

울릉분지 서부에서의 탄화수소 생성 및 지표

류 병재¹⁾, 김 지훈²⁾, 이 영주³⁾, M. Riedel⁴⁾, R.D. Hyndman⁵⁾, 김 일수⁶⁾

Hydrocarbon generation and indicators in the western Ulleung Basin

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

Key words : hydrocarbon (탄화수소), natural gas hydrate (천연가스 하이드레이트),
bottom simulating reflector (해저면 모방반사면), seismic blank zone (탄성과 공백대)

Abstract : Piston cores retrieved from the western Ulleung Basin, East Sea were analyzed to examine the potential for hydrocarbon generation and to determine the hydrocarbon indicators. 2D multi-channel reflection seismic and Chirp data were also investigated for mapping and characterizing the geophysical hydrocarbon indicators such as BSR (bottom simulating reflector), blank zone, pock-mark etc. High organic carbon contents and sedimentation rates that suggest good condition for hydrocarbon generation. High pressure and low temperature condition, and high residual hydrocarbon concentrations are favor the formation of natural gas hydrate. In the piston cores, cracks generally oriented to bedding may indicate the gas expansion. The seismic data show several BSRs that are associated with natural gas hydrates and underlying free gas. A number of vertical to sub-vertical blank zones were well identified in the seismic sections. They often show the seismic pull-up structures, probably indicating the presence of high velocity hydrates. Numerous pockmarks were also observed in the Chirp profiles. They may indicate the presence of free gas below the hydrate stability zone as well.

subscript

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

자유가스는 고압·저온의 특수한 조건 하에서는 물 분자와 결합하여 고체상의 천연가스 하이드레이트 (natural gas hydrate: NGH)를 형성하기도 한다.

탄화수소 가스가 생성되기 위해서는 첫째 0.5% 이상의 유기탄소(organic carbon)를 포함한 퇴적

1. 서론

탄화수소(hydrocarbon)는 탄소와 수소로 이루어진 화합물로 석유와 천연가스의 주성분이다. 기체상(gas phase)의 탄화수소는 산상에 따라 유정가스(oil well gas), 자유가스(free gas), 용해가스(dissolved gas), 탄전가스(coal field gas)로 구분된다.

해저면으로부터 심도 1000 m 미만인 천부 퇴적층의 경우 박테리아의 작용에 의한 생물기원의 탄화수소 가스가 생성된다[1]. 반면에 이 보다 깊은 심도에서는 높은 열과 압력에 의한 열기원의 탄화수소 가스가 생성된다[1]. 열기원의 탄화수소 가스는 상향 이동되어 천부 지층에 집적되기도 한다. 지층 내에 가스상(gas phase)으로만 존재하는

- 1) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: bjryu@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3211 Fax: 042-862-3417
- 2) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: save@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3276 Fax: 042-862-3417
- 3) 한국지질자원연구원 석유해저자원연구부
E-mail: yjl@kigam.re.kr
Tel: 042-868-3209 Fax: 042-862-3417
- 4) McGill Univ. Dept. of Earth & Planetary Science
E-mail: mriedel@epc.mcgill.ca
Tel: +1-518-398-3671 Fax: +1-514-398-4680
- 5) Geological Survey of Canada
E-mail: rhyndman@nrcan.gc.ca
Tel: +1-250-363-6428 Fax: +1-250-363-6565
- 6) 한국석유공사 국내탐사팀
E-mail: ilsookim@knoc.co.kr
Tel: 042-868-3362 Fax: 042-861-0066

물이 쌓여야 하며[2], 퇴적물에 포함된 유기물이 산화되지 않고 보존될 수 있는 환경이 요구된다. 둘째, 유기숙성작용(organic diagenesis)이 일어나기 위해서는 높은 퇴적률(30-300 m/10⁶yr)이 요구된다[3]. 또한 탄화수소 가스가 생성되기 위해서는 천부 퇴적층에서는 박테리아의, 심부 퇴적층에서는 상당한 기간 동안 열의 작용을 받아야 한다. 셋째 생성된 탄화수소 가스는 우선 공극수에 용해되며, 과포화가 될 경우 자유가스 상태로 존재하게 된다. 넷째 공극 내의 자유가스와 물이 결합하여 고체상의 NGH로 상변화하기 위해서는 0 °C에서 26 bar 또는 10 °C에서 76 bar 이상의 고압·저온의 조건이 충족되어야 한다[3, 4, 5, 6]. 또한 1 liter의 젖은 퇴적물(wet sediment) 내에 10 ml 이상의 잔류 탄화수소 가스(residual hydrocarbon gas: RHCG)가 포함되어 있어야 하며, 충분한 물이 존재하여야 한다[3]. 이밖에 유기물로부터 생성된 탄화수소 가스가 삼투(percolation)될 수 있는 양호한 투수성과 NGH가 성장할 수 있는 공간(=공극: pore)이 요구된다[7].

시추 또는 코어링(coring)을 통하여 탄화수소의 부존을 직접 확인하는 방법 이외에, 탄화수소의 부존 여부를 간접적으로 가늠케 하는 지표(hydrocarbon indicator)는 지질·지화학적, 지구물리학적 지표로 구분된다. 이들 지시자들은 시추과정에서의 이수분석(mud analysis)과 공경검층(well logging), 퇴적물의 온도 측정, 퇴적물과 공극수에 대한 지질·지화학적 분석, 심해 카메라, ROV 또는 유인 잠수정을 이용한 해저면 관찰과 시료(퇴적물, 해수, 생물체, NGH 등) 분석, 탄성과 음향측심기 등 지구물리 탐사자료에 대한 분석을 통해 확인할 수 있다[3, 8, 9].

본 연구에서는 동해 울릉분지 서부에서 채취·취득한 피스톤 코어(piston core)와 탄성과 탐사 자료를 이용하여 천부 퇴적층에서의 탄화수소 가스의 생성 잠재력을 파악하고 탄화수소 지표(indicator)와 부존 양상을 규명하였다.

2. 연구지역의 지형과 지질

연구지역은 동해 남서부에 발달되어 있는 울릉분지(Ulleung Basin)의 서부에 위치하고 있다(Fig. 1). 울릉분지는 북쪽으로는 한국대지(Korea Plateau)와, 동쪽으로는 오키뱅크(Okki Bank)와, 서쪽으로는 한반도와 가파른 경사로, 남쪽으로는 일본열도와 완만한 경사로 접하고 있는 제 3기(Tertiary) 퇴적분지이다.

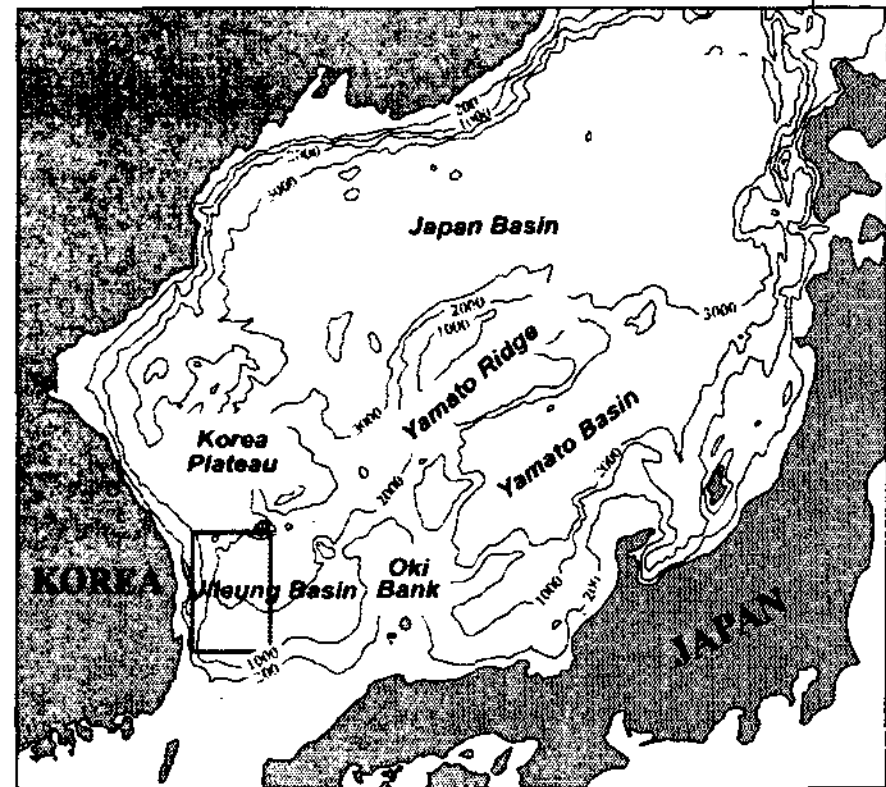


Fig. 1. Location map of the study area (red box). Contour line: bathymetry in meter.

울릉분지는 장사방형(rhomboid)의 형태로 북쪽과 서쪽 경계부는 경사가 급하여 대규모의 사면침식, 사면사태, 사면붕락(slump) 및 쇄설류 퇴적체(debris flow deposit)가 특징적으로 발달하고 있으며, 남쪽과 동쪽 경계부는 다소 경사가 완만함에도 불구하고 사면침식, 사면붕락, 사면사태, 소규모 협곡(gully)이 발달하고 있다. 분지평원(basin floor)은 대략 수심이 2000-2500 m이며, 북동쪽의 몇 개의 섬과 화산기원의 해산을 제외하고는 일반적으로 편평한 형태를 갖는다. 울릉분지는 울릉도와 독도 사이에 존재하는 사이분지 평원(interbasin plain)인 '울릉분지간 통로(Ulleung Interplain Gap; 수심 3000 m)'를 통하여 일본분지와 연결된다[10].

탄성과 탐사자료에 의하면 울릉분지에 발달된 퇴적층의 두께는 중앙부에서 약 5 km 정도이나[11], 남쪽으로 가면서 두꺼워져 최대 10 km에 달한다[12].

3. 연구 자료와 방법

연구지역 천부 퇴적층에서의 탄화수소 생성 잠재력을 파악하고 지질·지화학적 탄화수소 지표를 규명하기 위하여 한국지질자원연구원의 탐해-2호를 이용 30개 지점(수심: 490-2230 m)에서 획득한 5-8 m 길이의 피스톤 코어를 분석하였다. 또한 지구물리학적 탄화수소 지표를 확인하고, 이들의 부존 양상을 파악하기 위하여 4946 L-km의 MCRS 탐사자료와 약 3250 L-km의 Chirp 자료를 분석하였다.

탄화수소 가스의 생성과 NGH의 형성 잠재력을 파악하기 위하여 퇴적물에 포함되어 있는 TOC 함량과 RHCG의 농도 및 성분을 Rock Eval-6와 GC(Gas Chromatography)를 이용 분석하였으며, NGH 안정영역(NGH stability zone)을 분석하였다. 선택된 코어에서 채집·선별한 유공층에 대한 ¹⁴C 연대 측정 결과와 테프라 연구 결과를 종합하여 퇴적률을 계산하였다. 유공층에 대한 ¹⁴C 연대 측정을 위하여 AMS(Accelated Mass Spectrometry)를 이용하였다. 퇴적물에 포함된 RHCG의 기원을 밝히기 위하여 SIRMS(Stable Isotope Ratio Mass

Spectrometry)를 이용 탄소 동위원소($\delta^{13}C_{CH_4}$) 분석을 수행하였다. 이밖에 코어 내에서의 NGH 부존 여부, 코어가 채취된 지역에서의 SMI 심도 및 메탄의 유동(flux) 정도를 알아보기 위하여 공극수에 포함된 염소 이온(Cl^-)과 황산염 이온(SO_4^{2-})을 IC(Ion Chromatography)를 이용하여 분석하였다.

탄화수소와 관련된 퇴적구조를 확인하기 위하여 코어 관찰과 함께 퇴적학적 분석을 수행하였다. 대표적인 지구물리학적 탄화수소 지표인 BSR과 탄성과 공백대(seismic blank zone)를 확인하기 위하여 Promax 2D를 이용하여 전산처리한 MCRS 탐사자료를 분석하였다. 이밖에 해저면과 수층에 나타나는 탄화수소 지표인 pockmark와 gas plum를 확인하기 위하여 Chirp 자료를 분석하였다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1 연구 결과

4.1.1 탄화수소 생성과 NGH 형성

선택된 11개 코어로부터 추출(sampling)한 893개 시료(422 samples from 4 OOGHP cores; 471 samples from 7 OIGHP cores)에 대하여 TOC 함량을 분석하였다. TOC 함량은 연구지역 남부해역에서 채취한 코어에서 평균 1.69%, 연구지역 북부해역의 코어에서 평균 1.76%로 측정되었다. 이는 연구지역에 분포된 천부 퇴적물이 탄화수소 근원암으로 양호(good)하다는 것을 지시한다[2, 3].

퇴적층이 비교적 교란을 받지 않은 분지평원에서 채취한 2개 코어의 각 4개 구간으로부터 산출된 유공층을 선별(각 시료 당 800~1500 개체)하고 AMS ^{14}C -연대를 측정된 결과, 테프라 분석 결과 [13] 및 [14]에 의하여 발표된 테프라층의 한 ^{14}C -연대 측정 결과를 종합하여 분석한 코어구간의 평균 퇴적률은 각각 168 및 190 $m/10^6yr$ 이다. 이는 코어가 채취된 지점의 천부 퇴적층은 유기 속성작용이 일어나기 위한 조건을 충족하는 것이다[3].

30개 코어의 중간과 최하부 구간에서 sampling한 시료에 포함된 RHCG의 농도와 성분을 분석하였다. 코어 퇴적물에 포함된 RHCG의 농도는 연구지역 남부해역에서 채취된 16개 코어에서 최대 87.40 ml/l of wet sediment, 연구지역 북부해역에서 채취한 14개 코어에서 최대 35.44 ml/l of wet sediment로 측정되었으며, 심도가 깊어짐에 따라 증가하는 양상을 보였다. 코어의 최하부 구간 퇴적물에 포함된 RHCG 농도 분석결과 연구지역 남부해역 코어의 경우 16 코어 중 10 코어, 북부해역 코어의 경우 14 코어 중 2 코어에서 [3]에 제시한 NGH 형성에 필요한 RHCG 농도를 보였다. 코어 퇴적물에 포함된 탄화수소 가스는 거의 대부분 메탄으로 구성되어 있으며, -94.31~-55.50%의 가벼운 $\delta^{13}C_{CH_4}$ 를 가지는 점으로 미루어 생물기원으로 해석된다[3].

4.1.2 탄화수소 지표

선택된 4개 코어에 대한 퇴적학적 분석을 수행한 결과 연구지역의 남서부와 북동부 해역에서 채취된 3개 코어(OOGHP-01, OOGHP-07, OOGHP-11)에서 층리면과 수평하게 발달된 수평 균열(crack)을 확인하였다(Fig. 2). 이들 균열은 코어의 회수과

정에서 퇴적물에 포함된 자유가스 또는 NGH로부터 해리된 가스의 팽창(expansion)에 의하여 형성된 것으로 분석된다.

BSR은 중요한 지구물리학적 탄화수소 지표의 하나로, NGH층과 하위에 자유가스로 포화된 퇴적층과의 경계면에서 탄성과 속도와 밀도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반한 큰 진폭의 반사면이다(Fig. 3). BSR은 연구지역의 남부에 광범위하게 분포되어 나타난다.

탄성과 공백대는 가스 또는 유체의 상향 이동에 의하여 탄성과 탐사자료 상에 수직 또는 반수직의 기둥 형태로 나타나는 탄화수소 지표로(Fig. 4), 연구지역 중부해역의 동부에서 잘 확인된다. 이들 공백대는 해저면까지 발달되기도 한다. 공백대에 흔히 나타나는 pull-up structure는 공백대가 높은 탄성과 속도를 가지는 NGH로 포화되었다는 것을 지시하는 것이다(Figs. 3 and 4).

Pock-mark는 심부로부터 이동된 가스의 분출에 의하여 해저면 부근의 연약한 퇴적층이 함몰되면서 해저면에 나타나는 양상으로, 측심기와 Chirp 자료에서 쉽게 확인될 수 있는 탄화수소 지표이다. [16]은 심해저면 정부에 발달된 pock-mark는 NGH층 하위에 자유가스가 부존되어 있다는 증거라 보고하였다. 이밖에 가스가 해수층(seawater column)으로 분출되는 현상이 연구지역 남부해역에서 관찰된다.

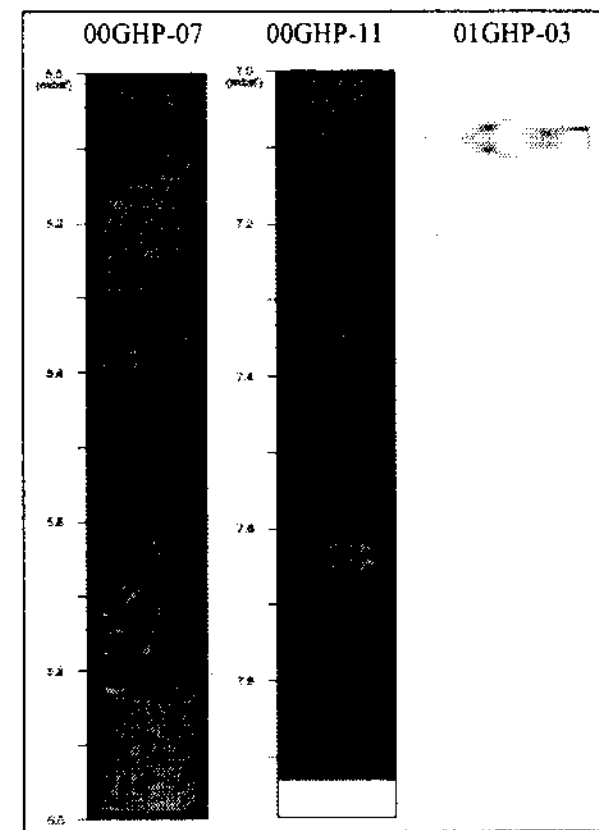


Fig. 2 Gas expansion cracks in the cores.

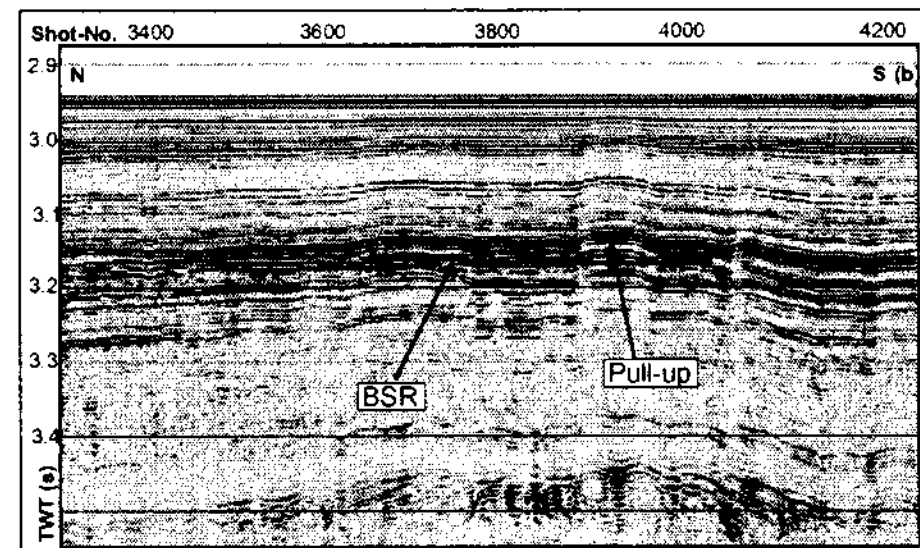


Fig. 3 BSR and pull-up structure.

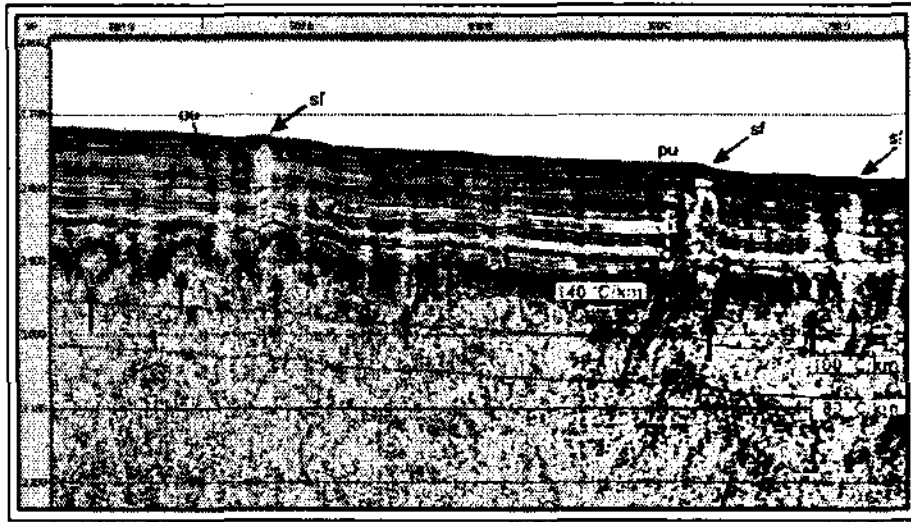


Fig. 4 Blank zones showing pull-up structures.
pu: pull-up, sf: seafloor expression

4.2. 토의

OOGHP-07과 O1GHP-03 코어에 나타나는 soupy layer는 상위와 하위에 분포된 퇴적물과 동일한 성분과 입도를 보이는 점으로 미루어 NGH의 해리와 관련이 있는 것으로 사료된다. 그러나 이들 soupy layer와 NGH와의 관계를 명확하게 규명하기 위하여서는 soupy layer의 공극수에 대한 CI과 안정동위원소 분석이 요구된다.

연구지역 북부해역에서 채취된 코어의 경우 높은 TOC 함량에 불구하고 낮은 RHCG 농도를 보인다. 이는 지역에 따른 탄화수소 가스의 유동 정도와 이에 기인한 SMI 심도와 관련이 있는 것으로 분석되며, 향후 보다 SMI 보다 깊은 심도까지 코어의 채취와 분석이 요구된다.

BSR이 광범위하게 나타나는 퇴적층의 경우 공백대가 잘 나타나지 않는다. 이 이유가 투수율이 낮은 NGH층이 탄화수소 가스 또는 유체의 상향이동을 억제하기 때문인지 아니면 다른 요인에 의한 것인지 확인할 필요가 있다.

공백대가 잘 나타나는 퇴적층에서 BSR의 규명이 용이하지 않는데, BSR이 해저면에 평행하게 발달된 퇴적-반사면에 가려져 확인하기가 어려운 것인지 다른 요인에 의한 것인지에 대한 추가 연구가 요구된다.

일반적으로 탄화수소의 상향 이동은 단층을 따라 이루어진다. 그러나 공백대가 특정한 해역의 퇴적층에서 집중적으로 나타나는 반면에 pock-mark가 산발적으로 나타나는 이유가 어떤 요인에 의한 것인지 보다 정밀한 분석이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행한 산업자원부 출연연구사업인 '가스 하이드레이트 탐사 및 개발 연구' 과제에서 지원되었습니다. 이 연구 과제에 지원과 참여를 해 주신 한국가스공사에도 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] Peters, K.E., 1986. "Guideline for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis." AAPG Bull. Vol. 70, pp. 318-329

[3] Sloan, E.D. Jr., 1998. "Clathrate Hydrates of Natural Gases (2nd Ed.)." Marcel Decker, New York, 705 p.

[4] Makogon, Y.F., 1997. "Hydrates of Hydrocarbons." Penn Well Publishing Co., Tulsa, 482 p.

[5] 류병재, 선우돈, 장성형, 오진용, 1999. "동해 울릉분지 남서부 해역에서의 가스 하이드레이트 안정영역." 한국석유지질학회지, Vol. 7, pp. 1-6.

[6] 류병재, 서유탉, 강성필, 이훈, 2000. "전해질이 메탄 하이드레이트 평형조건과 안정영역에 미치는 영향." 화학공학, Vol. 38, No. 3, pp. 380-386.

[7] Max, M.D., Pellanbarg, R.E. and Hurdle, B.G., 1997. "Methane hydrate, A special clathrate: Its attributes and potential." Naval Research Laboratory Report, NRL/MR/6101-97-7926, Washington, DC, 74 p.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000. "Marine geology of Korean seas," (2nd Ed.), Elsevier, Amsterdam, 313 p.

[11] Park, C.-H., Kim, H.-J., Yang, C.-S., Suk, B.-C. and Isezaki, N., 1996. "Crustal structure of the Ulleung Basin, tyhe EastSEA (Japan SEA), from gravity and ocean bottom seismometer data." J. Geol. Soc. Korea, Vol. 32, pp. 276-290.

[12] 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

[13] 류병재, 김원식, 정태진 외, 2004. "가스 하이드레이트 탐사 및 개발 기술." 한국지질자원연구원 산업자원부 출연연구사업 연구보고서 (KR-02(C)-08), 525 p.

[14] Machida, H. and Arai, F., 1992. "Atlas of tephra in and around Japan (in Japanese)." Univ. of Tokyo Press, Tokyo, 276 p.

[15] Vogt, P.R., Crane, K., Sundvor, E., Max, M.D. and Pfirman, S.L., 1994. "Methane-generated(?) pockmarks on young, thickly sedimented oceanic crust in the Arctic: Vestnesa ridge, Fram strait." Geology, Vol. 22, pp. 255-258.