 UBGH2-3과 UBGH2-7 지점에서는 각각 97 m와 65 m로 발달되어 있다. 단열의 방위각(azimuth)은 UBGH2-3 지점에서 서북서 방향으로 일정한 경향성을 보여 그 성인이 구조운동에 기인함을 시사하는 반면, UBGH2-7과 UBGH2-11 지점에서는 일정한 방향성을 보이지 않는 점으로 미루어 가스하이드레이트의 형성과 관련이 있는 것으로 해석된다. 물리검층 P파 속도 값을 기반으로 계산한 가스하이드레이트 포화도는 세 지점 모두 경사각 10°이하의 단열 구간에서 평균 64.7%로 높지만, 약 40~70°(평균 52.6°)의 경사각을 갖는 대부분의 단열에서는 43.3%(UBGH2-3), 35.1%(UBGH2-7), 17.6%(UBGH2-11)로 낮게 나타난다. 이와 함께 UBGH2-11 지점에서는 가스하이드레이트의 해리로 인해 공극수 염소이온 농도가 심도가 깊어짐에 따라 감소하는 배경값보다 더 떨어지는 탈염화(freshening)현상이 관찰되나, UBGH2-3과 UBGH2-7 지점의 천부 구간에서는 반대로 공극수 염소이온 농도가 해수보다 높게 나타나서 강한 메탄 플럭스(methane flux)로 인해 가스하이드레이트가 급속히 형성되었음을 지시한다. 따라서 상기 결과들을 종합해 볼 때, 침니 구조 내에서 가스하이드레이트의 산상은 단층 및 단열의 발달양상과 메탄 플럭스에 의해 조절되며, 암상이 가스하이드레이트의 산상 변화에 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 해석된다.

주요어: 가스하이드레이트 산상, 단층 및 단열, 가스하이드레이트 포화도

Jin-Heuck Lee and Jang-Jun Bahk, 2013, Characterization of gas hydrate-bearing sediments within chimney structures in the Ulleung Basin, East Sea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 587-604

ABSTRACT: Differences in occurrences of gas hydrate (GH) and their controlling factors were examined using well-log and core data from three chimney sites (UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11) of the 2nd Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) in 2010. Although fracture-filling GH hosted in hemipelagites is dominant in all of the three chimney sites, thickness of their occurrence zone, fracture patterns, and GH saturation are different from each other. The thickness of the GH occurrence zone is 97 m at Site UBGH2-3, 65 m at Site UBGH2-7, and 134 m at Site UBGH2-11, respectively. Azimuth of the fractures developed at Site UBGH2-3 is consistently aligned to WNW direction indicating relations with the tectonic movement in the closing stage of Ulleung Basin, whereas those at Site UBGH2-7 and UBGH2-11 are randomly oriented suggesting relations with formation of GH. The GH saturation, calculated from effective medium theory (EMT), is generally high (average 64.7%) in fractured zone where dip angle is less than 10 degree. In high angle fractured zone (40 to 70 degree), the GH saturation is 43.3% at Site UBGH2-3, 35.1% at Site UBGH2-7, and 17.6% at Site UBGH2-11, which is relatively lower than that of the low angle fractured zone. Unlike UBGH2-11, the pore-water chlorinity of Sites UBGH2-3 and UBGH2-7 is highly enriched at shallow depth, suggesting rapid formation of the GH with sustained high methane fluxes. The differences in fracture patterns and methane fluxes might have had primary control of GH occurrences in the three chimney sites.

* Corresponding author:

E-mail: lgeene@ust.ac.kr

Key words: gas-hydrate occurrence, fracture, gas-hydrate saturation

(Jin-Heuck Lee and Jang-Jun Bahk, *Petroleum Resources Technology, University of Science and Technology, 217 Gajeong-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-333, Korea and Petroleum & Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea*)

1. 서 론

가스하이드레이트는 저온·고압 환경에서 메탄, 이산화탄소, 질소, 산소 등의 가스 분자들이 물 분자가 형성하는 격자에 포획된 결정 화합물이다. 천연 가스하이드레이트의 경우 주로 메탄가스를 포함하기 때문에(>99.9%) 메탄하이드레이트라고도 불린다(Kvenvolden, 1988). 가스하이드레이트는 저온·고압의 조건을 보이는 전 세계 대륙 주변부의 해저 퇴적층과 영구동토 지역에 광범위하게 부존되어 있다(Kvenvolden and Lorenson, 2001; Makogon, 2010). 가스하이드레이트는 화석에너지를 대체할 수 있는 차세대 청정 에너지원으로 각광받고 있지만, 해리 시에 해저 사면사태 발생(McIver, 1982; Dillon *et al.*, 1998, 2001) 및 온실효과 초래(Shine *et al.*, 1990) 가능성이 있기 때문에 그 형성과 해리 과정에 대한 지질학적 조절요인을 이해하는 것은 매우 중요하다. 구체적인 산출양상은 메탄의 유동량(methane flux) 및 이동경로, 퇴적물의 입도 등 다양한 요인에 의해 조절된다(Borowski *et al.*, 1996; Nimblett and Ruppel, 2003; Boswell *et al.*, 2011).

가스하이드레이트의 산출형태는 크게 사질 퇴적층에 부존하는 공극 충전(pore-filling) 형태와 니질 퇴적층 내에서 단괴(nodule) 또는 단열을 충전(fracture-filling)하는 형태로 나눌 수 있다(Holland *et al.*, 2008). 특히 단열충전 가스하이드레이트는 침니(chimney) 구조 내에서 흔히 발견된다. 침니 구조는 퇴적층을 수직으로 가로질러 발달하며, 이 침니 구조 내에 가스하이드레이트가 부존하는 경우 탄성과 자료 상에서 풀업(pull-up)구조가 관찰된다(Horozal *et al.*, 2009; Ryu *et al.*, 2009; Yoo *et al.*, 2013). 또한 침니 구조에서 발달하는 단열은 심부 퇴적층으로부터 유체가 활발히 유동할 수 있는 통로 역할을 하여, 천부 퇴적층에 다량의 가스하이드레이트를 형성한다(Nimblett and Ruppel, 2003; Tréhu *et al.*, 2003; Hornbach *et al.*, 2004). 천부 퇴적층에 집적된 가스하이드레이트는 해수면 변동, 해수온 변화 등 온도·

압력조건의 변화에 민감하게 반응하여, 해저사면 안정성과 기후변화에 상당한 영향을 미칠 수 있다(Paull *et al.*, 2003; Torres *et al.*, 2011).

이와 같이 퇴적층의 다양한 가스하이드레이트 산출 형태는 포화도 산정에도 영향을 주는데, 일반적으로 아키의 공식을 통해 계산한 가스하이드레이트 포화도는 퇴적층 내의 공극에 가스하이드레이트가 균질하게 분포하고 있다는 가정을 바탕으로 하기 때문에, 가스하이드레이트가 단열을 충전하는 경우에 과대평가되는 경향을 보인다(Riedel *et al.*, 2006; Lee and Collett, 2009). 이러한 오차를 보완하기 위하여 P와 속도 값을 이용한 유효매질이론방법이 적용되며, 이는 퇴적층 내에 부존하는 가스하이드레이트가 비등방성을 갖는 단열충전 형태로 산출되는 경우에 정확한 포화도의 계산을 가능하게 한다(Helgerud *et al.*, 1999; Jakobsen *et al.*, 2000). 따라서 두 포화도 계산방법을 통해 산출한 가스하이드레이트의 포화도 값을 이용하여 공극충전 형태의 가스하이드레이트와 단열충전 형태의 가스하이드레이트 부존구간을 구분할 수 있다.

국내 울릉분지에서도 다수의 침니 구조가 발견되었으며(Horozal *et al.*, 2009; Ryu *et al.*, 2009; Yoo *et al.*, 2013), 2007년 제1차 울릉분지 가스하이드레이트 심부시추(1st Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition; UBGH1)를 통해 침니 지역의 가스하이드레이트 부존증거 및 산출상태, 해저면 마운드(mound) 구조 등을 확인하였다(Bahk *et al.*, 2011, 2013a; Chun *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011). 한국지질자원연구원은 2010년 수행된 제2차 울릉분지 가스하이드레이트 심부시추(2nd Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition: UBGH2)에서 총 10개 지점에서 코어(core)를 채취하였는데, 이 중 UBGH2-2_1, UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11 등 4개 지점에서 침니 구조를 대상으로 시추 작업을 수행하였다. 이 중 UBGH2-2_1 지점에서는 침니 구조가 심도 약 25 mbsf (meter below seafloor)까지 발달한 반면, UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11 지점에서는 해저

면까지 침니 구조가 발달되어 있다(Ryu *et al.*, 2012).

본 연구에서는 침니 구조가 발달된 세 개의 시추 지점 UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11을 대상으로 시추자료와 물리검층자료에서 나타나는 가스하이드레이트 산상을 파악하고, 각 지점별 심도에 따른 가스하이드레이트 산상변화와 각 지점간의 차이를 비교·분석하여 이에 대한 지질학적 조절 요인을 규명하고자 하였다.

2. 연구지역

울릉분지는 지금으로부터 약 3,000만 년 전부터 1,000만 년 전 사이에 일본열도의 남진으로 형성된 동해 후열도(back-arc) 분지이다(Yoon and Chough, 1995). 울릉분지 발달단계는 (1) 후기 올리고세에서 전기 마이오세까지의 인리형 열개(pull-apart opening) 단계, (2) 전기 마이오세에서 중기 마이오세까지의 부채꼴형 열개(fan-shaped opening) 단계, (3) 후기 마이오세에서 현재까지의 후열도 닫힘(back-arc closing) 단계로 구분된다(Jolivet and Tamaki, 1992). 울릉분지는 북쪽으로 지형의 굴곡이 심한 한국 대지(Korea Plateau)의 급사면과 접하고 있으며, 분지평원은 약 2,000~2,500 m의 수심을 갖고 북동방향으

로 완만하게 깊어지는 형태를 보인다(그림 1). 분지의 서쪽은 가파른 경사를 갖는 한반도의 대륙사면과 접하고, 동쪽과 남쪽은 완만한($<3^\circ$) 경사를 가지며 오키뱅크(Oki Bank)와 접하고 있다(Chough *et al.*, 2000). 특히 울릉분지의 남서부에서는 동해의 닫힘 단계에서 지각의 수축운동으로 인하여 형성된 배사 구조인 고래구조, 돌고래구조가 확인된 바 있다(Lee *et al.*, 2004).

울릉분지의 가스하이드레이트 부존을 지시하는 증거로는 탄성과 단면상에서 나타나는 해저 모방 반사면(bottom simulating reflector: BSR), 침니 구조, 증폭 반사면(enhanced reflection)등이 제안되었다(Ryu *et al.*, 2006; Horozal *et al.*, 2009; Yoo *et al.*, 2013). 특히 탄성과 자료 상에서 퇴적층을 수직으로 가로지르는 굴곡형태의 음향공백대(acoustic blanking zone)를 보이는 침니 구조는 주로 울릉분지 분지평원의 북서부와 북동부, 그리고 남부사면의 일부 지역에 다수 분포한다(Ryu *et al.*, 2006, 2009; Yoo *et al.*, 2008, 2013; Horozal *et al.*, 2009). 울릉분지에서 관찰되는 침니 구조는 해저면에 가까워지면서 대부분 사라지나, 일부는 해저면까지 발달되어 마운드 또는 폭마크 구조와 함께 관찰되기도 한다(Ryu *et al.*, 2006, 2009; Yoo *et al.*, 2013).

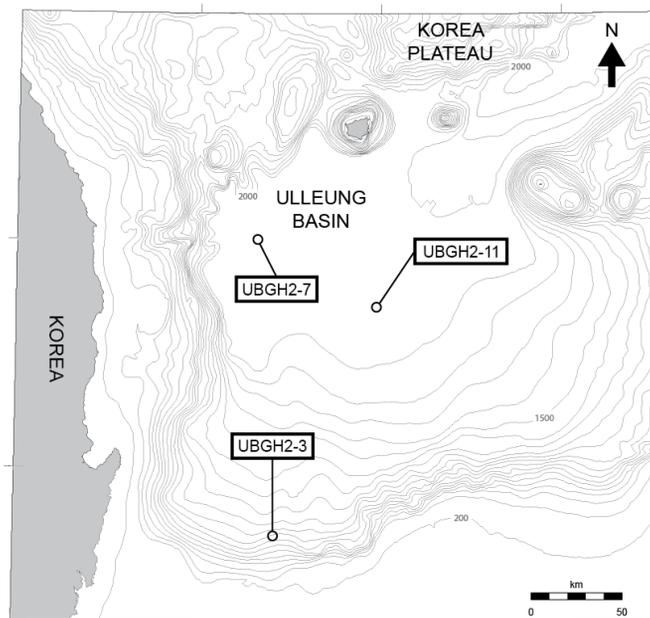


Fig. 1. Bathymetric map of the Ulleung Basin. Contours are in meters. Seismic chimney sites are denoted by open circles.

본 연구의 대상인 시추지점 UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11 지점은 각각 울릉분지의 남부 사면, 분지평원의 북서부와 북동부에 위치하며, 특히 UBGH2-3 지점의 약 15~20 km 남쪽에는 배사구조인 돌고래 I, 돌고래 II 구조가 위치한다. 이들 세 지점에 발달된 침니 구조는 약 400~600 m의 폭을 갖는다(그림 2). 세 지점에서 모두 해저면으로부터 약 0.2 s (TWT)까지 반원양성(hemipelagic) 및 저탁류(turbidity-currents) 퇴적물을 지시하는 연속적인 반사면이 발달하고, 그 하위로는 암설류(debris-flows) 퇴적물에 해당되는 혼탁한(chaotic) 반사면이 나타난다. 특히 UBGH2-3 지점과 UBGH2-7 지점에서는 해저면에 침니 구조와 연계된 해저면 마운드 구조가 관찰된다(그림 2A and B). 각 지점에서 취득된 탄성파 단면에서 관찰되는 BSR의 심도 및 시추과정에서 측정된 지온구배를 바탕으로 계산된 가스하이드레이트 안정영역의 하한의 심도는 표 1에 정리한 바와 같다.

이들 침니 구조가 발달하는 지점에서 취득한 물리검층 및 압력코어 자료상에 나타나는 단열충전 가스하이드레이트의 발달양상은 Kim *et al.* (2013)과 Lee *et al.* (2013a) 등에 의해 보고된 바 있다. 이 연구에서는 기존의 연구결과에 추가하여 시추 퇴적물의 퇴적상 및 적외선 열화상(infrared thermal image) 자료에서 나타나는 가스하이드레이트 산출양상을 물리검층 자료와 비교하였으며, 각 지점별 가스하이드레이트 산출양상의 차이를 공극수 염소이온농도 분석결과에서 유추되는 메탄 플럭스의 정도와 연계하여 해석하였다.

3. 연구방법

3.1 적외선 열화상 분석

적외선 열화상 촬영은 가스하이드레이트의 해리로 인한 온도 감소를 확인하여 가스하이드레이트 함유구간을 신속하게 파악할 목적으로 시추시료 회수 직후 선상에서 수행하였다(Ryu *et al.*, 2012). 촬영된 적외선 열화상 자료의 온도 분포를 FLIR™ Systems의 ThermoCAM™ Researcher 프로그램을 이용하여 분석하였으며, 온도 감소가 나타나는 온도이상대(anomalies)와 그 주변부의 온도차(이하 ΔT)를 계산하였다. ΔT 값은 제 2차 울릉분지 가스하이드레이트 시추 보고서에 보고된 공극수 염소이온 농도 자료와 함께 가스하이드레이트 부존의 지시자로 사용하였다(Ryu *et al.*, 2012).

3.2 퇴적상 분석

각 시추지점 퇴적물의 퇴적 작용과 환경을 파악할 목적으로 퇴적상 분석을 실시하였다. 퇴적 구조 및 색상 관찰을 위하여 선상에서 촬영한 절개 전 원형 코어에 대한 X선 영상과 탐사 종료 후 한국지질자원 연구원이 보유한 코어 스캐너 장비를 이용하여 촬영한 절개 후 절개면 영상 자료를 이용하였다(Ryu *et al.*, 2012). 또한 입도 조성을 파악하기 위해 약 0.05 g의 퇴적물 시료를 약 50 cm 간격으로 채취하여 10% 과산화수소로 유기물을 제거하고 1N 염산으로 탄산염을 제거한 후 0.1% 칼곤(calgon)을 첨가하여 교반하였다. 입도 분석에 이용한 기기는 레이저 산란 입도 분석기(Microtrac S3500)이며 측정범위는 0.021 -

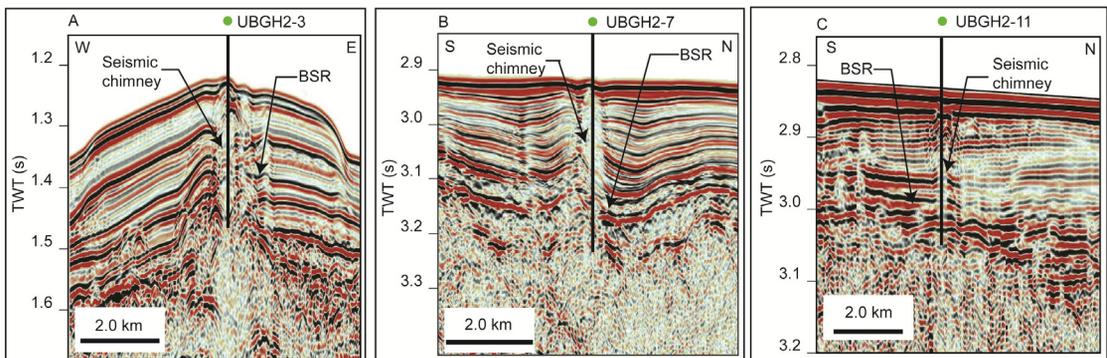


Fig. 2. Seismic profiles showing seismic chimney structure in the Ulleung Basin. (A) UBGH2-3, (B) UBGH2-7, and (C) UBGH2-11 (Modified from Ryu *et al.*, 2012).

Table 1. Summary of chimney site locations and logging/coring results from the UBGH2.

Hole	Latitude (N)	Longitude (E)	Water Depth (mbss)	BSR*/BGHSZ Depth (mbsf)	TD ¹ (mbsf)	Remarks
UBGH2-3						
UBGH2-3A	36°41'15.8"	130°20'38.5"	897.9	168*	280	LWD/MWD ²
UBGH2-3B	36°41'16.1"	130°20'38.5"	897.8	131.6	6	Coring
UBGH2-3C	36°41'16.1"	130°20'38.5"	897.8	131.6	170	Coring
UBGH2-7						
UBGH2-7A	36°54'53.2"	130°22'00.6"	2,144.6	183*	299	LWD/MWD ²
UBGH2-7B	36°54'53.6"	130°22'00.6"	2,144.6	124	Failure	Coring
UBGH2-7C	36°54'53.6"	130°22'00.6"	2,144.6	124	8	Coring
UBGH2-7D	36°54'53.7"	130°22'00.6"	2,144.6	124	238	Coring
UBGH2-11						
UBGH2-11A	36°39'46.8"	130°54'24.9"	2,081.47	160*	230	LWD/MWD ²
UBGH2-11B	36°39'47.0"	130°54'24.9"	2,082.6	159	181	Coring

The water depths were measured with the length of seafloor touching drill pipe; mbss = meter below sea-surface; mbsf = meter below sea-floor, BSR = Bottom-Simulating Reflector; BGHSZ = Base of Gas Hydrate Stability Zone derived from in-situ temperature measurements; TD¹ = termination depth; LWD/MWD² = Logging-While-Drilling/Measurement-While-Drilling; Failure = the failure in core recovery

1,408 μm이다. 퇴적물 입도 분포 자료의 통계처리는 GRADISTAT (Blott and Pye, 2001)를 사용하였으며, 평균입도와 분급도 등은 모멘트 방법(method of moment)을 이용하여 Φ 단위로 계산하였다.

3.3 압력코어 영상 분석

가스하이드레이트의 산출형태를 정밀하게 파악하기 위하여 UBGH2-3 지점에서 회수한 3개의 압력코어(pressure core)와 UBGH2-11 지점에서 회수한 4개의 압력코어를 대상으로 X선 CT 영상 분석을 수행하였다. 단면영상은 한국지질자원연구원이 보유한 “KIGAM CT” 장비를 이용하여 전압 140 KeV, 전류 40 μA 조건에서 780 X 773 픽셀(pixel) 해상도로 코어배럴 1 mm당 약 5개씩 취득하였다(KIGAM 2010). 취득한 영상은 가스하이드레이트와 주변 퇴적물의 밀도차에 따른 X선 투과율의 차이로 인하여 뚜렷한 명암 대비를 보인다(그림 3A). CT 단면 영상 세트는 Image J 프로그램을 이용하여 3차원 CT 영상으로 변환하였다. 또한 3차원 CT 영상 자료에서 파악되는 단열층전 가스하이드레이트 산출형태를 전기비저항 시추공 영상(RAB image)과 비교하기 위하여 3차원 원형 영상의 외부 곡면에 근사하는 정

12면체의 각 면에 해당하는 수직단면 영상을 추출한 후 연결하여 2차원으로 전개하였다(그림 3B). 명도지수(L*)는 Uchida *et al.* (2000)이 제안한 것과 동일한 방법으로 상기 전류, 전압, 해상도 조건에서 설정한 CT 값(CT number)을 바탕으로 환산하였으며, 이에 따라 퇴적물(25~48)과 공극(50~55), 가스하이드레이트(>60)함유 구간으로 구분하였다. 가스하이드레이트 포화도는 영상 전체에서 가스하이드레이트가 차지하는 비율을 계산하여 백분율로 계산하였다.

3.4 물리검층 자료 분석

UBGH2 LWD(Logging-While-Drilling) 물리검층은 Schlumberger사의 장비를 이용하여 수행되었으며, 이 연구에서는 취득된 물리검층 자료 중 전기비저항(ring resistivity), P파 속도(P-wave velocity), 전기비저항 시추공(resistivity-at-bit: RAB) 영상, 감마선(gamma ray), 전밀도(bulk density), 공경(caliper) 검층자료를 이용하였다(Ryu *et al.*, 2012). 이 자료들은 Kim *et al.* (2013)에서 사용한 자료와 동일하다. 각 검층자료의 수직 해상도는 전기비저항은 5~8 cm, P파 속도는 61 cm, 감마선은 46 cm, 전밀도는 16 cm이다(Mrozewski *et al.*, 2009). 또한 전기비

저항과 P파 속도에 대하여 각각 아키 공식(Archie, 1942)과 Helgerud (1999)의 유효매질이론(effective medium theory; EMT)방법을 적용하여 계산한 가스 하이드레이트 포화도 자료(이하 Sh_Archie, Sh_EMT)는 제 2차 울릉분지 가스하이드레이트 시추 보고서에서 참조하였다(Ryu *et al.*, 2012). 전기비저항 시추공 영상에서 사인 곡선(sine curve)의 형태로 나타나는 단층 및 단열의 방위각(azimuth)과 경사각(dip angle)은 WellCAD 프로그램을 이용하여 분석하였다. 또한 이 영상을 이용하여 높은 전기비저항 값으로 인하여 시추공 영상에서 밝은 색으로 나타나는 저항성 단열(resistive fracture)과 낮은 전기비저항 값으로 인하여 어두운 색으로 나타나는 전도성 단열(conductive fracture), 그리고 거의 수평하고 밝게 나타나는 저항성 층(resistive bedding)등을 구분하였다.

4. 연구결과

4.1 물리검층자료 분석

UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11의 세 시추지점에서 취득한 물리검층 자료는 전기비저항 값에 따라 크게 3개의 검층단위(logging unit)로 구분하였다(그림 4, 5, 6). 검층단위 I은 전기비저항 값이 1 Ω m이하로 매우 낮은 최상부 천부 퇴적층 구간에 해

당한다. UBGH2-7 지점의 경우 해저면으로부터 약 18 mbsf 구간까지는 검층자료를 취득하지 못하여 코어자료를 바탕으로 구분하였다. 검층단위 II는 전기비저항 값이 전반적으로 매우 높고 변화가 큰 구간으로, 그 변동 폭과 최대 값이 시추지점에 따라 뚜렷이 대별된다. 검층단위 III은 낮은 전기비저항 값(평균 0~1 Ω m)을 보이며 변화가 거의 없는 하부구간에 해당된다. 각 시추지점의 공경검층 결과는 전반적으로 매우 양호한 시추공 상태를 지시하고 있으나, UBGH2-3 지점의 검층단위 I과 UBGH2-7 지점의 검층단위 III에서 일부 불량한 구간이 존재하기도 한다.

4.1.1 UBGH2-3 지점

UBGH2-3 지점의 검층단위 II는 심도 7 mbsf에서부터 104.5 mbsf까지 구간에 분포한다. 이 구간은 심도 45 mbsf를 기준으로 상부의 II-1과 하부의 II-2로 세분하였다. II-1의 경우 유사한 전기비저항과 P파 속도 값의 변화경향이 보이는 반면 II-2에서 전기비저항은 상부에 비해 전체적으로 증가하지만 P파 속도는 전체적으로 감소하는 경향을 보이는 것이 특징이다(그림 4B). 전기비저항 값은 II-1에서 약 6~15 Ω m이나 II-2에서는 평균 200 Ω m 정도로 크게 증가하며 최대 1135 Ω m에 달한다. 반면 P파 속도 값의 경우 II-1에서 대체로 1800~3000 m/s 범위에서

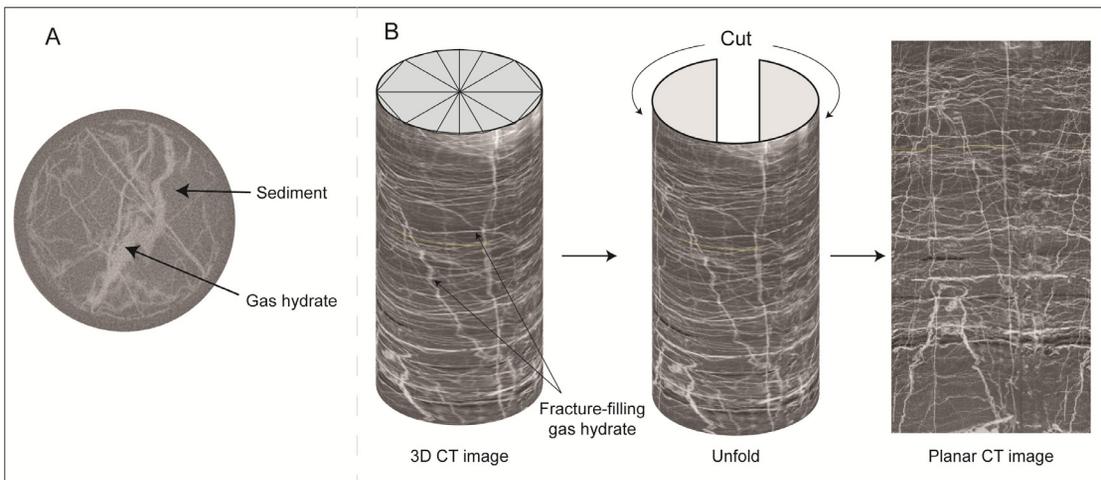


Fig. 3. (A) An example of pressure core X-CT raw image(UBGH2-3C-7P). (B) The concept of making planar CT image from 3D CT image(UBGH2-3C-7P). Note that the cylinder-shaped 3D CT image is considered to be a dodecagonal prism, each side of the prism is rolled out and merged.

변화하나 II-2에서는 약 1600~1800 m/s 범위로 감소한다. 따라서 전기비저항과 P파 속도 두 값이 전 구간에 걸쳐 서로 반대되는 증감 경향을 보인다. 또한 이를 바탕으로 계산된 Sh_Archie와 Sh_EMT도 유사한 경향을 보인다. 즉, II-1에서는 각각 Sh_Archie가 평균 80%와 Sh_EMT가 평균 60%로 큰 차이를 보이지 않지만 II-2에서는 Sh_Archie가 평균 90%를 상회하는 반면 Sh_EMT가 평균 45%로 감소하여 두 값이 큰 폭의 차이를 보인다. 감마와 전밀도 값은 심도가 깊어짐에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이는데, 특히 높은 전기비저항과 P파 속도 값을 보이는 구간에서는 각각 20~50 API와 1.0~1.4 g/cm³의 낮은 값을 보인다(그림 4B). 전기비저항 시추공 영상 분석결과 검층단위 II-1에서 평균 44°의 경사각과 평균 303.5°의 방위각을 갖는 전도성 단열들과, II-2에서는 평균 56° 경사각과 286.8°의 방위각을 갖는 저항성 단열들이 전반적으로 일정한 방향성을 갖고 발달함을 확인하였다(그림 4B).

검층단위 III는 심도 104.5 mbsf에서부터 174 mbsf까지의 구간에 분포한다. 전반적으로 0~1 Ωm의 낮은 전기비저항 값과 약 1500 m/s의 P파 속도

값을 보이며 변화양상을 거의 보이지 않는다(그림 4B). 감마와 전밀도 값의 경우 심도에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 코어자료에서 사질 퇴적물의 함량이 대략 45% 이상으로 확인된 심도 112 ~ 116 mbsf구간에서는 P파 속도 값이 약 1800 m/s까지 증가한다. 상부에서 평균 51.7°의 경사각과 평균 275.7°의 방위각을 갖는 전도성 단열들이 전반적으로 일정한 방향성을 갖고 발달함을 전기비저항 시추공 영상에서 확인하였다.

4.1.2 UBGH2-7 지점

UBGH2-7 지점의 검층단위 II는 심도 11 mbsf에서부터 90 mbsf까지에 분포하며, 세 개의 시추 지점 중 가장 얇다(그림 5B). 이 구간에서 전기비저항 값은 전반적으로 1~30 Ωm의 범위에서 변화하며, 일부 구간에서는 최대 55166.4 Ωm에 달하는 높은 값을 보이기도 한다. 한편 P파 속도 값은 1800 m/s에서 최대 3749 m/s의 범위에서 전기비저항 값과 유사한 변화 경향을 보인다. 계산된 가스하이드레이트 포화도는 Sh_Archie와 Sh_EMT가 각각 평균 70.3%와 35%로 Sh_Archie가 검층구간 전체에 걸

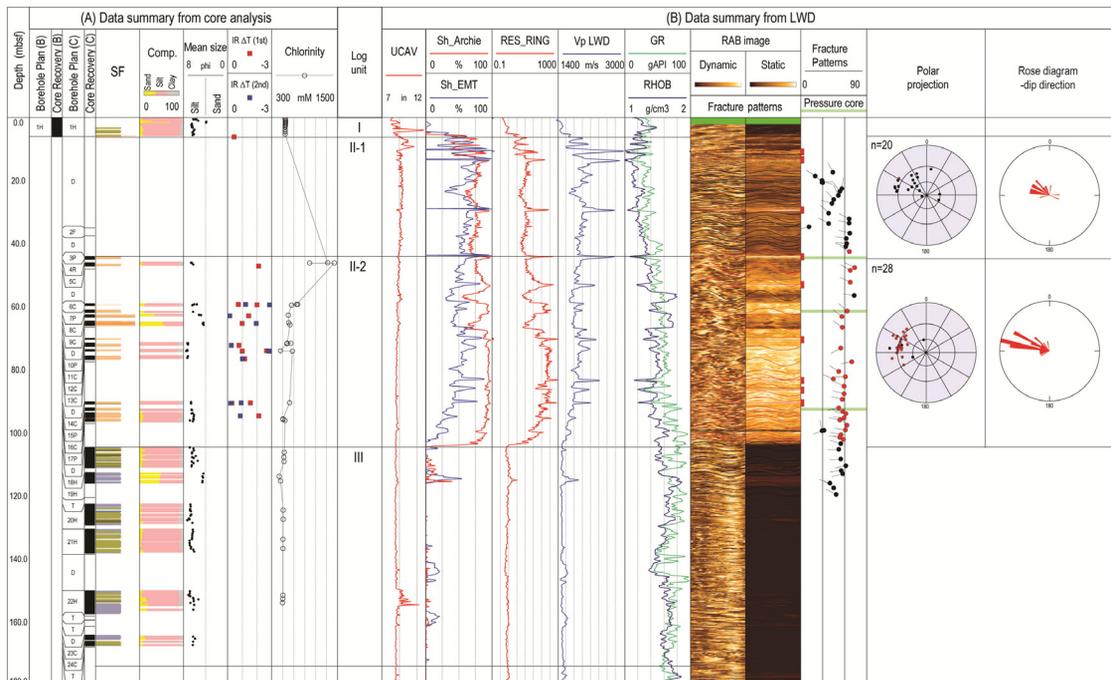


Fig. 4. Data summary of Site UBGH2-3, (A) Core analysis data. (B) LWD data (Modified from Kim *et al.*, 2013).

처 전반적으로 높게 나타난다. 감마와 전밀도 값 또한 심도가 깊어짐에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보이거나, 전기비저항 값과 P파 속도 값이 높은 구간에서 각각 40~80 API, 1.2~1.5 g/cm³의 낮은 값을 보인다(그림 5B). 전기비저항 시추공 영상에서는 평균 51.1°의 경사각을 갖는 저항성 단열들이 우세하게 발달하며 방위각은 일정한 변화 경향성을 보이지 않는다(그림 5B).

검층단위 III는 심도 90 mbsf에서 241 mbsf까지에 분포한다. 전반적으로 0~1 Ωm의 낮은 전기비저항 값과 약 1500 m/s의 P파 속도 값을 보인다(그림 5B). 또한 시추공 상태가 불량한 것으로 판단되는 일부구간에서는 Sh_Archie와 Sh_EMT가 미약하게 증가하는 것이 확인되었다.

4.1.3 UBGH2-11 지점

UBGH2-11 지점의 검층단위 II는 심도 9 mbsf에서 143 mbsf까지에 분포되어 있다(그림 6B). 이 구간에서 전기비저항 값은 1~5000 Ωm범위에서 전반적으로 크게 변동하는 경향을 보인다. 반면에 P파

속도 값은 약 1500 m/s의 일정한 값을 보이거나 일부 구간(심도 약 11, 24, 54, 66, 128 mbsf)에서는 약 2000 m/s를 상회하는 높은 값을 보인다(그림 6B). 이러한 차이는 Sh_Archie와 Sh_EMT에서도 뚜렷하게 관찰되어, P파 속도 값이 높지 않은 구간에서는 Sh_EMT 값이 Sh_Archie 값에 비해 현저하게 낮게 나타난다. 감마와 전밀도는 심도가 증가함에 따라 증가하나, 전기비저항 값과 P파 속도 값이 높은 구간에서 각각 40~80 API와 1.2~1.6 g/cm³의 낮은 값을 보인다(그림 6B). 전기비저항 시추공 영상에서는 전기비저항 값과 P파 속도 값이 높은 구간에서 거의 수평한 저항성 층이 발달하며 그 하부에는 저항성 단열이 나타나는 것이 특징이다(그림 6B). 또한 저항성 단열의 경사각은 천부에서 약 21.4°와 심부에서 72.7°로 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 보이며, 방위각의 변화는 일정한 경향성을 보이지 않는다.

검층단위 III는 심도 143 mbsf에서 180 mbsf까지에 분포하며, 전반적으로 낮은 전기비저항 값과 P파 속도 값을 보인다(그림 6B).

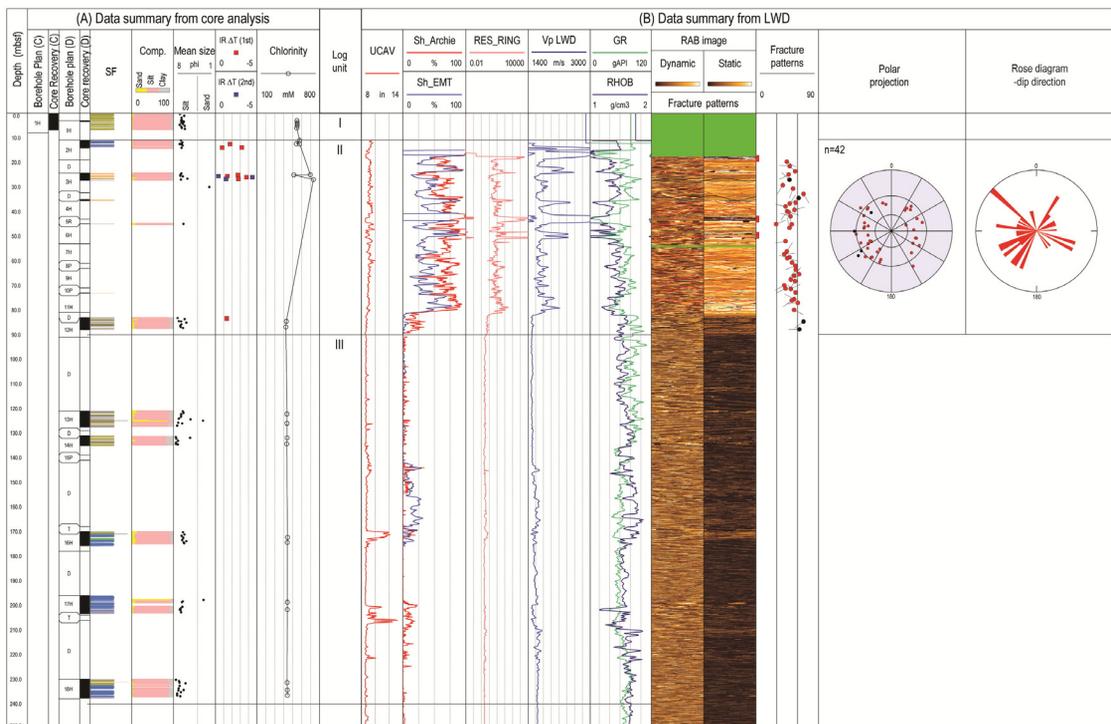


Fig. 5. Data summary of Site UBGH2-7, (A) Core analysis data. (B) LWD data (Modified from Kim *et al.*, 2013).

4.2 퇴적상

UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11 세 개의 시추 지점에서 취득한 시추 퇴적물을 퇴적 구조와 입도분포에 따라 총 9개의 퇴적상으로 분류하였다. 이들 퇴적상들은 다시 퇴적 작용과 시추코어 회수시의 교란 유무에 따라 반원양성 퇴적물, 저탁류 퇴적물, 교란 또는 파쇄 퇴적물, 암설류 퇴적물 등으로 구분하였다(표 1).

4.2.1 반원양성 퇴적물

반원양성 퇴적물에 속하는 퇴적상은 생물교란 니(bioturbated mud: BM)와 희미한 층리 니(crudely laminated mud: CLM), 생물교란 사질 니(bioturbated sandy mud: BSM) 퇴적상이다(표 2). 세 퇴적상은 공통적으로 실트질 퇴적물의 함량이 평균 80% 이상이며 정규분포에 가까운 입도분포를 보인다(표 3).

BM 퇴적상은 주로 밝은 회색, 밝은 녹회색 또는 올리브색을 띠는 니질 퇴적물로 이루어져 있다. 이 퇴적상은 코어 절개면 영상이나 X선 영상에서 타원형 또는 튜브(tube) 형태의 구과상(framboidal) 황

철석으로 충전된 생흔구조를 보이는 것이 특징이다(그림 7A). BSM 퇴적상은 BM 퇴적상과 유사하나 그보다 더 높은 사질 퇴적물 함량(평균 11.7%)을 보인다(표 3). 주로 올리브 혹은 어두운 올리브 색상을 보이는 니질 퇴적물로 이루어져 있는 CLM 퇴적상은 희미한 층리를 보이며, 잘 보존된 부유성 유공층이 종종 나타나기도 한다(그림 7B).

BM과 CLM 퇴적상은 각각 비교적 저층 산소농도가 풍부한 환경과 낮은 반원양성 환경에서 형성된 것으로 해석되며, BSM 퇴적상은 BM 퇴적상과 유사하나 저층류(bottom-current)에 의한 퇴적물의 재동 및 분급 영향을 받은 것으로 해석된다(Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999; Bahk *et al.*, 2000, 2005, 2011, 2013a, 2013b).

4.2.2 저탁류 퇴적물

저탁류에 의하여 형성된 퇴적상은 균질 니(homogeneous mud: HM), 층리 니 또는 사질 니(laminated mud and sandy mud: LM) 및 층리 사 또는 니질 사(laminated sand and muddy sand: LS)

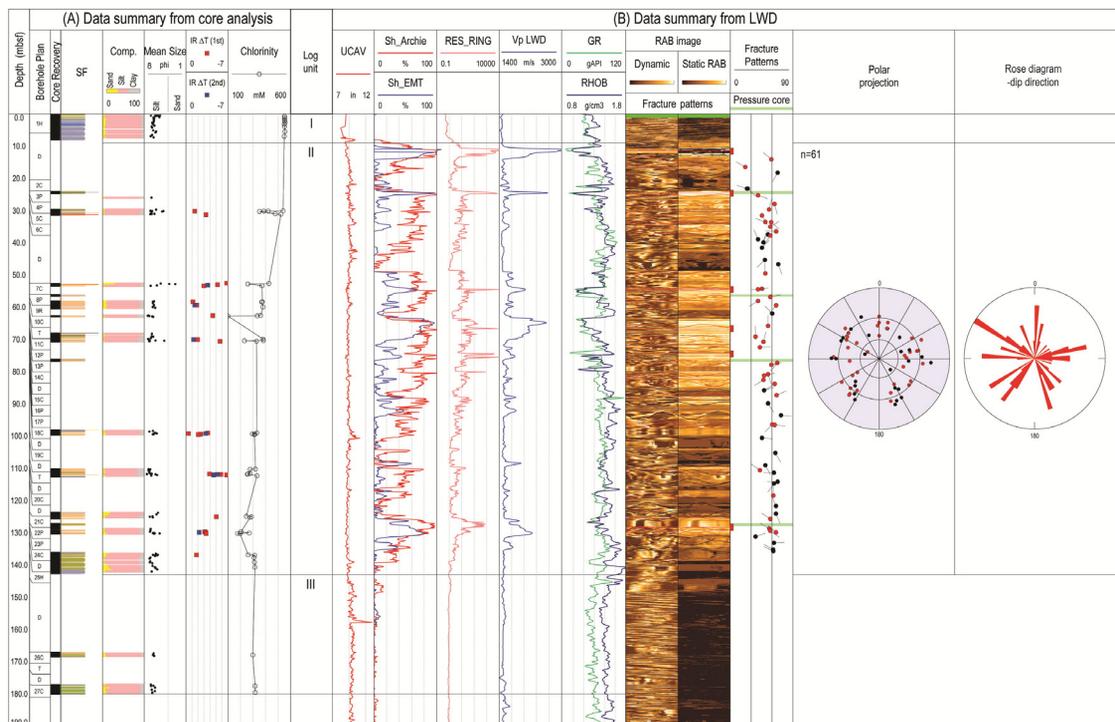


Fig. 6. Data summary of Site UBGH2-11, (A) Core analysis data. (B) LWD data (Modified from Kim *et al.*, 2013).

Table 2. Summary of sedimentary facies classification and interpretation.

Facies code	Color	Interpretation
Bioturbated mud (BM)		Hemipelagites formed under generally oxygenated bottom-water condition (Bahk <i>et al.</i> , 2000, 2011, 2013a, 2013b)
Bioturbated sandy mud (BSM)		Bottom-current reworked turbidites (Massé <i>et al.</i> , 1998; Bahk <i>et al.</i> , 2005, 2013a, 2013b)
Crudely laminated mud (CLM)		Hemipelagites formed under poorly oxygenated bottom-water condition (Oba <i>et al.</i> , 1991; Tada <i>et al.</i> , 1999)
Homogeneous mud (HM)		Fine-grained turbidites: Piper (1978) E ₂ (graded mud) division
Laminated mud/sandy mud (LM)		Fine-grained turbidites: Piper (1978) E ₁ (laminated mud) division
Laminated Sand/muddy sand (LS)		Coarse-grained turbidites: Bouma (1962) T _c or T _d division
Disintegrated mud (DITM)		Disintegrated BM or CLM by gas hydrate dissociation or gas expansion (Bahk <i>et al.</i> , 2011, 2013b).
Disintegrated sand (DITS)		Disintegrated HM, LM or LS by gas hydrate dissociation or gas expansion (Bahk <i>et al.</i> , 2011, 2013b).
Deformed mud (DM)		Deformation during coring or deformed by gas expansion
Mud-clast mud (MCM)		Muddy debrites (Lewis <i>et al.</i> , 1980; Stow <i>et al.</i> , 1984).

퇴적상이다(표 2).

HM 퇴적상은 대부분 밝은 회색을 띠는 니질 퇴적물로 이루어져 있으며 간혹 올리브 또는 녹회색을 띠기도 한다. 특별한 1차 퇴적구조들이 나타나지 않으나 상부로 갈수록 퇴적물의 입자가 세립해지는 정점이 층리가 보이고 최상부 구간에서 구조연니 층이 나타나기도 한다(그림 7B). 이 퇴적상의 하위에는 대개 LM 또는 LS 퇴적상이 나타나며 경계면은 점이적 이거나 뚜렷하고 편평한 형태를 보인다(그림 7B). 이 퇴적상은 Piper (1978)가 분류한 세립질 저탁암의 “E₂ (graded mud)” 구간으로 판단된다(Bahk *et al.*, 2011, 2013b).

LM 퇴적상과 LS 퇴적상은 주로 녹회색 또는 어두운 녹회색을 띠는 퇴적물로 이루어져 있다. 공통적으로 사질 엽리와 니질 엽리가 교호하며 수평 또는 사층리를 보이는 것이 일반적이며, LM의 경우 때로 단일한 사질 엽리로 나타나기도 한다(그림 7A & 7B). 하부 경계면은 뚜렷하고 편평하거나 불규칙한 침식면으로 나타난다. LS 퇴적상은 LM에 비해 50% 이상 보다 많은 사질 퇴적물을 포함하며, 입도 분포가 뚜렷한 양(+)의 왜도를 보인다(표 3).

이들 퇴적상은 Piper (1978)의 세립질 저탁암의 “E₁ (laminated mud)” 구간(LM)과 Bouma (1962)의 저탁암의 “T_c” 또는 “T_d” 구간(LS)에 해당하는

것으로 해석된다(Bahk *et al.*, 2011, 2013b).

4.2.3 교란 혹은 파쇄된 퇴적물

교란 혹은 파쇄된 퇴적물에 속하는 퇴적상은 교란 니 또는 사질 니(disintegrated mud and sandy mud: DITM), 교란 사 또는 니질 사(disintegrated sand and muddy sand: DITS), 변형 니(deformed mud: DM) 퇴적상이다(표 2). 이들은 공통적으로 녹회색 또는 어두운 녹회색을 띠는 퇴적물로 구성되어 있다. 퇴적물이 교란 또는 파쇄되는 원인은 크게 공극 내 가스팽창 또는 가스하이드레이트의 해리로 인한 파쇄, 그리고 피스톤 코어 시추시에 퇴적물이 코어 라이너 안쪽으로 흘러들어가는 “flow-in” 현상에 의한 수직변형으로 나눌 수 있다.

DITM과 DITS 퇴적상은 공통적으로 원래의 퇴적구조가 교란되어 파쇄된 퇴적물로 구성되어 있으며, 일부 구간에서는 가스하이드레이트의 해리로 인하여 수분을 많이 함유한 “soupy” 구조 또는 거품처럼 부풀어 오른 “mousse-like” 구조가 나타나기도 한다(그림 7D; Tréhu *et al.*, 2003). 이들은 입도분석 결과에서 차이를 보이는데, DITM 퇴적상은 주로 실트질 퇴적물의 평균 함량이 82.9%에 달하며 정규분포에 가까운 입도분포를 보이는 반면, DITS 퇴적상은 평균 48.9%의 사질 퇴적물로 이루어져 있으며 뚜

Table 3. Average grain-size statistical parameters of each sedimentary facies. For facies codes, see Table 2.

Facies code	Mean (Φ)	SD (Φ)	Sk (Φ)	Sand (wt.%)	Silt (wt.%)	Clay (wt.%)	Number of samples
BM	6.5	1.5	-0.02	6.2	87.4	6.5	68
BSM	6.4	1.8	-0.04	11.7	80.8	7.5	15
CLM	6.4	1.6	-0.05	9.3	84.0	6.7	9
HM	6.5	1.7	-0.05	9.0	82.9	8.1	21
LM	5.9	2.1	-0.17	22.2	71.8	6.0	3
LS	3.1	1.2	2.15	86.1	13.9	0.0	1
DITM	6.6	1.7	0.04	8.6	82.9	8.5	70
DITS	4.6	1.5	0.60	48.9	49.0	2.1	7
DM	6.2	1.6	0.00	13.2	81.1	5.7	22
MCM	6.5	1.5	-0.06	10.3	82.6	7.1	19

렷하게 양(+)의 왜도를 보인다(표 3).

DITM과 DITS 퇴적상은 가스하이드레이트의 해리로 인하여 심하게 교란된 퇴적상을 나타내는 것으로 퇴적 당시의 정확한 퇴적구조가 파악되지 않지만 입도구성과 분포의 유사성을 근거로 각각 BM 또는 CLM 퇴적상(DITM), LM 또는 LS 퇴적상(DITS)이 교란되어 형성된 것으로 해석된다(Bahk *et al.*, 2011, 2013b).

반면 DM 퇴적상에서는 뚜렷하게 수직으로 교란된 구조가 관찰되며, 이는 피스톤 코어 시추 시의 “flow-in” 현상으로 인하여 발생한 것으로 해석된다.

4.2.4 암설류 퇴적물

암설류에 의해 형성된 니질편 니(mud-clast mud: MCM) 퇴적상은 다양한 색상과 불규칙한 모양을 갖는 니질편(clast)들이 실트 또는 점토를 기질(matrix)로 하여 기질 내에 불규칙하게 산재해 있는 퇴적물로 이루어져 있다(그림 7C). 니질편과 기질의 구성 입자는 거의 유사하나 색상과 고화도에서 차이를 보인다. 니질편에는 생물교란의 흔적이 관찰되는데, 물리적인 변형을 받아서 일정한 방향으로 신장되어 나타나기도 한다. 하부 경계면은 비교적 뚜렷한 침식면을 보이는 것이 대부분이다. 이 퇴적상은 사면 사태에 기인한 암설류에 의해 퇴적된 것으로 판단된다(Lewis *et al.*, 1980; Stow *et al.*, 1984).

4.2.5 시추지점별 퇴적상 분포

전체 시추구간에 대한 코어 회수율이 낮고 가스하이드레이트 해리에 의한 퇴적물 변형에 의해 연속

적인 퇴적상 분포를 파악하는 것은 어려우나, 회수된 코어에서 확인된 각 시추지점별 퇴적상 분포는 아래와 같다.

UBGH2-3 지점의 검층단위 I은 BM 퇴적상으로 이루어져 있다(그림 4A). 검층단위 II-1에서는 회수된 코어가 없으며 검층단위 II-2는 주로 DITM과 DITS 퇴적상으로 구성되어 있다. 검층단위 III에서는 BM과 CLM 퇴적상과 함께 간헐적으로 DM 퇴적상이 나타난다. 따라서 이 지점은 전반적으로 반원양성 퇴적물이 매우 우세한 가운데, 검층단위에 따라 구간 II-2에서는 가스하이드레이트로 인하여 교란된 반원양성 퇴적물이, 검층단위 III에서는 반원양성 퇴적물과 함께 “flow-in” 또는 가스팽창으로 인해 교란된 반원양성 퇴적물이 특징적으로 나타난다.

UBGH2-7 지점의 검층단위 I은 주로 BM 퇴적상으로 구성되어 있다(그림 5A). 검층단위 II에서는 최상부에서 MCM 퇴적상, 그 하부로 DITM 퇴적상, 최하부에서는 HM과 LM, LS, BM 및 CLM 퇴적상이 확인되었다. 검층단위 III의 상부는 HM과 LM, LS, BM 및 CLM 퇴적상으로 구성되어 있으며, 하부에서는 MCM, BM 및 BSM 퇴적상이 주로 나타난다.

UBGH2-11 지점의 검층단위 I은 주로 DM과 BM 퇴적상으로 구성되어 있다(그림 6A). 검층단위 II에서는 DITM과 DITS 퇴적상이 주를 이루는 가운데 BM과 HM 퇴적상이 간헐적으로 확인된다. 검층단위 III에서는 BM과 BSM이 주를 이루며, 간혹 DM 퇴적상이 나타난다. 이 지점은 타 지점에 비하여 가스하이드레이트 해리로 인해 교란 혹은 파쇄된 정도가 상대적으로 약하여 생흔이나 층리구조 등 일차

퇴적구조가 비교적 자주 관찰된다.

4.3 적외선 열화상과 공극수 염소이온 농도 이상대

UBGH2-3, UBGH2-7 및 UBGH2-11의 세 시추 지점에서 확인한 적외선 온도 및 공극수 염소이온 농도 이상대는 공통적으로 검층단위 II에서만 나타난다. UBGH2-3 지점의 검층단위 II에서 총 24개의 온도 이상대가 확인되었다. 이들은 대부분 DITM이나 DITS 퇴적상에서 나타나며, ΔT는 평균 2.8°C이다(그림 4A). 공극수 염소이온 농도는 해저면 해수 염소이온 농도와 유사한 500~600 mM범위로 비교적 일정하나, 검층단위 II 상부 46.03 mbsf에서는 최대 1438 mM에 달하는 높은 이상치가 나타난다. UBGH2-7 지점의 검층단위 II의 11개 지점에서 온도 이상대가 확인되었으며, ΔT는 평균 2.24°C이다(그림 5A). 공극수 염소이온 농도는 UBGH2-3 지점

과 같이 해저면 해수 염소이온 농도와 유사하나, 검층단위 II의 상부 26.96 mbsf에서 최대 730.9 mM에 달하는 높은 이상치를 보인다. UBGH2-11 지점 검층단위 II의 온도 이상대는 총 30개 구간에서 확인되었으며, ΔT는 평균 3.52°C이다(그림 6A). 이 지점에서의 공극수 염소이온 농도는 앞의 두 지점과는 달리 심부로 가면서 약 300 mM까지 감소하는 경향을 보이며, 온도 이상대가 나타나는 구간에서는 배경 값보다 50~250 mM 더 낮아지는 탈염화(freshening) 현상이 나타난다.

4.4 압력코어 분석

UBGH2-3 지점에서 UBGH2-3C-3P (44.0~44.9 mbsf), UBGH2-3C-7P (61.0~61.9 mbsf), UBGH2-3C-15P (92.0~92.9 mbsf) 등의 압력코어가 성공적으로 회수되었다(그림 4B). 압력코어에 대한 감압실험에

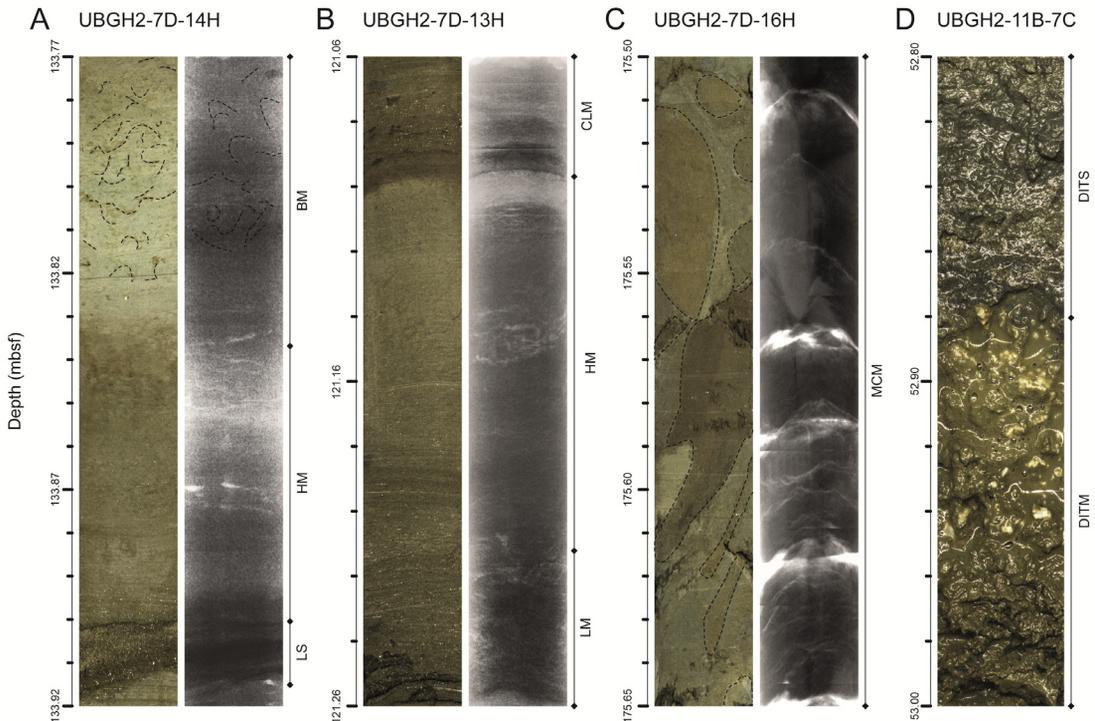


Fig. 7. Photographs and X-radiographs of typical sedimentary facies from selected core sections. (A) Sequence of LS, HM, and BM facies. Bioturbation mottles (photograph) and pyrite-filled burrow tubes (X-radiograph) are delineated by dash lines (B) Sequence of LM, HM, and CLM facies. Bright part(X-radiography) of the top of HM facies are diatom-ooze layer. (C) MCM facies. Mud-clasts (photograph) are delineated by dash lines. (D) DITS facies overlying DITM facies. Note the nodules and/or veins of partly dissociated gas hydrates in DITM facies. For facies codes on the right of X-radiographs, see Table 1.

서 규명된 가스하이드레이트 포화도(Lee *et al.*, 2013a), CT 영상분석을 통해 계산된 포화도와 Sh_EMT는 그 절대값에 있어 차이를 보이지만 모두 하부로 가며 감소하는 경향을 보인다. 그러나 Sh_Archie는 심도에 무관하게 약 80% 이상의 높은 포화도를 보인다(그림 8A). 특히 UBGH2-3C-3P 코어에서는 단괴 또는 수평방향으로 연속성이 우수한 단열충전 형태의 가스하이드레이트가 잘 발달하며(그림 9A), 이는 검층단위 II-2의 최상부 전기비저항 영상에 나타나는 수평에 가까운 저항성 단열 또는 층과 잘 일치한다(그림 4B). 또한 하부에서 회수된 두 개의 압력코어에서는 대부분 수직에 가까운 경사를 갖는 단열충전 가스하이드레이트가 잘 발달하며, 심도가 깊어짐에 따라 경사각이 커지고 단열의 두께가 감소하는 경향을 보인다(그림 9B, 9C). 전기비저항 영상에서도 UBGH2-3C-15P 코어가 회수된 검층단위 II-2의 하부에서는 약 60°의 경사각을 갖는 저항성 단열이 다수 관찰된다(그림 4B).

UBGH2-11 지점에서는 UBGH2-11B-3P (24.0-24.9 mbsf), UBGH2-11B-8P (56.0-56.66 mbsf), UBGH2-11B-16P (76.0-76.9 mbsf), UBGH2-11B-22P (127.0-127.9 mbsf) 등의 압력코어가 성공적으로 회수되었다(그림 6). 감압실험을 통해 계산한 가스하이드레이트 포화도는 약 10% 이하로 하부로 가며 감소하다가 최하부에서 증가하는 양상을 보인다. 영상분석을 통해 계산된 포화도와 Sh_EMT 또한 유사한 경향을 보인다(그림 8B). 이 중 UBGH2-11B-3P 코어에서는 비교적 작은 크기의 가스하이드레이트 단괴들이 다수 나타나며 특히 일부구간(약 200, 360, 400, 570, 680 mm)은 LM, LS와 상부의 HM 퇴적상 등

저탁류 퇴적물이 관찰된다(그림 9D). 그러나 이 사질 퇴적물에서는 공극을 충전하는 가스하이드레이트가 확인되지 않는다. 한편 UBGH2-11B-8P 코어에서는 층을 따라 얇게 퍼져있는 가스하이드레이트 단괴가 상부에 나타나며, 하부에서는 비교적 큰 가스하이드레이트 단괴가 관찰된다(그림 9E). UBGH2-11B-16P 코어에서는 육안으로 가스하이드레이트를 확인할 수 없었으며, 포화도 또한 낮다(그림 9F). UBGH2-11B-22P에서는 수직에 가까운 경사를 보이는 단열충전 가스하이드레이트가 관찰된다(그림 9G).

5. 토 의

본 연구의 대상인 UBGH2-3, UBGH2-7 및 UBGH2-11 세 시추 지점의 검층단위 II에서는 공통적으로 물리검층 자료상에서 매우 높은 전기비저항 값과 P파 속도 값이 가스하이드레이트 부존을 지시하고 있으며, 시추 코어 분석 자료에서는 온도 이상, 공극수 염소이온 농도 이상, 가스하이드레이트 해리에 의해 교란된 퇴적상(DITM, DITS) 등이 또한 가스하이드레이트 부존을 증명하고 있다. 또한 전기비저항 값과 P파 속도 값이 매우 높은 구간에서는 감마와 전 밀도 값이 높은 가스하이드레이트 포화도에 의해 배경값보다 낮게 나타나는 현상도 공통적으로 잘 나타난다(Kim *et al.*, 2013). 그러나 검층단위 II에서 나타나는 전기비저항 영상에서 확인되는 단열 발달 경향, Sh_Archie와 Sh_EMT의 변화 양상, 공극수 염소이온 농도 변화 양상, 퇴적상 분포 양상 등은 시추 지점별로 차이를 보인다. 본 연구에서는 이러한 시추 지점별 가스하이드레이트 산출 상태의 차이에 주

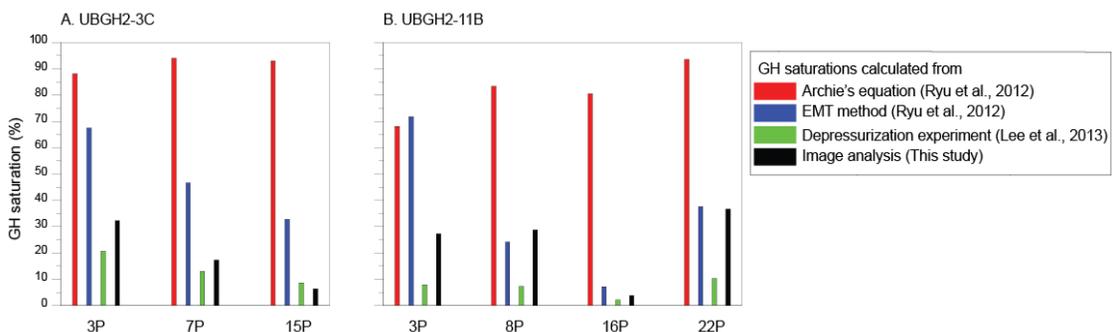


Fig. 8. Gas hydrate saturations of recovered pressure cores from Holes (A) UBGH2-3C and (B) UBGH2-11B.

목하여 그 조절 요인을 파악하고자 하였다.

선행연구에 따르면, 저탁류 퇴적물과 반원양성 퇴적물이 교호하는 지역에서는 일반적으로 저탁류 사질층의 공극을 충전하는 가스하이드레이트가 우세하게 부존하는 반면(Uchida *et al.*, 2004; Torres *et al.*, 2008), 침니 구조를 보이는 지점은 지층내부의 단열이 잘 발달하며 이를 통로로 하여 하부로부터 가스를 함유한 유체가 이동하며 단열충전 형태의 가스하이드레이트가 형성된다(Sassen *et al.*, 2001; Collett *et al.*, 2009). 이러한 단열들은 시추지점의 주향과 경사에 따라 유사한 방향성을 갖고 발달하는 것이 일반적이나, 단열이 퇴적물 내 공극수의 팽창 또는 가스하이드레이트 형성으로 인한 공극률 증가에 따른 서릿발 용기(frost heave) 등에 기인할 경우 유사한 방향성을 보이지 않는다(Cook *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2013b).

UBGH2-3 지점의 검층단위 II는 주로 교란된 반원양성 퇴적물로 이루어져 있으며, 단열을 충전하는 가스하이드레이트가 우세하게 나타난다(그림 4). 단층 및 단열의 방위각은 대략 서북서 방향으로 유사한 경향을 갖는 것이 확인되었다(그림 4B). 이 지점이 위치하는 울릉분지의 남서부에는 동해의 단층 단계에서 형성된 배사구조가 나타나며(Lee *et al.*, 2004),

특히 UBGH2-3 지점이 위치한 배사구조의 해저 능선을 따라 UBGH2-3 지점과 유사한 일련의 가스 침니 구조가 확인되었다(Bahk *et al.*, 2013a). 따라서 일정한 방향성을 보이는 UBGH2-3 지점의 단층 및 단열은 주로 동해의 단층과 관련한 지구조적 운동에 의해 형성된 것으로 해석된다. 검층단위 II-2 상부에 나타는 해수보다 높은 공극수 염소이온 농도 이상은 $100 \text{ mol m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도의 강한 메탄 플럭스가 지속되어 가스하이드레이트가 빠른 속도로 형성되었을 때 나타날 수 있는 것으로 해석된다(Torress *et al.*, 2004). 검층단위 II-2의 상부에서 확인된 저항성 층은 수평에 가까운 단열을 충전하는 가스하이드레이트를 지시하는 것으로 해석되며, 하부에서 나타나는 Sh_Archie와 Sh_EMT의 차이는 큰 경사각($>50^\circ$)을 갖는 단열을 충전하는 가스하이드레이트의 부존을 시사한다. 이러한 심도에 따른 단열 발달양상의 변화는 압력코어 자료에서도 확인된다. 검층단위 II-2의 최상부의 Sh_Archie와 Sh_EMT 값이 모두 약 75% 이상으로 높은 구간에서 회수된 압력코어 UBGH2-3C-3P(그림 4B)에는 수평에 가까운 형태의 단열을 충전하는 가스하이드레이트가 주로 분포하며(그림 9A), 그 하부에서 회수된 두 개의 압력코어에서는 공통적으로 수직에 가까운 단열이 우세하게

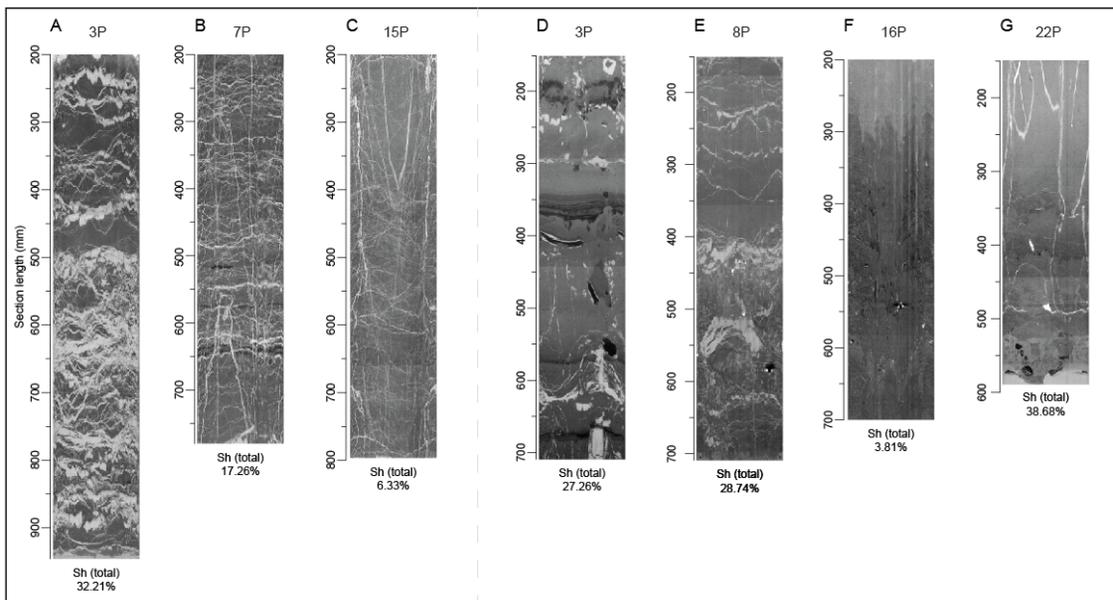


Fig. 9. Rolled out X-CT 3D images of pressure core sections from UBGH2-3 (A-C) and UBGH2-11 (D-G). Average gas hydrate saturation values calculated by image analysis are given at the bottom of each X-CT image.

발달하고 있다(그림 9B, 9C). Lee *et al.* (2013a)은 이처럼 낮은 심도에서 수평 단열이 보다 잘 발달하는 것은 하층 감소에 따라 서릿발 용기작용이 보다 쉽게 일어나기 때문으로 해석하였다. 이 시추지점의 검층단위 II-2 상부에서 주로 수평에 가까운($<7^\circ$) 단열충전 가스하이드레이트가 부존하며 그 하부로 높은 경사각을 갖는 단열충전 가스하이드레이트가 부존하는 것이 확인되었는데, 이는 Lee and Collett (2013)의 전기비저항 모델링을 통한 연구결과와도 잘 일치한다.

UBGH2-7 지점의 검층단위 II 역시 주로 반원양성 퇴적물로 이루어져 있으며, 단열을 충전하는 가스하이드레이트가 우세하게 나타난다(그림 5). 단층 및 단열의 방위각은 유사성을 보이지 않는데, 이는 단층 및 단열의 형성원인이 구조적인 요인보다 가스하이드레이트 형성으로 인한 수압파쇄(hydrofracturing)효과에 더 큰 영향을 받았기 때문으로 해석된다. 이 결과는 Kim *et al.* (2013)의 결과와 약간의 차이를 보이는데, 이는 단층 및 단열 경향 분석이 상대적으로 처리하는 사람의 주관에 반영하기 때문이며, 또한 분석에 이용한 소프트웨어가 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 이 지점에서 공극수의 염소이온 농도 분석결과는 전기한 UBGH2-3 지점과 유사하게 가스하이드레이트가 빠른 속도로 형성되었음을 시사하며, 상대적으로 메탄 플럭스가 강하게 작용한 것으로 해석된다. 검층단위 II에서 Sh_Archie와 Sh_EMT 두 포화도 값은 구간 전체에 걸쳐 차이를 보여 대부분 큰 경사각($>50^\circ$)을 갖는 단열충전 가스하이드레이트가 부존함을 시사한다.

대부분 반원양성 퇴적물로 이루어져 있는 UBGH2-11 지점의 검층단위 II에는 단열충전 가스하이드레이트가 우세하게 나타나며, 앞의 두 지점에 비하여 사질 퇴적물이 일부 확인되었다(그림 6). 그러나 이 사질 퇴적물에서 공극충전 가스하이드레이트는 확인할 수 없었으며, 사질 퇴적물의 하위에 단열충전 가스하이드레이트가 부존하는 경향이 반복된다. 단층 및 단열의 방위각은 유사성을 보이지 않는 점으로 미루어 이들 단층과 단열이 UBGH2-7 지점과 유사하게 수압파쇄에 의해 형성된 것으로 해석된다. 이 시추 지점에서 공극수의 염소이온 농도 분석결과에서는 앞의 두 지점과 같은 고염 이상대가 나타나지

않는 점으로 미루어 상대적으로 메탄 플럭스가 약했던 것으로 해석된다. 검층단위 II에서 Sh_Archie와 Sh_EMT 값 모두 사질층으로 판단되는 구간에서 높게 나타나며, 그 하위에서 큰 차이를 보이는 경향이 반복된다. 특히 사질층으로 해석된 구간에서 회수된 압력코어 UBGH2-11B-3P에서도 사질 퇴적물과 함께 단열충전 가스하이드레이트가 확인되었다(그림 9D). Ryu *et al.* (2012)의 압력코어 PCAT scan 결과와 비교해 볼 때, 이 사질 퇴적물에서 P파 속도가 높은 값을 보이지 않기 때문에 공극충전 가스하이드레이트가 부존하지 않으며 이는 전술한 불충분한 메탄 공급이 원인으로 해석된다. 또한 UBGH2-11B-8P는 사질층으로 판단되는 구간의 하위에서 회수되었으며 단괴 또는 단열충전 형태의 가스하이드레이트가 부존한다(그림 9D).

6. 결론

동해 울릉분지에서 침니 구조를 보이는 세 개의 시추지점 UBGH2-3, UBGH2-7, UBGH2-11에서 시추코어와 물리검층 자료를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 모든 시추지점의 검층단위 II에서 가스하이드레이트 부존이 확인되었다.
- 2) 침니 구조 내에 발달된 단열은 UBGH2-3 지점에서는 지구조적인 요인에 의하여, UBGH2-7과 UBGH2-11 지점에서는 가스하이드레이트 형성에 따른 수압파쇄에 의하여 형성되었다.
- 3) UBGH2-3과 UBGH2-7 지점은 높은 염소이온 농도로 미루어 볼 때 강한 메탄 플럭스가 지속되어 니질층의 단열을 충전하는 가스하이드레이트가 빠른 속도로 형성되었다.
- 4) UBGH2-11 지점에서 니질층에 단열충전 가스하이드레이트가 부존하는 것은 유사하지만, 상대적으로 불충분한 메탄공급이 원인이 되어 시추공 내에 존재하는 일부 사질 퇴적물 구간에서 공극충전 형태의 가스하이드레이트가 형성되지 못하였다.
- 5) 침니 구조 내에 발달된 퇴적물의 암상은 시추지점별 가스하이드레이트의 산상의 차이에 상대적으로 큰 영향을 주지 못하는 것으로 해석된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부의 “가스하이드레이트 부존평가 및 부존층 특성 연구”의 연구결과의 일부이며 자료취득에 도움을 준 Synergy호 승조원과 UBGH2 연구원들에게 감사드립니다. 또한 논문 심사를 해 주신 류병재 박사님과 익명의 심사위원님께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Petroleum Transactions of AIME*, 146, 54-62.
- Bahk, J.J., Chough, S.K. and Han, S.J., 2000, Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *Marine Geology*, 162, 459-477.
- Bahk, J.J., Lee, S.H., Yoo, H.S., Back, G.G. and Chough, S.K., 2005, Late Quaternary sedimentary processes and variations in bottom-current activity in the Ulleung Interplain Gap, East Sea (Korea), *Marine Geology*, 217, 119-142.
- Bahk, J.J., Um, I.K. and Holland, M., 2011, Core lithologies and their constraints on gas-hydrate occurrence in the East Sea, offshore Korea: Results from the site UBGH1-9. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1943-1952.
- Bahk, J.J., Yoo, D.G., Um, I.K., Lee, S.H. and Woo, K.S., 2013a, Sedimentation and seafloor mound formation in the southern slope of the Ulleung Basin, East Sea, Korea, since the Last Glacial Maximum. *Geosciences Journal*, 17, 151-161.
- Bahk, J.J., Kim, G.Y., Chun, J.H., Kim, J.H., Lee, J.Y., Ryu, B.J., Lee, J.H., Son, B.K. and Collett, T.S., 2013b, Characterization of gas hydrate reservoirs by integration of core and log data in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine Geology*, 47, 30-42.
- Blott, S.J. and Pye, K., 2001, GRADISTAT: A grain distribution and statistics package for analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.
- Borowski, W.S., Paull, C.K. and Ussler III, W., 1996, Marine pore-water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate. *Geology*, 24, 655-658.
- Boswell, R., Rose, K., Collett, T.S., Lee, M., Winters, W., Lewis, K.A. and Agena, W., 2011, Geologic controls on gas hydrate occurrence in the Mount Elbert prospect, Alaska North Slope. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 589-607.
- Bouma, A.H., 1962, *Sedimentology of Some Flysch Deposits*. Elsevier, Amsterdam.
- Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, *Marine Geology of Korean Seas*. 2nd edition. Elsevier, Amsterdam.
- Chun, J.H., Ryu, B.J., Lee, C.S., Kim, Y.J., Choi, J.Y., Kang, N.K., Bahk, J.J., Kim, J.H., Kim, K.J. and Yoo, D.G., 2011, Factors determining the spatial distribution of gas-charged sediments in the continental shelf off southeastern Korea. *Marine Geology*, 332-334, 27-39.
- Collett, T.S., Johnson, A., Knapp, C. and Boswell, R., 2009, Natural gas hydrates: a review. In: T.S. Collett., A. Johnson., C. Knapp. and R. Boswell. (eds.), *Natural gas-hydrate energy resource potential and associated geologic hazards*. AAPG Memoir, 89, 146-219.
- Cook, A.E., 2010, Gas hydrate-filled fracture reservoirs on continental margins. Ph.D. thesis, Columbia University, New York, NY, USA.
- Dillon, W.P., Danforth, W.W., Hutchinson, D.R., Drury, R.M., Taylor, M.H. and Booth, J.S., 1998, Evidence for faulting related to dissociation of gas hydrate and release of methane off the southeastern United States, in Henriot, J.-P., and Mienert, J., eds., *Gas hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society [London] Special Publication, 137, 293-302.
- Dillon, W.P., Nealon, J.W., Taylor, M.H., Lee, M.W., Drury, R.M. and Anton, C.H., 2001, Seafloor collapse and methane venting associated with gas hydrate on the Blake Ridge-Causes and implications to seafloor stability and methane release, in Paull, C.K., and Dillon, W.P., eds., *Natural gas hydrates: Occurrence, distribution, and detection*. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 124, 211-233.
- Helgerud, M.B., Dvorkin, J., Nur, A., Sakai, A. and Collett, T.S., 1999, Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: effective medium modeling, *Geophysical Research Letters*, 26, 2012-2024.
- Holland, M., Schultheiss, P., Roberts, J., and Druce, M., 2008, Observed gas hydrate morphologies in marine sediments. *Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates*.
- Horozal, S., Lee, G.H., Yi, B.Y., Yoo, D.G., Park, K.P., Lee, H.Y., Kim, Y., Kim, H.J. and Lee, K., 2009, Seismic indicators of gas hydrate and associated gas in the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications of heat flows derived from depths of the 2bottom-simulating reflector. *Marine Geology*, 258, 126-138.
- Hornbach, M.J., Saffer, D.M. and Holbrook, W.S., 2004, Critically pressured free-gas reservoirs below gashy-

- drate provinces. *Nature*, 427, 142-144.
- Jakobsen, M., Hudson, J.A., Minshull, T.A. and Singh, S.C., 2000, Elastic properties of hydrate-bearing sediment using effective medium theory. *Journal of Geophysical Research* 105, 561-577.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and the volcanic activity of the northeast Japan arc, in Tamaki, K., *et al.*, eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, scientific results*. College Station, Texas, Ocean Drilling Program, 127-128, 1311-1331.
- KIGAM, 2010, Non-destructive analyses, data integration and Data Base establishment of cores in KIGAM's Marine Core Repository (KMCR), Annual report.
- Kim, G.Y., Yi, B.Y., Yoo, D.G., Ryu, B.J. and Riedel, M., 2011, Evidence of gas hydrate from downhole logging data in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 28, 1979-1985.
- Kim, G.Y., Narantsetseg, B., Ryu, B.J., Yoo, D.G., Lee, J.Y., Kim, H.S. and Riedel, M., 2013, Fracture orientation and induced anisotropy of gas hydrate-bearing sediments in seismic chimney-like-structures of the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 47, 182-194.
- Kvenvolden, K.A., 1988, Methane hydrate - A major reservoir of carbon in the shallow geosphere?. *Chemical Geology*, 71, 41-51.
- Kvenvolden, K.A. and Lorenson, T.D., 2001, The global occurrence of natural gas hydrate, in *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection*. Geophysical Monograph Series, vol. 124, edited by C. K. Paull and W.P. Dillon, AGU, Washington, D.C. 3-18.
- Lee, G.H., Kim, B.Y., Chang, S.J., Huh, S. and Kim, H.J., 2004, Timing of trap formation in the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications for hydrocarbon accumulations. *Geosciences Journal*, 8, Issue 4, 369-380.
- Lee, J.Y., Jung, J.W., Lee, M.H., Bahk, J.J., Choi, J., Ryu, B.J. and Schultheiss, P., 2013a, Pressure core based study of gas hydrates in the Ulleung Basin and implication for geomechanical controls on gas hydrate occurrence. *Marine and Petroleum Geology*, 47, 85-98.
- Lee, J.Y., Kim, G.Y., Kang, N.K., Yi, B.Y., Jung, J.W., Im, J.H., Son, B.K., Bahk, J.J., Chun, J.H., Ryu, B.J. and Kim, D.S., 2013b, Physical properties of sediments from the Ulleung Basin, East Sea: Results from Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition, East Sea (Korea). *Marine and Petroleum Geology*, 47, 21-29.
- Lee, M.W. and Collett, T.S., 2009, Gas hydrate saturations estimated from fractured reservoir at site NGHP-01-10, Krishna-Godavari basin, India. *Journal of Geophysical Research*, 114, 1-13.
- Lee, M.W. and Collett, T.S., 2013, Characteristics and interpretation of fracture-filled gas hydrate - An example from the Ulleung Basin, East Sea of Korea, *Marine and Petroleum Geology*, 47, 168-181.
- Lewis, D.W., Laird, M. G. and Powell, R.D., 1980, Debris flow deposits of early Miocene age, Deadman Stream, Marlborough, New Zealand. *Sedimentary Geology*, 27, no.2, 83-118.
- Makogon, Y.F., 2010, Natural gas hydrates - A Promising source of energy, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2, 49-59.
- Massé, L., Faugères, J.C. and Hrovatin, V., 1998, The interplay between turbidity and contour current processes on the Columbia Channel fan drift, Southern Brazil Basin. *Sedimentary Geology*, 115, 111-132.
- McIver, R.D., 1982, Role of naturally occurring gas hydrates in sediment transport. *AAPG Bulletin*, 66, 789-792.
- Mrozewski, S., Guerin, G., Cook, A., Collett, T.S. and Boswell, R., 2009, Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II - LWD Methods: Proceedings of the Drilling and Scientific Results of the 2009 Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project Leg II. <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/2009Reports/LWDMethods.pdf>
- Nimblett, J. and Ruppel, C., 2003, Permeability evolution during the formation of gas hydrates in marine sediments, *Journal of Geophysical Research*, 108 (B9), 2420.
- Oba T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T., 1991, Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6, 499-518.
- Paull, C.K., Brewer, P.G., Ussler, W.III., Peltzer, E.T., Clague, D. and Rehder, G., 2003, An experiment demonstrating that marine slumping is a mechanism to transfer methane from seafloor gas-hydrate deposits into the upper ocean and atmosphere, *Geo-Marine Letters*, 22(4), 198-203.
- Piper, D.J.W., 1978, Turbidite muds and silts on deep sea fans and abyssal plains. In: Stanley, D.J., Kelling, G. (eds.), *Sedimentation in Submarine Canyons, Fans, and Trenches*. Dowden, Huchison and Ross, Inc., 163-176.
- Riedel, M., Collett, T.S., Malone, M.J. and the Expedition 311 Scientists., 2006, *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program, Volume 311*, Washington, D.C.
- Ryu, B.J., Riedel, M., Lee, Y.J., Kim, J.H. and Hyndman, R.D., 2006, Pockmarks and seismic blanking zones in the southwestern Ulleung Basin of the East Sea. *Geophysical Research*, Abstract, 8, 03267.
- Ryu, B.J., Riedel, M., Kim, J.H., Hyndman, R.D., Lee, Y.J., Cung, 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, 2012, The Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) Expedition Report KIGAM, Daejeon, 667.
- Sassen, R., Losh, S.L., Cathles III, L., Roberts, H.H., Whelan, J.K., Milkov, A.V., Sweet, S.T. and DeFreitas, D.A., 2001, Massive vein-filling gas hydrate: relation to ongoing gas migration from the deep subsurface in the Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 18, 551-560.
- Shine, K.P., Derwent, R.G., Wuebbles, D.J. and Morcrette, J.J., 1990, Radiative forcing of climate, in *Climate Change, the IPCC Scientific Assessment*, ed. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums, 41-68.
- Stow, D.A.V., 1984, Anatomy of debris-flow deposits, in Hay, W.W., and Sibuet, J.C., *et al.* (1984). Initial Reports, Deep Sea Drilling Project: Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 75, 801-807.
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I., 1999, Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of Japan Sea. *Paleoceanography*, 14, 236-247.
- Tréhu, A.M., Bohrmann, G., Rack, F.R., Torres, M.E., Bangs, N.L., Barr, S.R., Borowski, W.S., Claypool, G.E., Collett, T.S., Delwiche, M.E., Dickens, G.R., Goldberg, D.S., Gràcia, E., Guèrin, G., Holland, M., Johnson, J.E., Lee, Y.J., Liu, C.S., Long, P.E., Milkov, A.V., Riedel, M., Schultheiss, P., Su, X., Teichert, B., Tomaru, H., Vanneste, M., Watanabe, M. and Weinberger, J.L., 2003, Proceedings of Ocean Drilling Program, initial reports, 204. [CD-ROM]. Available from: Ocean Drilling Program, Texas A&M University, College Station, Texas 77845-9547, U.S.A.
- Torres, M.E., Tréhu, A.M., Cespedes, N., Kastner, M., Wortmann, U.G., Kim, J.H., Long, P., Malinverno, A., Pohlman, J.W., Riedel, M. and Collett, T.S., 2008, Methane hydrate formation in turbidite sediments of northern Cascadia, IODP Expedition 311. *Earth and Planetary Science Letters*, 271, 170-180.
- Torres, M.E., Kim, J.H., Choi, J.Y., Ryu, B.J., Bahk, J.J., Riedel, M., Collett, T.S., Hong, W. and Kastner, M., 2011, Occurrence of high salinity fluids associated with massive near-seafloor gas hydrate deposits. *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*.
- Uchida, T., Dallimore, S. and Mikami, J., 2000, Occurrences of natural gas hydrates beneath the permafrost zone in Mackenzie Delta, Visual and X-ray CT Imagery, In G.D. Holder and P.R. Bishnoi, Eds., *Gas hydrates, Challenges for the Future*. *Annals of the New York Academy of Science*, 912, 1021-1033.
- Uchida, T. and Tshji, T., 2004, Petrophysical properties of natural gas hydrate-bearing sands and their sedimentology in Nankai Trough. *Resources Geology*, 54, 79-88.
- 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 Korea*, 44, 645-655 (in Korean with English abstract).
- Yoo, D.G., Kang, N.K., Yi, B.Y., Kim, G.Y., Ryu, B.J., Lee, K.S., Lee, G.H., and Riedel, M., 2013, Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 47, 236-247
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 1995, Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan). *GSA Bulletin*, 107, 83-97.

투 고 일 : 2013년 10월 28일

심 사 일 : 2013년 10월 28일

심사완료일 : 2013년 10월 31일