



[2016-9-GH-014]

우리나라 가스 하이드레이트 연구·개발

류병재^{1)*}

Gas Hydrate Research and Development in Korea

Byong-Jae Ryu^{1)*}

Received 29 June 2016 Revised 5 July 2016 Accepted 6 July 2016

ABSTRACT Gas hydrate project in Korea was initiated by Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) in 1996. To understand the potential of gas hydrate presence in the Ulleung Basin, East Sea, KIGAM collected the geophysical data and sediment samples in the southwestern part of the basin from 1997 to 1999. Bottom simulating reflector firstly was identified from the seismic data acquired in 2008. Regional geophysical surveys and geological studies have been also carried out by KIGAM from 2000 to 2004. KNOC also collected seismic data from 2001 to 2003. Based on the results from these preliminary researches, “Korean National Gas Hydrate Program” was launched in 2005. The program has been supported by the government, and carried out by KIGAM, KNOC and KOGAS under the management of Gas Hydrate R&D Organization. The program has undertaken geophysical survey programs and coring for the identification of gas hydrate occurrences, the assessment of gas hydrate resources in the basin, development of optimum production technology, environmental impact studies, and test production. The gas hydrate test production which originally was planned to be performed in 2015, is postponed to study further for safer and more successful testing. Currently, the second national program is being planned.

Key words Gas hydrate(가스 하이드레이트), Clathrate(클러스레이트), Ulleung Basin(울릉분지), Seismic data(탄성파 자료), Bottom simulating reflector(해저면 모방 반사면), KNOC(한국석유공사), KOGAS(한국가스공사)

Nomenclature

UBGH1 : The First Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition
UBGH2 : The Second Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition
PROD : Portable Remotely Operated Drill
LWD : Logging-While-Drilling
WL : Wireline Logging
VSP : Vertical Seismic Profile

subscript

mbsf : meter below sea-floor
mbsl : meter below sea-level

1. 서론

천연가스 하이드레이트(natural gas hydrate)는 클러스레이트(clathrate) 하이드레이트의 일종으로 저온·고압 조건 하에서 천연가스가 수소결합을 하는 물분자(hydrogen-bonded water molecule)와 결합하여 형성된 얼음과 비슷한 형태를 보이는 고체상 화합물(solid compound)이다.^[1] 저온·고압 조건의 심해저와 영구동토(permafrost) 지역의

1) Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
E-mail: bjryu@kigam.re.kr
Tel: +82-42-868-3211 Fax: +82-42-868-3417

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

[1]에 의해 클로린 하이드레이트(chlorine hydrate)의 존재가 확인된 이후 현재까지 천연가스의 구성성분인 탄화수소 가스(hydrocarbon gas)를 포함하여 130개 이상의 가스분자들이 물분자와 결합하여 가스 하이드레이트를 형성하는 것으로 보고되었다.^[2] 자연 상태에서의 천연가스 하이드레이트의 존재는 물의 빙점보다 높은 온도에서 가스 수송관(gas transmission line)이 막히는 사고가 관내에서 형성된 하이드레이트에 의한 것이라는 [3]의 연구에 의해 규명되었으며, 이를 계기로 천연가스 하이드레이트가 주목을 받기 시작하였다. 육상 퇴적층에 부존되어 있는 천연가스 하이드레이트의 존재는 1967년 구 소련의 영구동토지역에서 최초로 보고되었다.^[4] 해저 퇴적층에 존재하는 천연가스 하이드레이트는 1974년 흑해(Black Sea)에서 최초로 관찰되었다.^[5] 서반구의 경우 1979년 Mexico 남쪽 Middle America Trench에서 수행된 DSDP(Deep Sea Drilling Project) Leg 66의 Site 490, 491 및 492에서 천연가스 하이드레이트의 부존이 확인되었다.^[6] 이들 천연가스 하이드레이트의 발견을 계기로 새로운 하이드레이트 연구의 전환기를 맞이하였다.

가스 하이드레이트에 포획된 유기탄소의 추정 매장량은 10^4 Gt으로 화석에너지(fossil fuel)에 포함된 유기탄소 양의 2배로 막대하다.^[7] 그리고 천연가스 하이드레이트의 주 구성성분인 메탄은 연소 시 현재 사용되고 있는 다른 화석 에너지에 비해 대표적 온실가스인 이산화탄소를 적게 방출하는 특성을 가지고 있다.^[8] 미래 에너지원으로 가스 하이드레이트의 중요성을 인식한 우리나라, 일본, 미국, 인도, 타이완 등 국가에서는 가스 하이드레이트에 대한 국가 연구·개발(research and development: R&D) 프로그램(program)을 수행하고 있다. 또한 가스 하이드레이트는 영구동토지역과 심해 등 특수한 지역에서 전통 천연가스의 탐사와 개발을 위하여 연구되어야 할 매우 중요한 대상이며, 환경오염과

자연재해(natural hazard) 측면에서도 매우 중요하다.^[9-13] 이밖에 가스 하이드레이트 관련 기술은 전통 천연가스의 수송과 저장, 온실가스의 처리와 격리(sequestration), 폐수 및 휘발성 유기 화합물(volatile organic compound)의 처리 등 다방면에 활용된다.

가스 하이드레이트가 형성되고 안정하게 부존되기 위해서는 우선 고압·저온(1°C 에서 29기압, 10°C 에서 76기압 이상)의 조건이 충족되어야 한다. 또한 충분한 양의 가스(> 10 ml residual methane/liter wet sediment)와 물이 존재해야 하며, 형성된 가스가 삼투될 수 있는 투수성과 가스 하이드레이트가 형성될 수 있는 공간(=공극: pore)이 요구된다.^[11] 즉, 온도·압력 조건과 가스의 이동·집적 조건 이외에 높은 퇴적률(> 30 m/ 10^6 year), 퇴적물 내에 충분한 양의 유기물($> 0.5\%$ TOC: total organic carbon)과 잔류 메탄농도(> 10 ml/1 liter wet sediment) 등의 조건이 충족되어야 한다.^[11] 가스 하이드레이트의 기원은 포획된 가스의 성분과 탄소동위원소($\delta^{13}\text{C}$) 분석을 통해 알 수 있다. 즉, 생물분해 기원 가스 하이드레이트의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-90 \sim -60\%$ 범위를 가지는 반면에 열분해 기원 가스 하이드레이트의 $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-60 \sim -30\%$ 범위를 갖는다.^[14]

가스 하이드레이트의 부존을 간접적으로 확인할 수 있는 지구물리 탐사 방법에는 물리검층(well logging), 탄성과 탐사(seismic survey), 해저면 측사 탐사(side scan sonar survey), 다중-빔 음향-측심기(multi-beam echo-sounder)를 이용한 해저지형 탐사, 전자기(electromagnetic: EM) 탐사 등이 있다. 이중 탄성과 탐사 자료상에서 해저면 모방 반사면(bottom simulating reflector: BSR)을 확인하는 것이 가장 일반적으로 이용되고 있다. 해저면과 평행하게 발달되어 나타나는 BSR은 가스 하이드레이트로 포화된 퇴적층과 하위에 발달된 자유가스 또는 물로 포화된 퇴적층과의 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반한 큰 진폭(amplitude)의 반사면이다.^[15] 또한 BSR을 경계로 상위에 발달된 퇴적층에서는 가스 하이드레이트에 의한 교질화에 기인한 탄성 반사파의 진폭감쇠 때문에 형성되는 음향 공백대(acoustically blank zone)가 나타나며, 하위에서는 탄성과 속도가 감소하게 된다. 퇴적층이 해저면과 평행하게 발달되어 있는 경우 탄성과 탐사자료로부터 BSR을 확인하는 것은 쉽지 않

다. 그리고 가스 하이드레이트층 하위에 가스가 존재하지 않거나 빠른 탄성과 속도를 가지는 퇴적층에서는 BSR이 명확하게 나타나지 않는다.^[16,17] 따라서 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR을 보다 명확히 분석하기 위하여 정밀한 탄성과 속도분석과 함께 BSR 심도와 가스 하이드레이트 안정영역(gas hydrate stability zone: GHSZ)의 하부 경계면 심도와의 대비가 요구된다. 가스 하이드레이트의 평형조건(equilibrium condition) 즉, 상경계(phase boundary)는 포획된 가스 이외에 해수와 퇴적층의 간극수의 영향을 받기 때문에, 그 지역의 수리학적·지질학적 특성에 맞춰 분석되어야 한다.

가스 하이드레이트의 부존을 간접적으로 확인하기 위하여 이용되는 대표적인 지질·지화학적 방법으로는 퇴적물, 해저면의 물 및 간극수(interstitial water) 분석을 들 수 있다. 첫째, 가스 하이드레이트가 해리되어 가스와 물로 변화되면서 가스팽창에 의한 균열(gas expansion crack)과 죽과 같은 층(soupy layer)이 형성된다. 둘째, 가스 하이드레이트에서 염소이온(Cl^-)은 감소하고 $\delta^{18}O$ 는 증가한다. 반면, 가스 하이드레이트와 평형인 해수에서는 염소이온이 증가하고 $\delta^{18}O$ 가 감소한다. 셋째, 가스 하이드레이트가 해리될 때 흡열반응에 의해 온도가 낮아진다. 이러한 지질·지화학적 지시자는 퇴적물 관찰, 동위원소 분석, 간극수 내 염소이온 분석 및 적외선(infra-red: IR) 카메라를 이용 분석할 수 있다.

우리나라의 경우 시베리아 등 극한지역의 가스전 개발, 인접국가와의 대륙붕 한계획정 및 온실가스 감축의무의 이행에 대비하여, 가스 하이드레이트에 대한 연구·개발은 매우 중요한 국가적 과제이다. 특히 에너지의 약 97%를 수입에 의존하고 있으며, 이를 위하여 총 수입액의 20%에 달하는 막대한 외화를 지출하고 있어 에너지원의 안정적인 확보는 국가 경제를 위하여 매우 중요하다. 따라서 산업자원부(현 산업통상자원부)는 환경 친화적인 에너지원의 안정적인 확보를 위하여 2005년 7월 ‘가스 하이드레이트 개발사업단’을 설립하여 국책사업을 수행하고 있다. 본 논문에서는 가스 하이드레이트의 안전하고 경제적인 개발을 위한 여러 좋은 의견을 청취하기 위하여 우리나라의 가스 하이드레이트연구·개발 현황에 대한 소개를 하고자 한다. 가스 하이드레이트 시험생산(test production)과 관련된 3 단

계 연구의 경우 아직 대외비에 묶여 있는 관계로 본 논문에서는 연구 수행 내용만 간략하게 서술하였다.

2. 기초연구

우리나라에서 가스 하이드레이트 연구는 1996년 한국지질자원연구원에 의해 시작되었다.^[18] 당시 천연가스 하이드레이트에 대한 우리나라의 연구 수준은 매우 초보 단계에 있었다. 따라서 천연가스 하이드레이트의 기원, 결정학적 및 열역학적 특성 그리고 가스 하이드레이트 탐사 및 개발 방법 등의 기본적인 정보를 파악하기 위하여 문헌연구를 통한 기초적인 연구를 수행하였다.^[18]

1996년 말 한국지질자원연구원의 탐사선 *R/V*(research vessel) *TAMHAE II*가 건조됨에 따라 1997년부터 우리나라 해역에서의 가스 하이드레이트 부존 가능성 파악을 위한 탐사가 가능하게 되었다. 우리나라 해역에서 가스 하이드레이트가 형성되고 고체상으로 부존될 수 있는 기본적인 조건을 충족하고 있는 동해 울릉분지를 탐사대상 해역으로 선정하였다. 1997년부터 1999년까지 가스 하이드레이트 부존 가능성을 파악하기 위하여 포항에서 남동쪽으로 약 50 km 떨어진 울릉분지 남서부 해역에서 가스의 방출(seepage)로 인하여 형성된 것으로 판단되는 폭마크(pork mark)가

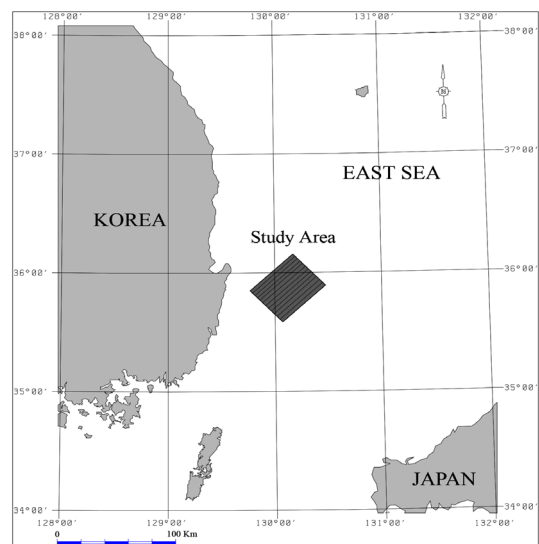


Fig. 1. Location of study area for 1997~1999 gas hydrate project

확인된 지역을 대상으로 탄성과 탐사, 정밀 해저지형 조사를 실시하였다(Fig. 1). 또한 탐사해역에서의 가스 하이드레이트가 형성된 후 해리(dissociation) 되지 않고 고체 상태로 안정하게 존재할 수 있는 가스 하이드레이트 안정영역(gas hydrate stability zone: GHSZ)을 파악하기 위하여 자체 제작한 실험장치를 이용해 평형조건(equilibrium condition)을 분석하였으며, 또한 낙하식 수심·수온 측정기(expandable bathythermograph: XBT)를 이용하여 수심 따른 수온을 측정하였다.

가스 하이드레이트 부존 가능성 규명을 위하여 울릉분지 남서부 해역에서 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 1997년에 총 11개 측선 400 L-km 단채널(single-channel) 탄성과 탐사자료를 취득하였다. 그리고 1998년과 1999년에 각각 13개 측선 658.6375 L-km, 8개 측선 183.0750 L-km의 다중채널(multi-channel) 탄성과 탐사자료를 취득하고 분석하였다(Fig. 1). 탐사에 이용된 측위방법은 측위 시스템(system)으로 현재 가장 많이 사용되고 있는 위성을 이용한 항측시스템인 전 지구 측위시스템(Global Positioning System: GPS)을 이용하였다. 다중 채널 탄성과 신호의 수신을 위해서 6.25 m 그룹간격의 64개 채널(channel)로 구성된 400 m의 스트리머 액티브 섹션(streamer active section)을 사용하였다. 액티브 섹션 앞에는 장력을 완화시킬 수 있는 50 m 길이의 스트레치(stretch) 섹션 2개를 연결하였다. 스트리머의 깊이를 5 m로 일정하게 유지시키기 위하여 3개의 심도 유지장치를 스트리머에 부착하였다. 탐사자료는 SEG-D 8015형식으로 IBM 3480 자기 테이프(magnetic tape, 200 MB)에 기록하였으며, 기록시간은 4초, 샘플링(sampling) 간격은 1 ms로 하였다(Table 1). 음원의 용량은 1998년에는 54 inch³와 144 inch³였으며, 1999년에는 245 inch³였다. 음원은 탐사속도를 일정하게 유지하여 약 5 초 간격으로 발파가 되도록 하였다. 탐사자료 분석을 통하여 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR이 우리나라 해역에서 최초로 확인하였다.^[19] 연구지역과 지질학적 특성이 유사한 동해의 오키 릿지(Oki Ridge)와 키타-야마토 트러프(Kita-Yamato Trough)에서 수행된 ODP(Ocean Drilling Program) Leg 127의 Sites 798과 799의 연구결과를 토대로 평형조건과 가스 하이드레이트 안정영역을 분석하였다. 실험을 통하여 측정된 결과는 기존 외국에서

발표된 실험결과 및 [20]의 열역학적 모델에 의한 예측 결과와 잘 일치하였다. 또한 분석된 가스 하이드레이트 안정영역의 하부 경계면의 심도는 연구해역에서 확인된 BSR 심도와 잘 일치하였다.^[21]

3. 선행연구(2000년~2004년)

1990년대 말까지 가스 하이드레이트가 부존될 수 있는 물리적 조건을 충족하고 있는 동해에 대한 탐사실적은 매우 미미한 편이었다. 따라서 가스 하이드레이트 탐사기술의 확보와 함께, 우리나라 동해 예상 관할해역에서의 가스 하이드레이트 형성 잠재력과 부존 가능지역을 규명하기 위하여 2000년부터 2004년까지 5년 동안 산업자원부와 한국가스공사의 지원을 받아 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 동해 울릉분지 약 46,294 km² 해역에서 탄성과, 정밀 해저지형 및 지질·지화학 탐사를 수행하고 획득한 자료를 분석하였다(Fig. 2; Table 1).^[22] 또한 탐사지역에서의 가스 하이드레이트 안정영역을 보다 명확하게 분석하기 위하여 XBT를 이용하여 지역과 계절을 달리하여 수심에 따른 수온을 측정하고 실험결과와 대비하여 가스 하이드레이트 안정영역을 분석하였으며, 가스 하이드레이트의 물성을 측정하고 처리, 개발 및 이용에 필요한 기반기술을 확보하기 위하여 자체적으로 설계·제작한 장치를 이용한 실험연구와 시물레이션 연구를 수행하였다.^[22]

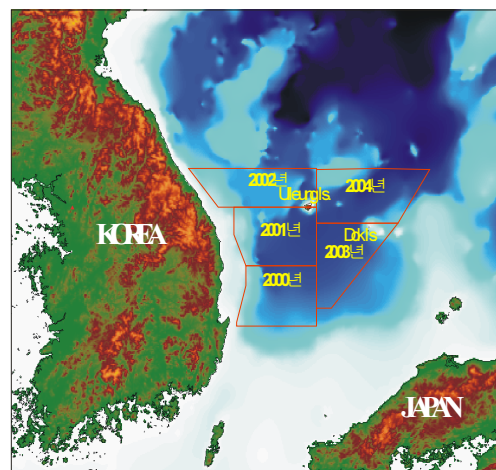


Fig. 2. Study area of gas hydrate project performed from 2000 to 2004

Table 1. Summary of seismic lines and piston cores collected from 2000 to 2004

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]

SC: single-channel, MC: multi-channel

3.1 지질·지구물리 연구

2차원 탄성과 다중채널(multi-channel) 탐사자료는 *R/V TAMHAE II*와 이에 장착된 Geco-Prakla의 'Trilogy System'과 'Bolt Airgun'을 이용하여 146개 측선에 대하여 총 12,366.395 L-km를 취득하였다(Table 1).^[22] 탐사선의 속도는 Table 2와 같은 탄성과 탐사자료 취득 매개변수(parameter)를 고려하여 시간당 평균 4.5 knot를 유지하였으며, 탐사자료는 선상에서 'Geoseis'를 이용하여 1차 전산처리 하였으며, 'ProMax' 및 'Globe Claritus'를 이용하여 전산 재처리(reprocessing)를 하였으며, 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 지구물리학적 지시자에 대한 분석을 수행하였다.^[22] 또한 보다 효과적인 탄성과 자료 해석을 위하여 106개 측선 총 10491.0195 L-km의 단채널 아날로그(single-channel analog) 탄성과 탐사 자료를 GeoAcoustic의 'Sonar Enhancement System'과 Benthos의 'MESH200P Hydrophone Array'를 이용하여 다중채널 디지털 탄성과 탐사자료와 함께 취득하였다. 이때 사용된 음원은 다중채널 디지털 탄성과 탐사와 동일하다(Table 2). 취득된 자료는 GeoAcoustic의 'SE881 Sonar Enhancement Workstation'과 'version 3.5' 전산처리 소프트웨어를 이용하여 전산처리를 하였으며, 처리된 자료에 대한 해석 작업을 수행하였

Table 2. Acquisition parameters of seismic data collected from 2000 to 2004

Year [Survey Type]	Streamer length (m)	No. of channel	Source volume (in ³)	Record length (sec)	Shot point interval (m)
2000 [2D MC]	600	96	s. 19 : 245 s. 5 : 454 s. 28 : 1,035 other s. : 299	4	12.5
2000 [SC]	30.4	1	s. 19 : 245 s. 4 : 454 other s. : 299	4	
2001 [2D MC]	1,000	80	s. 1~25 : 925 s. 26~30 : 1,254	s. 1~25 : 4 s. 26~30 : 8	s. 1~25 : 12.5 s. 26~30 : 25.0
2001 [SC]	30.4	1	925	s. 1~25 : 4 s. 26~30 : 8	
2002 [2D MC]	1,000	80	1,254	6	25.0
2002 [SC]	30.4	1	1,254	6	
2003 [2D MC]	1,000	80	1,035	6	25.0
2003 [SC]	30.4	1	1,035	6	
2004 [2D MC]	1,000	80	1,035	6	25.0
2004 [SC]	30.4	1	1,035	6	

s.: sequence

다. 이밖에 또한 가스 하이드레이트의 부존 특성을 알아보기 위하여 음향상 분석을 수행하고 코어 분석결과와 대비하였다.^[22]

취득된 2차원 탄성과 다중채널 탐사자료에 대하여 전산 처리와 함께 속도분석, 극성분석, 전파형 역산(full waveform inversion) 및 임피던스 역산(impedance inversion) 등의 분석을 수행하여 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR과 탄성과 공백대(seismic blank zone)를 확인하고 분포도를 작성하였다.^[22] 탄성과 공백대는 탐사해역의 중부에 잘 나타난다. 탄성과 공백대에서 흔히 관찰되는 속도

끌어올림(velocity pull-up) 현상은 높은 탄성과 속도를 가지는 가스 하이드레이트의 존재로 분석된다. BSR은 탐사해역의 남부에 주로 나타나며, 분지 중부의 서쪽해역에 발달된 배사구조에서도 확인되었다. 해리된 가스가 수층으로 방출되면서 해저면 부근의 연약한 지층의 함몰에 의해 형성되는 폭-마크(pock-mark)의 경우 저탁류 퇴적상이 주로 분포하는 분지 쪽에서 많이 확인되며, 마운드(mound) 구조는 연구해역의 중앙부와 북부에 많이 발달되어 나타난다. BSR을 명확하게 규명하는데 가장 중요한 요소 중 하나는 탄성과 속도이다. 그러나 본 연구를 통하여 취득된 다중 채널 탄성과 탐사자료의 경우 오프셋(offset)이 짧아 정확한 탄성과 속도의 분석이 쉽지 않았으며, 분석결과와 정밀도 역시 긴 스트리머를 이용 2005년에 취득된 탐사자료에 비해 상대적으로 낮았다. 그러나, BSR을 규명하는데 큰 문제는 없었다.

동해 울릉분지와 한국대지에 분포하는 해저 퇴적층은 심부 탄성과 탐사자료에 나타나는 음향상 특성에 따라 3가지 음향상을 보이는 퇴적체로 구분하였다.^[22] 음향상 I 퇴적체는 평행층리를 보이는 퇴적체로서 저탁류 퇴적체와 반원양성 침강 퇴적체의 교호로 이루어진 퇴적체이며, 혼탁상 및 투명상을 보이는 음향상 II 퇴적체는 쇄설류 퇴적체로 해석된다. 음향상 I 퇴적체는 주로 분지 중앙부나 경사가 완만한 사면에 발달하고, 음향상 II 퇴적체는 경사가 급한 사면이나 사면 하부 근처의 분지에 발달한다. 주로 울릉분지간 통로(Ulleung Interplain Gap: currently Ulleung Gap) 근처에서 관찰되는 음향상 III 퇴적체는 쇄설류나 저층류(bottom current)에 의한 침식을 잘 보여주는 음향상 특징을 보인다.^[22]

탐사지역 해저지형의 발달상태와 가스 하이드레이트와의 연관성을 파악하기 위하여 SIMRAD의 심해용 다중-빔 음향 측심기(multi-beam echo sounder) 'EM12S'를 사용하여 해저면을 측심하였다.^[22] 자료는 SIMRAD의 자료 처리 소프트웨어인 'NEPTUNE'을 이용하여 해황과 해수의 불균질성 때문에 발생하는 자료왜곡 요인에 대한 보정작업을 실시하였다. 다중-빔 음향측심 자료에 대한 분석결과 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, 분지 남부의 사면에서는 매우 완만한 경사를 보인다. 따라서 남부 사면에서 해저봉락이 나타날 경우 가스 하이드레이트와의 관련성을 세심하게 분석할 필요가 있다. 탐사해역의 중앙부는 대부분 울릉분지의 영향으로 수심 2,000 m 내외의 평탄하고 넓은 지형이 크게 발달되어 있는 반면, 울릉도의 북부지역에서 상대적으로 불규칙한 지형이 나타난다. 독도와 주변에 분포하는 해산의 영향으로 북서부 지역은 매우 가파른 지형변화와 약 500 m에서 2,000 m 까지 급격한 수심변화를 보였다. 후산란 영상자료(backscatter image data)의 특성분석을 통해 탐사해역의 북동부 해역에서 약 300 m 폭의 고수로 형태의 지형을 확인하였으며, 중앙부와 북부에서 가스 하이드레이트에 기인한 탄성과 공백대에 수반된 마운드들이 해저면에 발달된 것을 확인할 수 있었다.^[22]

4년 간 지역과 계절을 달리하여 측정한 수온구배 자료를 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 것으로 규명되었다.^[22]

3.2 지질·지화학 연구

탐사해역의 가스 하이드레이트 형성 잠재력 파악과 부존 지시자(indicator) 규명을 위하여 37개 지점(수심: 790~2,450 m)에서 길이 8 m의 38개 피스톤 코어(piston core)를 채취하여 퇴적상 분석을 수행하였다(Table 1).^[22] 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. 또한 유기물의 기원을 규명하기 위하여 유기물 만 분리하여 탄소 동위원소를 분석을 실시하였으며, 부유성 유공충(planktonic foraminifera)을 이용하여 퇴적층의 절대연령과 퇴적률(sedimentation rate)을 계산하였다.^[22] 모든 코어를 대상으로 퇴적물에 포함된 잔류 탄화수소 가스의 성분과 함량에 대한 분석을 수행하였다. 이밖에 퇴적물 간극수의 pH, 알카리도, 염소(chlorine) 이온, 황산염

(sulfate) 이온 및 브롬(bromine) 이온 농도를 측정하였고 각종 동위원소(δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$, $\delta^{34}S$) 분석도 수행하였다. 또한 가스 하이드레이트 부존 특성을 알아보기 위하여 퇴적상 분석 결과를 음향상 분석결과와 대비하였다.^[22]

탐사해역에 분포된 천부 퇴적물은 주로 이질 퇴적물로 주로 이루어져 있으며, 얕은 이토 퇴적상, 약얕은 이토 퇴적상, 생물교란 이토 퇴적상, 균질 이토 퇴적상, 테프라층(tephra layer) 등이 발달되어 있다.^[22] 퇴적물에 포함된 총유기탄소의 함량은 대부분 0.5% 이상으로 가스 하이드레이트 형성에 적합한 것으로 나타났다. TOC/TN과 TOC/TS의 비를 고려할 때 유기물들은 해양성 조류기원의 유기물이 무산소 환경에서 퇴적된 것으로 분석되었으나, 열분석 결과를 이용한 유기물 타입을 구분하면 해양성 조류기원과 육성 식물원이 혼재하는 'Type II'와 'Type III'의 경계부분이 우세하다.^[22] 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(rework) 등에 의해 산화를 받은 것으로 추정되며, T_{max} 가 435°C보다 낮은 것으로 보아 유기물이 미성숙단계에 위치하는 것으로 분석되었다.^[22] 분지평원에서 채취한 코어를 이용 퇴적물을 계산한 결과, 평균 퇴적률이 평균: 190 m/10⁶ yr으로 측정되었으며, 이 값들은 일반적으로 천연가스 하이드레이트가 형성되기 위한 퇴적률인 30 m/10⁶ yr의 조건을 충분히 만족시킨다.^[22] 퇴적물 내 잔류 탄화수소 가스는 거의 대부분 메탄으로 구성되었으며, 최대 126.68 ml 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 천연가스 하이드레이트가 형성에 필요한 조건(> 10 ml residual HC/liter wet sediments)이 충족되는 것으로 분석되었다.^[22] 반면에 2002년도와 2004년도 시료에서는 가스의 양이 대부분 10 ml/liter wet sediment 이하로 나타났다. 또한 잔류 탄화수소 가스량의 공간적, 수직적 분포를 고려하면 전반적으로 탐사해역의 남부지역의 퇴적물이 북부지역의 퇴적물에 비해 상대적으로 높은 농도를 가지며, 퇴적물 심도가 증가할수록 가스량이 증가하는 것이 관찰되었다. 2000년도 탐사해역에서 채취된 퇴적물 내 잔류가스의 동위원소

분석결과 가스의 기원이 생물기원으로 밝혀졌으며, 분지의 남부에서 채취한 코어에서 천연가스 하이드레이트의 해리에 기인된 가스의 방출과 관련된 것으로 분석되는 균열이 발견되었다.^[22] 2003년 및 2004년 코어 퇴적물 시료를 이용한 간극수 분석 결과, 탐사해역의 황산염-메탄-전이대(sulfate-methane transition zone: SMTZ)의 심도는 탐사해역의 북쪽으로 갈수록 낮아지는 것이 확인되었다.^[22] 이는 연구해역 북부가 남부에 비해 메탄 유동(methane flux)이 크다는 것을 지시하는 것이다.^[23]

3.3 실험 연구

3.3.1 열역학·동력학적 특성 분석

가스 하이드레이트의 형성과 해리 과정을 이해하기 위하여, 하이드레이트 평형조건 및 형성/해리 속도를 측정할 수 있는 실험장치를 자체적으로 설계·제작하여 실험연구를 수행하였으며, 가스 하이드레이트의 평형조건에 따른 안정영역과 형성 및 해리 메카니즘(mechanism)을 파악하였고 가스 하이드레이트 형성에 미치는 퇴적물의 영향과 PVP(polyvinylpyrrolidone), PVCap(poly vinyl caprolactam) 등의 동력학적 억제제(kinetic inhibitor) 특성을 분석하였다.^[22] 또한 가스 하이드레이트 저류유동 전산모델을 개발하였으며, 이를 활용하여 가스 하이드레이트 저류층에서 열주입법 뿐만 아니라 감압법 및 화학첨가제 주입법에 의한 해리현상 및 해리가스-물의 생산거동 양상을 분석하였으며, 실험실에서 발생하는 시스템 의존성과 기억효과를 배제한 실제 자연현상에서 발생할 수 있는 메탄가스의 이동속도가 가스 하이드레이트 형성에 미치는 영향을 규명하기 위한 실험연구를 수행하였다.^[22] 실험 결과, 점토가 포함된 시스템에서는 가스 하이드레이트의 형성 초기에 점토가 일종의 결정핵 역할만 하였고 NaCl과 점토가 모두 동력학적 억제제로 작용하는 것을 파악하였으며, 해저 심부지층에서 메탄가스의 상승 속도가 빠른 지점에서는 가스 하이드레이트가 형성되지 않으나, 추가적인 메탄가스의 공급이 멈추게 되거나 유속이 감소하게 되면 그때부터 하이드레이트가 형성될 수 있는 가능성을 보여주는 것을 알 수 있었다.^[22]

3.3.2 가스 하이드레이트 플러그(plugging) 연구

가스 저장 및 수송에 관한 실험과 수송 시 파이프라인 내

플러깅 현상에 대한 연구를 수행하였다. 가스 하이드레이트를 자켓 타입(jacket type)의 교반 반응기 내에서 인공적으로 제조하고, 제조된 하이드레이트의 저장능력을 살펴봄으로써, 하이드레이트에 의한 가스의 저장 및 수송 가능성에 대한 연구를 수행한 결과, 가스 함유량을 증대시키는 첨가제로는 음이온계 계면활성제가 매우 적은 양을 사용하여도 가장 효율이 높은 것으로 나타났다.^[22] 또한 가스 하이드레이트를 제조할 경우에 온도, 압력 및 동적 거동 등에 대한 다양한 제조 조건에 대한 실험을 실시하였으며, 각종 첨가제를 사용하여 저장 능력을 검증하였다.^[22] 형성 촉진제(promoter)와 안정제를 이용하여 가스 하이드레이트를 제조한 결과 구아검(guar gum) 등의 안정제는 외부 온도에 대한 안정성을 높여 하이드레이트 수송 및 저장 분야에 응용이 가능한 것으로 분석되었다.^[22] 이밖에 해저 및 동토 지역의 가스 파이프라인뿐만 아니라 천연가스 생산라인에서 형성된 가스 하이드레이트에 의해 유동저해 및 관막힘이 발생하는 플러깅 현상을 방지하기 위한 기준 및 방법을 선정하기 위하여 파이프라인 내에서 메탄가스에 의한 하이드레이트의 형성 및 해리 실험을 수행한 후 가스-물-하이드레이트의 3상 평형조건을 도출하였고, 이로부터 해리 엔탈피의 변화를 분석하였다.^[22] 그리고 각종 화학첨가제를 사용하여 가스 하이드레이트 플러깅 현상을 분석하였다. 실험결과, 가스 하이드레이트 형성을 억제함에 있어, 메탄올(methanol)이 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)에 비해 더 효과적인 것을 확인하였으며, 메탄올과 글리콜과 같이 수소결합을 유발하는 첨가제는 가스 하이드레이트 핵 형성을 억제하는 열역학적 의미의 에너지 장벽으로 작용하지만, 이 장벽을 넘어 하이드레이트가 형성되기 시작하면 성장속도를 증가시키는 촉진제(promoter) 역할을 하는 것을 밝혔다.^[22]

4. 국가 R&D(2005년~현재)

2000년부터 2004년까지 한국지질자원연구원과 한국석유공사에 의해 울릉분지에서 수행된 탐사를 통해 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 지시자들이 규명되었으며 이들의 분포지역이 도면화 되었다.^[22] 이를 토대로 산업자원

부(현 통상산업자원부)는 울릉분지에 부존하는 가스 하이드레이트의 개발을 목표로 ‘가스 하이드레이트 개발사업 추진계획’을 마련하여 현재까지 사업을 추진하고 있다. 이 개발사업은 2005년부터 가스하이드레이트 개발사업단을 구심점으로 한국지질자원연구원, 한국가스공사, 한국석유공사 등이 출연기관으로 참여하여 연구·분석 및 현장조사 사업을 수행하고 있다. 막대한 비용이 소요되는 가스 하이드레이트 시험생산을 보다 세심하게 준비하기 위하여 당초 계획된 2014년에서 상당 기간 연기됨에 따라 가스 하이드레이트 개발사업 3단계 기간 또한 2012년~2014년에서 2012년~2016년으로 연장되었다. 이에 따라 2015년 가스하이드레이트 개발사업 종합 성과 보고서가 발간되었으며,^[24] 현재 2차 가스 하이드레이트 개발사업에 대한 계획이 수립 중에 있다.

4.1 지질·지구물리 연구

본 연구는 동해 울릉분지를 대상으로 가스 하이드레이트 부존 유망지역을 선정하여 미래 에너지 자원 확보를 통한 국가 경쟁력 강화하고 가스 하이드레이트 저류층 특성을 파악하여 당초 3단계에 계획되었던 시험생산을 위한 시추 위치를 선정을 목표로 수행되었다.

4.1.1 1단계(2005년~2007년)

1단계에서는 울릉분지 가스 하이드레이트 부존 가능성과 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 지구물리학적 지표를 확인하기 위하여 다양한 지구물리(2차원/3차원 탄성파, 해저면 지진계(ocean bottom seismometer: OBS), 다중-빔 음향 측심 및 천부 지층) 탐사를 수행하였다.^[25-29] 취득 자료에 대한 전산처리 및 분석을 통해 울릉분지 가스 하이드레이트 부존 가능성을 지시하는 5가지 증거(indicator)를 도출하고 분포 도면을 작성하였다.^[25,28,29] 2007년에는 탐사 자료의 분석 결과를 토대로 선정한 5개 지점에서 1차 울릉분지 가스 하이드레이트 시추(The 1st Ulleung Basin Gas Hydrate Drilling Expedition: UBGH1)을 수행하고 시추 코어 및 물리검층 자료를 취득하였다.^[30] 취득된 물리검층과 시추 코어에 대한 분석을 수행하였다. 특히, 2007년에 피스톤 코어링(piston coring)과 UBGH1을 통해 국내 최초로 동해 울릉분지에서 가스 하이드레이트 실물을 채취하였다(Fig. 3).^[27]



Fig. 3. Gas hydrates recovered from piston core (07GHP-10C) collected in 2007

(1) 지구물리 연구

1) 2차원 탄성파 탐사자료 취득 및 분석

울릉분지에서 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 지구 물리학적 지표를 확인하고 가스 하이드레이트 부존 특성을 파악하기 위하여 2005년 *R/V TAMHAE II*를 이용 국내 대륙붕 6-1광구 북부를 포함하여 울릉분지 대부분을 포함하는 광역 탐사로 총 64개 측선 6,690 L-km의 자료를 취득하였으며(Figs. 2b, 4), 주요 자료취득 매개변수는 Table 2와 같다. ‘SUN Workstation’과 ‘ProMax’를 이용하여 수행한 가스 하이드레이트 2차원 탄성파 자료에 대한 전산 재처리하는 단면도 상에 나타나는 가스 하이드레이트 부존 지시자(indicator)를 파악하고 진폭(amplitude) 특성을 규명

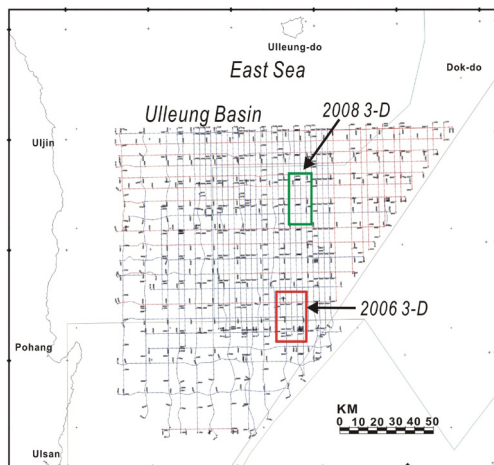


Fig. 4. 2D seismic track lines in 2005, and 3D seismic survey areas in 2006 and 2008^[24]

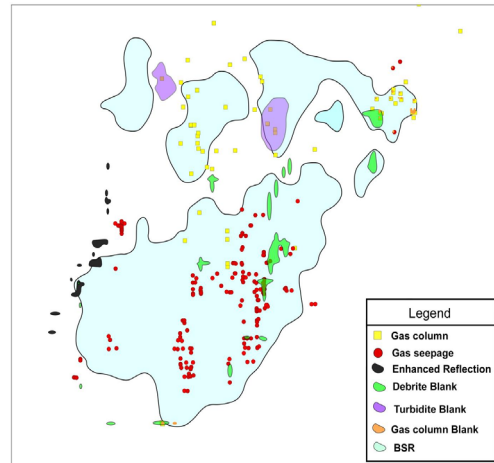


Fig. 5. Distribution map of evidences related to gas hydrate identified by using 2D seismic data acquired in 2005^[24]

하기 위하여 원 자료의 진폭을 최대한 보존하여 수행하였다.^[25] 탐사자료에 대한 분석을 수행하여 가스 하이드레이트 부존 가능성을 지시하는 BSR, 음향 공백대, 칼럼/탄성과 침니(column/seismic chimney), 증폭 반사면(enhanced reflection), 가스 방출 등의 증거를 도출하고 분포 도면을 작성하였다(Fig. 5).

2) 3차원 탄성파 탐사자료 취득 및 분석

2006년 수행된 가스 하이드레이트 3차원 탄성파 탐사는 2005년 수행된 가스 하이드레이트 2차원 탄성파 탐사자료의 분석결과를 토대로 울릉분지 남측 사면에서 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 400 km²(16 km × 25 km)의 면적에서 160개 라인(line) 23,045 CMP L-km(주 측선 16,000 CMP L-km, 추가 측선 7,045 CMP L-km)의 탐사자료를 취득하였다(Fig. 4; Table 3).^[28] 탐사 자료취득 변수는 Table 3과 같다. 탄성파자료는 ‘SUN Workstation’과 ‘ProMax’을 이용하여 수행한 전산 재처리를 통하여 퇴적층 및 BSR의 발달을 3차원적으로 확인하였으며, 최종 도출된 3차원 지층 볼륨의 해석을 통해 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 BSR, 증폭 반사면, 탄성과 침니 구조 등의 분포를 도면화하였다.

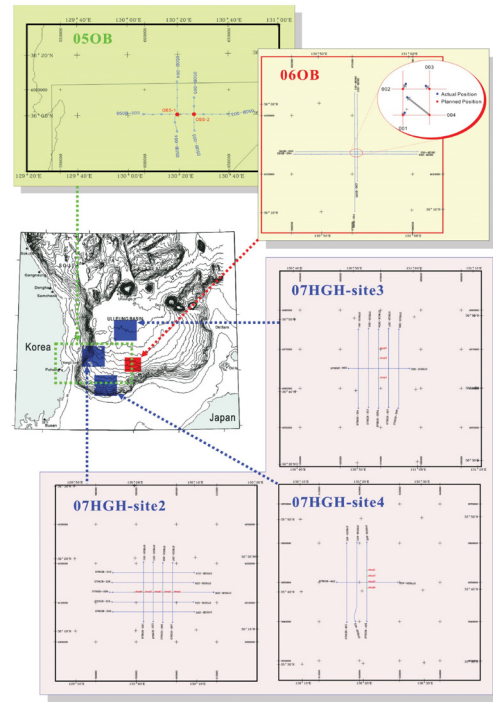
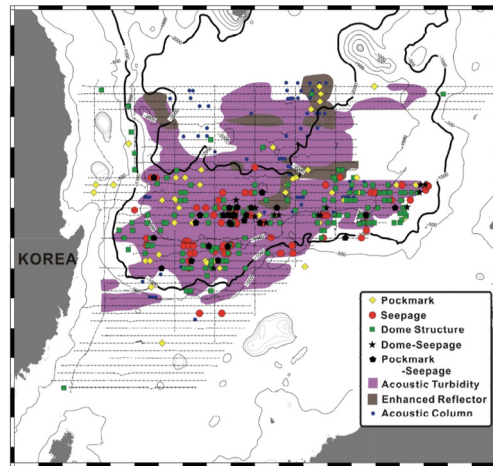
3) 기타 지구물리 탐사자료 취득 및 분석

2005년과 2007년 울릉분지 내 가스 하이드레이트 유망지역을 대상으로 한국지질자원연구원이 보유하고 있는

Table 3. Acquisition parameters of 3D multi-channel seismic data collected since 2005

Year Parameter	2006	2008	2012	2014
Area (km ²) [km]	400 [16 × 25]	300 [12 × 25]	192.64 [17.2 × 11.2]	4.5 [9 × 0.5]
Each streamer length (m)	3,000	4,000	5,000	2,400
No. of channels/ streamer	240	320	400	192
Streamer separation (m)	100	100	100	100
No. of cables	2	2	6	2
No. of sources	2	2	2	2
Bin size (inline × crossline)	12.5 m × 25 m	12.5 m × 25 m	6.25 m × 25 m	6.25 m × 25 m
No. of folds	30	30	40	24
Source volume (in ³)	1,035	1,060	3,460/4,100	1,254
Source pressure (psi)	2,000	2,000	2,000	2,000
Record length (sec)	7	6	7	7
Sample rate (ms)	1	1	1	1
Shot point interval (m)	25.0	25.0	25.0	25.0

*R/V TAMHAE II*와 OBS 시스템을 이용하여 해저면 탐사를 실시하여(Fig. 6), BSR 심도 부근 및 인근 광역구조에 대한 속도 분포를 도출하였다.^[25-27] 또한 울릉분지의 해저 지형과 가스 하이드레이트와 연관된 해저면 변형을 확인하기 위하여 *R/V TAMHAE II*에 장착된 ‘EM12’ 다중-빔 음향 측심기(multi-beam echo-sounder)을 이용하여 다중 빔 탐사자료와 함께 LaCoste-Romberg사의 ‘S-118’ 중력계를 이용하여 중력탐사 자료를 취득하였다. 이밖에 울릉분지에 분포하는 가스 및 가스분출과 연계된 해저면 및 천부 퇴적층의 구조 분석을 위하여 2005년 수행된 2차원 탄성과 탐사와 병행하여 ‘처프(Chirp)’ 시스템과 ‘EA 500’ 정밀 음향 측심기(echo-sounder)를 이용하여 고해상 천부 지층에 대한 탐사를 수행하고 가스 하이드레이트로부터 해리된 가스와 관련되어 해저면에 나타나는 구조를 형태 및

Fig. 6. Survey areas and track lines of OBS seismic survey from 2005 to 2007^[24]Fig. 7. Distribution map of evidences related to gas and gas hydrate identified using high resolution seismic data collected in 2005^[24]

음향 특성에 따라 폭마크(pockmark), 가스 방출, 돔(dome) 구조, 가스 방출과 폭마크 그리고 돔 구조가 혼합되어 나타나는 구조 등으로 분류하였다(Fig. 7).

(2) 지질·지화학 연구

1단계 연구에서는 UBGH1 시추 후보 지역에 대한 추가

탐사와 UBGH1 자료 분석을 수행하였다.^[25,28,29] 또한 UBGH1 시추 위치 선정에 필요한 천부 가스 하이드레이트 및 자생 탄산염 광물의 분포, 높은 후방 산란 강도(high-backscatter object: HBO) 및 음향 공백대(acoustic blank zone: AB) 분포, 메탄-황산염 전이대(sulfate-methane transition zone: SMTZ)의 지역적 변화, 가스 방출과 관련된 해저면 징후 등에 대한 다양한 지질·지화학 모수에 대한 연구를 수행하였다.^[25,28,29] 이밖에 가스 하이드레이트 부존 가능성을 확인하기 위하여 BSR이 뚜렷하고 탄성과 공백대가 복합적으로 확인된 5개 지점에서 암심 시추를 수행하고 135 m의 코어를 채취하였다.^[31] 그리고 UBGH1을 통해 획득된 자료에 대한 선상분석을 수행하였다.^[30]

1) 피스톤 코어 채취 및 분석

가스 하이드레이트부존을 지시하는 지질·지화학적 지표와 퇴적층 특성을 확인하기 위하여 2005년에 6개의 피스톤 코어(piston core)를, 2006년에 3개 푸쉬 코어(push core)와 5개 피스톤 코어를, 2007년에는 12개의 피스톤 코어를 채취하였다(Table 4).^[25,28,29] 이들 코어를 이용 가스 하이드레이트 부존을 평가할 수 있는 유기물 함량과 기원, 가스 성분과 기원, 자생 탄산염(authigenic carbonate) 광물, 퇴적률(sedimentation rate), 광물 조성, 미고생물 등의 분석을 수행하였다(Table 4). 또한 음향 측심기를 이용해 취득된 탐사자료에서 확인된 가스 방출 현상을 밝히기 위하여 메탄 센서(methane sensor), 심해용 디지털 카메라, 수중 위치추적기, 해저면 감지장치, 해수분석 채취 시스템 등의 현장 관측 장비를 사용하여 구체적인 자료를 수집하였다. 2007년 수행한 피스톤 코어링을 통하여 이질 퇴적층에서 맥상(vein type), 단괴(nodule)상 및 두께 2 cm의 괴상(massive) 가스 하이드레이트 실물을 확인하였으며(Fig. 3), 가스 하이드레이트에 포함된 메탄의 기원은 생물기원으로 분석되었다.^[29]

2) 암심 채취 및 분석

2005년 10월 19일부터 실시되어 10월 30일까지 총 12일간 동해 울릉분지에서 가스 하이드레이트 부존 가능성을 확인하기 위하여 5개 지점에서 호주 Benthic Geotech PTY Ltd.의 '이동식 원격조정 시추(portable remotely operated

Table 4. Summary of retrieved cores and analytical items since 2005

Year	Type of corer	No. of retrieved and [analyzed] cores (water depth: mbsl)	Items of analysis
2005	PC	6 [6] (600~1,980)	- Sedimentary facies - Water content of sediment - TOC, TC, TN, TS, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$ - XRD, Head-space gas - Interstitial water, Microfossil
	PC	5 [5] (1,700~1,800)	- Sedimentary facies - Head-space gas - Interstitial water, Microfossil
2006	PU	3 [3] (1,600~1,750)	- Interstitial water - Water content of sediment - TOC, TC, TN, TS, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$ - Microfossil
	PC	12 [10] (912~2,144)	- Sedimentary facies - TOC, TC, TN, TS, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$ - XRD, Authigenic carbonate - Head-space gas - Interstitial water, Microfossil
2007	PU	17 [-] (1,360~2,093)	-
	PC	12 [12] (967~2,149)	- Sedimentary facies - Grain size, water content & porosity of sediment - TOC, TC, TN, TS, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$ - MSCL (for 3 cores) - Head-space gas, DET - Interstitial water, Microfossil - Residual methane concentration
2009	MC	7 [7] (915~2,140)	- Interstitial water - DET, Microbiology
	PC	6 [6] (2,164)	- Sedimentary facies - XRD, Head-space gas - Interstitial water
2013	MC	6 [6] (2,148~2,164)	- Major, trace & RE elements - TOC, TC, TN, TS - Head-space gas - Interstitial water, δPb
	PC	11 [11] (492~2,166)	- Sedimentary facies - Grain size, water content & porosity of sediment - Physical property of sediment - Head-space gas, XRF - Interstitial water
2014	MC	12 [12] (500~2,167)	- Major, trace & RE elements - XRD, TOC, TC, TN, TS - Head-space gas - Interstitial water, δPb
	PC	9 [9] (2,164)	- Sedimentary facies, XRF - Physical property of sediment - TOC, TC, TN, TS, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{N}$ - Head-space gas - Interstitial water - C-age dating using foraminifera
2015	MC	4 [4] (2,156~2,165)	- Major, trace & RE elements - TOC, TC, TN, TS - Head-space gas - Interstitial water

XRD: X-Ray Diffraction, RE: Rare Earth, XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometry, MSCL: Multi-Sensor Core Logger, DET: Diffusive Equilibrium in Thin Films

Table 5. Summary of PROD holes^[31]

Hole No.	Location of drill sites		WD (mbsl)	TD (mbsf)
	Latitude	Longitude		
05-GHDP-1	35°40'08.986"	130°39'27.677"	1,005	16.51
05-GHDP-2	35°52'27.603"	130°39'07.552"	1,378	24.90
05-GHDP-3	35°57'27.706"	130°39'52.474"	1,480	33.43
05-GHDP-4	35°57'03.347"	130°49'20.653"	1,543	41.00
05-GHDP-5	35°49'38.111"	130°29'30.474"	1,359	24.47

mbsf: meter below sea-floor, WD: water depth, TD: termination depth

drill: PROD)'장비를 이용 암심 채취를 실시하여 135 m의 코어를 채취하고 분석하였다(Table 5).^[31] 시추 지점은 2005년 취득된 2차원 물리탐사 자료를 바탕으로 BSR이 뚜렷하고 탄성과 공백대가 복합적으로 나오는 지역 중에서 피스톤 코어에 대한 분석결과 가스 하이드레이트 부존 가능성이 높다고 판단되는 지점들을 대상으로 탄성과 특성 및 암심 채취 장비 운용의 효율성 등을 종합적으로 고려하여 5개 지점을 선정하였다. 시추 결과 가스 하이드레이트 실물을 채취하지 못했으나 현장에서 측정된 메탄가스의 농도는 하부로 내려갈수록 급격히 증가하는 양상을 보여주었으며,^[31] 이 분석결과는 가스 하이드레이트의 부존 확인과 부존량 평가에 기초자료로 활용되었다.

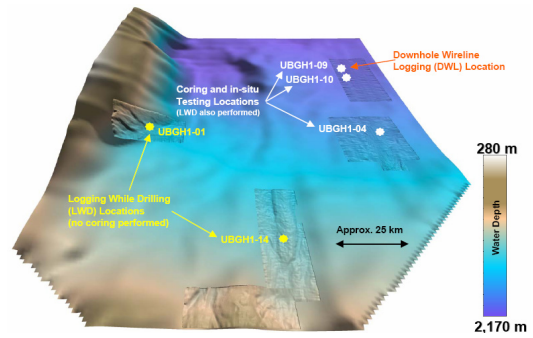
(3) 1차 울릉분지 가스 하이드레이트 시추(UBGH1)

1) 시추 위치 선정

울릉분지에서 가스 하이드레이트 부존을 확인하기 위하여 2007년 9월 22일부터 11월 17일까지 총 56일 동안 *M/V* (multi-purpose vessel) *REM Etive*를 이용하여 UBGH1을 수행하였다.^[30]

가스 하이드레이트 부존 가능성을 지시하는 탄성과 지시자의 분석 결과, 속도분석 및 탄성과 속도분석 등을 포함하는 특수 전산처리 결과 및 지질학적인 연구 결과를 종합 분석하여 가스 하이드레이트 부존 가능성이 높은 지역을 중심으로 14개의 시추후보지를 선정하였으며, 국내외 전문가 의견을 종합하여 최종적으로 5개 시추지점으로 압축하였다(Fig. 8).^[30]

안전하고 효과적인 UBGH1 수행을 위하여 시추지점에 대한 재해 평가(site hazard assessment)가 Fugro GeoConsulting

Fig. 8. Locations of UBGH1 sites^[30]

에 의해 수행되었으며, 시추 프로그램을 수립하였다.^[30] 2007년 9월 22일부터 10월 11일까지 수행된 페이스(phase) 1 기간에는 5개 심부 시추 지점에 대한 LWD(Logging While Drilling) 자료가 Schlumberger의 장비를 이용하여 취득되었고, LWD 자료 결과를 바탕으로 가스 하이드레이트 부존 가능성이 높다고 판단되는 3개 지점을 선정하였다(Fig. 8).^[30]

페이스(phase) 2 기간(10월 17일~11월 13일)에는 선정된 3개 지점에 대한 시추 작업과 1개 지점에서 WL(Wireline Logging)과 VSP(Vertical Seismic Profiling) 작업이 수행되었다(Fig. 8). 시료는 Fugro의 비압력 코어러와 압력 코어러를 이용 채취하였으며, WL은 FAOL(Fugro Alluvial Offshore Ltd.)의 장비를 이용하여 취득하였으며, VSP 자료는 FAOL 장비와 90 inch³ 에어건(air-gun)을 이용하여 취득하였다.^[30]

LWD 자료가 취득된 페이스 1 동안 5개 지점에서 무인잠수정(Remotely Operated Vessel: ROV)을 이용 해저면 지형을 관찰하였으며, ROV에 부착한 메탄 센서를 활용한 시추 전후 연구 지역의 해수 내 용존 메탄 농도를 측정하고 CTD(conductivity, temperature, depth) 및 메탄 센서를 이용 시추 지점 주변의 해수 특성 자료를 측정하고, 푸시(push) 코어를 채취 하였다.^[30,32]

2) G&G(Geology and Geophysics) 프로그램 수립

UBGH1의 성공적인 수행을 위하여 기 수행된 국내외 가스 하이드레이트 프로그램에 대한 분석을 참고하여 UBGH1 물리검층 측정 장비와 분석 항목을 결정하였으며, *M/V REM Etive*의 시추 장비 및 능력, UBGH1의 선상 측정·분석 항목 및 장비, 책정된 예산 등을 고려하여 물리검층 및 코어

링 계획을 수립하였다. *M/V REM Etive*에는 선상분석을 위한 공간이 별도로 구성되어 있지 않은 관계로 Fugro와의 용선 협상 체결 후 Geotek 기술진과 협의를 통해 시추 계획, 비압력 코어(non-pressure core) 및 압력 코어(pressure core)의 분석 방법, 취득 자료에 대한 데이터베이스(database) 방법 등을 결정하고 G&G 프로그램을 수립하였다.

3) 자료 취득 및 선상 분석

LWD 자료는 9월 22일부터 10월 11일까지 Schlumberger의 SonicVision, Powerpulse, Advision, GeoVision을 이용 5개 공에서 BSR 하부 40~50 m까지 즉, 214.6~231.7 mbsf까지 취득하였다(Table 5).^[30] LWD 자료 분석결과 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 검층자료를 취득하였다.^[32]

코어링 작업은 10월 17일부터 11월 13일까지 Fugro의 비압력 및 압력 코어를 이용 수행되었다.^[30] 가스 하이드레이트 또는 가스가 많이 함유된 구간에서 채취된 비압력

Table 6. Summary of UBGH1 holes^[30]

Hole No. TD (mbsf)	Purpose	WD ⁽¹⁾ (mbsl) CTD ⁽²⁾
UBGH1-01A, (3) 218.3	LWD & Pilot hole	1444.0
UBGH1-04A, (3) 224.2	LWD & Pilot hole	1841.4
UBGH1-04B, 71.9	Coring & In-situ testing	1841.4
UBGH1-04C, 186.6	Coring & In-situ testing	1841.4
UBGH1-09A, (3) 228.9	LWD & Pilot hole	2,099.1
UBGH1-09B, 55.7	Coring & In-situ testing	2,099.1
UBGH1-09C, 179.9	Coring, In-situ testing & WL	2,099.1
UBGH1-10A, (3) 231.7	LWD & Pilot hole	2077.0
UBGH1-10B, 204.9	Coring & In-situ testing	2077.0
UBGH1-13A, (3) 214.6	LWD & Pilot hole	1356.3

TD: termination depth, WD: water depth

⁽²⁾ Corrected to mean sea level

⁽³⁾ Attached to ROV and/or seabed frame

⁽⁴⁾ Based on surface measurement value presented in LWD report

코어의 경우 회수 중 가스 하이드레이트 해리와 가스 팽창 등으로 시료 회수율(core recovery)이 불량하였다. 압력 코어링의 경우 총 20회 시도되었으며 이 중 15개 코어가 압력을 유지하여 시료 회수에 성공, 75%의 비교적 높은 성공률을 보였다. UBGH1 동안 선상에서 공기층 가스(head-space gas: HG)와 보이드 가스(void gas: VG) 분석 및 공극수 분석과 함께 적외선(infra-red: IR) 카메라를 이용한 퇴적층 온도를 측정하고 비파괴 물성 및 압력코어 물성을 측정하였으며, 코어에 대한 X-선 이미지를 취득하고 가스 하이드레이트 시료를 채취하고 보관하였다(unopened Fugro report, 2007). 육안 관찰이나 적외선 영상에서의 온도이상 자료 등에서 가스 하이드레이트가 확인된 비압력 코어 역시 20 cm 이하의 길이로 절단하여 즉시 액체질소 용기에 넣어 보존하였다. 코어 최상부 및 코어 캐처(catcher)로 밀려나온 퇴적물에서 육안으로 관찰된 가스 하이드레이트 경우도 액체질소 용기에 넣어 보존하였다. 압력 코어의 경우 회수 후 'MSCL-P'(MSCL for Pressure Core)를 이용 압력이 유지된 상태에서 X-선 이미지 촬영과 전밀도, P파 속도 등을 측정하였으며, 이 결과를 바탕으로 육상분석에 활용할 압력코어 7개를 선별하였다.^[30,32] 이들 7개 코어는 추가적인 육상분석을 위하여 압력을 유지한 채 보존용 압력용기(storage chamber)에 이송하여 보관하였다. 나머지 코어에 대해서는 감압실험을 통해 코어 내의 총 메탄농도를 측정하였으며, 감압실험 후 압력 코어에서 시료를 꺼내어 공극수 분석을 추가적으로 실시하였다.^[32]

코어링을 수행한 결과 물리검층 자료 상에서 가스 하이드레이트 함유를 지시하는 구간에서 가스 하이드레이트를 확인하였다.^[32] Sites UBGH1-09와 UBGH1-10의 경우 높은 비저항 값을 보여주는 구간에서 다양한 형태(노듈(nodule) 상, 맥(vein) 상, 층(laminae) 상 등) 가스 하이드레이트를 채취하였다(Fig. 9).^[32] 특히, 선상에서 회수하여 액체질소 용기에 보존된 17개 가스 하이드레이트 시료 중 15개가 UBGH1-10B공에서 회수되었으며, 사질 퇴적물의 공극을 채우는 형태로 산출된 가스 하이드레이트가 UBGH1-09C공에서 확인되었다.^[32]

WL과 VSP 자료는 11월 13일부터 11월 16일까지 시추공 내의 가스 하이드레이트 부존 여부를 보다 명확하게 파악하기 위하여 코어링이 끝난 후 비어있는 UBGH1-09C공에

FAOL의 장비를 투입하여 232.2 mbsf까지 취득하였다(Fig. 9). 취득하였다.^[30] VSP는 zero-offset VSP이지만 실제로 리그 플로어(rig floor)의 중앙에서 약 4 m 정도 이격되어 발파가 이루어졌다. 에어건의 챔버(chamber)는 90 inch³이며 하부층에서부터 약 10 m 간격으로 20회에 걸쳐 탐사하였다.

ROV를 이용한 해저면 지형 관찰은 LWD 페이스 동안 5개 시추 지점에서 수행되었으며(Fig. 8), ROV에 부착한 메탄 센서를 활용한 시추 전후 연구 지역의 해수 내 용존 메탄 농도를 측정하고 CTD 및 메탄 센서를 이용하여 시추 지점 주변의 해수 특성 자료를 측정하였다.^[30] 또한 5개 시추지점에서 채취한 24개 푸시 코어를 채취 하였다. 일부 푸시 코어에 대하여 공극수의 염도(salinity), 염소량(chlorinity) 및 황산염(sulfate) 함량 분석을 수행하였으며, 절개한 후 Geotek의 'MSCL-CIS' (MSCL-Benchtop Imaging)를 이용하여 퇴적물을 촬영하였다. 해수 내 용존 메탄의 경우 마운드 혹은 폭마크와 같은 특징적인 해저지형을 중심으로 높은 값을 보였으며, LWD 시추 이후 시추지점 또는 연구지역 전반에 걸쳐 높아지는 경향을 보였다.^[32]

4) 육상분석

UBGH1 종료 후 육상 실험실에서 UBGH1을 통해 채취된 비압력 코어와 선상에서 감압된 압력 코어를 대상으로 퇴적물 물성 및 퇴적상 분석을 수행하였으며, 시추 시료 분석 결과와 선상 로깅 자료의 비교 해석하였다.^[32] 또한 함수율, 입자 밀도(grain density), 전단 응력(shear strength), 점착식 전기비저항 및 P파 속도, 대자율 등의 퇴적물 물성을 측정하였으며, 측정된 함수율과 입자 밀도 값을 이용하여 공극률(porosity)을 계산하였다. 그리고 디지털 영상 촬영, 입도 분석, X-선 퇴적구조 분석을 통해 11개의 퇴적상을 구분하고, 퇴적과정을 분석하였다. 코어에서 산출된 화분과 와편모 미화석 분석을 근거로 플라이오에서/플라이스토세 경계(UBGH1-09C: 130 mbsf, UBGH1-10B: 170 mbsf)를 설정하였다. 화분을 이용한 고기후 분석 결과, 코어가 퇴적된 시기의 기후는 오늘날의 한반도의 기후조건과 유사한 온대 기후인 것으로 분석되었으며, 코어 퇴적물이 쌓이는 동안 약 4번 정도 기후조건이 변한 것이 인지되었다.^[32]

와편모류의 군집구성 변화에 의하면, 코어 퇴적물이 퇴적된 초기에는 연근해 환경에서 점차적으로 심해환경으로 변하여 최종적으로는 오늘날과 같은 해양환경이 된 것으로 분석되었다. ROV를 이용 5개 지점에서 채취한 24개 푸시 코어 역시 육상에서 분석되었다.

UBGH1-10B 코어에서 가스 하이드레이트와 함께 산출된 탄산염 결핵체(carbonate nodules)와 탄산염 충전물(carbonate cements) 시료를 선별하여 이들의 광물조성과 화학조성을 분석한 결과, 코어 시료에 포함된 탄산염 결핵체 및 탄산염 충전물은 방해석(calcite)으로 구성되어 있으며, 2007년에 피스톤 코어에서 확인된 아라고나이트(aragonite)는 감지되지 않았다.^[32] 그리고 자성 광물 특성과 가스 하이드레이트 부존과의 관계를 살펴보고 인도 NGHP Exp. 01 및 IODP Exp. 311 비교·분석한 결과, 울릉분지에서 산출된 자생광물 특성은 주로 가스 하이드레이트 형성과 관련된 속성작용에 의해 지배되는 것으로 분석되었다.

UBGH1을 통해 채취된 15개의 압력 코어 중 선상에서 감압 실험을 거치지 않은 7개 코어에 대해서는 CT(computed tomography) 촬영, 물성 측정, 추가 감압실험과 함께 시료 분석 등을 수행하였다.^[32] 압력 코어에 대한 CT 스캔(scan) 작업은 대전 소재 선병원의 'SIEMENS Sensation 64'CT를 이용하여 수행하였다. 촬영된 CT 단면에서 두께 수 mm 두께로 서로 교차하는 맥상의 가스 하이드레이트를 확인할 수 있었다. 장기 보존용인 10B-18P를 제외한 모든 압력 코어를 대상으로 in-situ 압력 상태의 'IPTC'(Instrumented Pressure Test Chamber)를 이용 물성을 측정하였으며, 선택된 코어를 대상으로 감압 시험(depressurization test)을 수행하였다.^[32] 또한 감압 시험 중 방출된 가스를 실린지(syringe)를 이용 채집하여 가스의 성분 분석과 함께 가스의 기원을 밝히기 위하여 미국 Isotech의 'GC/IRMS' (Gas chromatograph/isotope ratio mass spectrometer)를 이용 탄소와 수소 동위원소 분석을 수행하였다. 분석 결과 메탄이 주요 가스 성분을 이루고 있고 에탄은 소량으로 존재하며, 프로판 보다 무거운 가스는 검출되지 않았다.^[32] 그리고 동위원소 분석 결과, 가스 및 가스 하이드레이트 내 메탄 가스는 생물 기원으로 분석되었다. 특히, UBGH1-10B 공에서 채취된 압력 코어에서는 염도 및 염소 이온 농도의 비정상적인 증감이 동시에 관찰되었다.^[32] 이는 채취한 압

력 코어 내에 가스 하이드레이트가 존재하였다가 해리되었음을 보여주는 간접적인 증거이고, 울릉분지에서 가스 하이드레이트가 존재할 때 염도 및 염소 이온의 비이상적인 증감이 동시에 나타날 수 있음을 보여주는 것이다.

코어 퇴적물의 TOC, TC, TN 및 TS 함량에 대한 분석과 함께 특정 구간에서 확인된 자생 탄산염에 대한 XRD(X-Ray Diffraction) 분석을 수행하였다. TOC 함량은 0.1%와 6% 사이의 큰 변화를 보이며, 분석된 대부분 시료가 0.5% 이상의 총유기탄소 함량을 가진다.^[32] 이는 양호한 탄화수소 형성 잠재력을 지시함과 동시에 [2]가 제시한 가스 하이드레이트 형성에 필요한 기본 조건을 충족하는 것이다. TC/TN 비 분석 결과, 코어 퇴적물에는 육상과 해양기원 유기물이 혼합되어 퇴적되었음이 파악되었으며, TOC/TS 비 분석을 통해 유기물들이 담수보다는 정제된 해양 환경에서 퇴적되었음을 알 수 있었으며, 'Rock-Eval' 열분석에 의하면 분석된 퇴적물 내 유기물들은 해양 조류기원이 우세하고 UBGH1-9C-7R과 UBGH1-10B-14R의 일부구간에서 육상기원 유기물이 부분적으로 우세한 것을 알 수 있었다.^[32] 이밖에 액체질소에 보존한 가스 하이드레이트 시료 중 일부는 육상 실험실에서 'Cryo-SEM'을 이용 미세구조를 관찰하고 결정구조를 분석하였다.^[32]

4.1.2 2단계(2008년~2011년)

2단계 연구는 UBGH2를 통한 가스 하이드레이트 부존 확인, 가스 하이드레이트 부존량 평가 및 시험생산을 위한 시추위치 선정과 가스 하이드레이트 생산모사 실험 시스템 구축을 목표로 수행되었다. 이와 같은 연구 목표 달성을 위하여 추가로 2차원 및 3차원 탄성파 탐사, 고해상 탄성파 탐사 및 OBS를 이용한 굴절법 탄성파 탐사, 다중-빔 음향 측심기를 이용한 수심 및 해저면 탐사, 천부지층 탐사 등 현장에서 직접 지구물리 자료를 취득하였다.^[33-36] 기존 탐사자료에 대한 분석을 토대로 UBGH2 시추위치를 선정하였으며, 2010년에 13개 지점에서 LWD 자료, 10개 지점에서 시추시료 및 2개 지점에서 WL/VSP 자료를 취득하였다.^[37] 시추 자료 및 물리탐사 자료 종합 분석을 통하여 울릉분지 가스 하이드레이트 부존 평가를 수행하고,^[38] 시추 결과를 종합한 시추 보고서를 발간하였다.^[39]

UBGH2의 효과적인 수행을 위하여 2009년과 2010년

가스 하이드레이트 2차 심부시추 프로그램 작성연구가 수행되었으며, 이와 함께 가스 하이드레이트 기술에 대한 특성 파악과 기술융합 대책 수립을 위한 정책연구가 수행되었다.^[37,44] 그리고 UBGH2 시추자료에 대한 육상분석이 수행되었다.^[37,40]

(1) 지구물리 연구

1) 2차원 탄성파 탐사자료 취득 및 분석

가스 하이드레이트 부존 유망 지역에 대한 추가 2차원 탄성파 탐사가 2009년과 2011년 수행되었으며, 탐사자료는 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 취득되었다(Fig. 9; Table 2).^[34,36] 2009년 취득한 252 L-km의 2차원 탄성파 탐사자료와 558 L-km의 고해상 탄성파 탐사자료 그리고 2010년 수행된 심부 시추 결과를 토대로 2011년 취득된 790 L-km의 2차원 탄성파 탐사 자료는 썬 워크 스테이션과 프로맥스를 이용하여 전산처리하고 2차원 탄성파 중합 단면 및 구조보정 단면을 생산하였다.^[34,36]

2) 3차원 탄성파 탐사자료 취득 및 분석

2008년 UBGH1을 통해 가스 하이드레이트가 채취된 지점에서 가스 하이드레이트 부존 양상 및 특성을 정밀하게 파악하기 위하여 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 300 km²의 3차원 탄성파 탐사 자료를 취득하였다(Fig. 4).^[33] 탐사자료는 2줄의 수진기와 2줄의 에어건 배열을 이용하여 가로

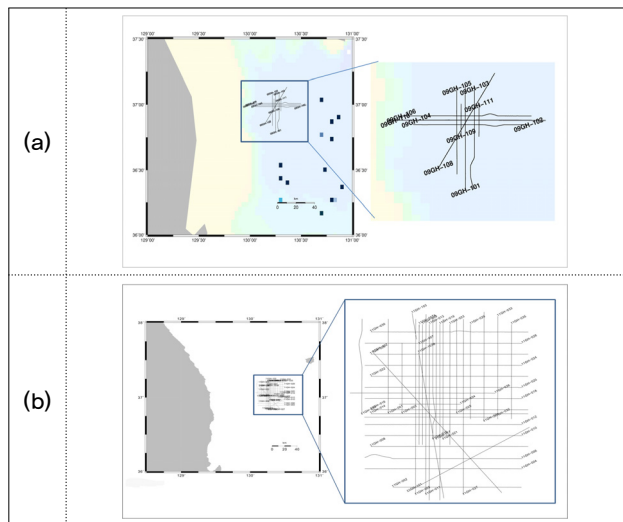


Fig. 9. 2D seismic survey areas with track lines performed in (a) 2009 and (b) 2011^[24]

12 km, 세로 25 km의 직사각형 지역에서 예정 탐사 축선 25 km 길이의 총 120개 축선 16,850 CMP L-km(12,000 CMP L-km 및 인필(infill) 축선 4,850 CMP L-km)의 탐사 자료를 취득하였다. 쉘 워크 스테이션과 프로맥스를 이용하여 3차원 지층 볼륨을 제작하기 위한 탄성과 자료와 지형 정보 입력, 트레이스 편집, 주파수 필터링, 실진폭 보정, 속도 분석, 동보정과 중합, 구조보정 등의 3차원 탐사 자료 전산처리를 수행하였다. 특히, 가스 하이드레이트 부존 지시자인 탄성과 침니 구조와 음향 공백대가 우세하게 나타나는 탐사 지역의 3차원 지층 볼륨을 제작하여 특수 전산처리(data processing)의 토대를 만들고, 탄성과 속성 분석으로부터 얻어진 가스 하이드레이트 부존 지시자들의 물성 정보를 이용해 그 규모와 분포를 파악하는데 중점을 두었다.

3) 기타 지구물리 탐사자료 취득 및 분석

가스 하이드레이트부존 유망지역 중 강한 BSR이 존재하는 지점에 대하여 P파 및 S파 속도구조를 도출하기 위하여 2008년과 2009년에 4성분 OBS 탐사를 실시하였다(Fig. 10).^[33,34] 2008년에는 1단계에서 선정된 2 시추지점(Sites UBGH1-09 및 UBGH1-10)을 지나는 남-북 축선(50 L-km) 상에 8대의 OBS를 설치하고 1,035 in³ 용량의 에어건을 사용하여 25 m 등거리 발파를 통하여 자료를 취득하였으며,^[33] 2009년에는 가스 하이드레이트부존 유망지역 중 북위 37도 부근05GH-042 축선 상에서 강한 BSR이 분포하는 지역에서 6대의 OBS를 2 km 간격으로 설치하고 1,035 in³ 용량의 에어건을 사용하여 25 m 등거리 발파를 실시하여 자료를 취득하였다.^[34] OBS 탐사자료에 대한 탄성과 주

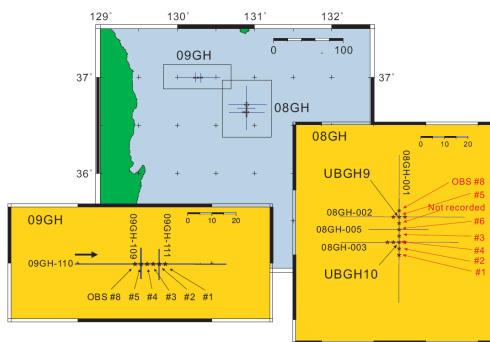


Fig. 10. OBS survey areas with track lines in 2008 and 2009^[24]

시역산을 통해 속도 구조를 도출하였다.

또한 2009년 UBGH2 시추 후보지점의 해저 지층구조와 가스 하이드레이트부존 지시자 파악을 위하여 8채널 수신기를 이용한 2차원 고해상 해양 탄성과 반사법 탐사자료를 취득하였다(Fig. 11).^[34] 가스 하이드레이트 연구를 위하여 구성한 전산처리 흐름도를 적용한 대표적인 고해상 탄성과 단면도로 전산처리를 통해 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio)가 향상된 고해상도 탄성과 단면도를 제작하였다.

(2) 지질·지화학 연구

지질·지화학 연구의 경우 UBGH1 자료에 대한 추가 분석과 함께 UBGH2 시추위치 선정에 필요한 천부 가스 하이드레이트 및 자생 탄산염 강물의 분포, 높은 후방산란 강도 및 AB(acoustic blanking: AB) 분포, SMTZ의 지역적 변화, 가스 방출과 관련된 해저면 징후 등에 대한 다양한 지질·지화학 지시자에 대한 연구를 수행하고 UBGH2 시추 후보지역에서 탐사를 수행하였다.

UBGH1을 통해 획득된 자료에 대한 보다 상세한 추가 분석 내용과 결과는 전기한 UBGH1 육상 분석에 서술되어 있다.

1) 피스톤 코어 채취 및 분석

2009년 12개의 피스톤 코어와 7개의 펠티 코어를 채취하고 분석하였다(Table 7). 피스톤 코어링을 통해 천부 가

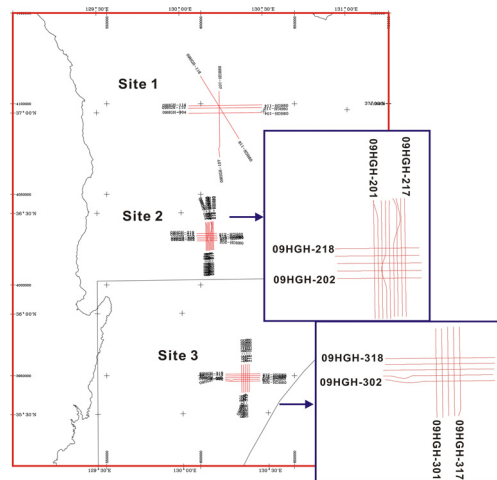


Fig. 11. High resolution seismic survey areas with track lines in 2009^[24]

스 하이드레이트 실물을 추가 확인하였으며, HBO 및 AB 지점에서 피스톤 코어를 취득하였다. 취득한 코어시료 내 공극수를 추출하여 염도, 염소 이온, 황산염 이온, 알칼리도, 주요 양 이온 및 미량 원소, 동위원소비를 분석한 결과, 가스 하이드레이트 해리에 의해 공극수의 화학 성분 및 동위원소가 영향을 받고 있음을 알았다. 황산염 이온과 메탄 농도 분석 결과, 전반적으로 침니 구조(HBO 및 AB 정점)가 백그라운드 정점에 비해 얇은 SMTZ 심도를 갖는 것으로 나타났다. 코어에서 채취한 가스와 가스 하이드레이트 분석 결과, 대부분의 가스들은 이산화탄소 환원작용(reduction)에 의한 생물기원 가스로 분석되었다. 또한 탄성파의 음향상 배경 지역과 침니 구조(HBO 및 AB 정점)에서 채취한 가스들의 화학 성분과 동위원소의 특성을 비교하여, 침니 구조에서 가스의 유동과 이동(migration) 기작, 가스 하이드레이트 형성, SMTZ 심도 등에 대한 전반적인 지화학적인 모델을 제시하였다.

Table 7. Proposed and suggested UBGH2 drilling sites^[37]

Group		Group Description	No. of Proposed Sites		No. of Top 12 Sites	
Group I	I-1	BSR crosscutting dipping strata along the base of slope	17	3	6	2
	I-2	BSR crosscutting dipping strata in monocline		4		-
	I-3	BSR crosscutting dipping strata in anticline		5		2
	I-4	BSR & strong positive amplitude in GHSZ		5		2
Group II		Columnar zones of amplitude blanking	3		3	
Group III		Acoustic blanking in the GHSZ	2		1	
Group IV		Sand layers associated with amplitude blanking & columnar structure in 2008 3D seismic data coverage	3		2	
TOTAL			25		12	

- sites in turbidite/hemipelagic facies: 15 (9)

- sites in debris flow facies: 2 (1)

- sites in turbidite and debris flow intercalated facies: 8 (2)

* Number in brackets above: number of top 12 sites

(3) 2차 울릉분지 가스 하이드레이트 시추(UBGH2)

UBGH2는 울릉분지에 부존된 가스 하이드레이트의 부존량을 정밀하게 평가하고, 가스 하이드레이트 시험생산을 실시할 시추위치를 선정하기 위한 저류층 특성에 대한 제반 자료를 얻기 위하여 2010년 7월 9일부터 9월 30일까지 84일간 수행되었다.^[37,39] UBGH2를 위한 시추선 용선은 IODP(Integrated Ocean Drilling Program) 시추선 *D/V* (drilling vessel) *Joides Resolution*과 일반상업용 시추선을 대상으로 적합성 등에 대하여 비교와 검토를 진행하였다. 2009년 말 *D/V Joides Resolution*의 운영사인 ODL (Ocean Drilling Ltd.)이 한국석유공사의 계약 제안을 거절함으로써 한국석유공사는 Fugro의 *D/V Fugro Synergy*와 용선계약을 맺었다.^[37]

대부분 국내 연구진에 의해 수행된 UBGH2 선상 분석을 통해 선진국 수준의 분석 기술을 확보할 수 있었으며, 분석 결과는 2012년 발간된 “UBGH2 Expedition Report”와 세계적으로 저명한 SCI 저널(journal)인 “Marine and Petroleum Geology”의 특별호(Volume 47)를 통해 발표되었다.^[39]

1) 시추 위치 선정

2009년 기존 탐사 및 시추자료에 대한 분석을 통해 22개 시추 후보지점이 제시되었으며, 국제전문가자문회의를 통해 3개의 후보 site가 추가적으로 제안되었다.^[37] 이들 25개 시추 후보지점들은 울릉분지에서 현재의 기술로 개발생산이 가능한 것으로 평가되고 있는 가스 하이드레이트 함유 사질 퇴적층이 발달될 수 있는 저탁류 퇴적상이 분포된 지역에서 주로 선정되었다. 25개 시추 후보지점에 대한 국내외의 전문가의 평가 및 자문을 통해 최종적으로 12개 시추 지점을 선정하였다(Table 7). UBGH2의 안전한 수행을 위하여 선정된 시추지점에 대한 지질재해 평가(geohazard site assessment)가 Fugro GeoConsulting에 의해 수행되었다.^[42]

2) 용선 후보선 분석과 G&G 프로그램 수립

UBGH2의 효과적이고 성공적인 수행을 위하여 용선 후보선인 *D/V JOIDES Resolution*의 제원, 시추 능력, 선상 분석 장비 및 실험실, 코어 저장고 등에 대한 분석을 수행

하였다. 2009년 말 *D/V JOIDES Resolution*의 갑작스런 용선 협상 결렬 이후 새로운 용선 후보선인 *Fugro*의 *D/V Fugro Synergy*를 대상으로 선상 분석 지원 능력, 시추 및 운항 능력 등을 분석하였다.^[37] *D/V Fugro Synergy*에 대한 실사 결과 승선 연구원을 위한 침대(berth)가 부족하고 실험공간이 전혀 마련되어 있지 않은 것이 파악되었다. 따라서 2010년 초 Geotek 기술진과 선상 실험 컨테이너의 내부 설계, 제작 및 배치 등에 대하여 협의하고, *D/V Fugro Synergy*가 부산항에 입항한 2010년 6월 22일 방선하여 선상 분석 실험실 및 코어 저장 시설 등에 대하여 최종 점검을 하였다.^[37] 부족한 승선 연구원 침대 수는 선실 개조를 통해 확보하기로 *Fugro* 측과 합의하였다.

기 수행된 국내외 가스 하이드레이트 시추 프로그램에 대한 분석을 기초로 UBGH2 물리검층 측정 장비와 분석 항목을 결정하였으며, 최적의 LWD 자료를 취득하기 위하여 장비의 굴진률(rate of penetration: ROP), 이수(mud)의 주입 압력(gallon per minute: GPM), 비트(bit)의 회전률(rotation per minute: RPM) 등의 자료 취득 변수들을 확정하였으며, 보다 고해상의 VSP 자료 취득을 위하여 구간 별 샘플 간격(sample interval)을 결정하였다.^[37,38]

*D/V Fugro Synergy*에는 선상분석을 위한 공간이 별도로 구성되어 있지 않았기 때문에 *Fugro*와 용선 협상 체결 후 국외 전문가 및 Geotek 기술진과 협의를 통해 실험실 배치, 코어 처리 순서, 재래형(conventional) 및 압력 코어 분석 방법, 시추 계획 및 코어 및 샘플 처리 방법, 자료 데이터베이스(database) 방법 등을 결정하였다. 또한 UBGH2의 안전하고 성공적인 수행을 위하여 국내외에서 수행된 가스 하이드레이트 시추 프로그램을 사전에 검토하고, 시추위치 선정에 관한 국·내외 전문가 워크숍과 심부시추 위치를 선정하기 위한 공개 토론회 등을 거친 후 *D/V Fugro Synergy*의 시추 장비 및 능력, UBGH2의 선상 측정·분석 항목 및 장비, 책정된 예산 등을 고려하고 시추 대상지역에 대한 지질·지화학 및 지구물리학적 관점에서 시추 시의 주의사항 및 시추공 별 분석 사항이 포함된 총 137쪽 분량의 G&G 프로그램을 작성하였다.^[44] UBGH2 승선 과학자는 확정된 선상 분석 항목을 토대로 *D/V Fugro Synergy*의 선실(cabin) 여건을 고려하여 구성하였다.

3) 물리검층과 ROV 탐사 자료 취득

LWD 자료는 7월 9일부터 8월 8일까지 Schlumberger의 'Geovision', 'Ecoscope', 'Sonicvision', 'Telescope'를 이용 13개 지점에서 BSR 하위 40~50 m까지 자료가 취득되었다(Fig. 12; Table 8).^[37,39] LWD와 WL 장비는 기본적으로 UBGH1과 유사하며, 다만 LWD 장비 중 'Adnvision' 대신에 'Ecoscope'를 'Powerpulse' 대신에 'Telescope'를 사용한 게 다른 점이다.^[37]

LWD 자료가 취득되는 동안 선상분석 장비를 설치하고 코어 처리, 분석 방법을 실습하였으며, LWD 자료 해석을 통해 10개의 코어링 지점을 선정하고 시추공 계획(borehole plan)을 수립하였다(Fig. 12; Table 8).^[37,38] 코어링 작업은 8월 10일부터 9월 30일까지 수행되었으며, 코어는 *Fugro*의 코어를 이용 채취하였다. 채취된 코어는 국내 연구진이 'MSCL-P', 'MSCL-CIS', 압도분석기 등의 장비를 이용하여 대부분 선상에서 분석하였으며, 압력코어와 육상분석을 위하여 추출된 시료들은 선상에 설치된 저장고에 저장하였다.

LWD 및 코어 자료와 대비를 위하여 9월 15일부터 21일 사이에 FAOL의 장비를 이용 WL과 VSP 자료를 코어링 작업 후에 2개 공에서 획득하였다(Fig. 12; Table 8).^[37,39] 검층 속도는 탄성과 자료로부터 가스 하이드레이트 부존 가능성이 있는 구간에서는 18 m/hr를 유지하였고, 그 외 구간에서는 현장 여건에 따라 적절하게 조절하였다.

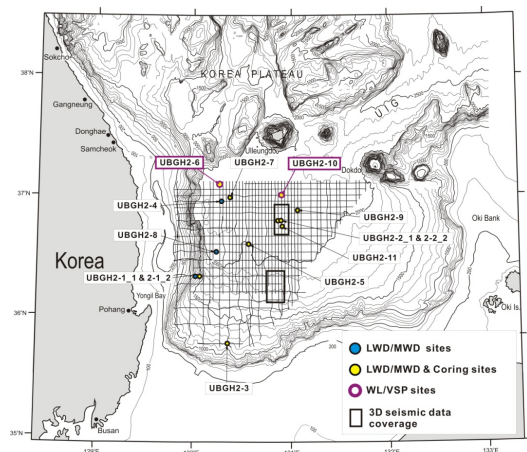


Fig. 12. UBGH2 site map depicting the location of drill sites, bathymetry, 2-D seismic track lines and 3-D seismic survey areas (blocked)^[39]

Table 8. Summary of UBGH2 holes^[39]

Hole	Purpose	Measured WD (mbs1)	BSR*/BGHSZ Depth (mbsf)	TD (mbsf)
UBGH2-4A	LWD/MWD	2,156.20	183*	384
UBGH2-7A	LWD/MWD	2,144.60	183*	299
UBGH2-6A	LWD/MWD	2,152.57	175*	281
UBGH2-2_1A	LWD/MWD	2,091.70	175*	283
UBGH2-2_2A	LWD/MWD	2,093.20	165*	282
UBGH2-9A	LWD/MWD	2,105.90	169*	304
UBGH2-10A	LWD/MWD	2,143.70	160*	261
UBGH2-11A	LWD/MWD	2,081.47	160*	230
UBGH2-5A	LWD/MWD	1,973.81	184*	281
UBGH2-3A	LWD/MWD	897.90	168*	280
UBGH2-8A	LWD/MWD	1,988.00	175*	262
UBGH2-1_1A	LWD/MWD	1,534.00	165*	281
UBGH2-1_2A	LWD/MWD	1,498.70	165*	380
UBGH2-6B	Coring	2,154.2	167	229
UBGH2-7B	Coring	2,144.6	124	6 (failure)
UBGH2-7C	Coring	2,144.6	124	8
UBGH2-7D	Coring	2,144.6	124	238
UBGH2-2_2B	Coring	2,092.2	180.5	204
UBGH2-2_1B	Coring	2,092.2	176	192
UBGH2-5B	Coring	1,969.3	189.5	219
UBGH2-1_1B	Coring	1,529.3	165	8
UBGH2-1_1C	Coring	1,529.3	165	8
UBGH2-1_1D	Coring	1,529.3	165	216
UBGH2-3B	Coring	897.8	131.6	6
UBGH2-3C	Coring	897.8	131.6	170
UBGH2-10B	Coring	2,143.3	171	6
UBGH2-10C	Coring	2,143.3	171	130
UBGH2-10D	Coring	2,143.3	171	213
	WL/VSP			

The water depths (WD) as shown above were measured with the measured length of drill pipe with observed seabottom touch (tag) with the ROV. The total length of drill string measured on the drill floor has the air gap subtracted to provide the "measured water depth". Distance from sea-surface to rig-floor was equal to 4.3 m. WL/VSP performed at same hole after coring operation.

ROV 조사 항목 및 측선 간격, 코어 채취 및 분석 등에 대한 사항을 결정하였다. ROV 측선 조사는 LWD 작업 기간에 수행하기로 하였으며, 측선은 기본적으로 남북 방향으

로 길이 100 m, 간격 10 m의 11개 측선을 설정하였다.^[37,39]

ROV를 이용한 코어 채취는 LWD와 코어링 작업 기간에 수행하기로 하였으며, 12개 시추정점에서 채취한 45개의 푸쉬 코어는 길이 1 m 바렐(barrel)과 ROV 매니플레이터(manipulator)를 이용하여 채취하였으며, 2개 지점에서 자생 탄산염 시료를 채취하였다.^[39]

4) 선상 분석

LWD 자료에 대한 분석결과, 대부분의 시추공에서 천연 가스 하이드레이트의 부존을 지시하는 높은 전기 비저항 값과 P파 속도가 확인되었다.^[37,39]

채취된 비압력 코어는 선상에서 퇴적학적 분석과 가스 및 공극수에 대한 지화학 분석과 함께 각종 물성을 측정하였으며, 코어에 대한 적외선, X선 및 디지털 이미지를 촬영하고, 부시료(subsample)를 채취하였다.^[39] 미생물 분석의 경우 육상 분석을 위한 시료 처리와 보존을 수행하였으며, 퇴적층서 분야에서는 코어 절개, 절개면 이미지 촬영, 암상 기술, 퇴적물 입자 조성 현미경 관찰, 퇴적물 입도 분석, 부시료(함수율, 유기물, 미고생물 등의 분석 용도) 채취, 입도 분석, '코어웰(CoreWall)'을 이용한 각종 코어 이미지(적외선, X선, 디지털 이미지)에 대한 종합 로그(log) 작성, 하이드레이트 함유 특수 시료(special protocol: SP)에 대한 추가 IR 스캔, 이미지 촬영, 암상 기재, 코어의 포장 및 적재 등을 수행하였다.^[39] 지화학 분야에서는 공극수 분석과 가스 분석을 수행하였으며, 미생물 분야에서는 일부 선상 분석 항목을 처리하고, 이후 육상 분석을 위한 시료 처리와 보존을 수행하였다.^[39] 물성 측정 분야의 경우 선상에서 함수율, 입자밀도, 전밀도, 퇴적물 색도, 전단 강도, 전기 비저항, P파 속도, 대자율, 열전도도 등의 항목을 측정하였다. 전밀도, 전기 비저항, P파 속도, 대자율 등은 코어 절개 전 'MSCL-S'(MSCL-Standard)를 이용 비파괴식으로 측정 한 후, 절개된 코어에서 다시 접촉식으로 측정하였다.^[39]

압력코어의 경우 코어 회수 후 'MSCL-P'를 이용하여 압력이 유지된 상태에서 X-선 이미지 촬영과 전밀도, P파 속도 등을 측정하였으며, 'MSCL-P' 분석 결과를 바탕으로 이후 추가적인 육상분석에 활용할 압력코어를 선별하였다. 그리고 선상에서 감압실험을 거치지 않은 코어는 압력을 유지한 채 보존용 압력용기(storage chamber)에 시료를 이송하

여 CT 촬영 등 추가적인 육상분석을 위하여 보존하였다.^[39]

12개 지점에서 채취한 푸시 코어에 대하여 ‘MSCL-CIS’와 ‘MSCL-XCT’(MSCL-X-Ray CT)를 이용하여 퇴적물 영상과 내부구조를 촬영하였으며, ‘MSCL-S’를 이용하여 퇴적물의 감마 일도, P파 속도, 대자율, 전기 비저항을 측정하였다. 또한 선상에서 부시료를 채취하여 체(sieve)를 이용하여 세립질과 조립질 시료를 분리한 후에 현미경을 이용하여 분석하였다. 이밖에 푸시 코어에서 공극수를 추출하여, 공극수의 알칼리도, 염도, pH, Cl, SO₄, PO₄, K, Ca, Sr, Mn 등의 함량을 분석하였다.^[39]

코어 시료 분석 결과, 대부분의 시추정점에서 가스 하이드레이트 부존을 지시하는 IR 이미지, 해리된 가스의 팽창에 의한 균열, 염소이온 농도 감소, 자생 탄산염 광물 등을 확인하였으며, 또한 단괴상, 괴상 및 맥상으로 부존된 가스 하이드레이트의 확인과 함께 가스 하이드레이트 함유 사질 퇴적층의 발달을 확인하였다.^[39]

5) 육상 분석

UBGH2 종료 후 육상 분석을 통하여 시추 시료 분석 결과와 물리검층 자료의 비교 해석, 시추 시료를 이용 시추 지역의 층서 및 퇴적환경 해석, 압력 코어에 대한 CT 스캔과 감압 실험, 압력 코어 물성 측정, 접촉식 비저항과 P파 속도 및 자성 측정과 함께 분석 및 측정 결과에 대한 해석을 수행하였다.^[39] 퇴적층서 분야에서는 정밀 입도 분석, 사질 입자 성분에 대한 현미경 관찰, XRF 스캔 퇴적물 원소 조성 분석, XRD 원소 조성 분석, 미고생물 분석 등이 수행되었다.^[39] 또한 입도 분석 결과 및 선상 X-선 이미지 등을 바탕으로 한 퇴적상 분류 및 퇴적 과정에 대한 해석 작업을 수행하였으며, 선상 열화상 자료를 재처리하여 온도 변화를 정량화하여 가스 하이드레이트 포화도와 비교하는 연구를 수행하였다.^[39] 이밖에 시추 지점 별 가스 하이드레이트 산출 형태를 분류하고 이에 대한 조절 요인을 분석하였다. 마지막으로 시추 코어에 대한 선상 및 육상 분석 결과를 종합하여 물리검층 자료와 비교하고 가스 하이드레이트 저류층 특성을 파악하였다.^[39] 지화학 연구 분야에서는 선상 채취된 공극수 시료에 대하여 산소 안정동위원소, 수소 안정동위원소, 황 안정동위원소, 용존 무기탄소의 탄소 안정동위원소 등의 추가 분석을 실시하였으며, 가스 시료에 대해

서는 메탄의 탄소 및 수소 동위원소 및 이산화탄소의 탄소 동위원소 분석과 함께 선상 및 육상 분석 결과를 종합하여 울릉분지 가스 하이드레이트 형성에 대한 지화학적 조절 요인을 파악하는 연구를 수행하였다.^[39]

가스 하이드레이트 부존량은 국가 연구개발사업을 통해 획득한 탄성과 자료, OBS 자료, UBGH1과 UBGH2를 통해 취득된 물리검층 자료 및 시추 시료에 대한 분석 결과를 종합하고 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)을 이용하여 평가하였다. 가스 하이드레이트 부존 평가는 탄성과 자료 해석을 통한 부피 계산, 시추 코어 자료의 해석 및 물리검층 자료 해석을 통한 공극률 계산, 가스 하이드레이트 포화도의 분석 순으로 진행하였으며, 각 분야 별 분석을 통해 설정된 부피, NG비(net to gross ratio), 공극률, 포화도, 부피비, 케이지 점유율(cage occupancy) 등의 변수는 부존 평가 계산식에 입력되어 부존량 계산에 활용하였다. 가스 하이드레이트 부존 평가의 알고리즘(algorithm) 설정을 위하여 석유가스 연구 분야에서 적용되는 부존 평가 공식을 일부 변형하여 활용하였다.^[38]

4.1.3 3단계(2012~2015년)

3단계 연구에서는 울릉분지를 대상으로 1, 2단계에서 취득된 물리탐사 및 UBGH1과 UBGH2 시추결과에 대한 종합 분석을 통해 울릉분지에 분포하는 가스 하이드레이트 저류층에 대한 특성 평가를 중점적으로 추진하였다.^[39,45-47] 또한 탄성과, 물리검층 및 시추 코어 분석에 의한 울릉분지 가스 이동 및 가스 하이드레이트 형성 모델과 함께 울릉분지 가스 하이드레이트 부존 모델을 수립하였다. 이밖에 가스 하이드레이트 시험생산을 위한 시추위치를 선정하였다.^[48] 2015년에는 현장 탐사자료를 데이터베이스하고 자료관리 시스템을 구축하였으며, 가스 하이드레이트 기본계획 단계 별 추진 애용과 성과를 백서형태로 발간하였다.^[24]

(1) 지구물리 연구

1) 2차원 탄성과 탐사자료 취득 및 분석

2012년 취득된 2차원 790 L-km의 탄성과 탐사 자료는 가스 하이드레이트 함유 사질 퇴적층이 확인된 가스 하이드레이트 시험생산 후보지역에서 퇴적물 근원과 천부 퇴적양상을 확인하기 위하여 *R/V TAMHAE II*가 이용되어 취

득되었다.^[38] 탐사 측선은 2006년 수행된 다중-빔 후방산란 자료 해석 연구에서 밝혀진 천부 퇴적물 흐름 양상을 토대로 대략적인 퇴적물 흐름 방향을 따라 설계되었으며, 설계된 측선은 북서-남동 방향의 4개 측선과 북동-남서 방향의 2개 측선으로 구성되었다. 자료취득 변수는 Table 2에 나타내었다. 2012년의 탐사 지역은 시추공 주변의 퇴적물 근원과 퇴적 양상을 확인하는 연구 목적의 특성상 분지의 사면부터 평원으로 이어지기 때문에 급격한 경사를 가지는 사면 지역을 포함하고 있어 경사면에서 발생하는 지층 왜곡과 회절 현상을 최소화하는데 주안점을 두고 수행하였으며, 전산처리를 통해 최종적인 2차원 탄성과 중합단면 및 구조보정 단면을 생산하였다.^[38]

2014년에는 개발 생산 단계에서 가스 하이드레이트의 거동 특성을 모니터링하기 위한 4D 모니터링 탐사를 계획하고 시험시추 후보지역 주변에서 *R/V TAMHAE II*를 이용하여 베이스라인(baseline) 탐사를 수행하였다.^[46] 탐사 지역은 기존 시추공과의 연결성을 고려하여 시험 시추 예정 지역과 Site UBGH2-6을 사선으로 연결하는 북서-남동 방향을 주 탐사 방향으로 하여 약 4.5 km²(9 km × 0.5 km)이며, 탐사는 2줄의 에어건 어레이와 2줄의 수진기를 사용하여 에어건이 25 m 마다 교대로(flip-flop) 발파되도록 하여 탐사를 수행하였다(Table 3). 해상 탐사 시 발생하는 반복 잡음을 최소화하기 위하여 탐사 설계 시 격자로 나누어진 각각의 빈 셀(bin cell)을 다시 3등분하여 니어(near), 미드(mid), 파(far)로 커버리지(coverage) 분석을 실시하였으며, 커버리지가 부족한 부분에 대하여 인필(infill) 탐사를 수행하였다. 탐사 자료는 일반적인 3차원 탄성과 자료 처리 과정을 바탕으로 전산처리하였으며, 최종적으로 3차원 볼륨을 제작하였다.

2) 저류층 특성 분석

가스 하이드레이트 시험생산과 관련하여 지질 및 지구물리학적 특성을 파악하기 위하여 지구물리 연구 분야에서는 시험생산 후보지역에 대하여 3차원 탄성과 해석을 통해 저류층 볼륨 추출 및 지질 모델 구축 연구를 수행하였다. 2013년도에는 2012년도 연구 결과를 바탕으로 시험시추 후보지역의 저류층 특성을 비교·분석하였으며, 두 지역에 대한 통계학적 지질 모델 구축을 통해 시험시추 후보지점 선정 작업을

수행하였다.^[45] 2014년도에는 2013년도에 선정된 시험생산 후보지역을 대상으로 지질 모델을 정교화 하였으며, 저류층의 층서 및 퇴적 환경 분석을 위한 연구를 수행하였다.^[45]

3) 지질 모델링

지질 모델링 연구에서는 저류층 특성 연구를 바탕으로 지질 모델을 구축하고, 가스 하이드레이트 함유 사질층(가스 하이드레이트 저류층)을 지질 모델링 결과에서 추출하고자 하였다. 가스 하이드레이트 저류층 추출은 다음 요소들을 기준으로 수행되었다.^[45] (1) 가스 하이드레이트 포화도가 18.86% 이상이며 연속성을 갖는 범위, (2) 부존이 확인된 기존의 시추공과 연결된 범위, (3) 지질학적 요소(단층, 탄성과 침니) 등에 의해 경계 되어지는 범위. 두 번째 기준인 부존이 확인된 기존 시추공과의 연장성은 하나의 시추공으로 수행된 시뮬레이션에서 나타날 수 있는 모델의 불확실성을 보완하기 위하여 적용되었다. 가스 하이드레이트 함유 사질층을 퇴적층에서 구분하기 위하여 물리검층 자료를 바탕으로 셰일 볼륨(shale volume)을 계산하였다. 셰일 볼륨 계산 결과 44% 이하의 구간을 사질 퇴적층으로 정의하였으며, 이를 바탕으로 구분된 사질 퇴적층에서 가스 하이드레이트 포화도와 음향 임피던스의 상관식을 도출하였다. 이 방법에서 이용된 가스 하이드레이트 포화도는 물리검층의 P파 속도를 바탕으로 계산된 결과이다. 지질 모델링 결과 A 지역에서 2개의 저류층과 B 지역에서 1개의 저류층의 발달을 확인하였다.^[45] 그러나 국제전문가자문위원회(International Science Advisory Committee:Committee: ISAC) 회의에서 A 지역의 하부 저류층이 발달된 깊이에서 균열대가 발달된 것이 확인되어 시험생산 대상에서 제외하였다.

4) 가스 하이드레이트 시험생산 예정 시추 위치 선정

본 연구에서는 지난 2005년부터 진행된 가스 하이드레이트 개발사업을 통해 제안된 2개소의 유망지역 중 1개소를 가스 하이드레이트 시험생산 시추 후보지역으로 선정하고, 선정된 지역 내에서 최적의 시험생산 시추 위치를 선정하였다.^[45] 시추 대상 후보지역 및 시추 위치는 가스 하이드레이트 저류층 특성뿐만 아니라, 가스 하이드레이트 시험생산 시 지반 안정성 및 생산성, 환경 영향 분야 까지 고려하고 3회에 걸친 국내 워크숍을 통해 국내외 여러 전문가

들의 의견을 최대한 수렴하여 선정하였다.

시험시추 후보 지역으로 선정된 지역을 대상으로 한국석유공사에서 중합 후 역산결과를 바탕으로 진폭이 강하고 가스 하이드레이트 포화도가 높은 5개의 시추 지점을 제안하였으며, 동일 자료를 바탕으로 ISAC 회의에서 가스 하이드레이트 포화도가 높은 1개 지점이 추가로 제안되었다.^[45] 또한 한국지질자원연구원은 중합 전 역산 결과를 바탕으로 4개 시추 지점을 제안하였으며, 동일 자료를 바탕으로 ISAC 회의에서 역시 1개 지점이 추가로 제안되었다. ISAC 회의에서 전기한 기술 항목에 따른 평가 결과를 종합하여 제안된 시추 후보지점에 대한 우선순위를 결정하였다.

(2) 지질·지화학 연구

2012년도에는 2개소의 가스 하이드레이트 시험생산 후보지역에 발달된 저류층에 대하여 퇴적상 정밀분석, 시추 코어-물리검층 대비 연구, 시추코어의 공극수, 가스 분석과 함께 메탄 플럭스 모델 연구를 수행하였다.^[38] 퇴적물의 입도 분포와 코어 절개면 사진 및 X선 사진 등에서 관찰된 퇴적 구조를 기초로 모두 14개의 퇴적상으로 분류하였다.

2013년도에는 2012년도 연구 결과를 바탕으로 시추 후보지 간 저류층 특성을 비교 분석하였으며, 두 지점에 대한 통계학적 지질 모델 구축을 통해 시험 시추 후보지역에 발달된 저류층의 특성을 비교하였다.^[45]

4.2 개발생산 연구

본 연구는 가스 하이드레이트 개발을 위하여 필요한 기술의 개발을 목표로 가스 하이드레이트 함유 퇴적물에 대하여 체계적 연구 자료가 학계에 보고되지 않았던 초기 단계에서부터 해리 거동 해석에 필수적인 가스 하이드레이트 함유 퇴적층의 물성분석과 생산기법에 대한 실험연구의 수행하였으며, 모의 가스 하이드레이트 시험생산을 분석하고 생산기법을 검증함으로써 중장기 현장 모사 생산 기술을 도출하는데 주력하여 수행되었다.

4.2.1 1단계(2005~2007년)

1단계에서는 가스 하이드레이트 개발 생산기법 기초 연구 기반 조성을 목표로 하여 실험실 규모의 가스 하이드레이트 생산연구 시스템을 구축하고 연구 기반 기술을 확보

하였다.^[25,48,49] 가스 하이드레이트가 확보되지 않은 상태에서 가스 하이드레이트의 물성 연구 및 연구 홍보의 목적으로 인공적으로 하이드레이트를 제조하는 장비와 함께 유체투과율, 전기비저항, P파 속도 등의 기초 물성 및 가스 하이드레이트 함유 미고결 퇴적시료의 모세관압 및 상대 유체투과율 등의 특수 물성 측정을 위한 시스템을 구축하여 물성을 측정하고 인공 가스 하이드레이트 함유 퇴적 시료에 대한 자료를 확보하였다.^[25,48,49]

미국 로렌스 버클리 국립연구소(Lawrence Berkeley National Laboratory: LBNL)와 공동 연구를 통해 CT scan을 이용하여 가스 하이드레이트 함유 미고결 퇴적시료에서 초기 함수율에 따른 가스 하이드레이트 형성 전후의 상대 유체투과율 곡선 및 모세관압 측정을 위한 실험연구를 수행하였으며, 전산 모사 연구에서는 해양 가스 하이드레이트 퇴적 구조를 4가지로 특성화하고 개념적 전산 모델을 확보하였다.^[25,48,49]

영국의 Heriott-Watt 대학과의 공동 연구를 통해 수행 마이크로 모델(micro model) 연구에서는 3 wt%의 염수와 물에 각각 이산화탄소, 메탄, 천연가스를 포화상태로 용해시켜 마이크로 모델에 주입하고 고압·저온상태를 유지하여 용해가스로부터 가스 하이드레이트가 형성되는 현상과 감압법 적용 시 해리 가스의 이동양상을 관측하였다.^[48]

가스 하이드레이트 퇴적층 생산 기법 연구에서는 미고결 퇴적 시료의 감압법 실험, 배가스 치환법 적용 실험 및 열 자극법 적용 실험과 함께 원천 기술로서 가스 하이드레이트 형성 원리 및 치환 메카니즘(mechanism) 규명을 위한 연구를 수행하였다.^[25,48,49]

4.2.2 2단계(2008년~2011년)

2단계에서는 동해 울릉분지에서 시행된 UBGH1과 UBGH2를 통해 획득된 현장 시추자료를 토대로 1단계에서 확보된 실험 기법 및 생산 기술의 현장 적용성 확장을 주목표로 하여 현장 물성 연구, 생산 기법 규모 확장 연구, 전산 모형 현장 확장 모사 연구에 주력하였다.^[50-53]

가스 하이드레이트 함유 퇴적 시료의 물성 측정 연구에서는 UBGH1과 UBGH2를 통해 현장 물성을 확보하였다. UBGH1의 교란되지 않은 부시료를 선택하여 기본 물성, 지반공학적 물성 및 지구물리학적 물성을 측정하였으며, 가

스 하이드레이트 형성 및 감압 해리 시 물성 변화 등을 분석하였다.^[50-53] 또한 현장 모사를 위하여 가스 하이드레이트 수포화 조건을 모사하고 가스 하이드레이트 형성 및 공극 포화 그리고 감압에 따른 전도도 변화를 측정하였다. 이밖에 1단계에서 개발된 균질 가스 하이드레이트 퇴적층의 물성 예측 모형을 검증하기 위하여 혼합한 퇴적시료를 이용하여 유체투과율, 전기저항, 속도를 측정하였으며, UBGH1과 UBGH2에서 취득된 압력 코어 시료를 이용하여 유체역학적 물성과 함께 압축성, P파 속도, 비저항 등의 지반공학 적 물성을 측정하고 비저항 값의 변화를 모니터링 하였다.

가스 하이드레이트 퇴적층 생산 기법에 대한 연구는 1단계 연구 결과의 제한성을 극복하고, 생산 기법의 현장 적용 기초 기반 기술 확보를 위하여 가스 하이드레이트 함유 퇴적층 모사 시스템의 스케일 확장을 통해 생산 기법의 현장 적용성 확장 연구를 수행하였다.^[50-53] 이를 위하여 3D 중 규모 고압 셀을 설계하였고(Fig. 13), 1D m급 생산 모사 시스템과 10 m급 해리 전파 측정 시스템을 개발 구축하여 감압법 적용 실험 연구를 수행하였다. 그리고 1단계 기존 생산 기법 연구 결과를 바탕으로 하여 감압법 기반의 최적



Fig. 13. Korea In-situ Production Experimental Device (KIPED), a 3D n-scale gas hydrate experimental device

생산 기법 개발을 위하여 감압법과 열 자극 융합 기법 적용 연구를 수행하였으며, 기존 생산 기법 중 하나인 억제제 주입법 연구의 일환으로 화학 및 생물학적 억제제 적용 연구를 수행하였다.^[51] 또한 UBGH1과 UBGH2를 통해 획득된 현장 시추 시료를 이용하여 기존 생산기법 적용 연구를 수행하여 현장 적용성을 분석하였다.

전산 모사 연구의 경우, 기존의 단순 개념적 모델 분석을 확장하여 가용 자료 범위 내에서 국내 부존 지층의 특성이 반영된 전산 모델을 설정하여 분석하였으며, UBGH1 및 UBGH2 시추 결과를 바탕으로 사암과 이암이 교호된 가스 하이드레이트 부존층을 대상으로 생산공 조건을 포함한 생산 시나리오 분석에 의해 회수 공정 및 생산 포텐셜 결과를 도출하였다. 특히 2단계의 1차년도(2008년) 및 2차년도(2009년) 연구에서는 'CMG(Computer Modeling Group) STARS'를 직접 적용하여 상업용 코드에 대한 운용 기술을 확보하고자 하였다. 2008년에는 상업용 전산 코드에 대한 운용 기술을 확보하기 위하여 'CMG STARS'를 적용하여 에너지부(Department of Energy: DOE) 산하 국립에너지기술연구소(National Energy Technology Laboratory: NETL)에서 제시한 연구 결과를 검토하여 현재까지 개발된 시뮬레이터에 대한 적용성을 분석하였다.^[50,51] PNNL과의 공동 연구의 경우, 'STOMP-HYS-KE' 모델 연구에서는 2007년의 전산 모사 연구를 토대로, 동력학적 치환 및 수포화도 상태에 따른 영향을 이해하기 위하여 배가스(이산화탄소-질소) 치환을 동적으로 모사할 수 있는 새로운 모델을 개발하였으며, 배가스(이산화탄소-질소) 치환 실험 결과를 통해 타당성에 대한 검증을 수행하였다.^[52]

2009년에는 생산 실험 자료를 바탕으로 'CMG STAR'의 전산모사를 수행하여 생산거동을 분석하였으며, 가스 하이드레이트 모사를 위한 입력자료 처리 방법을 고찰하고 수행된 실험 자료에 대한 비교 연구를 통해 입력 자료의 타당성 및 상업용 모델에 대한 적용성을 검토하였다.^[51]

2010년은 한미 공동 연구를 통해 최신 가스 하이드레이트 생산 전산 모형 및 이산화탄소 치환 기법 적용 가능 전산 모형을 공동 개발을 통해 확보하고 현장 규모의 생산 가능성을 파악하는 초기 모델을 분석하였다. LBNL과 공동으로 수행한 이 연구에서는 'TOUGH+HYDRATE with FLAC3D Model'을 이용 UBGH2의 가용 정보를 반영하고 지반 역학

적 안정성을 함께 고려하여 해리 가스의 생산성 및 주요 인자에 대한 민감도 분석을 수행하였다.^[52]

2011년에는 미국 DOE 공동 출자 연구비의 지원 중단에 따라 LBNL 및 PNNL과 수행한 한-미 공동연구가 모두 종료되었으며, 가스 하이드레이트 생산 전산 모형 연구도 잠정 중단되었다. 후속 공동연구는 3단계의 첫 해인 2012년도부터 다시 재개되었다.^[53]

4.2.3 3단계(2012년~2015년)

(1) UBGH2 현장 시료 물성 측정 및 공정 설계 지원 자료 구축

3단계에서는 가스 하이드레이트 중장기 개발에 대비한 현장 모사 생산기술의 확립과 도출을 목표로 울릉분지 모의 가스 하이드레이트 시험생산 분석 및 시험생산 기법의 예비 실증 실험을 수행하였다.^[54-57] 이 단계에서는 1, 2단계에서 축적된 물성 자료를 바탕으로 해양 가스 하이드레이트 시험생산 공정 설계에 필요한 물성 측정 연구를 추가적으로 수행하였으며, 공정 설계를 위한 필요 정보 제공을 위한 자료 구축 및 추가 분석이 수행되었다. 특히, 시험생산 후보지 선정에 필요한 공학적 물성 자료 분포를 도출하고 이를 저류층 평가 분석 팀에 제공하였으며, 3단계에서 확보된 물성 자료를 토대로 2단계에 개발한 물성 분포 예측 기법을 활용하여 생산 지역의 물성 분포 모델을 생성하였다. 또한 지반의 역학적 거동 파악을 위하여 사용된 모어-쿨롬브(Mohr-Coulomb: MC) 모델의 입력 변수 도출을 위하여 고압 삼축 시험을 수행하여 사질층 대표 시료의 탄성계수, 마찰각, 점착력을 도출하였으며, 횡방향 변위 및 부피 변화 측정을 통해 도출된 포아송 비(poisson ratio)로 체적 탄성계수 및 전단 탄성계수를 산정하였다. 이밖에 울릉분지 해양 퇴적토 모사시료를 이용하여 거시 해석에 필요한 불포화도 물성을 산출하고, 이미지 기반 격자 볼트만 모델(Lattice Boltzman Model: LBM) 수치 해석과 흙-함수 특성 곡선(soil-water characteristic curve: SWCC) 실험 결과를 통합 분석하여 울릉분지 해양 퇴적토에 적합한 함수비-모세관력-상대투수계수 상관식을 구축하였다.

가스 하이드레이트 시험생산에 따른 산출성 분석과 지반 안정성 연구 수행을 위해 하이드레이트 시험생산 안정성 체크 리스트를 작성하고 지반 안정성 전산 모사 연구와 함

께 사질 생산에 대한 연구를 수행하였다.^[54-57] 이 연구를 위하여 가스 하이드레이트 시추, 생산 및 완결 과정에서 발생할 수 있는 안정성 문제들에 대하여 다중 스케일, 다양한 해석기법 및 시뮬레이션을 통해 검증하고, 이를 바탕으로 가스 하이드레이트 함유층의 안정성을 담보할 수 있는 시추 및 생산 공정 안정성 평가를 수행하였다. 또한 가스 하이드레이트 시험생산 공정 설계를 위하여 하이드레이트 생산 시 생산 효율과 생산공 안정성을 결정하는 핵심 고려인자들을 선정하였다.^[55,56] 이밖에 가스 하이드레이트 생산 시 광역/생산공 주변 지반의 2차원/3차원 역학적 안정성에 대한 평가, 물 및 가스의 생산량 도출 및 입자 유동에 따른 시추공의 안정성 분석을 수행하였다.^[56,57]

2단계 연구 결과의 제한성을 극복하기 위하여 가스 하이드레이트 함유 퇴적층 모사 시스템의 스케일 확장과 수포화 조건에서의 가스 하이드레이트 형성을 통해 생산기법의 현장 적용성을 확장하는 연구를 수행하였다.^[54,55] 이를 위하여 2단계에서 개념 설계된 3-D 중규모 생산 모사 시스템을 구축하여 수포화 조건에서의 감압법 적용 시 가스 하이드레이트 생산 양상을 파악하였다. 그리고 구축된 가스 하이드레이트 분포 및 함량 정량화 시스템을 이용하여 감압법 적용 시 퇴적층 내부에서 해리되는 현상에 대하여 동적 관찰을 수행하였으며, 현장 지층 조건을 포함한 다양한 지층 조건에서 현장 사용 사질 조절 기법들의 성능에 대한 실험연구를 수행하였다.^[56]

3단계에서 가스 하이드레이트 퇴적층 생산 기법에 대한 연구는 2단계 연구 결과의 제한성을 극복하기 위하여, 가스 하이드레이트 함유 퇴적층 모사 시스템의 스케일 확장과 수포화 조건에서의 하이드레이트 형성을 통해 생산기법의 현장 적용성 확장 연구를 수행하였다.^[54,55] 이를 위하여 3-D 중규모 생산 모사 시스템을 구축하고 이질-사질 교호층을 모사한 인공 시료를 이용하여 수포화 조건에서의 감압법 적용 시 가스 하이드레이트 생산 양상을 파악하였다. 그리고 구축된 가스 하이드레이트 분포 및 함량 정량화 시스템을 사용하여 감압법 적용 시 퇴적층 내부에서 해리되는 현상에 대하여 동적 관찰을 수행하였다.^[55] 1D 급 생산 모사 시스템을 사용한 실험 연구는 2단계에서 수행된 가스 포화 조건에서의 결과 비교를 위하여 수포화 조건에서의 감압법 적용 실험을 수행하였다.^[55] 그리고 1-D 10 m

급 생산모사 시스템을 사용한 기존 연구결과를 바탕으로 하여 보강 실험을 수행하였다. 치환 기법 연구의 경우 현장 적용성을 더욱 확장하기 위하여 8 m 길이의 치환 반응 모사 시스템과 모래와 유사한 인공 시료를 이용하여 시험생산 대상 저류층의 조건을 기준으로 거시적인 수준의 치환 실험연구를 수행하였다.^[56] 각종 주입 유속에 따른 치환 효율을 분석하였으며, 소킹 시간 및 횟수에 따른 치환율 영향에 관한 심화 연구도 수행하였다.

LBNL 및 PNNL과 공동으로 수행한 전산 모사 연구의 경우 3단계에서는 지반역학 연계 다성분 유동 전산모형('TOUGH+HYDRATE with FLAC3D Model')을 보완, 모의 가스 하이드레이트 시험생산의 기본 공정 설계에 필요한 핵심 유동 분석 자료를 도출하는 것과 배가스 치환 모듈의 개선 및 확장을 통해 'STOMP-HYDT-KE'모델의 현장 모사 적합성을 확보하는데 주력하였다.^[54-56]

2012년 LBNL 공동 연구에서는 현장 규모의 가스 하이드레이트 시험생산 예비 타당성 분석을 위하여 시추 분석 자료 및 울릉분지 가스 하이드레이트 부존 지질 모델이 반영하여 하이드레이트 생산 거동과 안정성 통합 분석을 시도하였으며, PNNL 공동 연구에서는 배가스 치환 상태 방정식 및 3차 가스 하이드레이트 평형 모듈(module)을 추가 개발하였으며, (메탄-질소-이산화탄소) 시스템에 대한 향상된 압력-온도 관계식을 개발하였다.^[54]

2013년에는 LBNL 공동 연구 및 유동 전산 모사 연구를 통해 지반역학 거동과 연계된 'TOUGH+HYDRATE' 해리 유동 정밀 해석 및 시험 운영 조건 적정 범위 분석 등이 포함된 모의 가스 하이드레이트 시험생산의 해리 유동 특성 및 산출성 분석을 본격 수행하였다. 한편 3성분계(메탄-질소-이산화탄소) 혼합 가스 하이드레이트에 대한 치환 거동 예측모델 개발과 검증은 목표로 계획된 PNNL 공동 연구는 미국 DOE의 협약 지연에 따라 수행하지 못했다.^[55]

2014년도는 LBNL 및 PNNL 과의 한-미 공동 연구가 모두 계획대로 수행되었다. 울릉분지 가스 하이드레이트 저류층 생산 추이 및 모의 가스 하이드레이트 시험생산 정밀 분석을 수행하여 최신의 산출성 분석 결과를 민감도 분석과 함께 종합 도출하였으며, 모의 가스 하이드레이트 시험생산의 기본 공정 설계를 위한 핵심 자료로 활용하였다.^[56] 배가스 치환 연구에서는 치환 기법 시뮬레이션의 적용성

확장을 통해 현장 규모의 치환 기법 분석을 시도하였다.

2015년에는 가스 하이드레이트 생산기술 현장모사 예비 실증을 위하여 중규모 생산모사 시스템을 이용한 실험 및 배가스 치환기법의 심해저 환경 적용성 확장에 대한 연구를 수행하였으며, 기존 공정설계 및 시뮬레이션 결과를 평가하였다.^[57]

4.3 가스 하이드레이트 저류층과 해리생산 상관관계 연구

본 연구는 가스 하이드레이트 개발사업의 출연기관인 한국가스공사에서 수행한 연구로 가스 하이드레이트로부터 최적의 방법으로 가스를 생산하기 위하여서 현장 조건과 비슷한 환경을 실험실에 구축하고자 다양한 실험 장비를 자체적으로 설계·제작하여 실험 연구를 수행하였다.

4.3.1 1단계(2005년~2007년)

1단계에서는 가스 하이드레이트 저류층의 특성을 규명하고자 심해저 환경의 회수 장치를 자체적으로 설계·제작하고 장치에 대한 타당성을 입증하였으며, 가스 하이드레이트 저류층으로부터 메탄 가스 생산을 위한 핵심 기술을 확보하고자 가능성 있는 기술에 대하여 고찰하였고 가스 하이드레이트 저류층에서 가스 생산 시 저류층에 따른 기초 물성의 영향에 대한 분석 연구를 수행하고 그 결과를 향후 울릉분지에서 가스 하이드레이트 시험생산 시 저류층에 적용할 수 있도록 검토하였다.^[58-60] 또한 감압법과 염수 주입법을 조합한 복합법에 의한 회수 생산실험을 수행하였으며, 저류층에서 가스 하이드레이트 형성에 대한 특성을 규명하였다.

4.3.2 2단계(2008년~2011년)

2단계에서는 선행 연구에서 도출된 회수 기법의 모듈화, UBGH1에서 획득된 시추 자료로부터 울릉분지 저류층의 물리적 특성 분석 및 모사를 통해 벤치 스케일 규모의 해리 전파 속도 측정 장치를 개발하고 이를 통해 동일/이질 저류층 간 가스 하이드레이트 해리 전파 속도 분석 및 생산성 평가를 수행하였으며, 3D 생산성 실험 장치를 제작하여 미고결 저류층의 압축력에 따른 생산성을 분석하고 국제 공동 가스 하이드레이트 시험생산 프로젝트에 적극적으로 참여하

여 국제 공동 기술 공유 및 실험실 데이터와 상호 보완을 통해 연구·개발 초기 단계에 있는 가스 하이드레이트 생산 기술의 현장 적용성 기반을 확보하였다.^[61-64] 또한 저류층의 방향, 형태, 심도 등으로부터 유체 투과율과 공극률 관계, 해리된 지층수의 영향과 가스 하이드레이트 해리 전파 속도 특성 관계, 가스 하이드레이트 저류층 균열에 따른 유체 투과율의 관계 등을 고찰하기 위하여 벤치 스케일의 가변 코어 홀더(core holder) 장치 구성을 위한 설계(안)를 도출하고 실험 연구를 수행하였다. 이밖에 또한 3D 가스 하이드레이트 형성 및 회수 장치의 구성 및 설계도를 도출하여 단면적이 변화되는 라디알(radial) 방향성을 포함하는 해리 특성을 살펴보았다.

4.3.3 3단계(2012년~2015년)

3단계에서는 선행 연구에서 도출된 회수 기법의 모듈화, 세밀화 및 체계화, 그리고 지반 안정성 등에 대한 실험적 연구를 통해, 향후 울릉분지에서 수행될 시험생산에 기술적 자료를 확보하였으며, 가스 하이드레이트층에서 메탄가스를 회수할 때 저류층에서 일어나는 특성을 규명하기 위한 실험을 수행하였고 실험과 별도로 지반 안정 특성 분석 시스템의 고압 셀 크기 및 실험 조건을 기준으로 하여 지반/암반 응력 변형 해석 프로그램인 FLAC 2,D(미국 ITASCA Consulting Group사 제품)을 이용하여 지반 변형 및 침하에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.^[65-67]

4.4 환경영향 분석 연구

4.4.1 3단계(2012년~2015년)

환경영향 분석 연구는 가스 하이드레이트 생산시험과 관련 가스 하이드레이트 개발사업의 3단계에서 착수되어 수행되었다. 가스 하이드레이트 환경 분야의 연구가 기획된 것은 2단계 말인 2011년 10월에 ‘가스 하이드레이트 시험생산 대비 환경 영향 평가 계획(안)’이 한국지질자원연구원에서 작성되어 가스 하이드레이트 개발사업단에 제출되면서 시작되었다. 가스 하이드레이트 개발사업 1차 추진 계획의 1단계와 2단계에서는 가스 하이드레이트의 해양 시험생산에 따른 환경 영향 연구가 전혀 실시되지 않았다. 3단계가 시작되는 2012년부터 가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 위하여 요소의 파악, 관측 및 분석, 검증 및 평가,

저감 대책 등의 연구 시급성과 필요성에 의해서 가스 하이드레이트 환경영향 분석 연구가 착수되었다.^[68,69] 가스 하이드레이트 환경 모니터링을 위한 시스템 설계와 제작은 2015년에 계획된 울릉분지 가스 하이드레이트 시험생산이 연기됨에 따라 중단되었다.^[70]

환경영향 분석 연구는 가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 위하여 요소에 대하여 집중적으로 수행되었다. 2012년 연구는 기존 가스 하이드레이트의 사업을 통해 획득된 자료의 환경영향 관련 내용에 대한 재처리 및 해석, 울릉분지 가스 하이드레이트의 시험생산에 최적화된 환경영향 리스크 분석 및 중요도 선정, 환경 모니터링 시스템 개념 설계, 환경 모니터링 시스템의 계약을 위한 자료 확보를 목표로 수행되었다. 2013년 연구는 가스 하이드레이트의 시험생산 지역의 환경 영향 리스크 정밀 조사, 가스/퇴적물 이동 확산 환경 시뮬레이션, 시험생산 지역의 환경 모니터링 시스템 기초 설계, 시험생산 지역 선정 및 시험생산에 필요한 환경 영향 자료를 확보하기 위하여 수행되었으며, 2014년에는 가스 하이드레이트의 시험생산 이전 기준 환경 조사 및 자료 해석, 환경 시뮬레이션 비교 분석 및 개선, 환경 모니터링 정밀 설계 및 제작에 필요한 자료 도출, 시험생산 기간 동안에 환경 모니터링 시스템 운영을 위한 모션 및 장비의 계약에 필요한 자료 확보를 위하여 수행되었다. 2015년에는 환경영향 리스크 요인을 분석하고 중요도를 선정하였으며, 환경 모니터링 시스템 설계 및 운영방안을 마련하고 환경영향 평가기술을 확보하였다.^[71]

울릉분지 가스 하이드레이트 시험생산에 따른 주요 환경위하여 요소로 예상되는 가스 및 생산수 누출, 해저면 변형 및 침하, 해저면 교란과 시추 컷팅의 발생 등을 분석하였으며, 2013년부터 수행한 기준 환경조사를 통해 해저면 영상과 해수의 용존 메탄, 탁도, 클로로필(chlorophyll) 농도 및 해류 자료를 획득할 수 있는 센서(sensor)와 장치가 부착된 해저면 관측 장비(KIGAM Seafloor Observation System: ‘KISOS’)를 이용하여 울릉분지의 지역적 특성과 함께 가스 하이드레이트 시험생산과 관련된 환경 위해 요소를 파악하고 해수와 대기를 대상으로 오염 및 환경 민감성분에 대한 자료를 확보하였다.^[68-71]

또한 가스 하이드레이트 시험생산 예정 지역에서의 환경 위해 요소 파악을 위한 정밀 조사를 통해 해저면과 천부 퇴

적물의 특성 및 해수 특성을 파악하고 시험생산 인접지역에 발달된 지질구조를 확인하였다. 이밖에 가스 하이드레이트 시험생산과 관련 발생될 수 있는 가스, 생산수 및 드릴 컷팅의 이동과 확산에 대한 환경 시뮬레이션을 수행하였다.^[69-71] 이밖에 가스 하이드레이트 시험생산 지역에서 시험생산에 따른 환경 영향을 관측하기 위한 모니터링 시스템(monitors system)에 대한 설계, 제작 운영 그리고 위기관리에 대한 설계를 하였다.^[70]

연구 결과 시험생산 후보 지역의 주변에서 해저 매설물(해저 케이블 등)은 확인되지 않았다. 또한 시험생산 후보 지역에서 UBGH2 시추작업에 의한 드릴 컷팅이 해저면에 잔류된 것과 일부 해역에서 가스 누출을 의심할 수 있는 높은 용존 메탄 농도를 확인하였다.

4.3.1 기준 환경 조사

(1) 환경 위해 요소 분석

가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 영향 분석 연구 사업은 환경 위해 요소 분석, 기준 환경 조사, 환경 영향 평가, 시험생산과 관련 해저면 환경 모니터링 시스템(KIGAM Seafloor Monitoring System: 'KIMOS')을 이용한 조사, 환경 관리 계획에 대한 종합적인 전략을 수행하기 위해 계획되었다(Fig. 14).^[68-71] 가스 하이드레이트 환경 위해 요소 분석(risk factor analysis)은 가스 하이드레이트 시험생산 예정 지역의 특성, 시추 작업과 시험생산 작업 내용 등을 고려하여 실시되었다. 동해 울릉분지의 미고 결된 퇴적층에서의 인위적인 가스 하이드레이트 해리에 의해서 발생될 수 있는 다양한 위해 요소를 탐색하고, 시험생

산 지역 특성에 의해서 중요도가 결정될 것이다. 기준 환경 조사(baseline survey)는 가스 하이드레이트 시험생산 이전과 이후의 변화를 'KISOS'을 이용하여 관측하고 비교하기 위한 목적으로 수행되는 조사로(Fig. 15), 기준 환경 조사의 범위와 항목은 환경 위해 요소 분석 결과와 함께 환경 시뮬레이션에 의한 가스/퇴적물 이동 확산 결과를 종합하여 결정하였다. 가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 평가와 환경 관리 계획은 시험생산 이후의 기준 환경 조사와 함께 시험생산 기간 동안의 환경 모니터링 결과를 종합하여, 시험생산 이후에 실시될 계획이다.

1) 동해 울릉분지의 지역적인 특성

동해 울릉분지 가스 하이드레이트 시험생산 후보 지역은 수심 2,000 mbsl 이상이고 해저면 수온 약 0.2℃이며, 평탄한 분지 평원에 위치한다. 가스 하이드레이트 시험생산 후보 지역의 일반적인 기상 및 해류 특성은 해양 시험생산에 관련된 모든 작업에 영향을 주며, 가스 하이드레이트 시험생산 작업 또한 바람, 파도, 해류 등에 의해 영향을 받을 수 있는 것으로 파악되었다.

동해의 바람 자료는 지난 9년간의 미국 해군 'NOGAPS'(Navy Operational Global Atmospheric Prediction System) 자료를 활용한 시뮬레이션 결과를 분석하였으며, 해류에 대한 자료는 [71]을 분석하였다. 동해의 표층해류 자료는 미국 해군 'HYCOM'(Hybrid Coordinate Ocean Model) 자료를 활용한 시뮬레이션 결과를 분석하였으며, 저층 해류에 대한 자료는 [72]를 참고하였다. 유의 파고와 태풍에 대한 정보는 우리나라 기상청 자료를 참고하였다. 가스 하이드레이트 시험생산 후보 지역에서의 어업 활동은 국립수산

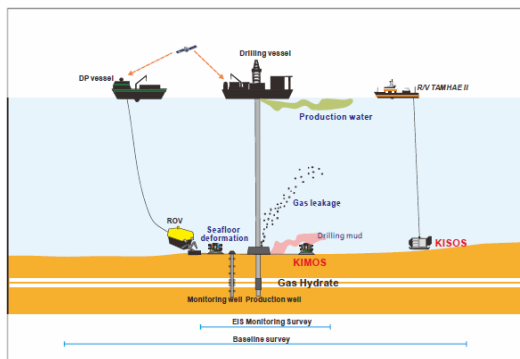


Fig. 14. Schematic diagram for environmental impact surveys



Fig. 15. KISOS used for baseline survey

과학원 자료를 이용하여 파악하였으며, 가스 하이드레이트 시험생산 후보 지역 주변에 매설된 해저 케이블에 대한 정보는 KT Submarine에 문의하여 획득하였다.

2) 가스 하이드레이트 시험생산과 관련된 환경 위해 요소

2010년 미국 걸프만에서 시추작업 중 폭발에 의해 원유와 가스가 누출되어 심각한 해양 환경 오염이 발생되었다.^[74,75] 연구결과 파악된 울릉분지 가스 하이드레이트 시험생산 과정에서 발생할 수 있는 환경 위해 요소로는 시험생산 과정에서 가스 하이드레이트로부터 해리된 가스의 해수로와 대기로의 방출, 가스 하이드레이트 재형성(rehydration) 방지를 위하여 첨가되는 억제제 및 시추 과정에서 다량 발생하는 시추컷팅(drill cutting)의 확산, 시험생산에 따른 해저면 변형과 침하 그리고 사면사태, 시험생산에 따른 생산수의 방출, 시험생산 작업에 따라 증가되는 탁도 등을 들 수 있다.

3) 환경 위해 요소의 중요도 분석

가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 위해 요소에는 가스 누출과 가스의 이동 확산, 지층 변형 및 침하에 따른 해저면 변형 또는 사면 사태, 생산수 및 억제제의 배출 및 누출에 의한 이동 확산, 시추 작업 및 시험생산 작업에 따른 해저면 교란과 시추 컷팅의 이동 확산 등이 있으며, 이러한 환경 위해 요소는 해양 생태계와 대기에 영향을 줄 수 있으며, 이들 환경 위해 요소의 중요도는 가스 하이드레이트 시험생산 지역의 지리적인 특성(경사도, 수심), 지질학적인 특성(균열대 또는 단층 발달 여부, 퇴적 환경), 해양학적인 특성(해류, 저성생물 군집), 사회적인 특성(어업 활동과 해저 시설물), 시험생산 절차 및 과정(시험생산 깊이, 가스 및 생산수의 산출량, 억제제의 사용량, 작업 기간) 등에 의해서 종합적으로 검증되고 보완되어 결정된다. 울릉분지의 가스 하이드레이트 시험생산에 따른 환경 위해 요소는 가스 누출(시추공과 주변 균열대), 해저면 변형 및 침하(일본에 비해 얇은 시험생산 구간), 해저면 교란과 시추 컷팅의 발생 등이 상대적으로 중요하다. 울릉분지 가스 하이드레이트 시험생산 지역의 지층은 거의 평탄하여,^[43] 상대적으로 사면 사태에 대한 환경 위해 중요도는 낮게 평가된다.

(2) 가스 하이드레이트 시험생산 예정 지역 위해 요소 정밀 조사

가스 하이드레이트 환경 영향에 대한 정밀 조사는 2013년 7월 23일에서 7월 30일까지, 2013년 8월 3일에서 8월 12일까지 두 차례 수행되었다.^[69] 2013년 정밀 조사의 연구 지역은 가스 하이드레이트 함유 사질 퇴적층의 발달이 확인된 가스 하이드레이트 시험생산 예정 지역과 주변 지역으로 포항에서 북동쪽으로 약 140km 떨어져 있으며, 수심은 약 2,164 mbss이다.

2013년 정밀 조사에서는 *R/V TAMHAE II*에 장착되어 있는 피스톤 코어를 사용하여 가스 하이드레이트 시험생산 예정 지역과 주변 지역에서 5개, 배경 지역에서 1개의 코어 퇴적물을 획득하고 퇴적학적 분석과 함께 공극수와 공극층 가스에 대한 분석을 수행하였다.^[69] 퇴적물의 근원지 추적 연구를 위하여 'MC-ICP-MS'(Multi Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)를 이용하여 Pb 동위원소 분석을 수행하였으며, 공극수 내 황화수소 농도는 분광 광도계(spectrophotometer)를 이용하여 측정하였다. 채취한 멀티 코어에 대해 이미지 촬영과 함께 'ITRAX' 코어 스캐너(core scanner)를 이용 1 mm 간격으로 퇴적물 내의 Ar, Ti, Si, Fe, Mn, Ca, Sr, Br, Rb, Ba 원소 분석을 수행하였다.

2013년과 2014년 KISOS에 부착되어 있는 로셋 시스템(Rosset system)의 니스킨(NISKIN) 모델의 채수기를 이용하여 시험생산 예정 지점과 UBGH공이 시추된 지역에서 심도에 따른 22개의 해수를 채취하고, 'ICP-MS'를 이용하여 해수의 용존 메탄 함량을 측정하였다.^[69,70] 또한 자동 영양염 분석기(Automatic Nutrient Analyzer; QuAAtro 모델)를 이용하여 해수의 용존 영양염(암모니아, 아질산염, 질산염, 인산염)을 분석하였다. 대기 중 메탄의 농도를 측정하기 위하여 대기시료를 데드라 백을 이용하여 채집하고 GC를 이용하여 분석하였으며, 해저면 부근의 천부 지질 구조의 발달을 조사하기 위하여 'Chirp'를 이용하여 의사(pseudo)고해상 3차원 탄성과 탐사를 수행하였다.

4.3.2 가스/퇴적물 이동, 확산 환경 시뮬레이션

동해 울릉분지에서 예정된 가스 하이드레이트 시험생산의 안전하고 환경 친화적인 수행을 위하여 시험생산 예

정 지역을 대상으로 가스 하이드레이트 시험생산 시추 및 시험생산 과정에서 방출될 수 있는 메탄가스, 생산수, 드릴 컷팅(drill cutting), 이질 퇴적물 및 생산수의 이동·확산에 대한 환경 시뮬레이션을 미국 RPS ASA(Applied Science Associates)에서 개발된 시뮬레이션 패키지(package) ‘CHEMMAP’을 이용하고 2014년 5월 현장에서 관측된 자료 중 품질 관리를 통과한 관측 해류 자료와 미 해군에서 개발된 전 지구 해류 순환 모델인 ‘HYCOM’ 자료를 활용하여 수행하였다.^[69,70] 시뮬레이션 환경은 KAIST에서 분석한 연구결과를 이용하여 설정하였으며, 생산수의 경우, 현재까지 시추선과 시추 방법이 확정되지 않았기 때문에, 기존 해양 유전 개발 시추에서 사용되는 통상적인 방법을 적용하여 시나리오를 개발하였다.

4.3.3 환경 모니터링 시스템

가스 하이드레이트 환경 모니터링은 가스 하이드레이트 시험생산에 의한 인위적인 가스 하이드레이트 해리에 의한 해저면 변형 및 지반 침하의 깊이와 형태를 파악하고 시험생산공 또는 시험생산공 주변의 균열대와 단층을 따라 발생될 수 있는 메탄가스의 누출, 시험생산에 따른 저층수의 용존 가스의 농도, 탁도, 온도, 염도, pH의 변화를 관측하기 위하여 시험생산 이전에 시험생산공 주변 해저면에 관측 플랫폼(platform)을 설치하고 시험생산 이후에 관측 플랫폼을 회수하여 관측 자료를 비교 분석할 목적으로 수행될 예정이다(Fig. 16). 2012년과 2013년 각각 KIMOS의 개념 설계와 정밀 설계를 하였으며,^[68,69] 2014년에 가스 하이드레이트 시험생산 일정의 연기에 의해서 가스 하이드레

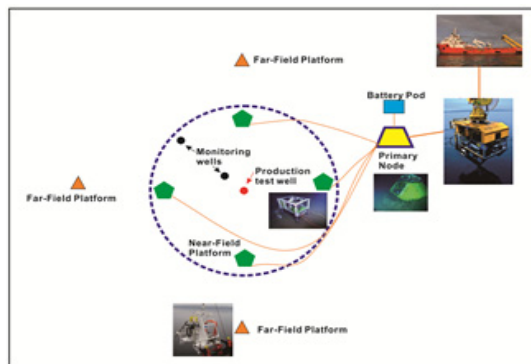


Fig. 16. KIMOS used for the monitoring survey^[24]

이트 환경 모니터링 시스템의 제작과 운영은 이루어지지 않았지만, 지난 3년에 걸쳐 수행된 연구를 통해 가스 하이드레이트 환경 모니터링 시스템의 설계 및 실전 프로그램 작성은 완료되었다.^[70]

(1) 개념 설계

KIMOS의 개념 설계는 수심 2,000 m 이상의 심해 지역에 환경 모니터링 시스템을 설치하고 운영하고 있는 캐나다 ONC(Ocean Networks Canada)와 협력하여 수행하였다.^[68] 가스 하이드레이트 환경 모니터링 시스템은 플랫폼의 각종 센서와 장비의 안정화 기간을 고려하여 시험생산 작업 이전에 설치하는 것으로 설계하였다. 환경 모니터링 시스템의 설치와 회수를 위해서는 자동위치제어(dynamic positioning: DP) 시스템을 구비하고 환경 모니터링 시스템의 운영 및 설치를 위한 ROV를 탑재할 능력을 가진 모선(vessel)이 필요한 것으로 분석되었다. 가스 하이드레이트 환경 모니터링 시스템은 가스 하이드레이트 시험생산공과 모니터링공으로부터 거리에 따라 근거리 플랫폼과 원거리 플랫폼으로 구분하여 설계 하였으며, 플랫폼에 부착되는 장비 역시 종류에 의해 세분하고 심해의 고압 저온 환경에 적합하게 설계하였다. 근거리 플랫폼은 케이블로 연결되어 주 장비 노드(primary instrument node)로 자료의 저장 및 다운로드가 가능할 수 있도록 하였으며, 가스 하이드레이트 시험생산 기간에는 주 장비 노드와 ROV가 직접적으로 연결되어 실시간으로 자료를 환경 모니터링 모선과 시추선에서 관측할 수 있도록 설계하였다. 따라서 주 장비 노드는 시추선의 작업 반경을 벗어난 곳에 위치하며, 가스 하이드레이트 시험생산 기간 동안에 ROV가 항상 접근 가능한 곳에 위치하게 설계하였다. 환경 모니터링 시스템의 주 장비 노드에는 저층 해류와 가스 누출(버블 형태)을 관측할 수 있는 해류계(acoustic doppler current profiler: ‘ADCP’)와 스캐닝 소나(scanning sonar)를 장착하고, 근거리 플랫폼에는 해저면 변형과 침하를 관측할 수 있는 고해상력 경사계(high-resolution tilt-meter), 고해상 수심 센서(bottom pressure recorder), 다양한 용존 가스(용존 메탄, 용존 산소, 용존 이산화탄소)를 측정하는 센서, 해양 환경(탁도, 온도, 염분) 변화를 관측할 수 있는 센서를 장착하는 것으로 설계하였다. 원거리 플랫폼에는 다양한 용

존 가스 센서와 해양 환경 변화를 관측할 수 있는 센서를 장착기로 하였다. 환경 모니터링 시스템을 이용하여 획득되는 자료들의 관리와 저장을 위한 자료관리 저장시스템(data management and archiving system: 'DMAS')이 장비 노드와 환경 모니터링 모선에 설치하여 각종 센서들로부터 전송된 자료들의 실시간으로 확인하고 다운로드(down-load) 할 수 있게 설계하였다.

(2) 정밀 설계

가스 하이드레이트 환경 모니터링 시스템의 정밀 설계를 어느 정도 마무리할 시점인 2013년 11월까지 시추선 용선 계획과 가스 하이드레이트 시험생산의 시추관 시험(drill stem test: 'DST') 일정이 확정되지 않았기 때문에 완전한 환경 모니터링 시스템의 정밀 설계는 하지 못했다.^[70] 환경 모니터링 근거리 플랫폼은 가스 하이드레이트 시험생산공 반경 50 m 이내에 해저면 변형, 가스 누출, 드릴 컷팅 이동 확산을 관측하기 위하여 설치되지만, 원거리 플랫폼은 2010년 시추공과 2013년 발견된 균열대에서의 가스 누출 등의 현상을 관측하기 위한 목적이 추가되었다.

가스 하이드레이트 환경 모니터링 시스템의 설치 작업은 7일 정도 걸리며, 환경 모니터링 플랫폼에 장착된 센서와 장비들의 안정화를 위하여서는 약 30일이 필요한 것으로 분석되었다. 따라서 각종 센서와 장비의 테스트 이후에 시추선 도착하기 전까지는 제한적인 전원 장치의 용량으로 관측 작업을 중단시켜서 시추 작업과 가스 하이드레이트 시험생산 작업 기간 동안에 자료를 확보할 수 있도록 동면시킬 예정이며, 환경 모니터링 시스템은 시추 작업과 가스 하이드레이트 시험생산 작업이 시작되는 시점에 재가동되어 관측될 수 있도록 하였다.^[70] 해저면 변형과 관련된 BPR 관측은 장기간 운영될 수 있도록 설계하였으며, 환경 모니터링 시스템의 운영은 최대 2 년간 지속될 수 있도록 설계되어 있지만 관측 자료의 종류와 빈도수 등의 조절에 의해서 운영 기간을 변경할 수 있도록 설계하였다.^[70] 가스 하이드레이트 환경 모니터링 설치하는 작업용(working class) ROV도 가능하지만, 가스 하이드레이트 시험생산 'DST' 기간의 전원 공급과 실시간 자료 전송에 활용될 수 있도록 과학용 무인 잠수정(remotely operated vehicle)을 이용하는 것으로 설계하였다. 가스 하이드레이트 환경 모니터

링 시스템의 노드는 ROV의 접근이 항상 가능한 위치에 설치하고 해저면 전원 장치로부터 근거리 플랫폼에 전력을 공급하고 플랫폼의 센서와 장치의 자료를 전송 받을 수 있게 그리고 해류계를 장착할 수 있게 설계하였으며, 원거리 플랫폼의 설치 위치는 기존의 시추공과 균열대를 포함하며, 가스 누출과 시추 컷팅의 이동 확산에 영향을 주는 저층 해류를 고려하여 선정기로 하였다.^[70]

(3) 실전 프로그램

가스 하이드레이트 시험생산 기간 동안 시험생산공 주변 해저면에 설치될 환경 모니터링 근거리 플랫폼은 가스 하이드레이트 시험생산공의 반경 50 m 이내에 설치하고 N1 플랫폼과 N2~N4 플랫폼으로 구분하여 설계하였으며, 설치 장소는 가스 하이드레이트 시험생산공의 배열과 저층 해류 방향 등을 고려하여 설치기로 하였다.^[69] 또한 근거리 플랫폼에 부착될 모든 센서와 장비들은 공통적으로 수심 3,000 mbsl 이상, 수온 0~30℃에서 작동될 수 있는 성능을 보유하게 설계하였다.

스틸카메라, 원격 지원 연속 채수기(remote access time-series water sampler), 초음파 ADCP, 음향 자동 이탈기(acoustic release)로 구성되는 근거리 플랫폼 NI은 가스 하이드레이트 시험생산공 주변에서 드릴 컷팅의 확산과 가스 방출 현상에 대한 영상 자료를 획득하고 해류에 대한 자료와 함께 드릴 컷팅과 용존 가스의 확산과 방출을 실측할 수 있는 연속적인 해수 시료를 획득하는 목적으로 설치될 계획이며, 6개월 이상 전원 공급이 가능하도록 설계하였다.^[70,71] 그리고 각종 센서(용존 메탄, 용존 이산화탄소, 용존 산소, pH, 클로로필, CTD, 고해상력 수심, 해류, 탁도)들과, 수중 통신 장치(underwater communication device), 음향 자동 이탈기, 전원 장치로 구성된 근거리 플랫폼 N2, N3, N4은 가스 하이드레이트 시험생산공으로부터 반경 50 m 이내의 지역에서 드릴 컷팅과 가스 방출 현상 및 해저면 변형과 관련된 자료를 획득하고 해저면 환경에 미치는 영향을 밝히기 위하여 설치될 예정이며(Fig. 16), 이들 플랫폼은 6개월 이상 전원을 공급 받을 수 있도록 설계하였다.^[70,71]

원거리 플랫폼은 가스 하이드레이트 시험생산공의 반경 50~300 m에 설치되며(Fig. 16), F1 플랫폼과 F2~F5 플랫폼으로 구분하여 설계하였다.^[70,71] 원거리 플랫폼의 설치

장소는 해저면 균열대, 해저면 변형 관측, 저층 해류 방향 등에 의해서 결정하기로 하였으며, 원거리 플랫폼에 장착 될 모든 센서와 장비들은 공통적으로 수심 3,000 mbsl 이상, 수온 0~30℃에서 작동될 수 있는 성능을 보유하게 설계하였다. 원거리 F1 플랫폼은 스틸 카메라, 원격지원 연속 채수기, 음향자동 이탈기로 구성된다. 드릴 컷팅과 가스 방출에 의한 이동 확산을 관측하기 위한 F1 플랫폼은 저층 해류 방향을 고려하여 설치하기로 하였다. 각종 센서들과 수중 통신 장치, 음향 자동 이탈기, 전원 장치로 구성된 원거리 플랫폼 F2~F5의 센서들은 근거리 플랫폼에서 사용된 것과 동일한 사양의 장비를 사용하고 장비 회수 이후에 근거리 플랫폼과 원거리 플랫폼의 자료를 비교 분석할 수 있게 하였으며, 원거리 플랫폼 F5에는 퇴적물 트랩을 추가적으로 설치하여 드릴 컷팅의 이동 확산에 의한 실측 자료를 획득할 수 있게 설계하였다.^[70,71]

(4) 위기관리 개념 설계

위기관리 개념 설계는 해저면에 설치된 환경 모니터링 시스템에서 관측된 가스 누출량이 계획된 가스 생산량보다 높거나 위험 수준에 도달할 때, 즉각적으로 시추선과 협의를 통하여 위기관리 규정이 작동될 수 있도록 하였고 수치 모델에서 예측된 해저면 변형 또는 침하량을 벗어난 경우에서도 위기관리 규정이 정해지도록 설계하였으며, 가스 하이드레이트 시험생산 작업과 시추 작업에서 예측되지 않은 해저면 균열대에서의 위기 상황 또는 태풍과 지진 등의 자연 재해에 의한 영향 등을 고려하여 설계하였다.^[70]

해저면 균열대에서 심각한 수준의 가스 누출이나 해저면 변형이 일어날 경우에 위기관리 규정에 따른 대처 방안이 마련과 함께 자연 재해(태풍 또는 지진)에 의한 환경 모니터링 시스템의 파손, 자료 저장 및 전송에 문제가 있을 때, 예비 플랫폼의 설치 및 운영을 통한 관측 자료의 확보 등 대처 방안의 마련이 필요하다. 향후에 위기관리 개념 설계는 가스 하이드레이트 시험생산 작업에 대한 자세한 실험 및 수치 모델 결과, 시험생산 예정 지역의 정밀 해저지질 조사, 시추선의 작업 규정, 환경 모니터링 시스템의 성능 등을 종합하여 작성될 것이다.^[70]

감사의 글

본 논문은 과학기술처 및 산업자원부의 기관고유사업, 산업통상자원부의 가스 하이드레이트 개발사업에 의해 창출된 연구결과의 일부이며, 자료 취득과 연구 수행에 도움을 준 R/V TAMHAE II, M/V REM Etive, D/V Fugro Synergy 승조원, 가스하이드레이트 개발사업단의 관계자 및 연구사업의 참여 연구원들께 감사드립니다. 또한 논문 심사를 해주신 익명의 심사위원님께 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] Hammerschmidt, E.G., 1934, "Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines", Ind. Eng. Chem., 26, 851.
- [4] Makogon, Yu, F., Trebin, F.A., Trofimuk, A.A., Tsarev, V.P., Cherskiy, N.V., 1972, "Detection of pool of natural gas in a solid (hydrated gas) state", Doklady Akademii Nauk SSSR, 196, 197-200.
- [5] Yefremova, A.G., Zhizhenko, B.P., 1974, "Occurrence of crystal hydrates of gases in the sediments of modern marine basins", Doklady Akademii Nauk SSSR 214, 1179-1181.
- [6] Shipley, T.H., Didyk, B.M., 1982, "Occurrence of methane hydrates offshore Southern Mexico, In: Wakins, J.S., Moore, J.C., et al.(eds.), "Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, 66", Washington(U.S. Government Printing Office), 547-555.
- [7] Kvenvolden, K.A., 1988, "Methane hydrates - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?", Chem. Geol., 71, 41-51.
- [8] 松本良, 奥田義久, 青木豊, 1994, "メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源", 日経サイエンス社, 東京.
- [9] Dillon, W.P., Grow, J.A., Paull, C.K., 1980, "Unconventional gas hydrate seals may trap gas off Southeast U.S.", Oil and Gas J., 78, 124.
- [10] Cayias, J.L., Gorden, R.D., 1994, "Bounded risk associated

- with NORM in oil and gas operation - Environmental issues and solutions in petroleum exploration, production and refining”, Proc. Int. Petrol. Environ. Conference, Houston, pp. 750-765.
- [11] Makogon, Yu.F., 1997, “Hydrates of hydrocarbons”, Penn Well, Tulsa, OK.
- [12] Max, M.D., Pellanbarg, R.E., Hurdle, B.G., 1997, “Methane hydrate, A special clathrate: Its attributes and potential”, Naval Research Laboratory Report, NRL/MR/6101-97-7926, Washington, DC.
- [13] 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.
- [14] Kvenvolden, K.A., 1996, A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrate, Organic Geochemistry, 23, 997-1008.
- [15] 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”, Am. Ass. Petrol. Geologists Bull., 63, 2204-2213.
- [16] Kvenvolden, K.A., Barnard, L.A., 1983, “Gas hydrates of the Blake Outer Ridge, Site 533, Deep Sea Drilling Project Leg 76”, In: “Initial Reports, Deep Sea Drilling Project, 76”, 353-365.
- [17] 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.
- [18] 류병재, 김원식, 오재호, 정태진, 허대기, 선우돈, 김현태, 김세준, 김학주, 김정기, 김성필, 공기수, 김진호, 구남형, 강무희, 김영진, 서갑석, 최종규, 황규덕, 1996, “가스 하이드레이트에 관한 연구”, 한국자원연구소 기관고유사업 연구보고서(KR-96(B)-16).
- [19] 장성형, 서상용, 정부홍, 류병재, 1999, “Geobit을 이용한 가스 하이드레이트 탐사자료 처리”, 물리탐사, 2, 184-190.
- [20] Kang, S.P., Lee, H., 1998, “Equilibrium data and prediction for methane and carbon dioxide hydrates in the aqueous $MgCl_2$ solutions”, In Proc. 5th Asian Thermophys. Propert. Conference, pp. 1-4.
- [21] 류병재, 박영훈, 김원식, 오재호, 서상용, 박근필, 정태진, 허대기, 정부홍, 김인기, 이호영, 선우돈, 김현태, 유동근, 장성형, 김세준, 김학주, 김정기, 김성필, 공기수, 김경오, 구남형, 강무희, 김영진, 서갑석, 최종규, 황규덕, 1999, “21세기 신에너지자원 가스 하이드레이트 연구”, 한국자원연구소 기관고유사업 연구보고서(KR-99(B)-09).
- [22] 류병재, 김원식, 정태진, 정부홍, 박근필, 서상용, 허대기, 이영주, 장성형, 유동근, 심지훈, 공기수, 김현태, 구남형, 김성필, 김경오, 권이균, 이재형, 강무희, 오재호, 선우돈, 한현철, 이호영, 권영인, 손병국, 김세준, 김정기, 김학주, 김영진, 서갑석, 최종규, 황규덕, 박명호, 김일수, 백영순, 이영철, 이정환, 조병학, 2004, 가스 하이드레이트 탐사 및 개발 기술, 한국지질자원연구원 연구보고서(KR-04(c)-09).
- [23] 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.
- [24] 구대립, 허대기, 강동호, 강년건, 김길영, 김세준, 김유리, 김지훈, 류병재, 박장준, 서영주, 안태웅, 엄인권, 유동근, 이보연, 이성록, 이재형, 이주용, 최지영, 안승희, 심재현, 진규옥, 황철욱 (류병재 편집), 2015, “가스하이드레이트 개발사업 종합 성과보고서”, 가스하이드레이트 개발사업단, 한국지질자원연구원.
- [25] 허대기, 권영인, 김현태, 류병재, 박관순, 박근필, 서상용, 손병국, 신원철, 오재호, 이호영, 장정해, 정부홍, 정태진, 진재화, 황인걸, 구남형, 권이균, 김성용, 김세준, 김진호, 김학주, 남승일, 박장준, 선우돈, 성낙훈, 유동근, 이영주, 이원석, 이재형, 장성형, 강동호, 김병엽, 김영진, 김원식, 김유정, 김지훈, 안은영, 황규덕, 서갑석, 안기오, 최종규, 강주명, 박수철, 변중무, 성원모, 신성렬, 유강민, 이상목, 이정환, 이훈, R. Sassen, Y. Seol, 2005, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서 (GAD2000011-2005(6)).
- [26] 유동근, 박근필, 박관순, 정부홍, 신원철, 이호영, 장성형, 김길영, 김진호, 김성필, 구남형, 김경오, 강동호, 김원식, 김병엽, 정순홍, 김영준, 김영진, 황규덕, 최종규, 서갑석, R.D. Hyndman, 박수철, 이광훈, 신성렬, 김한준, 변중무, 2006, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2006-012-2006(1)).
- [27] 유동근, 서상용, 박관순, 신원철, 박근필, 정부홍, 이호영, 장성형, 김길영, 김진호, 김성필, 김경오, 구남형, 황규덕, 김영진, 강동호, 김원식, 김병엽, 정순홍, 김영준, 최종규, 서갑석, 손혜진, 조민희, R. D. Hyndman, 박수철, 이광훈,

- 신성렬, 김한준, 변중무, 박요섭, 2007, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서 (NP2007-020-2007(1)).
- [28] 권영인, 고재형, 김정기, 김지훈, 김학주, 류병재, 박영수, 손병국, 선우돈, 신영재, 안기호, 오재호, 이정화, 이영주, 이호영, 전치완, 정태진, 천종화, 황인걸, 배위섭, 우경식, 2006, “가스하이드레이트 지질·지화학 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2006-013-2006(1)).
- [29] 권영인, 고재형, 김정기, 김지훈, 김학주, 류병재, 박영수, 손병국, 선우돈, 안기호, 오재호, 이정화, 이영주, 이호영, 전치완, 정태진, 천종화, 황인걸, 이주용, 강년진, 배위섭, 우경식, 이성주, 이창식, R. Sassen, 2007, “가스하이드레이트 지질·지화학 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서 (NP2007-019-2007(1)).
- [30] Fugro, 2007, Investigation of Gas Hydrate Expedition UBGH1 Ulleung Bssin, East Sea, Offshore Korea, Factual Field Report” [unopened] (0201-6242), Fugro GeoConsulting, Inc., Houston, Texas.
- [31] 진재화, 이치원, 민건홍, 장세원, 장정해, 최현수, 이성록, 허대기, 박근필, 정부홍, 이호영, 김현재, 유동근, 이영주, 박장준, 권이균, 남승일, 김성필, 공기수, 장성형, 구남형, 이원석, 이재형, 김원식, 김지훈, 엄인권, 2006. “2005년 가스 하이드레이트 심부 퇴적물 암상채취 용역 최종보고서”, Unopend report.
- [32] 박장준, 김원식, 장정해, 김지훈, 장세원, 민건홍, 권이균, 이치원, 최현수, 남승일, 김성필, 엄인권, 이영주, 김정기, 이상현, 진재화, 최종규, 장태수, 문홍수, 2008, “가스하이드레이트 심부시추시료 분석 및 안정성·지질재해 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2008-003-2008(1)).
- [33] 유동근, 서상용, 박관순, 신원철, 박근필, 정부홍, 이호영, 장성형, 김길영, 김진호, 김성필, 김정오, 구남형, 황규덕, 김영진, 강동호, 김원식, 김병엽, 정순홍, 김영준, 최종규, 서갑석, 이호정, 조민희, 박수철, 이광훈, 김한준, 변중무, 하태영, 2008, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2008-004).
- [34] 유동근, 신원철, 박근필, 정부홍, 이호영, 장성형, 김길영, 김진호, 김성필, 김정기, 구남형, 황규덕, 김영진, 강동호, 김원식, 김병엽, 정순홍, 김영준, 최종규, 서갑석, 이호정, 강년진, 이보연, 2009, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2008-004-2009(2)).
- [35] 유동근, 류병재, 박근필, 신원철, 이호영, 정부홍, 장성형, 구남형, 김성필, 김원식, 김길영, 김병엽, 정순홍, 김영준, 강년진, 김영진, 황규덕, 서갑석, 김정기, 최종규, 이보연, 정래근, 황남순, 박수철, 이광훈, 김한준, 변중무, 한혁수, G. D. Spence, 2010, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2010-003-2010(1)).
- [36] 유동근, 류병재, 이성록, 정부홍, 이호영, 천종화, 황세호, 신원철, 김길영, 김정기, 구남형, 황규덕, 김영진, 강동호, 김원식, 김병엽, 정순홍, 김영준, 최종규, 서갑석, 조동우, 강년진, 이보연, 이광훈, 박수철, 김한준, 변중무, G. D. Spence, 2011, “가스하이드레이트 지구물리탐사 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2010-003-2011(2)).
- [37] 류병재, 박근필, 유동근, 김길영, 천종화, 박장준, 김지훈, 이주용, 김병엽, 정부홍, 이영주, 김원식, 허은녕, 문창권, 이유아, 최혁준, 강민주, 김지호, 김해연, 박주영, 이동진, 이동준, 2010, “가스하이드레이트 2차 시추 프로그램 작성 및 정책 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2010-009-2010(1)).
- [38] 유동근, 신원철, 민건홍, 이성록, 류병재, 정부홍, 이호영, 황세호, 이상현, 김길영, 천종화, 구남형, 박장준, 김지훈, 강동호, 김병엽, 엄인권, 김영준, 강년진, 김영진, 황규덕, 김정기, 최종규, 조동우, 이주용, 이보연, 최지영, 2012, “가스하이드레이트 부존평가 및 저류층 특성 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-026-2012(1)).
- [39] 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., the UBGH2 scientists, 2012, “The Second Ulleung Basin, Gas Hydrate Drilling Expedition (UBGH2) Expedition Report”, KIGAM.
- [40] 김대형 외, 2009, “가스하이드레이트 정책연구사업”, 김대형, 김지환, 이재욱, 김유정, 허은녕, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2009-018-2009-R), 236p.
- [41] 박장준, 강년진, 강동호, 김길영, 김성필, 김정기, 김지훈, 김학주, 류병재, 박영수, 손병국, 엄인권, 이상현, 이성록, 이주용, 정부홍, 천종화, 최현수, 이운수, 최지영, 이진혁, 김대하, 이정현, 한정호, 최종근, 2011, “가스하이드레이트 지질·지화학 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서 (GP2010-002-2011(2)).
- [42] Fugro, 2010, “Geohazard Site Assessment 2010 Gas Hydrate Exploration Proqram Ulleung Basin, Offshore Korea”, [unopened], Fugro GeoConsulting, Inc., Houston, Texas.
- [43] Fugro, 2010, “Gas Hydrate Investigation Expedition UBGH-2 Ulleung Basin, East Sea, Offshore Korea,

- Operational Report”[unopened] (27.2010-2391), Fugro GeoConsulting, Inc., Houston, Texas.
- [44] KIGAM, 2010, “Geology and Geophysical Program for Gas Hydrate Drilling Expedition 2010”, [unopened], KIGAM, Daejeon.
- [45] 유동근, 류병재, 민건홍, 이호영, 이보연, 황세호, 이상현, 김길영, 천종화, 구남형, 박장준, 김지훈, 강동효, 김병엽, 엄인권, 김영준, 강년건, 김영진, 황규덕, 김정기, 최종규, 조동우, 최지영, 주용환, 박수철, 변중무, 2013, “가스하이드레이트 부존평가 및 저류층 특성 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-026-2013(2)).
- [46] 유동근, 류병재, 민건홍, 이호영, 이보연, 황세호, 이상현, 김길영, 천종화, 구남형, 박장준, 김지훈, 강동효, 김병엽, 엄인권, 김영준, 강년건, 김영진, 황규덕, 김정기, 최종규, 조동우, 최지영, 변중무, 허민, 김여상, 2014, “가스하이드레이트 부존평가 및 저류층 특성 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-026-2014(3)).
- [47] 유동근, 강연진, 강동효, 김길영, 김영준, 김지훈, 류병재, 박장준, 엄인권, 이보연, 이상현, 이호영, 주용환, 천종화, 최지영, 김연진, 김정기, 서갑석, 조동우, 황규덕, 2015, “가스하이드레이트 부존평가 및 저류층 특성 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-026-2015(4)).
- [48] 김세준, 김현태, 이재형, 이원석, 신영재, 김학주, 이정환, 강주명, 2006, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2006-014-2006(1)).
- [49] 허대기, 김현태, 김세준, 황인걸, 이재형, 이원석, 신영재, 이현석, 김학주, 2007, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(KR-2007-036-2007).
- [50] 이재형, 김현태, 고재홍, 김세준, 허대기, 황인걸, 남승일, 이대성, 이원석, 신영재, 이주용, 이현석, 김학주, 강주명, 이훈, 조계춘, 임종세, 김영석a, 이정환, 김영석b, B. Tohidi, 2008, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2008-005-2008(1)).
- [51] 이재형, 김현태, 고재홍, 선우돈, 김세준, 허대기, 황인걸, 이대성, 이원석, 이주용, 이현석, 김학주, 이정환, 조계춘, 임종세, 김영석a, 강주명, 김영석b, 2009, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(NP2008-005-2009(2)).
- [52] 이재형, 김현태, 고재홍, 선우돈, 김세준, 허대기, 황인걸, 이대성, 이원석, 이주용, 이현석, 김학주, 이정환, 이훈, 조계춘, 임종세, 윤태섭, 강주명, 서용원, 2010, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2010-016-2010(1)).
- [53] 김세준, 허대기, 김현태, 선우돈, 황인걸, 남승일, 이대성, 고재홍, 이원석, 이성록, 김현석, 이재형, 신영재, 이주용, 안태웅, 정부흥, 김학주, 안승희, 이정환, 강주명, 이훈, 조계춘, 임종세, 강주명, 송재준, 윤태섭, 서용원, 김영석a, 김영석b, B. Tohodi, 2011, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2010-016-2011(2)).
- [54] 김세준, 선우돈, 이성록, 이치원, 고재홍, 이재형, 이원석, 이주용, 안태웅, 김학주, 정부흥, 안승희, 이훈, 조계춘, 임종세, 2012, “가스 하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-025-2012(1)).
- [55] 김세준, 류병재, 이성록, 이치원, 고재홍, 이재형, 이원석, 이주용, 안태웅, 서영주, 김학주, 황규덕, 정용복, 박정욱, 안승희, 이훈, 조계춘, 임종세, 2013, “가스 하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-025-2013(2)).
- [56] 김세준, 이성록, 류병재, 이치원, 고재홍, 이재형, 이원석, 이주용, 안태웅, 서영주, 김학주, 황규덕, 정용복, 박정욱, 안승희, 이훈, 조계춘, 임종세, 2014, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-025-2014(3)).
- [57] 김세준, 류병재, 이성록, 선우돈, 고재홍, 이재형, 이원석, 이주용, 안태웅, 서영주, 김유리, 황규덕, 안승희, 이훈, 조계춘, 임종세, 2015, “가스하이드레이트 개발생산 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-025-2015(4)).
- [58] 이정환, 주우성, 박승민, 최양미, 2005, “가스하이드레이트 개발 및 생산(I)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [59] 이정환, 박승수, 한정민, 박승민, 최양미, 2006, “가스하이드레이트 개발 및 생산(I)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [60] 이정환, 박승수, 한정민, 김병주, 최양미, 박승민, 백영순, 2007, “가스하이드레이트 개발 및 생산(I)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [61] 이정환, 박승수, 주우성, 안승희, 신창훈, 한정민, 김병주, 이계정, 2008, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구”, 한국가스공사 연구보고서.
- [62] 이정환, 박승수, 안승희, 한정민, 신창훈, 주우성, 백문석, 이계정, 권종철, 2009, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구”, 한국가스공사 연구보고서.
- [63] 이정환, 주우성, 박승수, 안승희, 신창훈, 한정민, 김영두, 박경식, 김치원, 배덕근, 2010, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구”, 한국가스공사 연구보고서.
- [64] 백영순, 이정환, 안승희, 이영수, 신창훈, 한정민, 장상엽,

- 김영완, 박경식, 배덕근, 박민영, 이성준, 민경원, 강정원, 2011, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구”, 한국가스공사 연구보고서.
- [65] 안승희, 백영순, 이영수, 김정규, 양영호, 강일오, 장영미, 2012, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구(II)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [66] 안승희, 이성민, 이영수, 이홍, 김기홍, 소영석, 강일오, 김정규, 양영호, 유승렬, 장영미, 2013, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구(II)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [67] 안승희, 이성민, 이영수, 이홍, 김기홍, 소영석, 강일오, 김정규, 이태엽, 백영순, 김운생, 임대희, 김정규, 양영호, 유승렬, 장영미, 2014, “가스하이드레이트 회수생산 현장 적용성 연구(II)”, 한국가스공사 연구보고서.
- [68] 천종화, 이성록, 류병재, 손병국, 박장준, 강동효, 엄인권, 이주용, 김영준, 김학주, 김정기, 김유리, 이경은, 최만식, McLean, S., 2012, “가스하이드레이트 환경영향 분석 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-027-2012(1)).
- [69] 천종화, 이성록, 류병재, 민건홍, 손병국, 박장준, 장태수, 구남형, 강동효, 엄인권, 이주용, 김영준, 이보연, 김학주, 김정기, 이홍진, 김유리, 김용훈, 최만식, McLean, S., McMurtry, G., Riedel, M., 2013, “가스하이드레이트 환경영향 분석 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-027-2013(2)).
- [70] 천종화, 이성록, 류병재, 손병국, 박장준, 강동효, 엄인권, 이주용, 김영준, 이보연, 김학주, 김정기, 이홍진, 김유리, 이진혁, 이동섭, 안순모, 김용훈, McMurtry, G., Riedel, M., 2014, “가스하이드레이트 환경영향 분석 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-027-2014(3)).
- [71] 천종화, 이성록, 류병재, 손병국, 김세준, 박장준, 이주용, 엄인권, 강동효, 정순홍, 김영준, 이보연, 김유리, 김학주, 김정기, 김성영, 최만식, 안순모, 2015, “가스하이드레이트 환경영향 분석 연구”, 한국지질자원연구원 연구보고서(GP2012-027-2015(4)).
- [72] Seung, Y.H., 1992, “A simple model for separation of East Korean Warm Current and Formation of North Korean Cold Current”, J. Oceanogr. Soc. Korea, 27, 189-196.
- [73] Chang, K.I., Hogg, N., Suk, M.S., Byun, S.K., Kim, Y.G., Kim, K., 2002, “Mean flow and variability in the southwestern East Sea”, Deep Sea Res., 49, 2261-2279.
- [74] Kessler, J.D., Valentine, D.L., Redmond, M.C., Du, M., Chan, E.W., Mendes, S.D., Quiroz, E.W., Villanueva, C.J., Shusta, S.S., Werra, L.M., Yvon-Lewis, L.M., Weber, T.C., 2011, “A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the Deep Gulf of Mexico”, Science, 331, 312-315.
- [75] Hastings, D.W., Schwing, P.T., Brooks, G.R., Larson, R.A., Morford, J.L., Roeder, T., Quinn, K.A., Bartlett, T., Romero, I.C., Hollander, D.J., 2014, “Changes in sediment redox conditions following the BP DWH blowout event”, Deep-Sea Res. II (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.12.009>.