

가스하이드레이트(GH) 연구개발 현황

허대기^{1)*} · 이주용²⁾

Overview of Gas Hydrates R&D

Dae-Gee Huh* and Joo Yong Lee

(Received 21 April 2017; Final version Received 24 April 2017; Accepted 26 April 2017)

Abstract : The world resource volume of gas hydrates is estimated about 300 trillion cubic meters excluding the gas hydrates of onshore permafrost. If half of this volume can be producible, it is close to the total reserve of natural gas worldwide. It is anticipated that the commercial production of gas hydrates is possible after 2030 due to the slow development of production technology and recent shale gas revolution. The test production planned in May 2015 was postponed during the preparation stage due to the estimated low production volume, insufficiencies of drill hole stability and flow assurance of produced gas. The test production will be rescheduled at the end of 2018. We have to prepare the gas hydrates era by developing a new breakthrough production technology in order not to kill the outcomes obtained during the gas hydrates development program of Korea last 10 years.

Key words : Gas Hydrates, Methane Hydrates, Resource, Test Production, Climate Change

요 약 : 육상-동토층의 가스하이드레이트를 제외한 해양의 사질형 가스하이드레이트 부존량은 약 300조 입방미터로 추산되고 있다. 이중 50%를 생산할 수 있어도 현재의 천연가스 매장량에 육박한다. 막대한 부존량을 나타내는 해양 가스하이드레이트의 상업적 생산은 더딘 생산기술 확보와 최근의 셰일가스 붐으로 인해 2030년 이후가 될 전망이다. 2015년 5월로 예정되었던 국내 시험생산은 준비 과정에서 예측된 시험생산량의 부족, 시추공 안정성 확보 미흡, 가스하이드레이트 유동성 확보 미흡 등의 이유로 연기되었으나 2018년 재추진 여부를 결정할 예정이다. 이미 확보된 에너지원인 가스하이드레이트의 개발기술을 사장시키지 않기 위해서라도 새로운 획기적인 생산기술을 개발하여 향후 도래할 가스하이드레이트 시대를 대비해야 한다.

주요어 : 가스하이드레이트, 메탄하이드레이트, 부존량, 시험생산, 기후변화

서 론

가스하이드레이트는 천연가스가 저온, 고압하에서 물과 결합하여 만들어지는 얼음 모양의 고체상태 화합물이다. 메탄하이드레이트가 가장 흔한 가스하이드레이트로 가스하이드레이트를 메탄하이드레이트로 부르기도 한다.

최초의 가스하이드레이트는 1810년 영국의 화학자 험프리 데이비 경이 실험실에서 물과 염소가스를 결합시켜 인공적으로 만들었으며 자연 상태의 가스하이드레이트는 1967년 시베리아 영구동토층에서 확인될 때 까지 존재하지 않는 것으로 알려졌다.

가스하이드레이트의 구조는 화합물의 일반적 형태인 화학적 결합이 아닌 분자들의 물리적 결합으로 이루어져 있다. 즉, 물 분자가 새장 격자를 형성하고 가스 분자가 새장 격자 안에 들어가는 형태로 이루어져 있어 압력, 온도 조건에 따라 가스하이드레이트의 생성과 해리가 반복적으로 일어나 불안정하다.

가스하이드레이트의 관심분야는 4가지로 알려져 있다 (Sloan, 2003). 파이프라인에서의 유동과 안전문제, 가스 저장/수송, 기후변화와 환경문제, 에너지원 등이다.

유·가스전에서 원유와 천연가스를 생산한 후 파이프라인을 통해 수송하는 경우 미량의 물이 포함되어 있어도 저온, 고압 하에 생성된 가스하이드레이트가 파이프라인을 막히게 하여 석유업계의 오랜 고민중 하나였다. 이를 방지하기 위해 메탄올과 글리콜 같은 방지제를 주입하는데 그 비용이 연간 2억2천만 달러에 달한다. 또한 가스하이드레이트로 막힌 파이프라인에 원유와 천연가스를 계속 주입하

1) 한국지질자원연구원 가스하이드레이트개발사업단

2) 한국지질자원연구원 석유해저연구본부

*Corresponding Author(허대기)

E-mail; huh@gashydrate.or.kr

Address; 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34132, Korea

면 압력이 높아져 폭발의 위험성도 내포하고 있다.

가스전이 규모가 작거나 처리시설이 멀리 떨어져 있어 개발이 힘든 경우 생산된 천연가스를 하이드레이트로 만들어 경제적으로 수송하는 방법이 제안되었다(Gudmundsson and Borrenhaug, 1996).

신생대 제4기 후반의 기후변화(Kennett *et al.*, 2003)와 후기 팔레오신의 온도증가(Dickens *et al.*, 1997)가 가스하이드레이트에서 해리된 메탄가스에 의해 야기된 것으로 추정된다는 주장이 보고되었다. 이는 해저면과 가까운 곳에 매장되어 있는 가스하이드레이트의 해리가 환경문제와 해저 퇴적층의 안전을 위협한다는 주장과 연계되어 있다.

여기서는 에너지원으로서의 가스하이드레이트 연구개발 현황에 대해 알아보려고 한다.

1960년대 중반 Makogon(1965)은 자연 상태의 가스하이드레이트가 존재할 것으로 인식하고 가스하이드레이트의 생성조건에 대한 연구를 수행하였다. 1970년대 초 시베리아 동토층에서의 시추로 육상 가스하이드레이트의 존재가 확인되었으며 해저의 가스하이드레이트는 1970년대 말과 1980년대 초 심해시추 프로그램(Deep Sea Drilling Project; DSDP)에 의해 발견되었다. 전세계 해저에 상당한 양의 가스하이드레이트가 광범위하게 부존되어 있음을 확인(Fig. 1)하여 향후 에너지원으로서의 잠재력에 주목하기

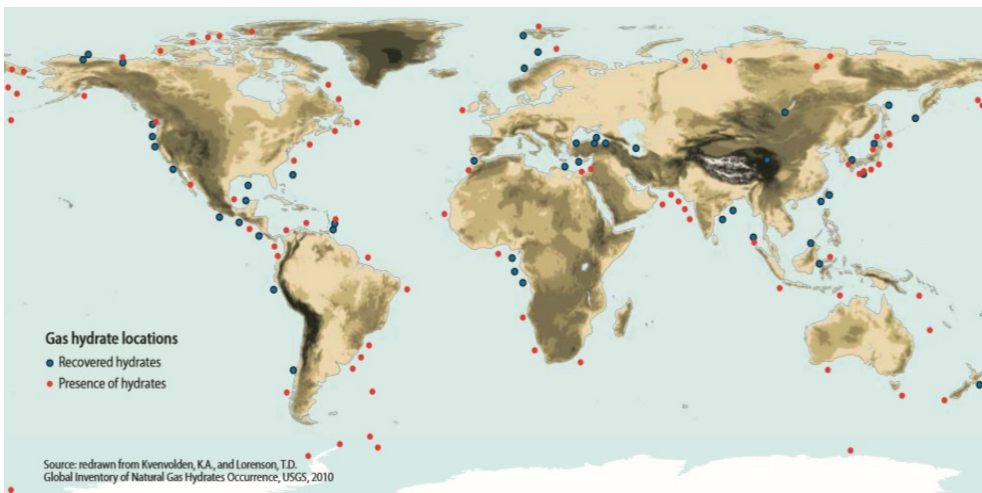


Fig. 1. Global occurrence of gas hydrates (Beaudoin *et al.*, 2014).

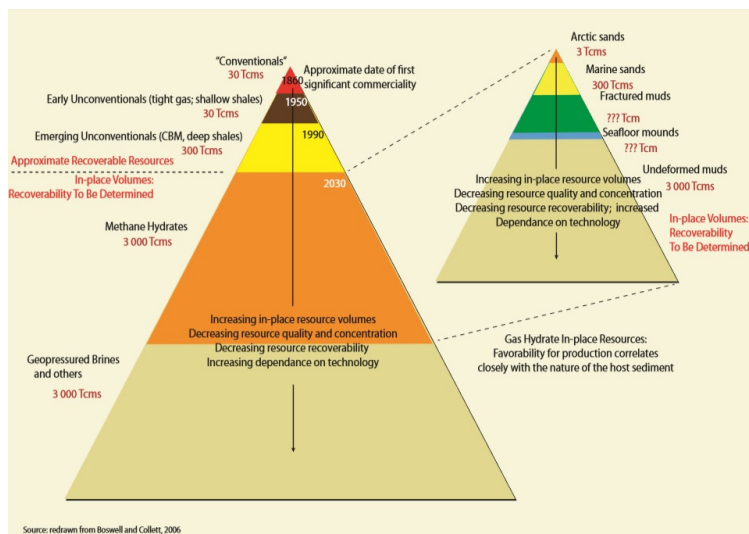


Fig. 2. Resource pyramid for gas hydrates (Beaudoin *et al.*, 2014).

시작하였다.

가스하이드레이트 대부분은 생물기원에 의한 것이나 일부 카스피해와 멕시코만에서는 열기원의 가스하이드레이트도 발견된다.

가스하이드레이트의 부존량(Fig. 2) 3,000조 입방미터(trillion cubic meter; TCM)는 상당한 오차가 있음을 고려하더라도 현 천연가스 매장량 187조 입방미터와 비교하면 그 양이 엄청난 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 2에서 보는 바와 같이 현 기술로 생산 가능한 가스하이드레이트 양은 3조 입방미터에 지나지 않으며 장래 해양의 가스하이드레이트를 생산할 수 있다고 해도 300조 입방미터 정도이다.

가스하이드레이트가 개발의 경제성을 확보하기 위해서는 생산량이 일일 500 MCM 이상이 되어야 한다. 동토층의 가스하이드레이트는 기존의 가스전 부근이 유망하며 가스전 생산에 따라 압력이 낮아지면 가스하이드레이트가 해리를 유도하여 생산이 가능해진다.

해양의 가스하이드레이트 생산은 2015년에 가능할 것으로 예상하였으나 생산기술의 확보가 지연되고 셰일가스 붐으로 현재는 2030년 이후가 될 것으로 추정하고 있다.

가스하이드레이트 연구개발의 주요 마일스톤이 Fig. 3에 나와 있다. 가장 최근의 마일스톤은 일본 난카이 트러프에서의 해양 가스하이드레이트 시험생산이다.

해외 가스하이드레이트 개발 현황

가스하이드레이트에 대한 과학적 연구는 세계 각국에서 지속적으로 수행하여 왔으나 가장 많은 예산은 현장 시추작업(Fig. 4)에 투자되었다. 현장 생산시험(Park, 2008, Lee, 2009, Lee *et al.*, 2009)의 기념비적 연구는 육상의 말릭 프로젝트와 해양의 난카이 트러프 프로젝트를 들 수 있다. 한편 유일하게 가스하이드레이트 저류층으로 부터 천연가스를 생산한 사례로는 러시아 서시베리아에 위치한 메

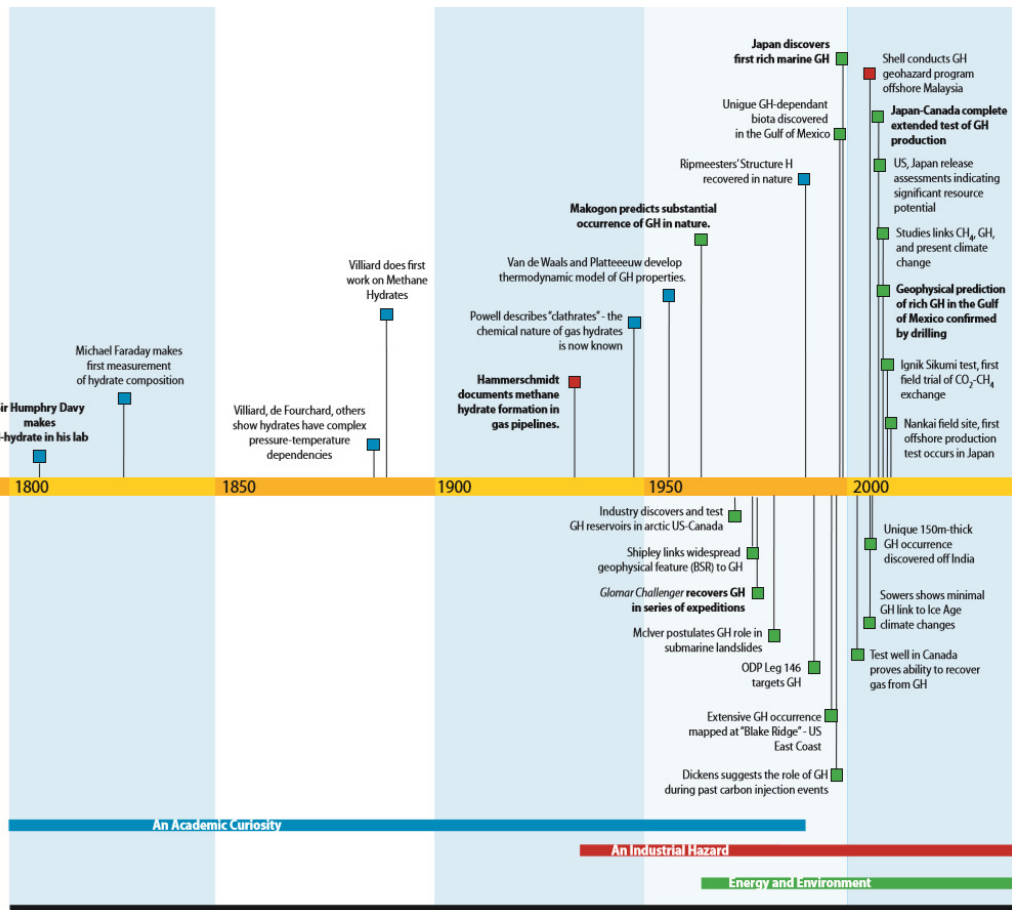


Fig. 3. Major milestones in gas hydrates research (Beaudoin *et al.*, 2014).

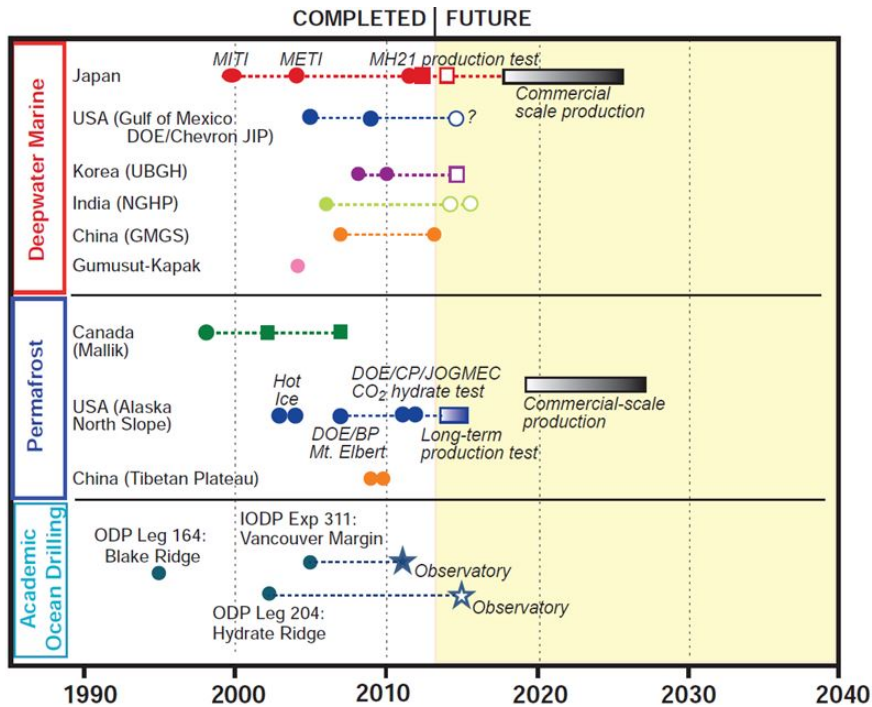


Fig. 4. Scientific and Industry Drilling Program of Gas Hydrates (Collett, 2016).

소야카 가스전이 있다. 그 밖에 멕시코만 프로젝트와 알라스카 프로젝트가 있다.

여기서는 최근까지 가스하이드레이트 연구개발이 활발한 주요 국가의 현황을 간략히 설명하고자 한다.

미국

에너지원으로서의 가스하이드레이트 연구는 1972년 알래스카 Prudhoe Bay에서 가스하이드레이트 부존을 확인한 이후 2차에 걸친 국가 프로젝트를 수행하였다.

1차 10개년 가스하이드레이트 연구·개발 프로그램(1982~1991년)

‘1차 가스하이드레이트 연구·개발 프로그램’의 주요 연구내용은 ① 알래스카 Kuparuk 지역에서 가스하이드레이트 부존 확인 ② 15개 해저 가스하이드레이트 분지에 대한 연구 및 부존량 평가 ③ 감압법과 열 주입법에 의한 가스하이드레이트 생산 모델 개발 ④ 가스하이드레이트 및 퇴적물 분석 기기 제작 ⑤ 가스하이드레이트 연구·개발에 관한 국제 학술회의 지원 등이다. 이 같은 연구 활동으로 1985년부터 전 세계 가스하이드레이트 부존지역에 대한 지도를 제작하기 시작하여 1998년에 완성하였다(Kvenvolden, 1993). 미국에서는 1995년 알래스카를 포함한 해양 4개 지

역, 육상 1개 지역 등 5개 지역에 부존하는 가스하이드레이트의 부존량 평가를 수행하였다(Collett, 1996). 연구결과 가스하이드레이트 내에 포함된 가스의 원시 부존량은 $9.07 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 으로 계산되었는데, 대부분이 해저 퇴적층에 부존되어 있는 것으로 평가되었다. 이는 2013년 말 기준 미국에 부존된 재래형 천연가스 확인 매장량 $9.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 의 약 1,000배에 달하는 막대한 양이다.

‘1차 가스하이드레이트 연구·개발 프로그램’이 종료된 1990년대는 저유가의 지속으로 가스하이드레이트에 대한 연구가 관심을 끌지 못하고 소강 상태를 보였다. 그러나 이 기간에도 가스하이드레이트 관련 연구를 체계적으로 지원할 수 있도록 법률 및 제도를 보완하였다. 그리고 1998년 7월에 ‘메탄 하이드레이트 연구·개발법’을 제정하고 ‘메탄 하이드레이트 연구·개발 전략’을 발표하여 2001년부터 ‘2차 가스하이드레이트 연구·개발 프로그램’을 추진하는 기초를 마련하였다.

2차 10개년 가스하이드레이트 R&D 프로그램(2001~2010년)

‘2차 가스하이드레이트 R&D 프로그램’은 2015년 육상에서 가스하이드레이트 상업 생산을 목표로 수행되었으며, 주요 연구 분야는 ① 실험실 연구 ② 가스하이드레이트 부

존 지역 연구 ③ 장비 개발, 컴퓨터 모델링 ④ 범지구적 기 후에 미치는 영향 ⑤ 가스하이드레이트 부존 지역의 심해 생태계 등이다. 2002년에는 알라스카 Kuparuk 지역에서 극지방에서의 가스하이드레이트 안정영역에 대한 시추 플랫폼, 시추작업, 코어링, 검층을 테스트할 목적으로 Hot Ice #1 탐사정을 성공적으로 시추하였다.

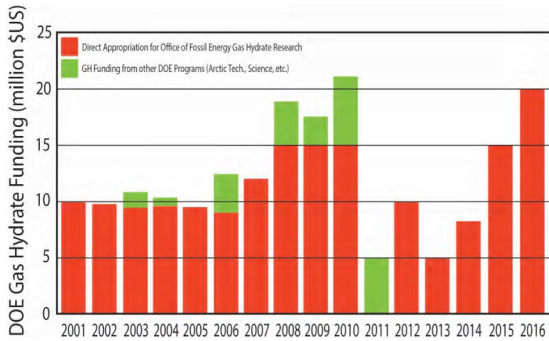


Fig. 5. Funding history for gas hydrates R&D (Boswell, 2016).

2차 10개년 가스하이드레이트 연구개발 프로그램 종료 후 가스하이드레이트 연구개발에 대한 예산지원이 중단되고 연구개발이 소강상태를 보이다 의회에서의 예산지원 요청으로 가스하이드레이트 연구는 재개되었다. 미국의 가스하이드레이트에 대한 예산 지원 현황은 Fig. 5에 나와 있다.

최근의 연구개발은 멕시코 만과 알라스카 지역으로 나누어 진행되고 있다. 멕시코 만에서의 GoM II 프로젝트는 탐사기술과 해양 가스하이드레이트의 특성파악에 중점을 두고 있으며 알라스카에서는 부존량 예측과 생산기술 연구에 주력하고 있다. 미국과 일본은 알라스카에서의 장기 육상 시험생산에 대한 공동연구를 2019년까지 추진하고 있다. 지금까지 진행된 시험생산의 시뮬레이션 결과와 실제 생산량 비교가 Fig. 6에 나타나 있다. 시뮬레이션 결과는 실제 현장시험 생산량과 비교하면 상당히 부족해 있음을 알 수 있다.

한편 2016년 1월 에너지장관 자문회의에서 가스하이드레이트에 대한 보고서를 발간하였으며 그 내용은 다음과 같다(Moniz, 2016).

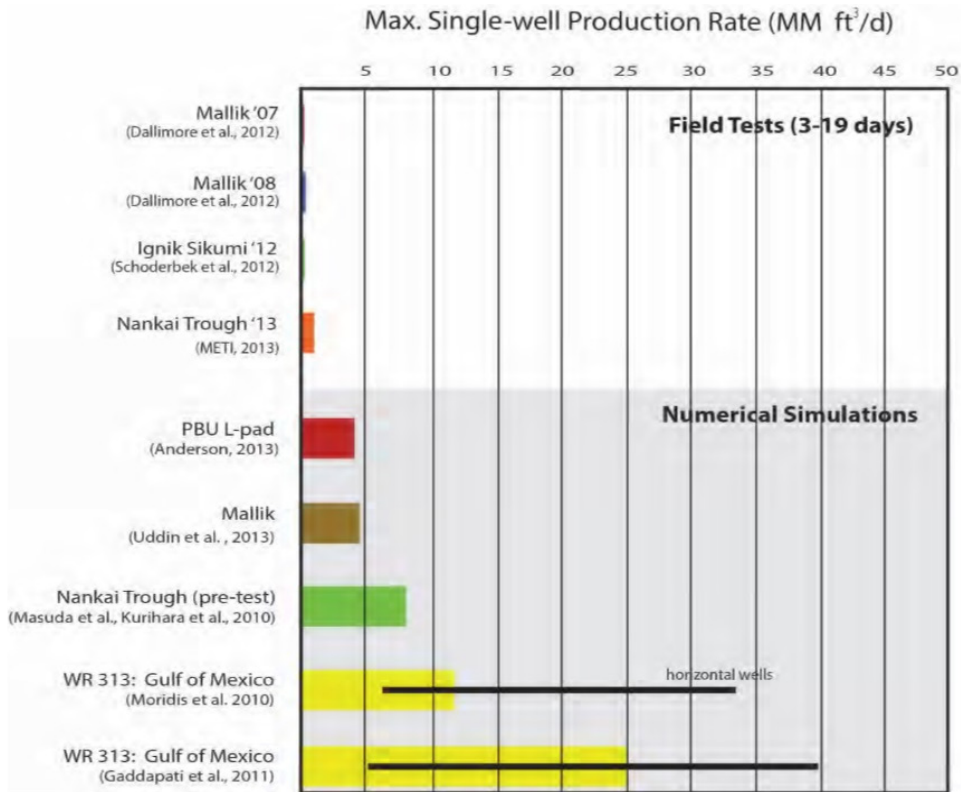


Fig. 6. Production rates of field test and simulation (Boswell, 2016).

2000년 이후 수행된 가스하이드레이트 연구개발은 상당한 성과를 나타냈으며, 향후 에너지부의 최우선 프로그램으로 유지되어야 한다.

연간 1,500만 달러 수준의 예산지원은 지속되어야 한다. 예산의 1/3은 과학적 연구에 투자되어야 한다(연간 5백만 달러).

예산의 2/3는 대규모 국제공동연구와 현장연구에 투자되어야 한다(연간 천만 달러).

일본

일본은 1989년 해양 심해시추 프로그램(ODP)에 의해 가스하이드레이트 현물이 확인된 이후 1995년부터 1999년까지 5개년 메탄하이드레이트 연구개발 프로그램과 2001년부터 2016년까지 MH21 프로그램을 수행하였다(Kim and Lee, 2010).

가스하이드레이트 부존 확인 기간(1970년대 말~1995년)

1970년대 말부터 수행한 탄성과 탐사 자료에 나타난 BSR에 의해 일본 주변 해역에 상당한 양의 가스하이드레이트 부존이 예상되었다. 1992년 응용에너지연구소는 일본 주변 해역의 가스하이드레이트 부존량에 대한 개략적인 평가 결과 $6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 의 부존량을 발표하였고, 이후 일본 주변해역의 가스하이드레이트 추정 부존량은 천연가스를 포함 $7.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 로, 자국의 천연가스 연간 소비량의 100배가 넘는 막대한 양이라고 평가하였다.

통상산업성 5개년 메탄하이드레이트 연구·개발 프로그램(1995~1999)

1995년과 1996년 난카이 트러프에서의 지구물리 탐사 자료 취득, 처리 및 해석 결과 BSR이 보다 광범위하게 분포되어 시코쿠 해역에 부존된 가스하이드레이트와 천연가스의 부존량이 $1.6 \times 10^{12} \sim 2.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 정도로 파악되었다. 이후 1999년부터 2000년 초에 걸쳐 난카이 트러프에서 3개공 심부 시추를 수행하였다. 시추결과 가스하이드레이트의 포화도가 예측한 것보다 높은 것으로 분석되었고, 가스하이드레이트에 포함된 메탄의 부존량이 $35 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 이상인 것으로 평가되었다.

MH21 메탄하이드레이트 개발 프로그램(2001~2016)

MH21 프로젝트는 JOGMEC을 중심으로 상업 생산기술 확보를 목표로 부존평가, 생산 및 모델링, 환경분야 등 3개 연구그룹으로 사업을 추진하고 있으며 연구기간을 당초 2016년에서 2018년까지 2년 연장한 상태이다.

그간의 주요 연구내용은 난카이 트러프에서 2차원, 3차원 물리탐사 작업 및 16개 공에 이르는 시추 작업을 완료하고 이에 대한 분석 작업을 수행하였으며, 2013년 3월에는 세계 최초로 해양에서 감압법을 이용한 가스하이드레이트 시험생산을 실시하여 $120,000 \text{ m}^3$ 의 가스를 생산함으로써 가스하이드레이트의 에너지원 가능성을 확인시켜 주었다.

한편 1차 해양 시험생산에서 나타난 문제점인 출사대책과 기기고장을 극복하고 장기생산을 위한 2차 시험생산을

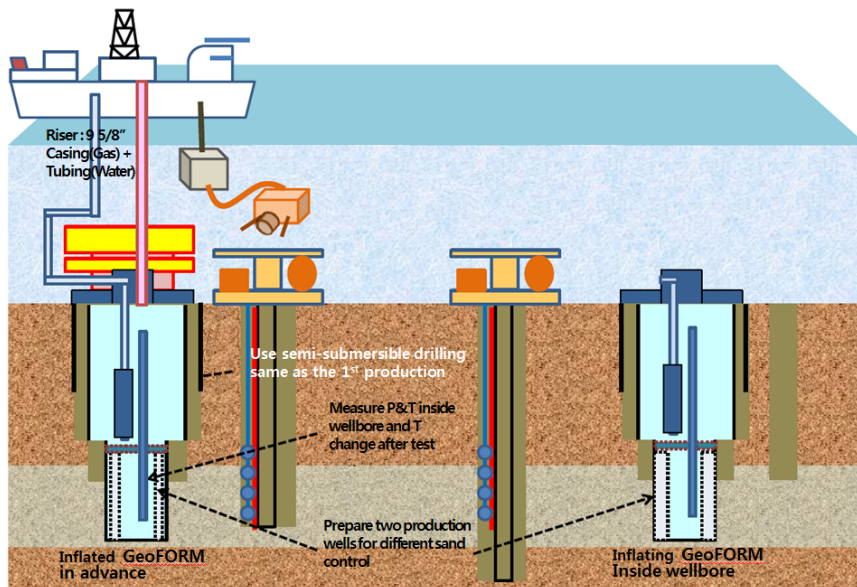


Fig. 7. Schematic diagram of 2nd production test in Nankai Trough (Japan METI, 2017).

2017년 4월 추진하고 있다. 주요 내용은 다음과 같으며 시험생산의 개략적 모습은 Fig. 7 (Japan METI, 2017)에 나와 있다.

- ① 출사대책으로 자갈대신 형상기억폴리머 사용과 Flow Assurance 대책
- ② 2개 생산정을 교대로 사용하여 총 1개월 이상의 생산 시험
- ③ 감압은 13.5 MPa에서 7 MPa, 5 MPa로 감압한 후 최종 3 MPa까지 점진적으로 진행
- ④ 가스와 물의 분리를 용이하게 하는 기기 설치
- ⑤ 워크오버 라이저 사용으로 기상악화시 긴급대피 추진

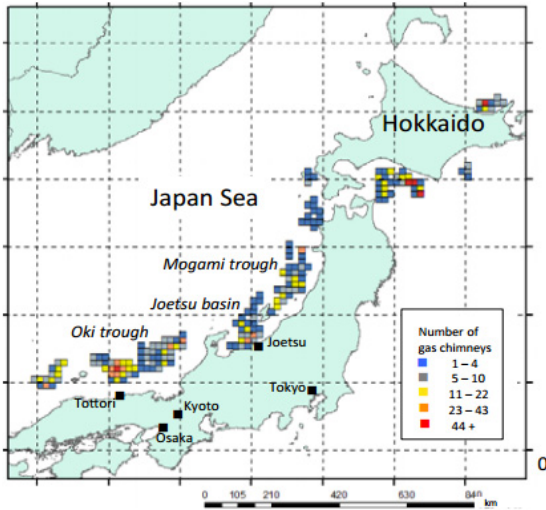


Fig. 8. Location of confirmed chimney gas hydrates during three year program (Matsumoto *et al.*, 2017).

한편 2차 시험생산을 위한 지금까지의 진행상황은 다음과 같다(Table 1).

- ① 2016년 5-6월에 사전 시추 실시; 탐사정 AT1-UD와 모니터링정 2공 AT1-MT2/MT3, 그리고 생산정 2공 AT1-P2/P3 등 총 5개공을 성공적으로 시추(단, 생산정은 가스하이드레이트 저류층 상부까지만 시추)
- ② 검층 자료, 온도, 압력 계측 장치 설치
- ③ 임시 폐정함
- ④ 2016년 8월에 OBS 설치 및 자료 취득

사질형 가스하이드레이트에 대한 연구개발 이외에 침니형 가스하이드레이트에 대한 탐사작업(Fig. 8)을 2013년부터 3년간 수행하였다(Matsumoto *et al.*, 2017). 그 결과 동해와 홋카이도 근해의 방대한 지역에서 침니형 가스하이드레이트를 발견하였고 massive한 하이드레이트 뿐만 아니라 노듈형 하이드레이트(Fig. 9)를 채취하였다.



Fig. 9. Nodular gas hydrate sample recovered from Central Joetsu Basin (Matsumoto *et al.*, 2017).

Table 1. Schedule of 2nd Production test in 2017(Japan METI, 2017)

		March	April	May	June	July
Equipment Inspection	~ late March	→				
Drillship Chartering Equipment Installation	early April		↔			
Installation of Logging & Sand Control Equipment	middle of April		↔			
Installation of Wellbore Test Equipment, Production Test	late April~early June (1 month for production test)		→			
Equipment Dismantling Evacuation	middle of June				↔	

중국

중국은 가스하이드레이트 연구의 출발은 늦었지만, 현재 가장 왕성한 연구 활동을 하고 있는 국가 중 하나이다. 1999년 남중국해에서 BSR을 발견한 직후 국가 프로젝트로 가스하이드레이트 연구를 시작하여 2007년 Shenhu 바다에 대한 1차 심부시추에서 가스하이드레이트 현물을 채취하게 된다.

이후 2013년 2차 GMGS-2, 2015년 3차 GMGS-3, 2016년 4차 GMGS-4까지 4차례에 걸친 남중국해에 대한 심부시추 작업(Fig. 10, Fig. 11)으로 고농도의 가스하이드레이트 저류층을 발견하였다. 특히 4차 GMGS-4 (Lu, 2016)는 2017년에 계획된 시험생산을 위한 가스하이드레이트 저류층을 찾은 것을 목표로 Shenhu Sea와 Xisha Sea에 대한 심부시추로 구성되어 있다(Table 2).

GMGS-4 심부시추의 목표층에 대한 탄성과 도면이 Fig. 12에 나와 있다. 그러나 시추 결과 대부분 사질층이 아닌 실트층 가스하이드레이트로 2017년에 예정된 시험생산을 무

기 연기하였다.

한편 2011년에는 칠레산 영구 동토층에서 천연가스의 추출에 성공하였으며, 중국 육상에 부존하는 가스하이드레이트 양을 약 194억 m³로 추정하여 평가하였다.

현재 가스하이드레이트 연구는 가스하이드레이트 국가 연구소인 칭따오 해양연구소(QIMG), 광저우 해양연구소(GMGS), 광저우 에너지변환 연구소(GIEC)와 대학에서 연구를 전담하고 있다. 이들 국가연구소에 대한 중국 정부의 대규모 투자로 중국의 가스하이드레이트 연구개발은 상당한 수준에 도달하였다.

인도

최초의 인도 가스하이드레이트 프로젝트는 가스하이드레이트의 경제적 개발을 목표로 1997년 인도 석유·천연가스부에 의해 시작되었다. 2006년 1차 심부시추 프로그램을



Fig. 10. Location of 4 GMGS deep sea drilling campaigns (Lu, 2016).

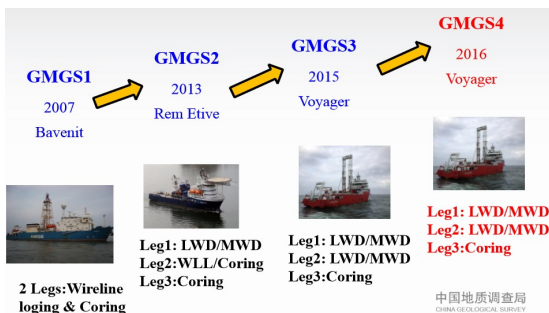


Fig. 11. Overview of GMGS-4 deep sea drilling campaign (Lu, 2016).

Table 2. Coring of GMGS-4 deep sea drilling campaign (Lu, 2016)

Shenhu Sea			
	Deployed (times)	Total length (m)	recovery
Conventional core	50	293	100%
Pressure core	32	75	78%
In situ test	31	/	/
Xisha Sea			
	Deployed (times)	Total length (m)	recovery
Conventional core	36	210	97%
Pressure core	6	11	62%
In situ test	9	/	/

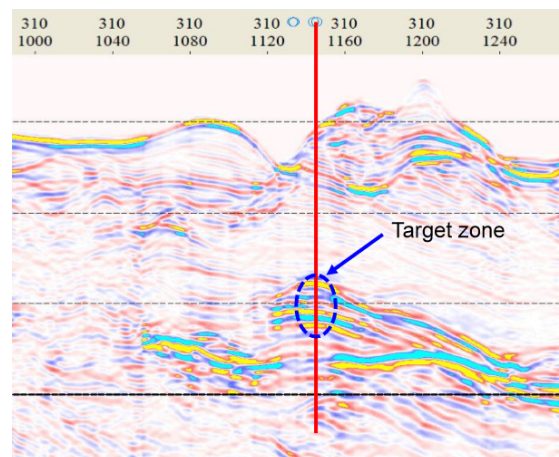


Fig. 12. Target zone of GMGS-4 deep sea drilling at water depth of 1292 m (Lu, 2016).

실시하였으나 시험생산에 적합한 고농도 가스하이드레이트 저류층 발견은 실패하였다. 1차 심부시추 프로그램은 대륙붕/대륙사면의 세립질 퇴적물로 구성된 지역으로 시험생산에는 부적합하였다.

고농도 가스하이드레이트 저류층 발견을 목표로 2차 심부시추 프로그램(NGHP-02)을 2015년 3월 3일부터 8월 28일까지 수행하였다(Kumar *et al.*, 2016). 2차 심부시추 프로그램은 인도 동부 심해지역(Fig. 13 참조)으로 이동하여 사질형 가스하이드레이트 저류층이 발달한 사면지역을 대상으로 총 42개 탐사정을 시추하여 고농도 가스하이드레이트 저류층을 발견하였다. B와 C 지역의 목표층에 대한

탐성과 도면이 Fig. 14와 Fig. 15에 각각 나와 있다. 2차 심부시추 프로그램에는 일본의 지쿠 시추선이 사용되었으며, 일본과 미국의 과학자들이 공동으로 프로젝트에 참여하였다. 인도 정부는 2017년-2018년에 이들 고농도 가스하이드레이트 저류층을 대상으로 시험생산을 계획하고 있다.

NGHP-02 프로그램의 시추결과는 다음과 같다.

- 대상분지: Krishna-Godavari 분지(B, C, E 지역의 조립질 사질층)
- 총 42개 탐사정 시추(수심 1,519~2,815 m, 해저 239~567 m)
- LWD: 25개 Well(검층은 총 6,659 m)
- 압력코어는 15개 시추공에서 156 m 획득
- 일반코어는 총 2,271 m 획득

유럽

유럽은 최근의 유가 하락에 따라 가스하이드레이트 연구개발을 거의 중단한 상태이다. 그러나 2015년 초 COST(유럽과학기술협동기구)의 주도로 MIGRATE (Marine gas hydrate - an indigenous resource of natural gas for Europe) 라는 새로운 가스하이드레이트 프로젝트를 출범시켰다(Lee, 2015). 이 프로젝트의 목적은 유럽내 매장된 가스하이드레이트 자원량을 평가하고 가스하이드레이트 생산기술 및 환경문제 등 생산관련 위험요소를 분석하는 것으로 연구기간은 2015년 3월부터 2019년 3월까지 4년이다.

MIGRATE 프로젝트의 특징은 혁신적인 연구를 우선적으로 유럽각국의 과학자들이 공동으로 연구하도록 네트워크를 형성하고 학회, 워크샵, 기술학교, 단기과제 등을 활용하며 연구자금은 각국이 부담토록 되어 있다.

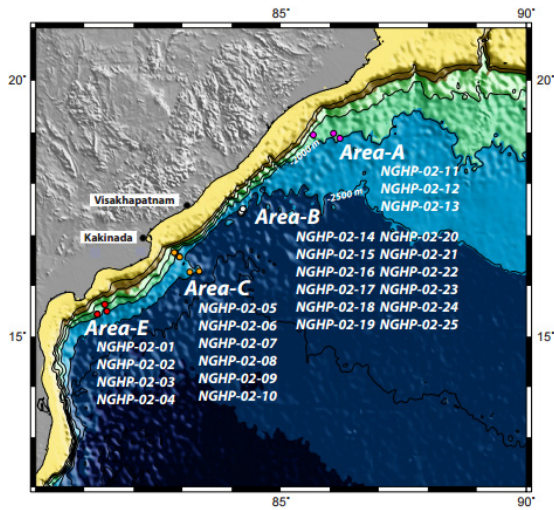


Fig. 13. Location of 2nd deep sea drilling campaign, NGHP-02 (Kumar *et al.*, 2016).

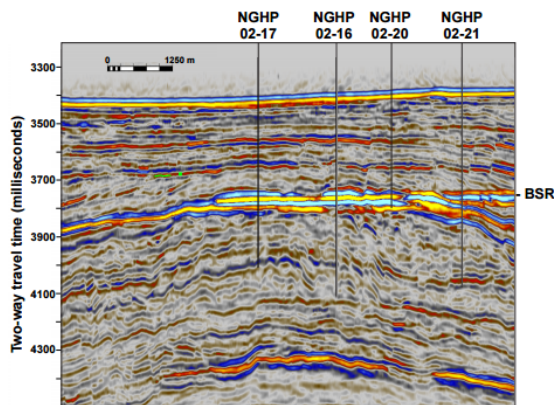


Fig. 14. Large anticlinal structure of target zone in Area-B (Kumar *et al.*, 2016).

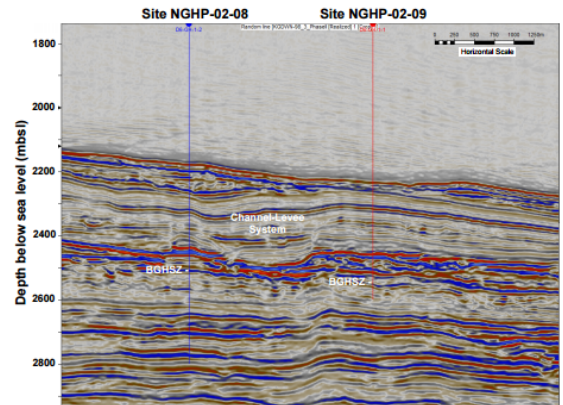


Fig. 15. 3D seismic data of target zone in Area-C (Kumar *et al.*, 2016).

참가국은 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일, 그리스, 아일랜드, 이스라엘, 이탈리아, 말타, 노르웨이, 포르투갈, 스페인, 터키, 영국 등 총 14개국으로 운영위원회는 위원 25명, 예비위원 11명으로 구성되어 있으며 위원장은 독일의 Klaus Wallmann이 부위원장은 노르웨이의 Stefan Bunz가 맡고 있다.

국내 가스하이드레이트 개발 현황

우리나라에서의 가스하이드레이트 연구는 한국지질자원연구원원이 1996년부터 울릉분지 남서부 해역에서 기초 물리탐사를 통해 BSR을 확인하면서 시작되었다. 2000년부터 2004년까지는 한국지질자원연구원, 한국가스공사,

한국석유공사가 공동으로 탄성과 탐사와 시료채취를 통해 가스하이드레이트 부존 가능성과 에너지원으로서의 가스하이드레이트 개발 잠재력을 인식하기 시작하였다. 그 결과 정부는 울릉분지 가스하이드레이트를 개발할 목적으로 10개년 가스하이드레이트 개발 국가 프로젝트를 출범시켰다(Park, 2008).

10개년 프로젝트의 1단계에서는 가스하이드레이트 부존 여부의 탐사, 1차 심부 시추를 통한 가스하이드레이트 부존의 직접적인 확인, 그리고 가스하이드레이트 기초 생산 기반기술을 확보하였으며, 2단계에서는 가스하이드레이트의 부존량을 정밀하게 파악하고, 2차 심해 시추를 실시하여 사질층 내의 가스하이드레이트 부존을 확인하였다. 더불어 가스하이드레이트 시험생산을 실시할 시추 위치를 선정하고 파일리트급 가스하이드레이트 생산모사 실험시스템을 구축하였다. 3단계에서는 2015년에 가스하이드레이트 시험생산을 계획하였으나 2014년 최종 시험생산 결정 과정에서 시험생산량의 목표 미달과 시추공 안정성 확보 미진 등의 문제점으로 인해 시험생산을 연기하였다. 향후 시험생산에 필요한 핵심기술을 확보한 이후 시험생산 재추진 여부를 결정하기로 하였다.

가스하이드레이트 개발 프로젝트를 통해 동해 울릉분지에 가스하이드레이트 부존 특성 및 평가를 위해 2005년부터 물리탐사가 시작되었다. 2005년에는 6,690 L-km의 2차원 탐사를 실시하여 가스하이드레이트의 부존 증거를 도출하고 2006년에는 400 km²의 3차원 탐사를 실시하여 가스하이드레이트 부존이 유망한 지역에 대한 분포도를 작성하였다. 이를 바탕으로 2007년의 1차 심부 시추가 실시되어 가스하이드레이트 실물의 직접 채취에 성공하였다. 시험생산에 대한 시추위치를 선정하기 위해 2008년과 2012년에 300 km²와 504 km²의 3차원 탐사를 각각 실시하였고 2010년 2차 심부시추를 실시하였다.

1차 심부시추와 2차 심부시추의 내용은 다음과 같으며 시추지점은 Fig. 16에 나와 있다.

1차 심부시추 프로그램

- 목적: 울릉분지에서의 가스하이드레이트 현물 채취 및 부존량 평가
- 기간: 2007년 9월 20일 - 11월 17일(59일)
- 시추선: M/V Rem Ative
- LWD: 5개 지점
- 코어링: 3개 지점, 5개 시추공(346.1 m)
- WL/VSP: 1개 지점

2차 심부시추 프로그램(Yi et al., 2010)

- 목적: 울릉분지 가스하이드레이트 부존량 정밀 평가 및

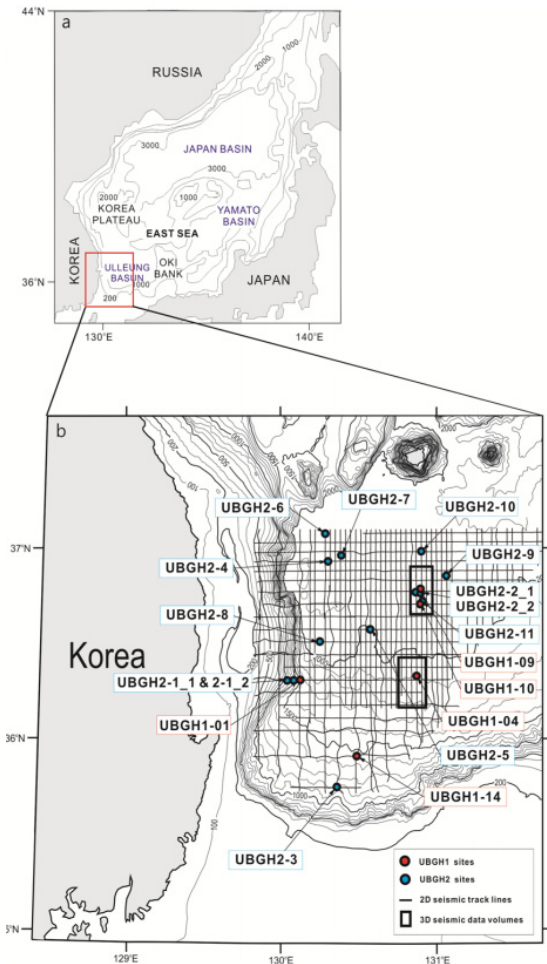


Fig. 16. Deep sea drilling location of UBGH-1 and UBGH-2 (Ryu et al., 2014).

- 사질형 시험생산 지점 선정
- 기간: 2010년 7월 9일 - 9월 30일(84일)
- 시추선: D/V Fugro Synergy
- LWD/MWD: 13개 지점(총 3,730 m)
- 코아링: 10개 지점, 19개 시추공(총 2,426 m)
- WL/VSP: 2개 지점(413 m)

1차 시추공 5개를 분석한 결과 밀도검층을 이용한 공극률은 50~90%, 전기비저항 검층을 이용한 포화율은 20% 내외로 나타났다(Seo *et al.*, 2010). 한편 2차 시추지역 중 사질층 분포가 많은 6개 시추공(UBGH2-2-1, 2-2-2, 2-6, 2-9, 2-10, 2-11)을 분석한 결과 공극률은 63.96~71.35%, 포화율은 3.35~42.23%로 나타남을 확인하였다(Shin *et al.*, 2012). 공극률은 상당히 양호한 반면 가스하이드레이트 포화율은 낮은 것으로 나타났다.

2차에 걸친 심부시추 프로그램의 주요 목적은 가스하이드레이트 부존량 정밀 평가와 시험생산 시추지점 선정이다. 이를 위해 BSR 분포지역을 탄성과 상(facies) 분석에 의해 5개 구역으로 나누고 몬테칼로 시뮬레이션을 통한 확률 분석으로 각각의 특성인자를 5개 구역에 부여하여 부존량을 계산하였다(Fig. 17). 계산 결과 약 6.2 억톤의 사질형 가스하이드레이트가 울릉분지에 부존되어 있는 것으로 추정되었다. 그러나 이 수치는 원시 부존량으로 계산된 것이며 생산 가능한 양이 아니다. 실제 에너지원으로 생산 가능한 양은 향후 생산기술에 따라 정해질 것이다.

2차 시추지점에 대한 지질모델, 검층과 코어 자료, 3차원 탄성과 분석 자료, 중합전 역산(pre-stack inversion)자료 등을 종합하여 시험생산 위치를 UBGH2-6로 결정하고 시험 생산 준비를 추진하였다.

2015년 5월로 예정된 가스하이드레이트 시험생산 준비는 2013년 초부터 시작되었다. 시험생산 준비를 위해 시험

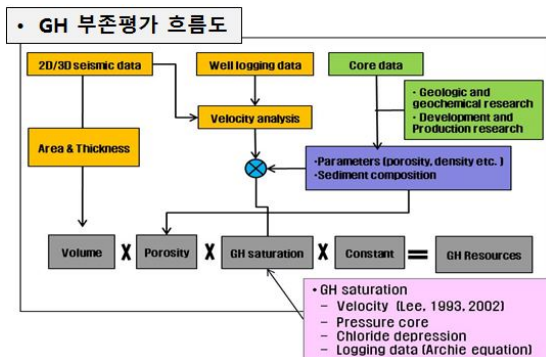


Fig. 17. Flow chart of resource assessment of gas hydrates (KIGAM, 2011).

생산 시추위치 선정이후 지질/시추/생산 프로그램 작성, 시험생산 추이 분석, 안정성 모사를 통해 시험생산 기본설계, 시추공 기본설계가 실시되었다. 이를 토대로 시험생산 장비제작, 시추선 용선계약, 시추, 환경영향 평가 순으로 준비를 진행하였다.

시험생산 추이 예측을 위해 미국 로렌스버클리 국립연구소에서 개발한 TOUGH+HYDRATE 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용된 기본 공정 조건은 공저압 9 MPa와 감압률 0.5 MPa/hr로 초기 저류층 압력의 약 60%인 일본의 해양 가스하이드레이트 시험생산과 동일한 감압률을 적용한 것이다. 시뮬레이션 결과 일본 난카이 트러프 시험생산량과 비교하여 1/100 이하로 매우 낮았다.

생산공정 기본설계에서는 시추공 안정성 분석, 지반 안정성 분석, 사질생산 조절 등을 준비하였으나 시험생산 개시 후 생산정의 생산구간 부근에 응력이 집중되어 공저압 9 MPa 일 때 생산정의 안정성을 장기간 유지하기 힘들다는 결과가 나왔다. 일본의 경우 2013년 3월에 난카이 트러프에서 공저압 4.5~5 MPa 이상 감압을 시도하다 생산정이 파괴되고 모래 유입이 발생하여 시험생산이 중단되었다. 사질생산 조절의 경우 기존의 상용 사질 생산 조절 시스템으로 조절이 가능하나 생산정 부근으로의 퇴적물 유입으로 인한 생산 효율 저하가 우려되었다. 또한 생산 후 가스하이드레이트의 재형성으로 인한 가스하이드레이트 유동 확보가 쉽지 않을 것으로 예상되었다.

환경영향 평가에서는 시험생산에 따른 온실 가스인 메탄의 해양과 대기로의 누출, 가스하이드레이트 해리에 의한 해저면 침하 또는 변형, 시추 작업과 시험생산 작업과 관련된 생산수와 드릴 컷팅의 이동 확산에 대한 관측 및 분석, 검증 및 평가, 저감 대책 제시 등을 수행하였다. 또한 시험생산 이전의 기준 환경 조사와 환경 시뮬레이션에 의한 검증, 시험생산 기간 동안의 장기간 환경 모니터링, 시험생산 이후의 기준 환경 조사 등을 종합하여 실시계획을 작성하고 해저면 관측 시스템을 개발하였다.

시험생산을 설계하는 과정에서 낮은 생산량과 시추공 안정성 예측의 불확실성, 사질생산 조절과 유동확보 기법의 불확실성 등의 문제가 대두되었고 이를 해결하기 위해 시

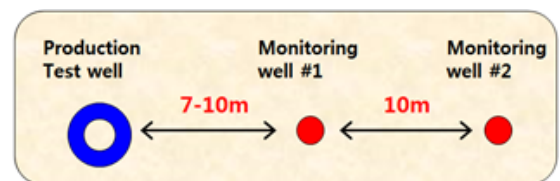


Fig. 18. Schematic diagram of well locations for test production.

협생산을 연기하게 되었다. 상기 과정을 통해 설계된 시험 생산 공정 개요는 다음과 같으며, 기본 설계도는 Fig. 18에 나와 있다.

시험생산 개요

- 시추지점: UBGH2-6(수심: 2,156 m, 가스하이드레이트 저류층: 해저면 140-154 m)
- 시험기간: 약 73일(test: 14일),
- 목표: 최소 6시간 이상 메탄 지속 생산
- 생산공수: 3공(test 1공, 관측공 2공)
- 생산방법: 감압법(23 MPa에서 9 MPa로 감압, 감압속도: 0.5 MPa/hr)

가스하이드레이트 개발 전망

가스하이드레이트가 단지 동토층이나 해저에 묻혀 있다고 해서 에너지원이 되는 것이 아니다. 묻혀 있는 가스하이드레이트를 안전하고 경제성 있게 생산하여 사용할 수 있어야 비로소 에너지원으로서의 가치가 있는 것이다. Fig. 2에서 언급한 바와 같이 약 300조 입방 미터의 이르는 원시부존량을 현 기술로 생산 가능한 양으로 대체하여야 한다.

일본과 미국의 경우 생산기술을 상당한 수준까지 확보하였으나 아직 안전하고 경제성 있는 수준까지는 도달하지 못하였다. 앞으로 지속될 셰일가스 붐이 끝나기 전에 환경에 영향을 미치지 않는 안전한 생산기술을 개발해야 하며 생산 후 수송 및 처리 시설 등 인프라가 확보되어야 한다.

과거 육상과 해양에서 시험생산을 추진하였으나 모두 단기 생산에 머물고 있어 향후 상업적 생산을 위해서는 장기 시험생산이 필요한 시점이다. 현재 진행되고 있는 일본 난카이 트러프에서의 2차 시험생산 기간이 1개월 이상 계획하고 있어 그 결과에 따라 상업적 생산의 가능 여부가 판명될 것으로 예상된다.

최근 기후변화가 세계적 관심사로 부상하고 있다. 가스하이드레이트의 개발이 기후변화에 미치는 영향도 앞으로의 가스하이드레이트 연구개발에 무시하지 못할 변수로 작용할 것이다. 가스하이드레이트가 석탄이나 원유에 비해 이산화탄소를 적게 배출하는 청정에너지라고는 하지만 이산화탄소를 발생시키는 화석연료임에는 틀림없다. 많은 국가에서 화석연료 사용을 줄이고 신재생 에너지 사용을 장려하는 정책은 화석연료 소비량을 감소시킬 것이다. 화석연료의 개발은 유가와 밀접하게 연계되어 있어 저유가의 지속은 전통 화석연료의 개발을 지연시키고, 셰일가스 혁명으로 인해 가스하이드레이트를 비롯한 타 비전통 화석연료의 개발 지연은 2030년 이후까지 계속될 것으로 전망된

다. 앞으로 가스하이드레이트에 대한 연구개발은 유가에 가장 민감하게 반응하며 경기회복으로 인한 유가 급등시 가스하이드레이트 연구개발이 다시 활력을 되찾을 것으로 예상된다.

결론

2000년대 초부터 시작된 유가 급등으로 촉발된 비전통 자원에 대한 연구개발은 우리나라가 가스하이드레이트의 상업적 생산을 위해 국가 프로젝트를 수행하게 된 계기가 되었다. 해외에서도 2020년 상업적 생산을 목표로 대규모 예산과 인력을 투입하여 적극적인 연구개발에 매진하였다. 특히, 미국과 캐나다, 일본은 육상과 해양에서 시험생산을 추진하여 생산기술에 대한 상당한 성과를 얻게 되었다. 그러나 2015년부터 하락하기 시작한 유가와 셰일가스 붐으로 인해 가스하이드레이트 연구개발은 후순위로 밀려나게 되었다.

가스하이드레이트 시험생산을 연기한 이유는 동해 울릉분지에 부존되어 있는 가스하이드레이트가 일본의 부존형태와는 다르게 광범위하게 산재되어 있어 개발에 불리하며, 생산 추이 시뮬레이션 결과 시추선상에서 가스 생산을 확인할 정도의 생산량을 확보하지 못할 것으로 예측되며, 시추공 안정성과 천연가스 유동, 최적 해리기술 등 시험생산에 필요한 현장 작업 기술을 보유하지 못한 결과이다. 이와 더불어 셰일가스를 비롯한 비전통 에너지자원의 개발로 대내외 환경 변화도 우리에게 불리하게 작용하고 있는 실정이다.

우리나라는 동해 울릉분지의 가스하이드레이트 개발이라는 목표로 지난 10여년의 시간과 예산을 투자해 왔다. 외국의 경우 20-30년 동안 수행하여 얻은 성과를 단기간에 달성하기 위해 최선을 다하였다. 비록 시험생산은 연기하였으나 그동안 확보된 기술과 정보를 사장시키지 않기 위해서는 당분간 가스하이드레이트 개발을 위한 핵심기술의 R&D에 전력한 후 여건이 조성되면 시험생산을 재추진하는 것이 바람직하다. 외국의 경우 상업적 생산 시기를 2020년대 이후로 연기하기 시작하였으며 2030년 이전에는 가스하이드레이트의 상업적 생산이 힘들 것으로 예상된다. 따라서 우리는 2030년까지 시험생산을 위한 최적 생산기법을 확보하고 지반 안정성과 시추공 안정성 등 생산에 필요한 여러 가지 핵심기술을 확보하는데 노력을 집중시켜야 한다. 특히 기존의 석유가스 생산기법이 아닌 새로운 획기적인 가스하이드레이트 생산기술을 개발하여 선진국보다 한발 앞서 나가는 전략으로 향후 도래할 가스하이드레이트 시대를 대비해야 한다.

References

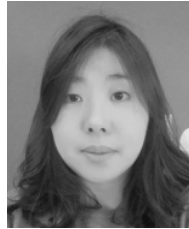
- Beaudoin, Y.C., Boswell, R., Dallimore, S.R. and Walte, W. (eds.), 2014, *Frozen heat: A UNEP global outlook on methane gas hydrates*, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal.
- Boswell, R., 2016, "US national gas hydrate program: Overview," *Korea-US Joint Workshop on Gas Hydrates*, Denver, Colorado, April 5-6.
- Collett, T.S., 1996, "Geological assessment of natural gas hydrate resources in the onshore and offshore regions of the United States," *Proceeding of 2nd International Conference on Natural Gas hydrates*, Toulouse, France, June 2-6, pp. 499-506.
- Collett, T.S., 2016, "USGS gas hydrates project summary," *Korea-US Joint Workshop on Gas Hydrates*, Denver, Colorado, April 5-6.
- Dickens, G.R., Castillo, M.M. and Walker, J.C.G., 1997, "A blast of gas in the latest paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of ocean methane hydrate," *Geology* Vol. 25, No. 3, pp. 259-262.
- Gudmundsson, J. and Borrenhaug, A., 1996, "Frozen hydrate for transport of natural gas," *Proceeding of 2nd International Conference on Natural Gas hydrates*, Toulouse, France, June 2-6, pp. 415-422.
- Japan Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2017.03.08., http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004108/032_haifu.html.
- Kennett, J.P., Cannariato, K.G., Hendy, I.L. and Behl, R.J., 2003, *Methane hydrates in quaternary climate change: The clathrate gun hypothesis*, American Geophysical Union, USA.
- Kim, D. and Lee, J., 2010, "Gas Hydrate R&D International Trends and Patent Analysis," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 47, No. 4, pp. 464-474.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 2011, *Studies on Gephysical Exploration of Gas Hydrate*, Ministry of Knowledge Economy, GP2010-003-2011(2).
- Kumar, P., Collett, T.S., Vishwanath, K., Shukla, K.M., Nagalingam, J., Lall, M.V., Yamada, Y., Schultheiss, P. and Holland, M., 2016, "Gas hydrate-bearing sand reservoir systems in the offshore of India: results of the India national gas hydrate program expedition 02," *Fire in the Ice*, Vol. 16, Issue 1, pp. 1-8.
- Kvenvolden, K.A., 1993, "Gas hydrates-geological perspective and global change," *Reviews of Geophysics*, Vol. 31, Issue 2, pp. 173-187.
- Lee, J.H., 2009, "The Development Status and Prospect for the Production Technology of Gas Hydrate," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 46, No. 3, pp. 387-401.
- Lee, J.H., Park, S.S., Joo, W.S., Shin, C.H. and Lee, Y.S., 2009, "Potentialities and Values of Gas Hydrate as an Energy Resource," *J. of the Geological Society of Korea*, Vol. 46, No. 4, pp. 490-497.
- Lee, S.R., 2015, "MIGRATE: A marine gas hydrate project newly implemented in Europe," *J. of the Geological Society of Korea*. Vol. 51, No. 5, pp. 525-536.
- Lu, J., 2016, "New proceedings on gas hydrate investigation and Reservoir Evaluation in the North Slope of South China Sea," *Proceeding of 1st Korea-China Gas Hydrate Joint Workshop*, Jeju Island, Korea, October 20-21.
- Makogon, Y.F., 1965, "Hydrate formation in the gas-bearing layer in permafrost conditions, Gazovaya Promyshlennost (Ministry of Gas Industry)," No. 5, pp. 14-15.
- Matsumoto, R., Tanahashi, M., Kakuwa, Y., Snyder, G., Ohkawa, S., Tomaru, H., and Morita, S., 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, pp. 1-6.
- Moniz, E.J., 2016, *Secretary of Energy Advisory Board report of Task Force on Methane Hydrates*, U.S. Department of Energy.
- Park, K.P., 2008, "Gas Hydrate Exploration: Overview and Status," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 590-600.
- Ryu, B., Yoo, D.G., Kang, N., Yi, B.Y., Bahk, J.J. and Lee, J.Y., 2014, "In-Place gas hydrate resources in the Ulleung Basin, East Sea of Korea," *Fire in the Ice*, Vol. 14, Issue 1, pp. 9-10.
- Seo, K.W., Lim, J.S. and Lee, J.H., 2010, "Estimation of Petrophysical Properties in Gas Hydrate Bearing Sediments using the 1st Well Data in Ulleung Basin, Offshore Korea," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 47, No. 1, pp. 70-80.
- Shin, H.J., Lim, J.S. and Kim, S.J., 2012, "Estimation of Porosity and Saturation in Gas Hydrate Bearing Sediments using Well Logs and Core Analysis Data of the 2nd Wells in Ulleung Basin, East Sea, Korea," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 49, No. 2, pp. 175-185.
- Sloan, E.D., 2003, "Fundamental principles and applications of natural gas hydrates," *Nature*, Vol. 426, pp. 353-359.
- Yi, J.S., Hwang, C.U., Kim, J.W. and Jang, G.H., 2010, "Technical Review of the Gas Hydrate Operation Offshore Korea," *J. of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 47, No. 6, pp. 948-955.



허 대 기

1978년 서울대학교 자원공학과 학사
1985년 Univ. of Southern California
박사

현재 가스하이드레이트 개발사업단 단장
(E-mail; huh.kigam@gmail.com)



이 주 용

1997년 연세대학교 지질학과 학사
1999년 연세대학교 지구시스템과학과 이
학석사
2003년 Colorado School of Mines,
Geology and Geological Eng., 공학
석사
2007년 Georgia Institute of Technology,
Geosystem Eng., 공학박사

현재 한국지질자원연구원 석유해저연구본부 책임연구원
(E-mail; jyl@kigam.re.kr)