

가스 하이드레이트 탐사 및 기술개발 현황

이정환, 백영순, 이영철, 조병학, 박기환*

한국가스공사 연구개발원, 본사*

Exploration of Gas Hydrate and the Present State in Development of Technology

J. H. Lee, Y. S. Baek, Y. C. Lee, B. H. Cho, K. H. Park*

Korea Gas Corporation-R&D Division, Headquarters*

1. 서론

최근 국내 에너지 수요는 산업발전과 더불어 계속 증가하고 있는 추세이고 세계 에너지자원의 수급동향은 불안정한 상태를 유지하고 있다. 따라서 대부분의 석유 및 천연가스 수요를 수입에 의존하는 국내에서는 1979년 이후 석유 및 천연가스 개발을 시작하여 최근까지 많은 인력과 자금이 투자되고 있다.

석유나 천연가스는 일반적으로 지하의 다공질 암반 저류층에 액체나 기체의 형태로 매장되어 있지만, 최근에는 심해저 퇴적층이나 동토지대에서 물과 결합하여 얼음과 유사한 결정체인 가스 하이드레이트 형태로 매장되어 있음이 제시되었으며 탐사나 시추를 통해 확인된 바 있다 [1]. 하이드레이트의 매장량은 미국의 USGS 보고서에서 제시된 바와 같이 약 10,000 기가톤에 달하는 것으로 추정되는데, 이는 메탄 가체 매장량의 100배 정도이며, 석유 및 석탄을 포함하는 전체 화석연료 매장량의 2배에 달하는 양이다 [2].

이러한 이유로 가스 하이드레이트는 미래의 신에너지자원으로 평가받고 있으며 미국, 일본을 비롯한 여러 선진국에서는 가스 하이드레이트의 자원화에 관한 활발한 연구가 진행되고 있다. 미국의 경우, 1982년부터 본격적으로 하이드레이트에 관한 기초연구에 착수하였으며, 1998년 과학기술재단에서 첫째 500만 불에서 2000년부터는 5년간 4,750만 불의 연구비를 투자하여 2015년에는 상업적 개발을 목표로 연구에 착수하였다. 일본은 1995년 4월부터 통산성의 주도하에 일본석유공사, 일본지질조사소와 10개의 민간기업이 컨소시엄을 구성하여 5개년 프로젝트를 수행 중에 있으며, 연구비는 약 5,000만 불을 투자하여 2002년에는 캐나다 맥켄지 델타에서 시험생산을 수행한 바 있다. 한편 노르웨이는 1994년 북해의 천연가스 생산과 수송에서 하이드레이트 형성에 대한 연구 및 효율적인 억제제에 대한 연구를 수행하였고, 1996년 노르웨이 과학기술대학에서 하이드레이트

를 이용한 천연가스 수송 및 저장에 대한 연구를 지금까지 수행하고 있지만 아직 실험실 규모의 수준에 머물 실정이다 [3].

국내에서는 1995년부터 국책연구소를 비롯한 일부 대학에서 하이드레이트에 관한 연구가 시작되어 기초연구를 수행 한 바 있으며, 최근에는 정부의 지원하에 한국가스공사 및 한국지질자원연구원이 공동으로 국내 동해지역의 가스 하이드레이트 생성 잠재력과 부존 유망 지역을 규명하기 위한 5개년 (2000~2004) 탐사 및 기초연구개발 사업을 진행하고 있다.

본 연구에서는 다양한 분야의 연구개발이 요구되는 가스 하이드레이트의 관련기술에 있어 국내에서 진행되고 있는 현재까지의 탐사현황 및 결과, 활용기술 개발에 관한 현황을 소개하고 향후 연구, 기술개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 가스 하이드레이트 기술개발 사업 개요

가스 하이드레이트 기술개발 사업은 한국가스공사의 신에너지 선점이란 중·장기 기술개발 목표 아래에 산업자원부 에너지관리공단 사업으로 1단계 2000~2004년까지 “동해안 가스 하이드레이트 광역물리탐사 및 관련 기초연구 개발”를 수행하고 있는 상태이다. 한국가스공사에서 15억을 투자하고 정부 지원금 11억 (총26억)으로 한국지질자원연구원 및 학계에서 기술개발이 이루지고 있으며, 특히 탐사 분야는 동해의 울릉 분지를 5개 구역으로 구분하여 광역탐사를 실시하여 BSR (Bottom Simulating Reflector) 분포도를 작성하고 부존 유망지역을 선정한다. 이를 위해 동해안 울릉분지 서부해역을 대상으로 현재까지 25,125 km² 면적에 대해 탄성과 탐사, 지질·지화학 탐사, 정밀해저지형 조사 및 중력 탐사를 수행하였다. 또한 가스 하이드레이트 생성 조건에 대한 최적 구조 및 평형조건을 검토하고, 결정 성장 및 해리에 의한 속도론적 (kinetic) 모델을 수립하는 것 외에 활용 기술개발 분야로 가스 하이드레이트의 제조를 통해 각 조건에 따른 생성물의 변화를 분석하고, 파이프라인내 하이드레이트 형성에 의해 유동저해 및 막힘 현상을 유발하는 플러깅 (plugging) 현상을 규명하고 이를 방지하는 연구를 수행하고 있다 [4].

3. 동해안 가스 하이드레이트 탐사

동해안 국내 관할해역에서의 가스 하이드레이트 부존 가능성과 유망지역 규명을 위하여 2000년부터 2002년까지 동해의 서부해역을 중심으로 탐사를 수행하였다. 탐사해역인 울릉분지는 동아시아 대륙과 일본 열도에 의해 둘러싸인 반폐쇄성 주변해인 동해의 남서부에 위치하고 있다. 북쪽으로는 한국대지, 서쪽으로는 오키뱅크에 의하여 일본분지와 야마또분지와 구별되고 서쪽으로는 한반도의 경사가 가파른 대륙사면과 접하고 남쪽으로는 일본열도와 완만한 경사로 접하고 있는 수심이 깊고 (2,000 m ~ 2,500 m) 불 형태를 갖는 퇴적분지이다.

탐사는 한국지질자원연구원 소유의 탐해2호를 이용하여 수행하였으며, 탄성과

탐사, 정밀해저지형 탐사 및 중력 탐사 등의 지구물리 탐사자료를 취득하고 이들 자료에 대한 전산처리를 수행하였다. 이밖에 탐사지역에서의 가스 하이드레이트 안정영역을 분석하기 위해 XBT (Expandable Bathythermograph)를 이용하여 수온구배를 측정하였고, 가스 하이드레이트 생성 잠재력을 규명하기 위해 28지점 (수심: 846 m ~ 2,174 m)에서 30개의 피스톤 코어를 채취하였다. 이중 선택된 30개의 피스톤 코어로부터 총 1,221개 시료를 샘플링하여 함수율, 입도 등의 지질학적 분석과 함께 퇴적물에 포함되어있는 총 유기탄소 (TOC: Total Organic Carbon), 총 탄소, 질소, 수소, 황의 함량에 대한 분석을 수행하였다. 모든 코어로부터 채취한 지화학 캔 (can) 시료를 이용하여 잔류 탄화수소 가스의 성분과 함량에 대한 분석을 수행하였으며, 퇴적물 간극수의 염소이온 농도를 측정하였다.

4. 탐사 결과

동해의 서부를 접하는 탐사해역의 지형은 동쪽에 발달한 해저분지와 서쪽에 발달한 대륙사면으로 크게 나눌 수 있다. 한반도와 인접한 대륙사면은 대부분 해역에서 가파른 경사를 보인 반면, 북쪽 해역에서는 상대적으로 완만한 경사를 보인다. 탐사해역의 동쪽은 대부분 울릉분지의 영향으로 수심 2000 m 내외의 평탄하고 넓은 지형이 크게 발달되어 있는 반면, 울릉도의 북부지역에서 상대적으로 불규칙한 지형이 나타난다. 탐사해역에 분포된 퇴적물은 주로 이질 퇴적물로 주로 이루어져 있다. 엽리이트 퇴적상, 약엽리이트 퇴적상, 생물교란이트 퇴적상, 균질이트 퇴적상, 테프라층 등이 발달되어 있다. 퇴적물의 입도는 극세립 실트 및 이토에 해당된다. 퇴적물에 포함된 총 유기탄소의 함량은 대부분 0.5 % 이상으로 가스 하이드레이트 생성에 적합한 것으로 나타났다. 또한 2000년도 채취된 퇴적물의 경우 32개의 시료 중 19개 시료에서 10 ml/liter wet sediment 이상의 잔류 탄화수소 가스의 양을 나타내었으며, 동위원소 분석결과 가스의 기원은 생물기원 가스인 것으로 밝혀졌다. 특히 2000년 채취한 7번과 11번 코어시료에서는 가스의 삼출 (seepage)과 관련된 것으로 판단되는 수평균열이 발견되었다. 반면에 2001년도와 2002년도 시료에서는 가스의 양이 대부분 10 ml/liter wet sediment 이하로 나타났다. 이는 분석된 퇴적물에 포함된 유기물의 진화단계가 메탄 생성단계와 황산염 환원단계의 중간단계이기 때문인 것으로 사료된다.

탐사해역에 분포하는 해저 퇴적층은 탄성과 자료상의 음향특성에 의하여 서로 다른 두 퇴적단위로 구분된다. 퇴적단위 I은 평행층의 음향상이 특징적이며, 강한 연속성을 갖는 내부 반사면을 보여준다. Fig. 1은 판상의 외부형태를 갖는 퇴적단위 I에서의 폭 마크 (pock mark)와 가스 컬럼 (gas column)을 나타내며, Fig.2는 머드 마운드 (mud mound)와 같은 음향특성을 나타낸다. 이러한 특성은 해저 퇴적층내에서 가스 하이드레이트가 존재할 수 있는 조건중의 하나로 분류되는 특징들이다. 또한 퇴적분지 I은 부분적으로 하부 퇴적층의 음향특성을 가리는 음향 혼탁층 (acoustic turbidite)이 존재하기도 하는데 이는 퇴적층 내에 가스가 존재함에 따라 음파 에너지를 흡수·산란시키는 결과로 나타나는 현상중

의 하나이다. 상기 특성을 갖는 퇴적단위 I은 주로 울릉분지 내에 분포하며 쇄설류 퇴적물(turbidite)인 것으로 해석된다. 퇴적단위 II는 내부층리를 갖지 않는 캐오틱 (chaotic) 음향상이 특징적이며, 주로 다양한 진폭을 갖는 허모키 (hummocky) 혹은 캐오틱 음향상이 나타난다. 렌즈형의 외부 형태를 가지는 퇴적단위 II는 대부분 대륙사면에 분포되어 있으며, 주로 쇄설류 (debris flow)에 의하여 구성된 것으로 해석된다.

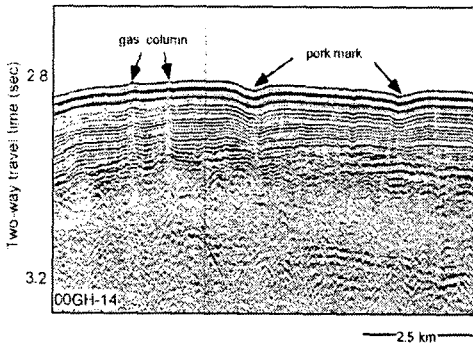


Fig. 1 Seismic profiles showing gas column and pork mark

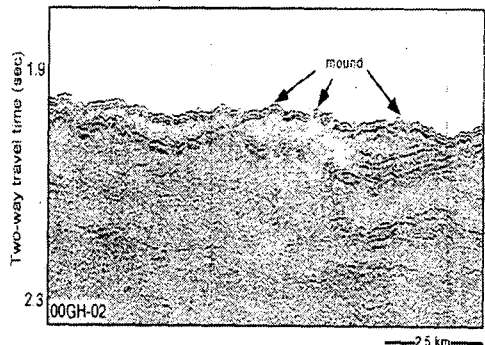


Fig. 2 Seismic profiles showing mud mound

2000년도 탐사해역의 경우 연구해역 전체에서 BSR의 요구조건인 해저면과 평행하고 극성역전 현상을 보이는 큰 진폭의 반사면 (high amplitude reflector with polarity reversal)을 추적하기가 가장 용이한 지역이며, 특히 이 반사면은 남동부에서 잘 나타난다. Fig. 3과 Fig. 4는 이러한 반사면과 극성역전을 나타내는 해석도면의 한 예를 나타내며, 이 극성역전 현상을 보이는 큰 진폭의 반사면은 퇴적층리의 발달이 미약한 지역에서도 잘 나타날 뿐만 아니라, 특히 이토류 (mud flow)와 같은 쇄설류 퇴적물이 발달된 지역에서 가스의 삼출에 기인한 것으로 사료되는 불규칙한 해저면의 하부 구간에서도 뚜렷하게 확인된다. 2001년도 탐사해역은 울릉분지 북부해역으로서 퇴적층은 대부분 저탁류 퇴적물로 구성되어 있다. 이 해역의 천부 퇴적층에 발달되어 있는 반사층의 층리는 해저면과 평행하게 발달되고 있어 BSR로 추정되는 이상 반사면의 확인이 매우 어려운 지역이다. 그러나 탐사해역의 남부에서 극성역전 현상을 보이는 큰 진폭의 반사면이 약 6 km 정도 연장되어 나타나며, 이 반사면은 배사구조의 상부에 위치하여 가스-물-경계면 (gas-water-contact)과 같은 특징을 보여주고 있다. 또한 탐사해역의 남부에서는 가스의 삼출에 의한 폭 마크와 가스 킴프가 관찰된다. 2002년도 탐사지역은 울릉도 서북쪽 지역으로서 한국대지 (Korea Plateau)에 해당하는 지역이다. 이 지역은 전체적으로 기복이 심한 기반암이 해저면 가까이 발달하고 있기 때문에 퇴적층의 발달이 빈약하여 충분한 가스가 생성되기 어려운 곳으로 판단된다.

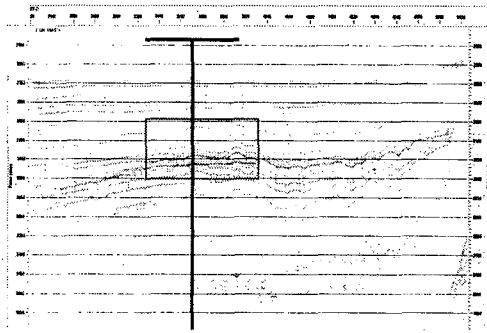


Fig. 3 Stack section showing the high amplitude reflector

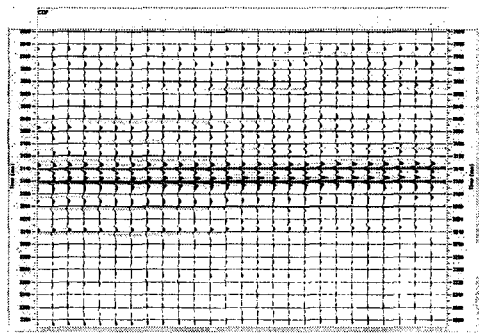


Fig. 4 Polarity reverse of fig. 3

5. 기술개발 현황

국내에서는 가스 하이드레이트에 관한 기초연구가 1996년부터 시작되었으나 가스 하이드레이트의 체계적인 연구는 정부의 지원하에 2000년부터 시작된 5개년 연구사업으로부터 시작된 것으로 볼 수 있다. 이 연구사업은 산업자원부 “국가 지질조사 및 자원탐사 연구사업”의 일환으로 한국지질자원연구원이 탐사분야 연구를 수행하고 있으며 한국가스공사가 연구비 지원과 함께 활용기술의 개발을 위한 연구를 공동으로 수행하고 있다.

가스 하이드레이트의 활용측면에 대한 기술로 현재 한국가스공사 연구개발원에서는 가스저장 및 수송에 관한 실험과 생산 및 수송 파이프라인내 하이드레이트 플러깅현상 규명 및 방지에 관한 연구를 수행하고 있다. 가스 하이드레이트를 자켓 형태 (jacket type)의 교반 반응기 내에서 인공적으로 제조하고, 제조된 하이드레이트의 저장능력을 살펴봄으로써, 하이드레이트에 의한 가스의 저장 및 수송 가능성을 실험하고 있다. 반응기내의 제조조건들, 온도, 압력, 및 교반속도 등과 계면활성제와 화학약품을 포함한 여러 첨가제들에 의하여 하이드레이트의 형성시 성장속도 및 유도지체시간에 대한 실험을 수행하고 분석하였다. 또한 view cell에서 여러 첨가제들과 제조조건들의 변화에 의한 가스 하이드레이트의 성장 즉 핵의 생성과 하이드레이트의 구조형성에 대해 관찰하고 있다.

한편 파이프라인내 하이드레이트 형성에 의한 플러깅 현상을 규명하고 이의 방지기술 개발을 위하여 소규모 환상형 파이프라인 실험장치를 개발하고 다양한 조건에서의 실험을 수행하고 있다. 유동이 진행되고 있는 파이프라인의 동적환경하에서 하이드레이트의 형성 및 억제 현상이 관찰되었고, 이를 통해 파이프라인에서의 플러깅 현상 방지조건 및 다양한 억제제 주입을 통한 플러깅 제어에 관한 기술이 개발되었다.

이러한 활용기술의 개발은 재래형 천연가스의 경제적이고 안정적인 수송과 저장을 위한 기반기술을 확보에 기여할 뿐만 아니라 PNG (Pipelined Natural Gas) 및 천연가스 생산라인에서 형성되는 가스 하이드레이트 플러깅 현상을 방

지하기 위한 기준 및 방법을 선정하는데 활용될 수 있다. 특히 파이프라인내에서 형성되는 가스 하이드레이트 플러킹에 대한 연구는 6-1 광구 동해 가스전 및 시베리아 가스전으로부터 국내까지 연결되는 파이프라인의 운영을 위해 매우 중요한 기술이다.

6. 결론 및 제언

현재까지의 결과로 볼 때, 탄성과 탐사자료에서 가스 및 가스 하이드레이트 부존 가능성을 간접적으로 시사하는 여러 반사면이 확인되었고, 지화학 탐사결과에서도 총 유기탄소 함량이 높고 가스 팽창에 의해 형성된 것으로 판단되는 틈이 확인됨으로써 가스 하이드레이트 형성 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 가스 하이드레이트 부존에 대한 보다 확실한 결론을 얻기 위해 중간 탐사 결과에 대해 제3자 전문기관 검증은 마친 후 나머지 지역을 계속 탐사하여 가장 매장량이 풍부할 것으로 판단되는 지역을 선정 후 향후 정밀탐사를 진행해 나가야 할 것이다.

가스 하이드레이트는 풍부한 매장량과 환경친화적인 신에너지자원으로 평가 받고 있으나 기술을 개발하여 활용하기까지는 많은 연구투자비와 개발기간이 요구되고 있다. 현재까지의 탐사 및 기술개발 결과는 긍정적인 결과로 판단되나 아직까지는 초보단계이며 관련 연구인력도 부족한 상태로 그 기술개발은 중장기적인 계획을 세워 추진해야 할 것이다. 따라서 향후 개발사업은 범국가적인 차원에서 추진하는 것이 필요하며 이를 위한 첫 단계로 정부주도의 산·학·연 컨소시엄 구성 등이 요구된다. 이를 통해 가스 하이드레이트 기술개발사업을 지속적으로 발전시켜 간다면 국내 미래 에너지 확보에 대한 전망은 매우 밝을 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

- [1] Sloan E. D., 1998, *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 2nd Ed., Marcel Dekker Inc., New York.
- [2] Kvenvolden, K. A., 1998, "A Primer on the Geological Occurrence of Gas Hydrate. Gas Hydrate: Relevance to World Margin Stability and Climate Change," *Geological Society*, London, Special Publications, Vol. 137, pp. 9-30.
- [3] Gudmundsson, J.-S., Parlaktuna, M., 1992, "Storage of Natural Gas at Refrigerated Conditions," *AICHE Spring National Meeting*, New Orleans, March.
- [4] Lee, J., Baek, Y., and Sung, W., 2002, "Effect of Flow Velocity and Inhibitor on Formation of Methane Hydrates in High Pressure Pipeline," *J. Ind. Eng. Chem.*, Vol. 8, No. 5, pp. 493-498.