

동해 울릉분지 남서부 천부 퇴적층에서의 가스 생성 및 천연가스 하이드레이트 형성 잠재력과 이들의 부존 증거

류병재¹⁾, 이영주²⁾, 김지훈³⁾, M. Riedel⁴⁾, R.D. Hyndman⁵⁾, 김일수⁶⁾

Potential of gas generation and/or natural gas hydrate formation, and evidences of their presence in near seafloor sediments of the southwestern Ulleung Basin, East Sea

Byong-Jae Ryu, Young-Joo Lee, Ji-Hoon Kim, M. Riedel, R.D. Hyndman, Ilsoo Kim

Key words: natural gas hydrate (천연가스 하이드레이트), total organic carbon (총유기탄소), 잔류 탄화수소), bottom simulating reflector (해저면 모방반사면), seismic blank zone (탄성과 공백대)

Abstract: Regional geophysical surveys and geological studies on natural gas hydrate (NGH) in the East Sea were carried out by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) from 2000 to 2004. 16 piston cores, 2270 L-km of multi-channel reflection seismic (MCRS) data and 730 L-km of 3.5 kHz Chirp data obtained from the southwestern part of the deep-water Ulleung Basin were analyzed in this study. In piston cores, cracks generally developed parallel to bedding suggest significant gas content. The core analyses showed high total organic carbon (TOC) content, sedimentation rate and heat flow of sediments. These are in favor of the generation of substantial biogenic methane, which can form the NGH within the stability zone of the near seafloor sediments in the study area. The cores generally show also high residual hydrocarbon gas concentrations for the formation of natural gas hydrates. The geophysical indicators of the presence of gas and/or NGH such as bottom simulating reflectors (BSRs), seismic blank zones, pockmarks and gas seeping features were well defined on the MCRS and Chirp data.

subscript

NGH : natural gas hydrate
MCRS : multi-channel reflection seismic
RHCG : residual hydrocarbon gas
TOC : total organic carbon
BSR : bottom simulating reflector

1. 서론

해저 퇴적물 내에 상당한 양이 포함되어 있는 메탄(methane) 가스는 대부분 천부 퇴적층에서 박테리아에 의한 생물분해 작용에 의하여 또는 심부에서 열분해에 의하여 생성된다. 심부에서 생성된 열기원의 가스는 상향 이동되어 천부 퇴적층에 집적(accumulation) 되기도 한다. 유기 숙성작용(organic diagenesis)이 일어나기 위해서는 30 m/10⁶yr 정도의 빠른 퇴적률이 요구되며, 가스가 생성되기 위해서는 총유기탄소(TOC) 함량이 0.5% 이상이어야 한다[3]. 생성된 가스가 고압·저온의 조건 하에서 천연가스 하이드레이트(NGH)로 상변화하기 위해서는 퇴적물 내 잔류 탄화수소 가스

(RHCG)의 농도가 10 ml/l of wet sediment 이상이어야 한다[3].

가스 또는 NGH의 부존을 간접적으로 지시하는

-
- 1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: bjryu@kigam.re.kr
Tel: (042)868-3211 Fax: (042)862-7275
 - 2) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: yjl@kigam.re.kr
Tel: (042)868-3209 Fax: (042)862-7275
 - 3) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: save@kigam.re.kr
Tel: (042)868-3276 Fax: (042)862-7275
 - 4) University of McGill
E-mail: mriedel@epc.mcgill.ca
Tel: 518-398-3671 Fax: 514-398-4680
 - 5) Geological Survey of Canada
E-mail: rhyndman@nrcan.gc.ca
Tel: 250-363-6428 Fax: 250-363-6565
 - 6) 한국석유공사 국내탐사팀
E-mail: ilsookim@knoc.co.kr
Tel: (042)868-3362 Fax: (042)861-0066

지표(또는 지시자: indicator)들은 시추 과정에서 이수분석(mud analysis)과 공경검층(well logging), 퇴적물의 온도 측정, 퇴적물과 간극수에 대한 지질·지화학적 분석, 탄성과 음향특성기 등 지구물리 탐사자료에 대한 분석을 통해 확인할 수 있다[1, 2, 3, & 4].

2. 연구지역의 지형과 지질

연구해역은 동해에 발달되어 있는 울릉분지(Ulleung Basin)의 남서부에 위치하고 있다(Fig. 1). 동해의 남서부에 발달되어 있는 울릉분지는 북쪽으로 한국대지(Korea Plateau), 서쪽으로 오키뱅크(Oki Bank)에 의하여 일본분지(Japan Basin)와 야마토분지(Yamato Basin)와 구별되며, 서쪽으로는 한반도의 경사가 가파른 대륙사면과 접하고 남쪽으로는 일본열도와 완만한 경사로 접하고 있는 수심이 깊은 볼 형태(bowl-shaped)를 가지는 퇴적분지이다.

동해는 북동부에 위치한 일본분지 쪽에서 전기 올리고세(Oligocene)부터 후기 올리고세까지 해양판의 확장(spreading)에 의하여 형성되기 시작하였으며[5], 중기 마이오세(Miocene)의 말까지 활발한 확장이 이루어졌다[6]. 일본분지가 확장되는 동안 동해의 남부에서는 지각팽창(crustal extension)과 이에 수반한 지각박화(crustal thinning)에 의하여 울릉분지와 야마토분지가 형성되기 시작하였다[5]. 탄성과 탐사자료에 의하면 울릉분지에 발달된 퇴적층의 두께는 중앙부에서 약 5 km 정도이나[7], 남쪽으로 가면서 두꺼워져 최대 10 km에 달한다[8].

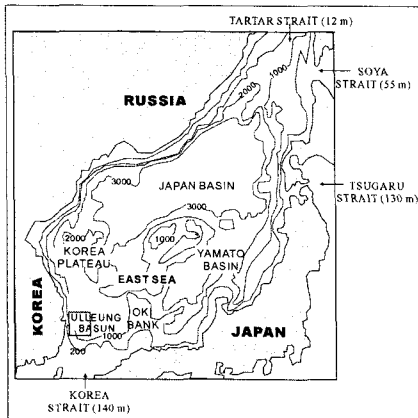


Fig. 1. Location map of the study area (red box). Contour line: bathymetry in meter.

3. 연구 자료와 방법

연구해역 해저면 부근의 천부 퇴적층(near seafloor sediment)에서의 (메탄)가스의 생성과 NGH 형성 잠재력을 파악하고, 가스 또는 NGH의 부존을 지시하는 지표를 확인하기 위하여 한국지질자원연구원의 탐해-2호를 이용 16개 지점(수심: 790 ~ 2179 m)에서 획득한 5 ~ 8 m 길이의 피스톤 코어를 분석하였다. 퇴적률 계산을 위하여 연

구해역 북쪽에서 채취한 2개 코어를 추가로 이용하였다. 또한 가스 또는 NGH의 부존을 간접적으로 지시하는 탄성과 지표를 확인하기 위하여 2270 L-km의 MCRS 탐사자료와 730 L-km의 고해상 Chirp 자료를 해석하였다.

채취한 코어를 탐해-2호 선상에서 1.2 ~ 1.6 m 간격으로 절단하였으며, 퇴적물에 포함된 RHCG 및 간극수(interstitial water) 분석을 위하여 시료를 sampling하고 용기에 넣었다. Sampling한 시료와 절단된 코어를 실험실에서 추가 분석을 위하여 저온(4 °C) 상태로 보관·운반하였다. 실험실에서 코어를 2등분 하였으며, 절단된 코어 중 하나는 보관용 코어로 다른 하나는 퇴적학 및 지화학 분석을 위한 연구용 코어로 사용하였다.

가스 또는 NGH와 관련된 퇴적구조와 퇴적상(sedimentary facies)의 변화양상을 살펴보기 위하여 코어 관찰과 함께 기본적인 퇴적학적 분석을 수행하였다. 가스의 생성과 NGH의 형성 잠재력을 파악하기 위하여 퇴적물에 포함되어 있는 TOC 함량(4개 코어 422 시료)과 RHCG의 농도(16개 코어 32 시료)를 Rock Eval-6와 GC를 이용 분석하였다. 퇴적물은 전기한 2개 코어의 8개 구간으로부터 선별·채집한 부유성 유공충(각 시료 당 800 ~ 1500 개체)에 대한 탄소(¹⁴C) 연대 측정결과를 이용 계산하였으며, 이를 위해 AMS를 이용하였다. 퇴적물에 포함된 유기물과 RHCG의 기원을 밝히기 위하여 Rock Eval-6 및 CHN-600을 이용 TOC/N ratio(4개 코어 422개 시료)와 IRMS를 이용한 탄소 동위원소(^{δ¹³C_{org}}; 6개 코어 7 시료) 분석을 수행하였다. 이밖에 코어가 채취된 지점에서의 NGH 부존 여부, SMI(sulfate-methane interface) 침도 및 메탄의 유동(flux) 정도를 알아보기 위하여 간극수에 포함된 염소 이온(Cl⁻)과 황산염 이온(SO₄²⁻)의 농도를 이용하여 분석하였다.

가스 또는 NGH의 부존을 지시하는 BSR과 탄성과 공백대(seismic blank zone)를 확인하기 위하여 air-gun system을 이용하여 취득한 MCRS 탐사 자료를 Promax 2D와 Globe Claritus System을 이용하여 처리하였다. 특히 NGH에 의한 나타나는 BSR을 명확하게 밝히기 위하여 속도, 극성(polarity), 반사계수 등에 대한 분석과 함께 thermal modeling을 수행하였다. 공백대의 경우 pull-up structure의 확인과 함께 구간속도를 분석하였다. 또한 가스 또는 NGH와 관련하여 해저면에 나타나는 pockmark를 보다 명확하게 확인하기 위하여 Chirp 자료를 분석하였다. 이밖에 [9]의 가스와 관련하여 해저면에 나타나는 지형에 대한 연구결과를 참고하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 가스 생성과 NGH 형성 잠재력

AMS 14C-연대 측정결과와 [10]에 의하여 발표된 테프라층(tephra layer)에 대한 ¹⁴C-연대 측정결과를 이용하여 분석한 코어가 채취된 구간의 퇴적률은 각각 71 ~ 253 m/10⁶yr(평균 168 m/10⁶yr), 62 ~ 640 m/10⁶yr(평균 190 m/10⁶yr)이다. 코어가 채취된 해역의 천부 퇴적층은 [3]이 제시한 유기 속성작용이 일어나기 위한 퇴적률을 충족하는 것으로 분석된다. 퇴적률에 대한 연구는

극히 제한된 지역과 구간을 대상으로 수행되었다. 따라서 향후 울릉분지 전역의 퇴적작용에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다 생각한다.

선택된 4개 코어로부터 선별한 422개 시료에 대한 Rock-Eval 분석결과, 퇴적물에 포함된 TOC 함량은 0.02 ~ 4.50%(평균 1.69%)로 측정되었다(Fig. 2). 조립질 입자와 패각으로 구성된 구간을 제외한 대부분의 시료(약 91%)는 0.5% 이상의 TOC 함량을 보인다. 코어 퇴적물의 TOC 함량을 기준으로 할 때, 연구해역에 발달된 천부 퇴적물은 가스를 생성시킬 수 조건과, [3]이 제시한 NGH 형성에 필요한 기본 요건을 만족하는 것으로 분석되었다. TOC/N ratio과 Rock-Eval 분석결과 코어 퇴적물에 포함된 유기물은 해양조류 기원으로 분석되었다.

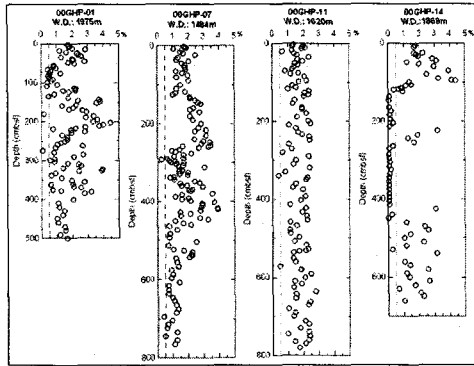


Fig. 2 TOC contents of the core sediments.

16개 코어의 32개 구간에서 sampling된 퇴적물 시료에 포함된 RHCG의 농도는 0.06 ~ 87.40 ml/l of wet sediment(평균 31.34 ml/l of wet sediment)로 측정되었으며(Table 1), 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 양상이 보였다. 퇴적물에 포함된 RHCG의 농도를 기준으로 할 때, 연구해역의 천부 퇴적층은 [3]이 제시한 NGH 형성에 필요한 RHCG 농도를 대부분 만족하는 것으로 분석되었다. 코어 퇴적물에 포함된 RHCG는 거의 대부분(> 97.4%) 메탄으로 구성되어 있으며, -94.31 ~ -55.50%의 가벼운 $\delta^{13}C_{CH_4}$ 를 가지는 점으로 미루어 열기원 보다는 생물기원으로 분석된다.

Table 1 RHCG concentrations of the core sediments.

00GHP Core No. Sample Depth	HC Gas in Sediment (ml/l)	00GHP Core No. Sample Depth	HC Gas in Sediment (ml/l)
01-118	59.63	09-400	41.44
01-518	77.23	09-800	82.02
02-186	0.06	10-400	26.72
02-586	0.10	10-800	79.93
03-400	0.98	11-400	39.26
03-575	1.21	11-800	55.51
04-400	1.37	12-400	34.24
04-800	4.39	12-800	64.12
05-400	6.52	13-400	5.55
05-800	8.52	13-800	6.81
06-400	17.48	14-400	0.13
06-800	23.16	14-800	0.41
07-400	37.49	15-400	59.31
07-800	87.40	15-800	43.27
08-400	1.70	16-400	43.45
08-800	21.97	16-800	71.62

Depth: cmbsf,

4.2 가스 또는 NGH 부존 증거

선택된 4개 코어에 대한 퇴적학적 분석을 수행한 결과 연구해역의 남서부와 북동부에서 채취된 3개 코어(00GHP-01, 00GHP-07, 00GHP-11)에서 층리면과 수평하게 발달된 수평 균열(crack)을 확인하였다(Fig. 3). 이들 균열은 코어의 회수과정에서 퇴적물에 포함된 자유가스(free gas)의 팽창(expansion) 또는 NGH부터 해리된 가스의 팽창에 의하여 형성된 것으로 판단된다. 또한 NGH의 해리에 의해 형성되는 것으로 생각되는 soupy layer가 00GHP-07 코어의 심도 581 ~ 568 cmbsf 구간에서 관찰되었다(Fig. 4). 전기한 바와 같이 본 연구에 이용된 코어의 길이는 최대 8 m이다. 따라서 이들 구조와 NGH와의 관계를 보다 명확히 밝히기 위해서는 SMI, 코어 온도, 간극수에 대한 추가적인 정밀분석이 요구된다.

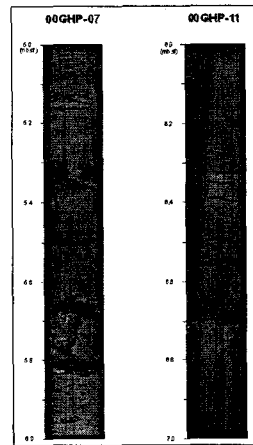


Fig. 3 Cracks and soupy layers in the cores.

BSR은 NGH 부존을 지시하는 탄성과 지표로, NGH로 포화된 퇴적층과 하위에 자유가스로 포화된 퇴적층과의 경계면에서 탄성과 속도와 밀도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반한 큰 진폭(amplitude)의 반사면이다[11]. BSR은 연구해역의 남부에 광범위하게 분포되어 나타난다. 그러나 BSR의 연장성은 좋지 않은 편이며, 반사진폭 역시 일반적으로 낮다(Fig. 4a). 특히 탐사해역 북동부의 경우 지층반사면이 해저면과 평행하게 발달되어 있는 관계로 BSR을 확인하기가 매우 어렵다. 따라서 BSR 확인에 세심한 주의와 분석이 요구된다.

탄성과 공백대는 가스 또는 유체의 상향 이동에 의하여 수직 또는 반수직의 기둥 형태로 나타나며, 가스 또는 NGH 부존을 지시하는 중요한 탄성과 지표이다. 공백대는 대부분 연구해역의 북동부에 나타난다. 이들 공백대는 퇴적층을 완전히 관통하여 해저면까지 발달되거나, 퇴적층 내에 나타난다(Fig. 4b). 해저면까지 발달된 공백대는 강한 측면회절(side diffraction) 현상과 함께 해저면에 mound와 같은 expression을 보이기도 한다(Fig. 4b). 공백대에 흔히 나타나는 velocity pull-up structure는 이들 공백대가 높은 탄성과 속도를 가지는 NGH로 포화되었다는 것을 지시하는

증거로 분석된다.

Pock-mark는 심부로부터 이동된 가스의 분출에 의하여 해저면 부근의 연약한 퇴적층이 함몰되면서 해저면이 움푹하게 파인 형태로 나타나며, 측심기와 Chirp 자료에서 쉽게 확인될 수 있다(Fig. 4c). [12]는 해저면 정부에 발달된 pock-mark는 NGH층 하위에 자유가스가 부존되어 있다는 증거라 보고하였다. 전기한 바와 같이 BSR과 공백대는 각각 연구해역의 남부와 북동부에 잘 나타나는 반면, pock-mark는 연구해역 전역에 걸쳐 산발적으로 나타난다.

이밖에 가스가 seeping되는 현상이 연구해역 남부에서 취득된 MCRS 자료에서 잘 관찰된다. 이들 가스 seeping에 대한 보다 정밀한 분석과 이 현상이 나타나는 지점에 대한 정밀한 mapping을 위해서는 sonar-탐사가 요구된다.

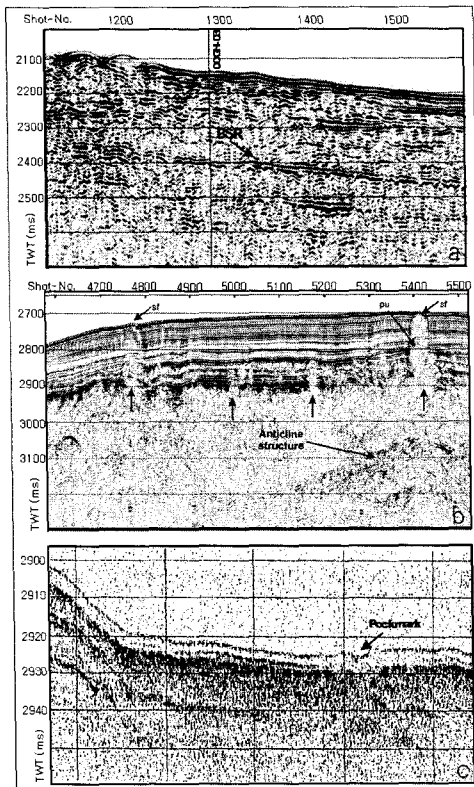


Fig. 4. Seismic evidences of gas and/or NGH.

후 기

이 초록은 산업자원부 국가지질조사 및 자원탐사사업의 일환으로 2000년부터 2004년까지 한국 지질자원연구원에서 수행한 “가스 하이드레이트 탐사 및 개발 기술” 연구 결과의 일부이다. 이 연구에 지원을 해 주신 한국가스공사와 산업자원부에 감사사를 드린다.

References

- [1] Davis, A.M., 1992. In: Methane in Marine Sediments (Davis, A.M. ed.), Pergamon Press: 1077-1079.
- [2] Judd, A.G. and Hovland, M., 1992. In: Methane in Marine Sediments (Davis, A.M. ed.), Pergamon Press: 1077-1079.
- [3] Sloan, E.D. Jr., 1998. Clathrate Hydrates of Natural Gases (2nd Ed.). Marcel Dekker, New York, 705p.
- [4] Kvenvolden, K.A. and Lorenson, T.D., 2001. In: Natural Gas Hydrates Occurrence, Distribution and Detection (Paull, C.K. and Dillon, W.P. eds.), AGU: 3-18.
- [5] Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J.C.Jr. and Pisciotto, K.A., 1992. In: Proc. ODP Sci. Results, 127/128 (Part 2): 1333-1348.
- [6] Jolivert, L. and Tamaki, K., 1992. In: Proc. ODP, Sci. Results, 127/128 (Part 2): 1311-1331.
- [7] Park, C.-H., Kim, H.-J., Yang, C.-S., Suk, B.-C. and Isezaki, N., 1996. J. Geol. Soc. Korea, 32: 276-290.
- [8] Park, K.S., 1992. In: Sedimentary basins in the Korean Peninsular and adjacent seas, Hanlimwon Publ.: 40-59
- [9] Park, S.C., Han, H.S. and Jung, C.K., 2005. In: Proc. of Int. Symp. on Gas Hydrate Technology, Korea: 45-48.
- [10] Machida, H. and Arai, F., 1992. Atlas of tephra in and around Japan (in Japanese). Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 276p.
- [11] Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., 1979. Seismic reflection evidence for widespread occurrence of possible gas hydrate horizons on continental slopes and rises, AAPG Bull., 63: 2204-2213.
- [12] Vogt, P.R., Crane, K., Sundvor, E., Max, M.D. and Pfirmann, S.L., 1994. Methane-generated(?) pockmarks on young, thickly sedimented oceanic crust in the Arctic: Vestnesa ridge, Fram strait, Geology, 22: 255-258.