



[2018-12-GT-002]

# 동해 심해 울릉분지의 침니 구조

류병재<sup>1)\*</sup>

## Chimney Structures in the Deep-water Ulleung Basin, East Sea

Byong-Jae Ryu<sup>1)\*</sup>

Received 5 September 2018 Revised 4 October 2018 Accepted 24 October 2018

**ABSTRACT** For detecting and mapping the seismic indicators for gas hydrate presence in the Ulleung Basin such as chimney structures, where the temperature/pressure conditions for gas-hydrate presence are sufficient, a total 11332.732 L.km 2D multi-channel digital seismic data and 12574.4445 L.km of single-channel data were acquired by KIGAM using air-gun system and *R/V TAMHAE II* in 1997~2004. Acquired multi-channel seismic data were processed to define gas hydrate indicators such as BSRs and chimney structures using ProMax. The acoustic faices of shallow sediments were also analyzed to understand the relationship between sedimentary strata and gas hydrate indicators. A number of vertical/sub-vertical chimney structures were identified in the basin. They may formed by gas and/or fluid upwelling through fractures and faults. Many of them are characterized by velocity pull-up structures and acoustic blank zones that are interpreted to be a result of higher velocity of gas hydrate. The presence of gas-hydrates in the chimney structures were confirmed by the piston coring in 2007, and the deep-drilling in 2007/2010. Most of them occur in turbidite/hemi-pelagic sediments in the northern basin. To develop the gas-hydrate within the chimney structures, studies have been performed as a part of national gas-hydrate project.

**Key words** chimney structure(침니 구조), gas hydrate(가스 하이드레이트), Ulleung Basin(울릉분지), seismic data(탄성파 자료), bottom simulating reflector(해저면 모방 반사면), velocity pull-up structure(속도 끌어올림 구조), acoustic blanking zone(음향공백대)

### Nomenclature

*R/V* : research vessel  
*D/S* : drill ship  
 EMT : effective modelling theory  
 UBGH1 : The First Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition  
 UBGH2 : The Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition

### Subscript

mbsf : meter below sea-floor  
 L.km : line kilometer

1) Research Fellow, Petroleum & Marine Division, Oil & Gas Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

\*Corresponding author: bjryu@kigam.re.kr

Tel: +82-42-868-3211 Fax: +82-42-868-3417

### 1. 서론

가스 하이드레이트(gas hydrate)는 클라스레이트(clathrate) 하이드레이트의 일종으로 저온·고압 조건 하에서 천연가스가 수소결합을 하는 물분자(hydrogen-bonded water molecule)와 결합하여 형성된 얼음과 유사한 고체상 화합물(solid compound)이다.<sup>[1,2]</sup> 저온·고압 조건의 심해저와 영구동토

(permafrost) 지역의 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있는 천연가스 하이드레이트는 in-situ 가스 하이드레이트의 대부분을 차지하기 때문에 일반적으로 가스 하이드레이트로 불리며, 천연가스의 주 구성성분이 메탄(methane)으로 이루어져 있기 때문에 메탄 하이드레이트로 불리기도 한다. 본 논문에서의 가스 하이드레이트는 천연가스 하이드레이트를 지시한다.

세계적인 인구 증가, 급속한 산업 발전에 따른 에너지 수요의 증가 및 지구환경 보호 측면에서 선진국을 비롯한 자원 보유국과 개발도상국들은 새로운 에너지 자원 개발을 국가적 아젠다로 설정하고 에너지 안보에 대비하고 있다. 특히 경제성과 환경 등의 이유로 거의 주목을 받지 못하던 비전통형 에너지 자원에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 1990년대부터 세계 각국에서는 유한한 화석 에너지 자원을 대체할 수 있는 새로운 천연가스 에너지 자원으로서 가스 하이드레이트에 주목하고 있다. 2000년대 접어들면서 활발히 진행된 탐사와 연구 결과는 심해저와 육상 영구 동토 지역의 퇴적층에 가스 하이드레이트가 광범위하게 분포하고 있으며, 부존량도  $10^4$  Gt으로 막대한 것으로 알려져 더욱더 이에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>[3]</sup> 또한 연소 시 다른 에너지에 비해 상대적으로 적은 이산화탄소를 발생하는 가스 하이드레이트가 해리될 경우 해저 산사태 등을 일으키고 지구 온난화에 막대한 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과 때문에 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>[4~6]</sup>

우리나라에서 가스 하이드레이트 연구는 1996년 한국지질자원연구원에 의해 시작되었다.<sup>[7]</sup> 당시 시베리아 천연가스를 안전하고 효과적으로 개발하기 위해 시작된 가스 하이드레이트에 대한 우리나라 연구 수준은 매우 초보 단계에 있었으며, 동해 심해 울릉분지에서 가스 하이드레이트 부존을 확인하는데 이용할 수 있는 탐사선도 없는 상태였다. 따라서 가스 하이드레이트의 기원, 결정학적 및 열역학적 특성 그리고 1996년 말 이루어진 탐사선 R/V TAMHAE II의 인도에 맞춰 가스 하이드레이트 탐사 및 개발 방법 등의 기본적인 정보를 파악하기 위하여, 문헌연구를 통한 기초적인 연구와 함께 울릉분지 남서부 해역에서 가스 하이드레이트 부존 가능성 규명을 위한 탐사를 1997년부터 1999년까지 수행하였으며(Fig. 1)<sup>[8]</sup>, 이 탐사를 통하여 취득한 탐사자료 분석 결과 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR

(bottom simulating reflector)이 우리나라 해역에서 최초로 확인되었다.<sup>[9]</sup>

이 탐사결과를 토대로 우리나라 동해 관할 해역에서 가스 하이드레이트 부존 유망지역 규명을 위한 광역탐사를 2000년부터 5년간 수행하였다(Fig. 2).<sup>[10]</sup>

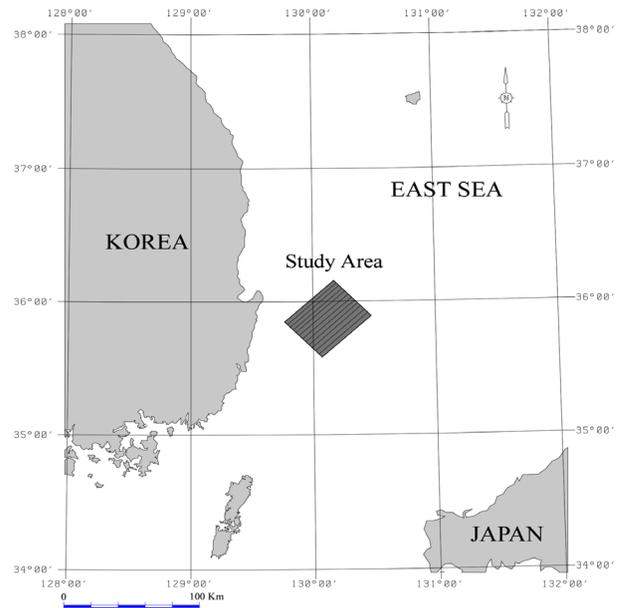


Fig. 1. Location of study area for 1997–1999 gas hydrate project

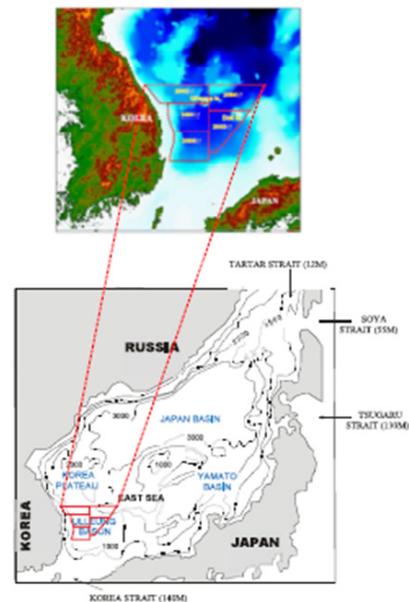


Fig. 2. (upper) Study area of gas hydrate project performed from 2000 to 2004, and (lower) physiographic map of the study area (contour line: bathymetry in meters)

그동안 수행된 탐사 결과 우리나라 동해 울릉분지에는 가스 하이드레이트로 충전된 수많은 침니구조가 특징적으로 발달되어 있는 것이 확인되었다.<sup>[10]</sup> 일본의 경우도 우리나라의 동해에 해당하는 일본해에도 많은 침니구조가 발달되어 있으며, 이에 대한 국가 차원의 연구를 메이지 대학의 마쓰모토(Matsumoto) 교수가 주축이 되어 수행하고 있다.<sup>[11]</sup> 현재의 기술로 사질 퇴적층으로부터 가스 하이드레이트를 개발하는 것이 가능한 것으로 실증되었으나, 침니구조에 부존되어 있는 가스 하이드레이트를 개발하는 기술은 부산의 한 고등학교 선생님이 제안한 가스 하이드레이트 함유 퇴적층을 잘게 부수고 부유된 하이드레이트를 채집하는 방식 이외에는 아직 아무것도 알려져 있지 않은 실정이다.<sup>[12]</sup> 따라서 본 논문에서는 막대한 양의 가스 하이드레이트를 포함하고 있는 것으로 예측되는 침니구조의 개발에 도움을 주고자 침니구조의 특성에 대한 정보를 제공하려 한다.

## 2. 연구해역의 지질 개요

연구해역은 동아시아 대륙과 일본 열도에 의하여 둘러싸인 반폐쇄성 주변해(semi-closed marginal sea)인 동해의 남동부에 위치하고 있다(Fig. 2). 동해는 대한해협(Korea Straits), 쓰가루해협(Tsugaru Straits), 소야해협(Soya Straits), 타타르해협(Tartar Straits)을 통하여 북태평양(North Pacific), 오호츠크해(Sea of Okhotsk) 그리고 동중국해(East China Sea)와 접하고 있다(Fig. 2). 동해는 평균수심 약 1,350m, 최대수심이 약 3,700m로 주변해로서는 수심이 깊은 해양이다. 동해에 발달된 퇴적분지는 한국대지(Korea Plateau), 오키뱅크(Oki Bank), 야마토 릿지(Yamato Ridge) 등의 지형적 고지대(topographic high)에 의하여 일본분지(Japan Basin), 야마토분지(Yamato Basin), 울릉분지(Ulleung Basin) 등 3개의 해양 퇴적분지로 구분된다(Fig. 2).

동해의 북부에 위치한 일본분지는 북동-남서 방향으로 폭이 200km에서 300km, 길이가 700km에 이르는 가장 크고 깊은 분지로서 분지평원의 수심이 3,500m-3,700m에 달한다.<sup>[13]</sup> 남동부에 위치한 야마토 분지는 일본분지와

마찬가지로 북동-남서방향으로 발달해 있으며, 평균 수심은 일본분지보다 얇은 2,500m-2,700m이다. 탐사해역이 위치한 울릉분지는 동해의 남서부에 위치하며, 북쪽으로 한국대지, 서쪽으로 오키뱅크에 의하여 일본분지와 야마토분지와 구별되고, 서쪽으로는 한반도의 경사가 가파른 대륙사면(continental slope)과 접하고 있으며, 남쪽으로는 일본열도와 완만한 경사로 접하고 있는 수심이 깊은 볼 형태(bowl-shaped)를 가지는 퇴적분지이다.

동해는 유라시아 판의 동쪽 가장자리에 위치하는 후열도 분지(back-arc basin)로 필리핀 판과 태평양 판, 그리고 오호츠크(Okhotsk) 판과 복잡한 경계를 가지며 생성되었다.<sup>[14]</sup> 동해는 북동쪽에 위치한 일본분지 쪽에서 전기 올리고세(Oligocene)부터 후기 올리고세까지 해양판의 확장에 의하여 형성되기 시작하였으며, 중기 마이오세(Miocene)의 말까지 활발한 확장이 이루어졌다.<sup>[14]</sup> 일본분지가 확장되는 동안, 북동 일본열도가 남동쪽으로 400km 이상 이동하면서 오른쪽 전단운동(dextral shear movement)이 동해의 동쪽 경계부를 따라 발생하였으며, 동시에 남동 일본열도가 남쪽으로 이동하면서 동해에서 지각팽창(crustal extension)과 이에 수반한 지각박화(crustal thinning) 작용이 발생하면서 울릉분지와 야마토분지가 형성되기 시작했다. [15]의 연구결과에 따르면 울릉분지는 세단계의 지구조적 발달단계를 보인다. 후기 올리고세에서 전기 마이오세 동안의 인리형 열개단계(pull-apart opening stage)를 지나 전기 마이오세에서 중기 마이오세의 부채꼴형 열개단계(fan-shaped opening stage)를 거쳐 후기 마이오세에서 현재까지 후열도 닫힘 단계(back-arc closing stage)에 있는 것으로 해석되었다.

울릉분지는 장사방형(rhomboid)의 형태로 북쪽과 서쪽 경계부는 경사가 급하여 대규모의 사면침식, 사면붕락(slump), 사면사태(slide), 그리고 쇄설류 퇴적체(debris flow deposit)가 특징적으로 발달하고 있으며, 남쪽과 동쪽 경계부는 다소 경사가 완만하지만 역시 다양한 사면침식과 사면붕락, 사면사태, 소규모 협곡(gully)이 발달하고 있다. 분지평원(basin floor)은 대략 수심이 2,000m-2,500m이며, 북동쪽의 몇 개의 섬과 화산기원의 해산을 제외하고는 일반적으로 편평한 형태를 갖는다. 울릉도와 독도 사이에는 폭이 좁고 수심이 깊은(폭 70m, 수심 3,000m) '코리아 갭(Korea

Gap: KG)'이 존재하는데, 이는 좁은 형태의 분지 간 평원(interbasin plain)으로 울릉분지와 일본분지를 연결한다.<sup>[16]</sup> 일본분지와 울릉분지를 연결하는 KG에는 강한 저층류(bottom current)의 작용을 지시하는 침식기원의 해저 수로가 저탁류 퇴적층 내에 잘 발달되어 있다.<sup>[17,18]</sup>

### 3. 연구자료 및 방법

#### 3.1 선행연구(1996-1999년)

1996년 말 한국지질자원연구원의 탐사선 R/V(research vessel) TAMHAE II가 노르웨이로부터 인도됨에 따라 1997년부터 우리나라 해역에서의 가스 하이드레이트 부존 가능성 파악을 위한 탐사가 가능하게 되었다. 탐사자료 분석을 통하여 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR이 우리나라 해역에서 최초로 확인하였다.<sup>[9]</sup>

탐사에 이용된 측위방법은 측위 시스템으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 위성을 이용한 항측시스템인 전 지구 측위시스템(Global Positioning System: GPS)을 이용하였다. 다중-채널 탄성과 신호의 수신을 위해서 6.25m 그룹간격의 64개 채널로 구성된 400m의 스트리머 액티브 섹션(streamer active section)과 액티브 섹션 앞에 장력을 완화시킬 수 있는 50m 길이의 스트레치(stretch) 섹션 2개를 연결하여 사용하였다. 수신기(streamer)를 해수면으

로부터 5m 깊이로 일정하게 유지시키기 위하여 3개의 심도 유지 장치(bird)를 수신기에 부착하였다. 탐사자료는 SEG-D 8015형식으로 IBM 3480 자기 테이프(magnetic tape, 200 MB)에 기록하였으며, 주요 자료 취득 매개변수(parameter)는 Table 1과 같다.

연구지역과 지질학적 특성이 유사한 동해의 오키 릿지(Oki Ridge)와 기타-야마토 트러프(Kita-Yamato Trough)에서 수행된 ODP(Ocean Drilling Program) Leg 127의 Site 798과 799의 연구 결과를 토대로 평형조건과 가스 하이드레이트 안정영역을 분석하였다. 실험을 통하여 측정된 결과는 기존 외국에서 발표된 실험결과 및 [19]의 열역학적 모델에 의한 예측 결과와 잘 일치하였다. 또한 분석된 가스 하이드레이트 안정영역의 하부 경계면의 심도는 연구해역에서 확인된 BSR 심도와 잘 일치함을 확인하였다.<sup>[10]</sup>

#### 3.2 광역탐사(2000-2004년)

##### 3.2.1 코어 시료 채취 및 분석

탐사해역의 가스 하이드레이트 형성 잠재력 파악과 부존 지시자(indicator) 규명을 위하여 37개 지점(수심: 790~2450m)에서 길이 8m의 38개 피스톤 코어를 채취하여 퇴적구조와 퇴적상 분석을 수행한 결과, 탐사해역에 분포된 천부 퇴적물은 주로 이질 퇴적물로 이루어져 있으며, 얕리 이토 퇴적상, 약얕리 이토 퇴적상, 생물교란 이토 퇴적상, 균질 이토 퇴적상, 테프라층(tephra layer) 등이 발달되어 있다.<sup>[10]</sup> 이 중 선택된 25개 코어로부터 총 2,369개 시료를 채취하여 함수율, 입도 등의 지질학적 분석과 함께 퇴적물에 포함되어 있는 총유기탄소(total organic carbon: TOC), 총탄소(total carbon: TC), 총질소(total nitrogen: TN), 총수소(total hydrogen: TH) 및 총황(total sulfur: TS) 함량을 분석하였다(Table 2).

유기물의 기원을 규명하기 위하여 유기물만 분리하여 탄소 동위원소 분석을 한국기초과학지원연구원의 안정동위원소 질량 분석기(stable isotope mass spectrometer)를 이용하여 실시하였다.<sup>[10]</sup> 이밖에 모든 코어를 대상으로 퇴적물에 포함된 잔류 탄화수소 가스의 성분과 함량에 대한 분석을 수행하였으며, 퇴적물 강극수의 pH, 알칼리도(alkalinity), 염소 이온, 황산염 이온 및 브롬 이온 농도를 측정하였고 각종 동위원소( $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{34}S$ ) 분석도

Table 1. Acquisition parameters of seismic data collected from 1997 to 1999 (modified from [8])

Year [S,T]	Streamer length (m)	No. of Ch.	Source volume (in <sup>3</sup> )	Record length (sec)	Shot point interval (m)
1997 [SC]	ca. 400	1	380	4	-
1998 [MC]	658,6375	64	s. 1~2: 54 s. 3~13: 144	4	12.5
1998 [SC]	658,6375	1	s. 1~2: 54 s. 3~13: 144	4	-
1999 [MC]	183,0750	64	245	4	12.5
1999 [SC]	183,0750	1	245	4	-

S,T: survey type, Ch.: 채널, s.: 씨퀀스(sequence), SC: 단-채널, MC: 다중-채널

Table 2. Summary of piston cores and 2D multichannel reflection seismic lines collected from 2000 to 2004 (modified from [10])

Year	Amount of SC seismic data (L-km) [No. of sequences]	Amount of 2D MC seismic data (L-km) [No. of sequences]	No. of retrieved piston cores [water depth: mbsl]	No. of analyzed samples [cores]
2000	1,753,1570 [21]	2,511,1875 [29]	16 [846~1,868]	422 [4]
2001	1,644,9875 [19]	2,271,2325 [30]	4 [790~2,147]	363 [4]
2002	2,158,9250 [22]	2,650,0250 [31]	7 [1,233~2,174]	436 [7]
2003	2,404,4000 [32]	2,404,4000 [32]	5 [1,197~2,179]	497 [5]
2004	2,529,5500 [24]	2,529,5500 [24]	5 [2,283~2,450]	651 [5]
Total	10,491,0195 [118]	12,366,3950 [146]	37 [790~2,450]	2,369 [25]

MC: 다중-채널, mbsl: 해수면으로부터의 수심(m)

수행하였다. 그리고 가스 하이드레이트 부존 특성을 알아보기 위하여 퇴적상 분석 결과를 음향상 분석결과와 대비하였다.<sup>[10]</sup>

Rock-Eval을 이용해 침니구조에서 채취한 코어에서 선택되어 분석된 퇴적물에 포함된 총유기탄소의 함량은 대부분 0.5% 이상으로 [2]가 제시한 가스 하이드레이트 형성조건에 적합한 것으로 나타났다.<sup>[10]</sup> 원소분석기(Elemental Analyzer)를 이용 분석한 TOC/N과 TOC/S의 비를 고려할 때 유기물들은 해양성 조류기원의 유기물이 무산소 환경에서 퇴적된 것으로 분석되었으나, 열분석 결과를 이용한 유기물 타입을 구분하면 해양성 조류기원과 육상 식물원이 혼재하는 'Type II'와 'Type III'의 경계부분이 우세하다.<sup>[10]</sup> 열분석 결과, TOC/TN, TOC/TS 및 탄소 안정 동위 원소 결과와 상반된 결과를 보이는 것은 코어 채취심도가 깊기 때문에 유기물이 침강하는 동안 또는 조류에 의한 재동 등에 의해 산화를 받은 것으로 추정되며,  $T_{max}$ 가 435°C보다 낮은 것으로 보아 유기물이 미성숙단계에 위치하는 것으로 분석되었다.<sup>[10]</sup> 그리고 연구지역의 분지평원에서 채취한 코어에서 산출된 부유성 유공충(planktonic foraminifera)을 이용한 퇴적물을 분석한 결과 가스 하이드레이트의 형성조건인 30m/10<sup>6</sup>yr를 충분히 만족시키는 것으로 분석되었다.<sup>[10]</sup>

퇴적물에 포함된 탄화수소 가스는 대부분 메탄으로 구성되었으며, 최대 126.68ml HC gas/liter wet sediment 값을 가지는 것으로 분석되었다. 특히, 2000년도 탐사해역에서 채취된 퇴적물의 경우 32개의 시료 중 19개 시료와 2003년 해역에서 채취되어 분석된 35개의 시료 중 7개 시료에서 [2]가 제시한 가스 하이드레이트가 형성에 필요한 조건(>10ml residual HC/liter wet sediments)이 충족되는 것으로 분석되었다.<sup>[10]</sup> 반면에 연구해역 북부에서 채취된 2002년도와 2004년도 시료에서는 가스의 양이 대부분 10ml/liter wet sediment 이하로 나타났다. 또한 잔류 탄화수소 가스량의 공간적, 수직적 분포를 고려하면 전반적으로 탐사해역의 남부지역의 퇴적물이 북부지역의 퇴적물 에 비하여 상대적으로 높은 농도를 가지며, 퇴적물 심도가 증가할수록 가스양이 증가하는 것이 관찰되었다.<sup>[10]</sup>

01GHP-04 코어와 01GHP-06 코어의 퇴적물에서 선별하여 채취한 부유성 유공충을 이용하여 가속질량분석기(Accelerator Mass Spectrometry: AMS)로 방사성 탄소(14C) 연대 측정을 실시한 결과와 기존의 알려진 부식층에 대한 절대연령측정 결과(Machida and Arai, 1992)를 이용하여 구간별로 각 코어의 퇴적물을 구한 결과, 01GHP-04 코어에서는 71m/106yr-253m/106yr(평균: 168m/106yr)이고, 01GHP-06 코어에서는 62m/106yr-640m/106yr(평균: 190m/106yr)로 분석되었다. 일반적으로 가스 하이드레이트가 형성되기 위해서는 유기물 매물 시 퇴적물이 30m/106yr 보다 높아야 하는데 위의 두 코어에서는 이 조건을 전체적으로 [2]가 제시한 가스 하이드레이트가 형성에 필요한 조건을 충분히 만족시키는 것으로 분석되었다.

2000년도 탐사해역에서 채취된 퇴적물 내 잔류가스의 동위원소 분석결과 가스의 기원이 생물기원으로 밝혀졌으며<sup>[10]</sup>, 분지의 남부에서 채취한 코어에서 가스 하이드레이트의 해리에 기인된 가스의 방출과 관련된 것으로 분석되는 균열이 발견되었다(Fig. 3).

코어 퇴적물 시료를 이용한 간극수 분석 결과, 탐사해역의 황산염 메탄 전이대(sulfate methane transition zone: SMTZ)의 심도는 탐사해역의 북쪽으로 갈수록 낮아지는 것으로 확인되었다.<sup>[10]</sup> 이는 연구해역 북부가 남부에 비해 메탄 유동(flux)이 적다는 것을 지시하는 것이다.<sup>[20]</sup>

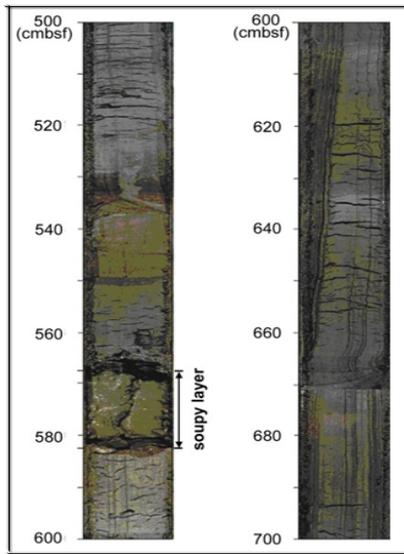


Fig. 3. Gas expansion cracks and soupy layer occurred in the Core 00GHP-11 collected from the southern Ulleung Basin [10]

### 3.2.2 탄성파 탐사자료 취득 및 처리

동해 울릉분지의 가스 하이드레이트 부존 유망지역 규명을 위해 *R/V TAMHAE II*와 이에 장착된 Geco-Prakla의 'Trilogy System'과 'Bolt Airgun'을 이용하여 146개 측선에 대하여 총 12,366,395 L.km의 단-채널 및 2차원 탄성파 다중채널 탐사자료가 취득되었다(Table 2).<sup>[10]</sup> 또한 보다 효과적인 탄성파 자료 해석을 위하여 106개 측선 총 10491,0195 L.km의 단-채널 이날로그 탄성파 탐사 자료를 GeoAcoustic의 'Sonar Enhancement System'과 Benthos의 'MESH200P Hydrophone Array'를 이용하여 다중채널 디지털 탄성파 탐사자료와 함께 취득하였다(Table 2). 이때 사용된 음원은 다중채널 디지털 탄성파 탐사와 동일하다(Table 2).

취득된 단-채널 탄성파 탐사자료는 GeoAcoustic의 'SE881 Sonar Enhancement Workstation'과 'version 3.5' 전산처리 소프트웨어를 이용하여 전산처리를 하였으며, 처리된 자료에 대한 해석 작업을 수행하였다(Fig. 4). 탐사선의 속도는 Table 2와 같은 탄성파 탐사자료 취득 매개변수를 고려하여 시간당 평균 4.5 노트(knot)를 유지하였다.

다중-채널 탐사자료는 선상에서 'Geoseis'를 이용하여 1차 전산처리 하였고, 'ProMax'를 이용하여 2차 전산처리를 하였으며, 침니구조와 가스 하이드레이트와의 관계를 규

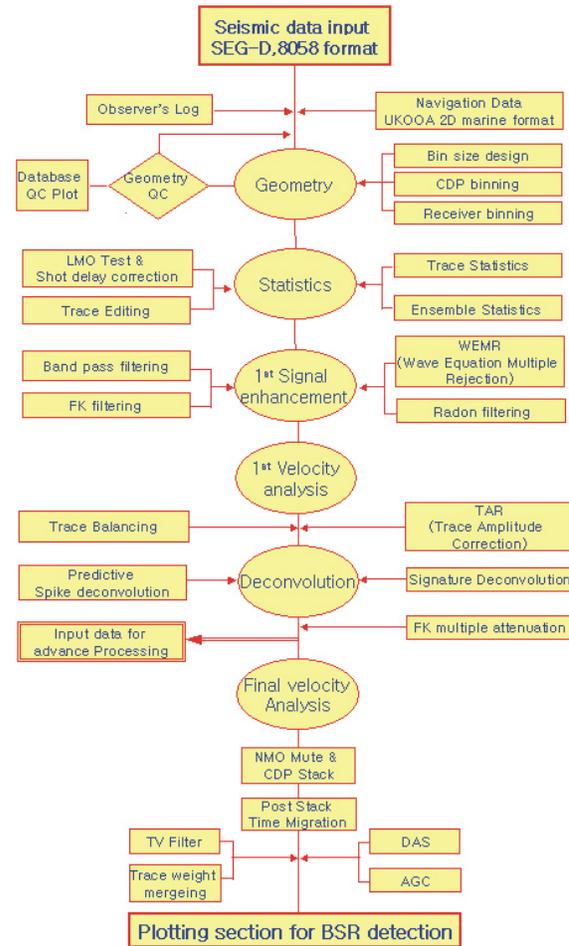


Fig. 4. 2D seismic data processing flow chart for gas hydrate project [10]

명하기 위해 음향공백 현상과 함께 속도 끌어올림(velocity pull-up) 구조와 같은 반사면의 속성을 분석하였다.

탄성파 자료해석 시 주의하여야 할 점은 반사면 단면에 나타나는 강진폭의 반사면이 모두 가스 하이드레이트에 기인한 것이 아니라는 것과 퇴적층이 해저면과 평행하게 발달되어 있는 경우 탄성파 탐사자료로부터 BSR을 확인하는 것이 쉽지 않다는 것이다. 또한 가스 하이드레이트로 포화된 퇴적층 하위에 가스가 존재하지 않거나 빠른 탄성파 속도를 가지는 퇴적층에서는 BSR이 명확하게 나타나지 않는다.<sup>[23,24]</sup> 따라서 BSR을 규명하기 위해 요구되는 아래와 같은 사항들에 대한 분석이 필요하다.<sup>[25]:</sup>

- BSR은 해저면과 평행하게 발달한다.
- BSR의 직상부에서는 2.0km/s의 높은 탄성파 속도 ( $V_p$ )를 보인다.

- BSR에서 극성역전 현상이 나타나며, BSR의 하위에서 바다물의 속도보다 낮은( $<1.5\text{km/s}$ ) 탄성과 속도는 자유가스(free gas)를 지시한다.
- BSR의 상위 구간에서는 매우 낮은 임피던스 콘트라스트를 가지는 음향 공백대 또는 투명대(acoustic blanking zone or transparent zone)가 나타난다.
- BSR로부터 수백 m 하위에 있는 구간에서 높은 반사율이 보인다.
- BSR 상위에서 관찰되는 음향공백대는 높은 탄성과 속도를 가지는 가스 하이드레이트에 기인한다.<sup>[26]</sup>

침니구조에서 흔히 관찰되는 속도 끌어올림 구조와 음향 공백 현상은 높은 탄성과 속도를 가지는 가스 하이드레이트의 존재로 분석된다(Fig. 5). 침니구조는 탐사해역의 중앙부에 잘 나타난다(Fig. 6).

동해 울릉분지와 한국대지에 분포하는 해저 퇴적층은 심부 탄성과 탐사자료에 나타나는 음향상 특성에 따라 3가지 음향상을 보이는 퇴적체로 구분하였다.<sup>[10]</sup> 음향상 I 퇴적체는 비교적 연속적이고 평행한 음향반사면 특징을 보이고, 음향강도(amplitude)도 강한 편이다. 이러한 음향상은 주로 반심해성 퇴적물 침전(hemipelagic settling)에

의한 퇴적물과 저탁류(turbidite) 퇴적물로 이루어진 퇴적층으로 해석된다.<sup>[10]</sup> 이 음향상은 평행층리를 보이는 퇴적체로서 저탁류 퇴적체와 반원양성 침강 퇴적체의 교호로 이루어진 퇴적체이다. 반면에 혼탁(chaotic)상 및 투명(transparent)상을 보이는 음향상 II는 썩기형의 기하학적 외형을 보이는 경우가 많으며, 이러한 음향상을 보이는 퇴적층은 보통 쇄설류에 의한 퇴적체 혹은 대규모의 질량류(mass flow)의 원부(distal part) 퇴적체로 해석된다.<sup>[28]</sup>

음향상 II 퇴적층의 상부는 생교란작용을 심하게 받은 퇴적층으로 피복되어 있다. 음향상 I 퇴적체는 주로 분지 중앙부나 경사가 완만한 사면에 발달하고, 음향상 II 퇴적체는 경사가 급한 사면이나 사면 하부 근처의 분지에 발달한다(Fig. 6).

주로 KG(Korea Gap; previously Ulleung Interplain Gap) 근처에서 관찰되는 음향상 III 퇴적체는 쇄설류나 저층류(bottom current)에 의한 침식을 잘 보여주는 음향상 특징을 보인다.<sup>[18]</sup> 연구해역 서부에는 후포단층을 이루는 부분에 기반암이 노출되어 있다.

가스 하이드레이트 부존을 지시하는 지구물리학적 지시자에 대한 분석을 수행하기 위하여 취득된 2차원 탄성과 다중채널 탐사자료에 대하여 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR과 탄성과 공백대(seismic blanking zone)와 속도 끌어올림 구조를 수반하는 침니구조를 분석하고 분포지역을 도면화 하였다. 가스 하이드레이트로 포화된 퇴적층과 가스 또는 물로 포화된 퇴적층 사이 즉, BGHSZ(base of gas hydrate stability zone)에서는 탄성과 속도 및 밀

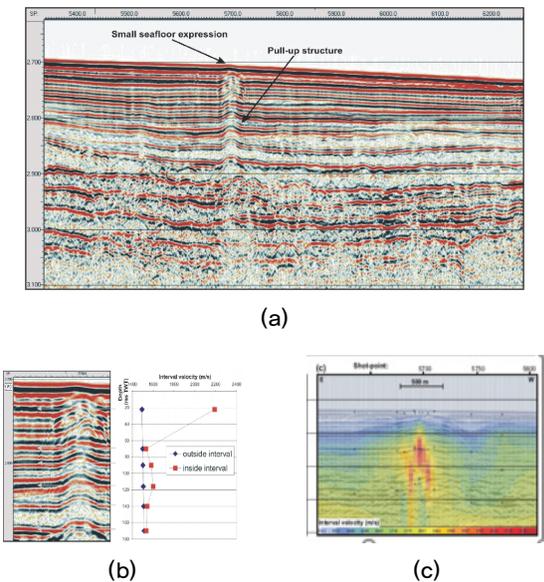


Fig. 5. (a) Example of chimney structure from line 00GH-10 showing the seismic blanking zone on line 00GH-10 (a), and its detailed view on the pull-up structure, and associated change in interval velocity (b) and (c) (modified from [10])

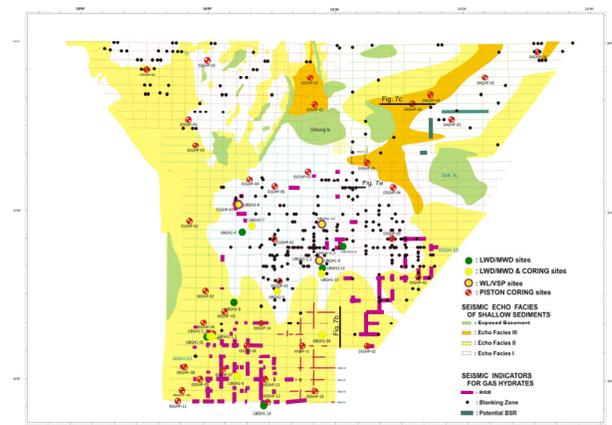


Fig. 6. Distribution of BSRs, chimney structures and acoustic facies on the Ulleung Basin (modified from [10])

도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반한 강진폭의 반사면인 BSR이 해저면과 평행하게 나타난다. 이들 BSR은 연구해역의 남부와 남동부에 주로 나타난다(Fig. 6).

3.2.3 탄성파 탐사자료 분석

2차원 다중-채널 탄성파 탐사자료를 분석하여 우리나라 동해 울릉분지에서 확인되는 가스 하이드레이트 부존 지시자를 규명하고 분포도를 작성하였다.<sup>[10]</sup> 또한 가스 하이드레이트의 부존 특성을 알아보기 위하여 음향상(acoustic facies) 분석을 수행하고 코어 분석결과와 대비하였다.<sup>[10]</sup>

전기한 바와 같이 가스 하이드레이트로 포화된 퇴적물은 물 또는 자유가스(free gas)로 충전된 퇴적물에 비해 높은 탄성파 속도를 갖는다. 따라서 가스 하이드레이트 부존 지시자를 명확하게 규명하는데 가장 중요한 요소 중 하나는 탄성파 속도이다. 본 연구를 통하여 취득된 다중채널 탄성파 탐사자료의 경우 깊은 수심에 비해 오프셋(offset)이 1km로 짧아 정확한 탄성파 속도의 분석이 쉽지 않았으며, 분석 결과의 정밀도 역시 3km의 긴 수진기를 이용 2005년에 취득된 탐사자료에 비해 상대적으로 낮았다. 그러나 가스 하이드레이트 부존 지시자와 음향상 분석에는 큰 어려움이 없었다. BSR은 탐사해역의 남부에 주로 나타나며, 분지 중부의 서쪽해역에 발달된 배사구조에서도 확인되었다(Fig. 6).

울릉분지에 발달된 침니구조는 다음과 같이 매몰된(buried) 탄성파 침니, 마운드를 수반한 침니, 폭-마크(pock-mark)를 수반한 침니로 구분된다.<sup>[30]</sup> 해리된 가스가 수층으로 방

출되면서 해저면 부근의 연약한 지층의 함몰에 의해 형성되는 폭-마크의 경우 저탁류 퇴적상이 주로 분포하는 분지 쪽에서 많이 확인되며, 마운드(mound) 구조는 연구해역의 중앙부와 북부에 많이 발달되어 나타난다(Fig. 7).

3.3 가스 하이드레이트 심부시추 자료 취득 및 분석

울릉분지의 경우 지온구배가 정상 값에 비해 상당히 높

Table 3. Summary of in-situ temperature measurements, calculated geothermal gradients and BGHSZ depths of UBGH2 coring sites (modified from [21] and [22])

Hole	Depth of Temperature Measurement (mbst) [seafloor depth]	Measured Temperature (°C)	Calculated Geothermal gradient (°C/km)	Calculated Depth of BGHSZ (mbst)	Inferred Depth of BSR (mbst)
UBGH1-4A	seafloor	-	91	<185	201
UBGH1-4C	174,7 188,1	15,52 17,29			
UBGH1-9A	seafloor	-	110,4	<151	179
UBGH1-9B	58,1	7,87			
UBGH1-9C	154,9 177,40	17,79 20,00			
UBGH1-10A	seafloor	-	119,7	<141	177
	158,2	18,40			
	183,2	21,20			
UBGH2-3A	seafloor	0,25	95	131,6	168
UBGH2-3C	120,5	11,7			
	158,0 159,3	failure failure			
UBGH2-7A	seafloor	0,371	171	124	183
UBGH2-7D	168,0	29,8			
	204,0	34,7			
UBGH2-11A	seafloor	1,241	112	159	160
UBGH2-11B	61,5	9,8			
	107,0 170,5	13,19 19,8			
UBGH2-3A	seafloor	0,25	95	131,6	168
UBGH2-3C	120,5	11,7			
	158,0 159,3	failure failure			
UBGH2-7A	seafloor	0,371	171	124	183
UBGH2-7D	168,0	29,8			
	204,0	34,7			
UBGH2-11A	seafloor	1,241	112	159	160
UBGH2-11B	61,5	9,8			
	107,0 170,5	13,19 19,8			

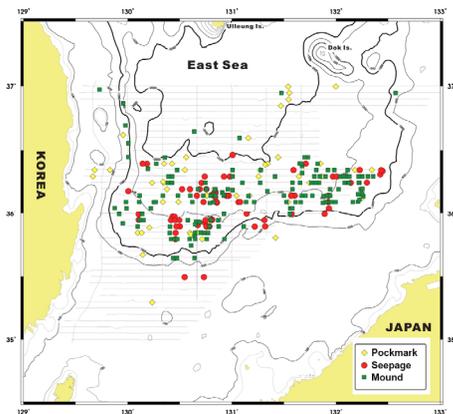


Fig. 7. Distribution of gas hydrate-related features on the seafloor developed in the Ulleung Basin [28]

은 것으로 측정되었는데 이는 분지가 젊은 백-아크(young back-arc) 분지인 때문에 분석된다(Table 3). BGHSZ의 심도가 BSR 심도 보다 상위에 위치하는 것이 확인되었는데, 이는 침니구조를 따라 하부로부터 상향 이동되는 따뜻한 유체(fluid) 때문인 것으로 해석된다. 그리고 Archie 공식에 의해 계산된 가스 하이드레이트 포화도가 EMT 모델링(effective modeling theory)에 의한 포화도에 비해

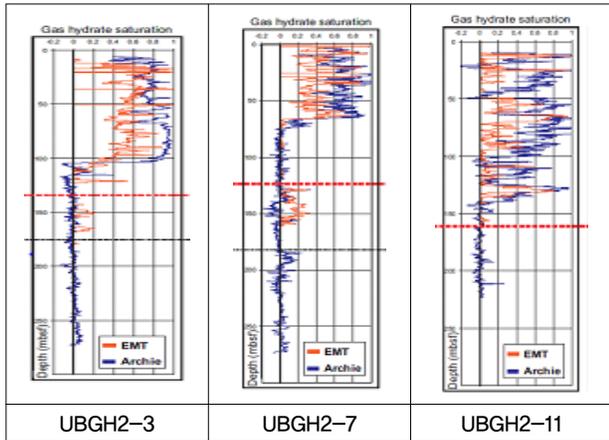


Fig. 8. Example of the LWD data showing high gas hydrate saturation within chimney structures from Site UBGH2-3 (a), UBGH2-7 (b) and UBGH2-11 (c) (Red and blue dashed lines are the BGHSZ and projected BSRs, respectively (modified from [22])

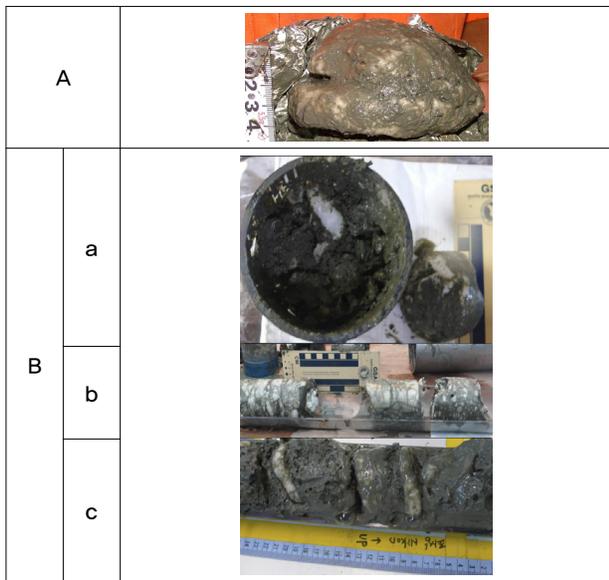


Fig. 9. (A) Gas hydrate recovered from chimney structure recovered by piston coring in 2007 [26], and by deep drilling 2010 [29]: (a) nodule type from Site UBGH2-3, (b) massive type from UBGH2-7 and (c) vein type from Site UBGH2-11 (modified from [31])

높게 계산된 것은 단열로 충전된 가스 하이드레이트에서 포화도가 과도(over-saturate)하게 계산된 때문인 것으로 분석된다(Fig. 8).

상기 표에 서술된 지온구배는 각 코어링 홀에서 WISON EP ststem을 이용하여 측정된 지층온도와 각 LWF/MWD 홀에서 'CTD 해양학 장치를 이용하여 측정된 해저면 온도를 이용하여 계산하였다.

침니구조에 부존된 가스 하이드레이트의 경우 2007년도에 01GHP-07의 해저면 부근 천부 세립질 퇴적층에 발달된 침니구조에서 국내 최초로 확인되었다(Fig. 9A). 그리고 2007년과 2010년에 Fugro사의 시추선(drill ship: D/S D/S REM Etive와 D/S Synergy를 이용하여 수행된 가스 하이드레이트 심부시추를 통해 노듈(nodule)상, 베인(vein)상 및 괴(massive)상 가스 하이드레이트의 부존이 침니구조에서 확인되었다(Fig. 9B).

### 3.4 기타 물리탐사 자료 취득, 처리 및 분석

탐사지역 해저지형의 발달상태와 가스 하이드레이트와의 연관성을 파악하기 위하여 Simrad의 심해용 다중-빔 음향측심기(multi-beam echo sounder) 'EM12S'를 사용하여 해저면을 측심하였다.<sup>[10]</sup> 자료는 Simrad의 자료처리 소프트웨어인 'NEPTUNE'을 이용하여 해황과 해수의 불균질성 때문에 발생하는 자료왜곡 요인에 대한 보정작업을

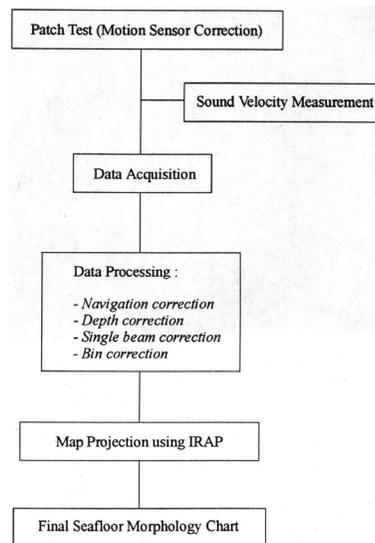


Fig. 10. Flow chart showing the multi-beam data acquisition and processing [10]

실시하였으며(Fig. 10), 다중빔 후방산란 영상자료(back-scatter image data)에 대한 분석을 수행하였다.<sup>[10]</sup>

다중빔 음향측심기를 이용해 취득한 측심 자료에 대한 분석 결과 탐사해역의 지형은 동부에 발달한 해저분지와 서쪽에 발달한 대륙사면으로 크게 나눌 수 있으며, 해저분지는 비교적 완만하게 발달되어 있으며, 남에서 북으로 갈수록 깊어지는 경향을 보인다. 한반도와 인접한 대륙사면은 대부분 해역에서 가파른 경사를 보인 반면, 분지의 남부 사면에서는 매우 완만한 경사를 보인다. 따라서 남부 사면에서 해저분리가 나타날 경우 가스 하이드레이트와의 관련성을 세심하게 분석할 필요가 있다. 탐사해역의 중앙부는 대부분 울릉분지의 영향으로 수심 2,000m 내외의 평탄하고 넓은 지형이 크게 발달되어 있는 반면, 울릉도의 북부지역에서 상대적으로 불규칙한 지형이 나타난다. 독도와 주변에 분포하는 해산의 영향으로 북동부 해역은 매우 가파른 지형변화와 약 500m에서 2,000m 까지 급격한 수심변화를 보였다. 후방산란 영상자료의 특성분석을 통해 탐사해역의 북서 해역은 매우 가파른 지형변화와 약 400m에서 2,150m 까지 급격한 수심변화를 보였다.

취득한 측심 자료에 대한 후방산란 영상자료의 특성분석을 통해 탐사해역의 북동부 해역에서 약 300m 폭의 고수로 형태의 지형을 확인하였으며, 연구해역 중앙부와 북부에서 가스 하이드레이트에 기인한 마운드와 폭-마크들이 해저면에 발달된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7). 폭-마크의 발달은 이들의 형성 당시 온도와 압력 변화에 따른 가스의 해리와 삼출(seepage)이 있었다는 것을 지시하는 것이다.

4년 간 지역과 계절을 달리하여 측정된 수온구배 자료를

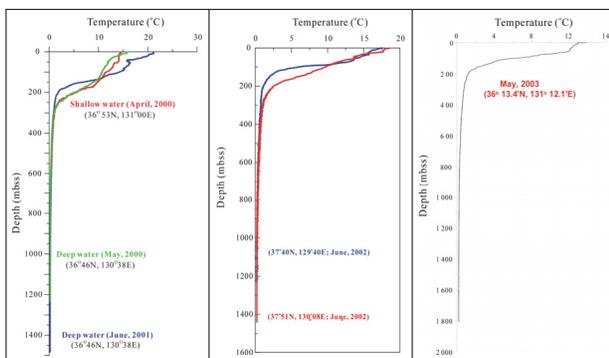


Fig. 11. Hydrothermal gradient of the study area (modified from [10])

분석하고 대비한 결과, 탐사해역에서 가스 하이드레이트가 형성될 수 있는 깊이에서는 지역과 계절에 따른 수온의 변화가 거의 없는 것으로 즉, 수온의 변화가 가스 하이드레이트 안정영역에 영향을 미치지 않는다는 것이 규명되었다(Fig. 11).

그러나 2010년도 가스 하이드레이트 2차 시추 시 측정된 지층온도를 이용하여 계산한 가스 하이드레이트 안정역역 하부 경계면의 깊이가 예측한 것보다 상당히 얕다는 것과 가스 하이드레이트 저류층의 온도가 높아 이산화탄소에 의한 치환법을 우리나라 울릉분지에는 적용할 수 없다는 것이 확인되었다.<sup>[22]</sup>

#### 4. 결론

울릉분지의 침니구조는 반심해성 퇴적물과 저탁류가 교호하며 구성된 음향상 I이 발달되어 있는 분지의 중앙부에 대부분 나타난다.

울릉분지의 침니구조에서 채취한 코어에서 선택되어 분석된 퇴적물에 포함된 총유기탄소의 함량은 대부분 0.5% 이상으로 [2]가 제시한 가스 하이드레이트 형성조건에 적합한 것으로 나타났으며, 원소분석기(Elemental Analyzer)를 이용 분석한 TOC/N과 TOC/S의 비를 고려할 때 유기물들은 해양성 조류기원의 유기물이 무산소 환경에서 퇴적된 것으로 분석되었다.

2000년도 탐사해역 남부에서 채취된 퇴적물의 경우 32개의 시료 중 19개 시료와 2003년 해역에서 채취되어 분석된 35개의 시료 중 7개 시료에서 [2]가 제시한 가스 하이드레이트가 형성에 필요한 조건이 충족되는 것으로 분석되었으며, 분지의 남부에서 채취한 코어에서 가스 하이드레이트의 해리에 기인된 가스의 방출과 관련된 것으로 분석되는 균열(crack)이 발견되었다. 반면에 연구해역 북부에서 채취된 2002년도와 2004년도 시료에서는 가스의 양이 대부분 10ml/liter wet sediment 이하로 나타났다.

침니구조가 많이 발달되어 있는 울릉분지에 부존되어 있는 가스 하이드레이트의 기원은 모두 생물기원으로 분석되었다. 특히 탄성과 단면도 상에서 가스가 BSR 하부로부터 침니구조로 상향 이동되는 양상이 관찰되었으며, 현재 생

산중인 동해-1 가스전으로부터 북쪽으로 얼마 떨어져 있지 않은 UBGH2-3에 부존된 가스 하이드레이트 역시 생물이 원인으로 밝혀졌다.

잔류 탄화수소 가스양의 공간적, 수직적 분포를 고려하면 전반적으로 탐사해역의 남부지역의 퇴적물이 북부지역의 퇴적물에 비하여 상대적으로 높은 농도를 가지며, 또한 퇴적물 심도가 증가할수록 가스양이 증가하는 것이 관찰되었다.

울릉분지에 발달된 침니구조에 부존된 가스 하이드레이트는 대부분 이질 퇴적물에 포함되어 있다. 가스 하이드레이트 함유 사질 퇴적층의 경우 현재의 기술로 생산이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 막대한 양의 가스 하이드레이트를 포함하고 있는 이질 퇴적물의 경우 낮은 유체 투과율과 공극률로 억제제 주입이 용이치 않다. 그러나 가스 하이드레이트가 해리되는 과정에서 해리된 가스의 팽창으로 인해 균열이 쉽게 만들어 지는 것이 코어 처리과정에서 확인되었다. 따라서 수압 파쇄법(hydraulic fracturing)을 이용해 미고결된 이질 퇴적물에 인공적으로 단열(fracture)을 만들어 열수, 증기 또는 억제제를 주입 시켜 가스 하이드레이트를 해리시켜 가스를 생산하는 방법도 고려해 볼만 하다 생각한다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 산하 가스하이드레이트 개발 사업단에서 지원하는 한국지질자원연구원의 연구과제“가스하이드레이트 탐사 및 개발연구(18-1143)”의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료 취득과 연구 수행에 도움을 준 R/V TAMHAE II 승조원, 가스하이드레이트 개발사업단의 관계자 및 연구사업의 참여 연구원들께 감사드립니다. 또한 논문 심사를 해주신 심사위원님께서도 감사를 드립니다.

## References

- [1] Davy, H. 1811, “On a combination of oxymuriatic gas and oxygen gas”, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 101, 1.
- [2] Sloan, E.D., 1998, “Clathrate hydrates of natural gas”, 2nd ed., Marcel Dekker, New York/Basel/Hong Kong.
- [3] U.S. DOE/NETL, 2002. National Methane Hydrate Program Website.
- [4] Dillon, W.P., Max. M.D., 2000, “Oceanic gas hydrate”, In: Max, M.D.(ed.), “Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/Hong Kong, 61-76.
- [5] Matsumoto, R., Okuda, Y. and Aoki, Y., 1994, Methane hydrate – hyge matura; gas resources in the 21st Century, Nihon Geizai Science Co., 253p (in Japanese).
- [6] Max, M.D., 1990, “Gas hydrates and acoustically laminated sediments: Potential environmental cause of anomalously low acoustic bottom loss in deep ocean sediment”, Naval Research Laboratory Report, 9235.
- [7] Ryu, B.-J., Kim, W.-S., Oh, J.-H., Cheon, T.-J., Huh, D.-G. Sunwoo, D. and Kim, H.-T., Kim, S.-J., Kim, H.-J., Kim, J. K, Kim, S.-P., Kong, G.-S., Kim, J.-H., Koo, N.-H., Kang, M.-H., Kim Y.-G., Seo, G.S., Choi, J.-K. and Hwang, K.-D., 1996. Study on Gas Hydrate. KIGAM Research Report (KR-96(B)-16) (in Korean with English Abstract).
- [8] Ryu, B.-J., Kwak, Y.-H., Kim, W.-S., Oh, J.-H., Seo, S.-Y., Park, K.-P., Cheong, T.-J., Huh, D.-G., Chung, B.-H., Kim, I.-K., Lee, H.-Y., Sunwoo, D., Kim, H.-T., Yoo, D.G., Jang, S.-H., Kim, S.-J., Kim, H.-J., Kim J.-K., Kim, S.-P., Kong, G.-S., Kim, K.-O., Koo, N.-H., Kang, M.-H., Kim, Y.-G., Seo, K.-S., Choi, J.-K. and Hwang, K.-D., 1999, ‘Study on gas hydrate – a new energy resoure in the 21st century. KIGAM Research Report (KR-99(B)-09) (in Korean with English Summary). 179p.
- [9] Jang, S.-H., Suh, S.-Y., Chung, B.-H. and Ryu, B.-J., 1999, Seismic Data Processig for Gas Hydrate usinf Geobit, Mulitamsa, 2(4), 184-190 (in Korean with English Abstract).
- [10] Ryu, B.-J., Kim, W.-SD, Cheong, T.-J., Chung, B.-H., Park, K.-P., Seo, S.-Y., Huh, D.-G., Lee, Y.-J., Jang, S.-H., Yoo, D.-G., Kim, J.-H., Kong, G.-S., Kim, H.-T., Koo, N.-H., Kim, S.-P., Kim, K.-O., Kwon, I.-K., Lee, J.H., Kang, M.-H., Oh, J.-H., Sunwoo, D., Han, H.-C., Lee, H.-Y., Kwon, Y.-I., Son, B.-K., Kim, S.-J., Kim, J.

- G., Kim, H.-J., Kim, Y.-G., Seo, K.-S., Choim, J.-K., Hwang, G.-D., Park, M.-H., Kim, I.-S., Baeck, Y.-S., Lee, Y.-C., Lee, J.-H., B.-H., Cho and Mo, Y.-G., 2004, Study on Techniques for Gas Hydrate Exploration and Development. KIGAM Research Report (KR-04(c)-09) (in Korean with English Summary), 525p.
- [11] Matsumoto, R., Tanahashi, M., Kakuwa, Y., Snyder, G., Ohkawa, S., Tomaru, H. and S. Marita., 2017, Recovery of thick deposits of massive gas hydrates from gas chimney structures, eastern margin of Japan Sea: Japan Sea Shallow Gas Hydrate Project. *Fire in the Ice*, Vol. 17, Issue 1, 1-6.
- [12] Lee, S.-J., 2001, Proposal for solid marine gas hydrate production – Octopus. submitted to Gas Hydrate R&D Organization.
- [13] 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, 66-75.
- [14] Tamaki, K. and Honza, E., 1985, Incipient subduction and obduction along the eastern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 119; 381-406.
- [15] Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan arc. *Proc. ODP, Sci. Results 127/128* (part 2), College Station, TX, 1311-1331.
- [16] Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., Ingle, J.C., Jr., and Pisciotto, K.A., 1992, Tectonic synthesis and implications of Japan Sea ODP drilling. In Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M., et al., *Proc. ODP, Sci. Results, 127/128* (Pt. 2): College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1333-1348.
- [17] Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, *Marine geology of Korean seas*, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, 313.
- [18] Ryu, B.-J., Seo, S.-Y., Kim, W.-S., Park, K.-P., Cheong, T.-J., Huh, D.-G., Chung, B.-H., Kwon, Y.-I., Kim, H.-T., Yoo D.-G., Jang, S.-H., Lee, J.-H., Kim, J.-H., Kwon, I.-G., Kong-G.-S., Koo, N.-H., Kim H.-J., Kim, J.-G., Kim, Y.-G., Seo, K.-S., Hwang, K.-D., Choi, J.-K., Park, M.-H., Kim, I.-S., Baeck, Y.-S., Lee, Y.-C., Lee, J.-H. and Cho, B.-H., 2003, Study on Techniques for Gas Hydrate Exploration and Development. KIGAM Research Report (KR-03(c)-09) (in Korean with English Summary).
- [19] Kang, S.P., Lee H., 1998, “Equilibrium data and prediction for methane and carbon dioxide hydrates in the aqueous MgCl<sub>2</sub> solutions”, In *Proc. 5th Asian Thermophys. Propert. Conference*, pp. 1-4.
- [20] Borowski, W.S., Paull, C.K., Ussler III, W., 1999, “Global and local variations of interstitial sulfate gradients in deep-water, continental margin sediments: Sensitivity to underlying methane and gas hydrate”, *Mar. Geol.*, 159, 131-154.
- [21] Fugro, 2007, Investigation of gas hydrate expedition UBGH1, Ulleung Basin, East Sea, Offshore Korea, Factual Field Report. Report No. 0201-6242.
- [22] Ryu, B.-J., G.-Y. Kim, J.-H. Chun, J.-J. Bahk, J.Y. Lee, J.-H. Kim, D.-G. Yoo, T.S. Collett, M. Riedel, M.E. Torres and the UBGH2 Scientists, 2012, The Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) Expedition Report. KIGAM, Daejeon, 667p.
- [23] Kvenvolden, K.A. and Bernard, L.A., 1983, Gas Hydrates of the Blake Outer Ridge. Site 533. Deep Sea Drilling Project Leg 76, Init. Repts. DSDP 76, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C, 353-365.
- [24] Max, M.D., 1990a, Gas Hydrates and Acoustically Laminated Sediments: Potential Environmental Cause of Anomalously Low Acoustic Bottom Loss in Deep Ocean Sediment, Naval Research Laboratory, Report 9235, 68.
- [25] Paull, C.K., Matsumoto, R., Wallace, P.J., et al., 1997, *Ocean Drill. Program, Initial Reports*, 164 (galley proofs).
- [26] Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L., 1979, *Amer. Assn. Petrol. Geol. Bull.*, 63, 2204-2213.
- [27] Ryu, B.-J. and Riedel, M., 2017, Gas hydrates in the Ulleung Basin, East Sea of Korea. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic sciences journal*, 28(6), 943-963.
- [28] Yoo, D.-G., Ryu, B.-J., Park, K.-P., Shin, W.-C., Lee, H.-Y., Chung, B.-H., Jang, S.-H., Koo, N.-H., Kim, S.-P., Kim, W.-S., Kim, G.Y., Kim, B.-Y., Jung, S.-H., Kim, Y.-J., Kang, N.-K., Kim, Y.-G., Hwang, K.-D., Seo, G.-S., Kim, J.-G., Choi, J.-K., Yi, B.-Y., Cheong, R.-K., Hwang, N.-S., Park, S.-C., Lee, G.-H., Kim, H.-J., Byun,

- J.-M., Han, H.S. and Spence, G.D., 2010, Study on Geophysical Exploraion of Gas Hydrate. KIGAM Reseach Report (GP2010-003-2010(1)) (in Korean with English Summary).
- [29] Kwon, Y.-I., Koh, J.-H., Kim, J.-G., Kim, J.-H., Kim, H.-J., Ryu, B.-J., Park, Y.-S., Son, B.-K., Sunwoo, D., An, G.-H, Oh, J.-H., Lee, J.-H., Lee, Y.-J., Lee, H.-Y., Chun, C.-H., Cheong, R.-J., Chun, J.-H., Qwang, I.-G., Lee, J.Y., Kang, N.-K., Bae, W.-S., Woo, K.-S., Lee, S.-J., and C.-S., Lee and Sassen, R., 2007. Study on Gas Hydrate Geology and Geochemistry. KIGAM Research Report (NP 2007-019-2007(1)) (in Korean with English Summary).
- [30] Horozal S., Bahk, J.-J., Urgeles, R., Kim, G.Y., Cukur, D., Kim, S.-P., Lee, G. H., Lee, S. H., Ryu, B.-J., and Kim, J.-H., 2017. Mapping gas hydrate and fluid flow indicators and modeling gas hydrate stability zone (GHSZ) in the Ulleung Basin, East (Japan) Sea: Potential linkage between the occurrence of mass failures and gas hydrate dissociation. *Mar. and Petrol. Geol.* 80, 171-191.
- [31] Ryu, B.-J., Collett, T.S., Riedel, M., Kim, G.-Y., Chun, J.-H., Bahk, J.-J., Lee, J.-Y., Kim, J.-H. and D.G. Yoo, 2013, Scientific Results of the Second Gas Hydrate Drilling Expedition in the Ulleung Basin (UBGH2). *Mar. Petrol. Geol.*, 47, 1-20.