

동부 심해 울릉분지의 천연가스 하이드레이트

류 병재¹⁾, 김 지훈²⁾, 정 부흥³⁾, 이 영주⁴⁾

Natural gas hydrates in the eastern deep-water Ulleung Basin

Byong-Jae Ryu, Ji-Hoon Kim, Bu-Heung Chung, Young-Joo Lee

Key words: Ulleung Basin (울릉분지), hydrocarbon (탄화수소), natural gas hydrate (천연가스 하이드레이트), seismic blanking zones (탄성과 공백대)

Abstract: Piston cores retrieved from the eastern part of the deep-water Ulleung Basin were analyzed to access the potential of hydrocarbon gas generation and natural gas hydrate (NGH) formation. Seismic data acquired in the study area were also analyzed to determine the presence of hydrocarbon gas and/or NGH, and to map their distribution. Core analyses revealed high total organic carbon (TOC) contents which favor hydrocarbon generation. The cores recovered from the southern study area showed the sufficient residual hydrocarbon gas concentrations for the formation of significant NGH. These cores also showed the cracks developed parallel to the bedding that suggest significant gas content in situ. A number of seismic blanking zones were observed on seismic data. They are identified as vertical to sub-vertical chimneys caused by the upward migration of pore fluid or gas, and containing of free gas and/or NGH. Often, they are associated with velocity pull-up structures that are interpreted to be the result of high-velocity NGH. The seismic data also showed several bottom-simulating reflectors (BSRs) that are associated with overlying NGH and underlying free gas. The distribution of blanking zones and BSRs would be impacted by the lateral differences of upward methane fluxes.

1. 서론

천연가스 하이드레이트(natural gas hydrate: NGH)는 고압·저온의 조건 하에서 물과 탄화수소(hydrocarbon) 화합물인 천연가스(주로 메탄: methane)가 결합하여 형성된 고체상 결합체로 영구동토(perma-frost) 지역과 심해저에 광범히 분포되어 있다. NGH는 막대한 매장량 때문에 미래의 에너지원으로 각광을 받고 있다. 그러나 NGH가 해리(dissociation)될 경우 지구온난화, 해저 산사태(submarine slide) 등의 자연재해(natural hazard)가 야기될 수도 있다.

NGH가 형성되기 위해서는 우선 충분한 양의 탄화수소 가스의 생성, 생성된 가스가 삼투(percolation)될 수 있는 투수성, NGH가 형성되고 성장할 수 있는 저온·고압의 조건과 공극(pore)이 필요하다[1,2,3,4,5]. 다시 말하자면 NGH 형성되기 위해서는 높은 지열 및 고압·저온 조건 이외에 0.5% 이상의 총유기탄소(total organic carbon: TOC) 함량, 30 - 300 m/10⁶year의 퇴적률(sedimentation rate), 10 ml/l of wet sediments 이상의 잔류 탄화수소 가스(residual hydrocarbon gas: RHCG)의 농도가 요구된다[4,5,6,7].

본 연구에서는 동부 심해 울릉분지에서 채취되고 취득된 피스톤 코어(piston core)와 다중채널 탄성과 탐사자료(multichannel seismic data)를 이용하여 연구지역에서의 탄화수소 가스의 생성과

NGH 형성 잠재력, 메탄의 상향 유동(upward methane flux)의 정도, 탄화수소의 부존을 시사하는 지시자(hydrocarbon indicator: HCI)와 NGH 지시자를 밝히고자 하였다.

2. 연구지역의 지질개요

울릉분지(Ulleung Basin)는 동해의 남서부에 발달되어 있으며, 연구지역은 심해(deep-water) 울릉분지의 동부에 위치하고 있다(Fig. 1). 울릉분지는 북쪽으로는 한국대지(Korea Plateau)와, 동쪽으로는 오키뱅크(Oki Bank)와, 서쪽으로는 한반도와 가파른 경사로, 남쪽으로는 일본열도(Japan Arc)와 완만한 경사로 접하고 있다. 분지

- 1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: bjryu@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3211 Fax: 042-868-3417
- 2) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: save@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3155 Fax: 042-868-3417
- 3) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: bhchung@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3401 Fax: 042-868-3417
- 4) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: yjl@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3209 Fax: 042-868-3417

의 평원(basin floor)은 북동부에 위치한 화산기원의 섬과 해산을 제외하고는 대체로 편평하다. 울릉분지는 울릉도와 독도 사이에 발달된 'Korea Gap'을 통해 일본분지(Japan Basin)와 연결된다[6].

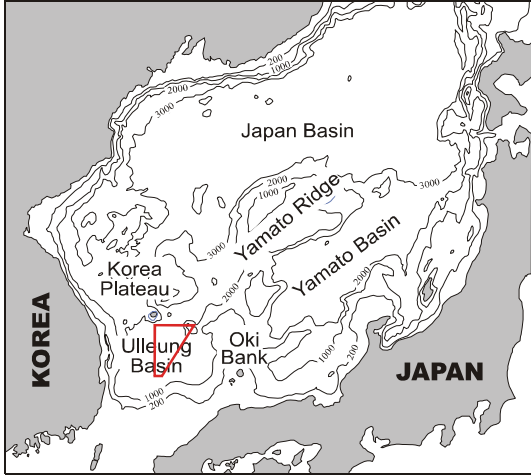


Fig. 1. Location map of the study area (red box). Contour line: bathymetry in meter.

탄성과 탐사자료 해석에 의하면 울릉분지에 분포된 제3기(Tertiary) 퇴적층의 두께는 분지의 중앙부에서는 약 5 km 정도이나[7], 분지의 남쪽으로 가면서 두꺼워져 최대 10 km에 달한다[8].

3. 연구 자료와 방법

연구지역 퇴적층에서의 탄화수소 생성 잠재력, 메탄의 상향유동 정도, NGH 및 탄화수소 가스의 부존을 지시하는 지질학적·지화학적 지시자를 규명하기 위해 연구해역에서 채취한 5개의 피스톤 코어를 이용하여 퇴적상과 퇴적구조, 퇴적물에 포함된 TOC 함량 및 RHCG의 농도와 기원 등을 분석하였다.

NGH 및 탄화수소의 부존을 지시하는 지구물리학적 지시자를 규명하기 위해 2404 L-km의 탄성과 탐사자료를 분석하여 탄성과 공백대(seismic blanking zone), BSR(bottom-simulating reflector), 폭마크(pockmark) 등을 확인하였으며, 이들의 부존 양상을 파악하고 분포를 mapping 하였다.

코어에 나타난 균열(crack) 및 탄성과 자료에서 확인된 HCI와 NGH와의 관계를 밝히기 위해 연구지역의 NGH-안정영역(NGH-stability zone)에 대한 분석과 함께 탄성과 속도분석을 수행하였다.

4. 연구 결과

연구지역에서 채취한 5개 코어에서 선택한 497개 시료의 평균 TOC 함량은 1.73 - 2.93%로 측정되었으며, 분석된 대부분의 시료는 [4]가 제시한 NGH 형성에 필요한 0.5% 이상의 TOC 값을 보였다. 이는 연구지역 코어 퇴적물이 양호한 탄화수소 생성 및 NGH 형성 잠재력을 가진다는 것을 지시한다[e.g., 4, 9]. 또한 울릉분지는 탄화수소 생성에 필

요한 높은 퇴적률과 지열류량(heat flow)을 가진다[e.g., 10, 11]. 이와 같이 높은 TOC 함량, 퇴적률 및 지열류량이 보다 깊은 심도의 퇴적층에 나타날 경우 상당한 탄화수소 가스가 생성될 것으로 판단한다.

연구지역 남부에서 채취된 2개 코어의 하부 구간에서 RHCG의 농도가 최대 161.87 ml/l of wet sediment로 측정되었으며, 퇴적물에 포함된 RHCG는 거의 대부분 생물기원의 메탄으로 구성되어 있다. 이는 이들 코어가 회수된 구간에서 NGH가 형성될 수 있음을 나타내는 지표이다[e.g., 8]. 또한 이들 코어에서 층리면과 수평하게 발달된 균열(crack)을 확인하였다(Fig. 2). 균열이 나타나는 구간이 NGH-안정영역 내에 위치하는 점으로 미루어 코어회수 과정에서의 온도·압력 변화에 의해 NGH로부터 해리된 가스의 팽창(expansion)에 의해 형성된 것으로 판단된다. [12]의 SMI(sulfate methane interface) 분석결과로 미루어 연구지역 북부에서 채취된 코어에서 RHCG의 농도가 낮고 가스 팽창에 의한 균열이 나타나지 않는 것은 메탄 생성작용(methanogenesis)이 코어가 회수된 구간보다 깊은 심도에서 일어나기 때문인 것으로 분석된다. 또한 이 분석결과는 연구지역 북부가 남부에 비해 메탄의 상향유동 정도가 낮다는 것을 지시한다[e.g., 13].

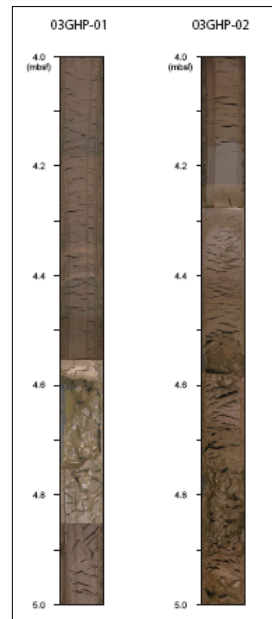


Fig. 2. Cracks in the study cores.

탄성과 공백대는 가스 또는 유체의 상향 이동에 의해 탄성과 단면도 상에 수직 또는 반수직의 기둥(column 또는 chimney) 형태로 나타나는 대표적인 탄성과 HCI이다. 주로 연구지역 중앙부와 북서부에 나타나는 이들 공백대는 간혹 해저면까지 발달되기도 하며, 속도 끌어올림 구조(velocity pull-up structure)를 보이기도 한다(Fig. 3). 이 구조는 높은 탄성과 속도를 가지는 NGH의 포화에 기인한 것으로 분석된다. 2007년 인접지역의 공백대에서 코어링(coring)과 심부시추(deep drilling)를 통해 확인된 NGH의 부존은 우리의 분석을 뒷받침한다.

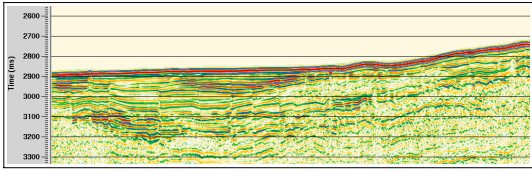


Fig. 3. Seismic blanking zones (on right part of the figure) and BSR (at 3100 ms two-way traveltime on left part) in the study area.

BSR은 NGH층과 하위에 자유가스로 포화된 퇴적층과의 경계면에서 탄성과 속도와 밀도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반한 큰 진폭의 반사면으로[14], 주로 연구지역의 남동부에 나타난다(Fig. 3). BSR은 2000년대 중반까지 NGH 부존을 지시하는 가장 보편적이고 중요한 증거로 인식되었다. 그러나 근래 자유가스가 BSR에 보다 많은 영향을 미친다고 발표되고 있다[e.g., 15]. BSR 상부에 나타나는 탄성과 속도의 증가는 NGH의 부존을 지시하는 것으로 분석된다.

폭마크는 심부로부터 이동되는 탄화수소 가스 또는 유체의 분출에 의해 해저면 부근의 연약한 퇴적층이 함몰되면서 해저면에 나타나는 탄성과 HCl로, [16]은 심해저면에 발달된 폭마크는 NGH 안정영역 하위에 자유가스가 부존되었음을 지시하는 일반적인 지시자로 이용된다고 보고하였다. 연구지역에 나타나는 폭마크는 공백대와 BSR에 비해 상대적으로 산발적인 분포양상의 보인다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행한 산업자원부 출연연구사업인 ‘가스 하이드레이트 탐사 및 개발 연구’ 과제에서 지원되었습니다. 이 연구 과제에 참여한 연구원과 탐해-2호 선박직원들께 감사드립니다.

References

- [1] Davis, A.M., 1992. "Shallow gas: an overview." In: Methane in Marine Sediments (Davis, A.M. ed.), Pergamon Press, pp. 1077-1079.
- [2] Judd, A.G. and Hovland, M., 1992. "The evidence of shallow gas in marine sediments." In: Methane in Marine Sediments (Davis, A.M. ed.), Pergamon Press, pp. 1077-1079.
- [3] Kvenvolden, K.A. and Lorenson, T.D., 2001. "The global occurrence of natural gas hydrate." In: Natural Gas Hydrates Occurrence, Distribution and Detection (Paull, C.K. and Dillon, W.P. eds.), AGU, pp. 3-18.
- [4] Sloan, E.D. Jr., 1998. "Clathrate Hydrates of Natural Gases (2nd Ed.)." Marcel Decker, New York, 705 p.
- [5] Wille, C.W., 2005. "Sound Images of the Ocean." Springer, 471 p.
- [6] Park, C.H., 2007. "Hydrography of the

- East Sea." In: Lee, K.-S. and Kim, W.-S. (Eds.), Ocean Atlas of Korea - East Sea -, National Oceanographic Research Institute, Incheon, pp. 66-75.
- [7] Park, C.-H., Kim, H.-J., Yang, C.-S., Suk, B.-C. and Isezaki, N., 1996. "Crustal structure of the Ulleung Basin, the East Sea (Japan Sea), from gravity and ocean bottom seismometer data." J. Geol. Soc. Korea, Vol. 32, pp. 276-290.
- [8] Park, K.S., 1992. "Geologic structure and seismic stratigraphy of the southern part of the Ulleung Basin." In: Sedimentary basins in the Korean Peninsular and adjacent seas (Chough, S.K. ed.), Hanlimwon Publ., pp. 40-59
- [9] Burtner, R.L. and Warner, M.A., 1984. "Hydrocarbon generation in lower Cretaceous Morwy and Skull Creek Shale." In: Hydrocarbon source rocks of the greater Rocky Mountain region (Woodward, J., Meissner, F. and Clayton, J. eds.), Rock Mountain Association of Geologists., pp. 449-468.
- [10] Park, M.-H., Kim, I.-S. and Shin, J.-B., 2003. "Characteristics of the late Quaternary tephra layers in the East/Japan Sea and their new occurrences in the western Ulleung Basin sediments," Mar. Geol., 203, pp. 135-142.
- [11] Pollack, H.N., Hunter, S.J. and Johnson, J.R., 1993. "Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set." Rev. Geophys. 31, pp. 267-280.
- [12] Kim, J.-H., Park, M.-H., Ryu, B.-J. and Chang, H.W., 2004. "The reduction stage and SMI depth in the Ulleung Basin, the East Sea." 대한지질학회 59차 추계학술발표회 초록집, pp. 92.
- [13] Borowski, W.S., Paull, C.K. and Ussler, W.III., 1996. "Marine pore water sulfate profiles indicate in situ methane flux from underlying gas hydrate." Geology, 24, pp. 655-658.
- [14] Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L., 1979. "Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises." AAPG Bulletin, 63, pp. 2204-2213.
- [15] Haacke, R.R., Westbrook, G.K. and Hyndman, R.D., 2007. "Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector." Earth Planet. Sci. Lett., 261, pp. 407-420.
- [16] Max, M.D., Pellanbarg, R.E. and Hurdle, B.G., 1997. "Methane Hydrates, A Special Clathrate: Its Attributes and Potential." U.S. NRL Rept. NRL/MR/6101-97-7926, NRL, Washington, 74 p.