

# 미래의 비재래형 에너지자원 천연가스 하이드레이트



류 병 재  
한국지질자원연구원

## 1. 서 언

근래 막대한 매장량으로 인해 미래의 비재래형 에너지원(nonconventional energy resource)으로 주목의 대상이 되고 있는 천연가스 하이드레이트(natural gas hydrate)는 저온·고압 조건 하에서 수소결합을 하는 고체상 격자(hydrogenbonded solid lattice) 내에 객체분자(guest molecule)인 가스분자가 포획되어 형성된 가스 하이드레이트(gas hydrate)의 일종으로 영구 동토지역과 심해저의 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있다. 천연가스 하이드레이트는 in-situ 가스 하이드레이트의 대부분을 차지하기 때문에 일반적으로 가스 하이드레이트로 명명되기도 하며, 천연가스의 주 구성성분이 메탄인 관계로 메탄 하이드레이트로 불리기도 한다.

1810년 Sir Humphrey Davy에 의해 클로린 하이드레이트(chlorine hydrate)가 발견된 이후 현재까지 130개 이상의 가스분자들이 물분자와 결합하여 가스 하이드레이트를 형성하는 것으로 보고되었다(Sloan, 1998). 육상의 퇴적층에 부존되어 있는 천연가스 하이드레이트의 존재는 1967년 서시베리아에 위치한 Messoyakhia Field와 동시베리아 야쿠츠크(Yakutsk)의 Ust-Viliuisk 및 Sredne-Viliuisk Field에서 밝혀졌다(Makogon,

1974, 1977). 심해저 퇴적층에 부존되어 있는 천연가스 하이드레이트의 최초 발견은 1979년 멕시코 남쪽 Middle America Trench에서 수행된 DSDP(Deep Sea Drilling Program) Leg 66(Site 490, 491 및 492)을 통하여 이루어졌다(Shiplely and Didyk, 1982).

가스 파이프라인(pipeline)이 막히는 사고가 하이드레이트 형성에 의한 것이라는 1934년 Hammerschmidt의 연구결과 발표 이후 천연가스 하이드레이트의 존재가 관심을 받기 시작하였으며, 1990년대 들어 막대한 매장량으로 인해 미래의 에너지원으로 각광을 크게 받게 되었다. 현재 미국과 일본이 2010년대 천연가스 하이드레이트의 상업적 생산을 목표로 국가 차원의 R&D program을 수행하고 있으며 인도가 이와 비슷한 program을 수행중이다(Makogon et al., 1997).

천연가스 하이드레이트는 에너지원 이외에 영구 동토지역과 심해저에서의 재래형 석유자원 탐사 및 개발 그리고 환경 측면에 있어서도 매우 중요하다. 또한 천연가스 하이드레이트 기술은 여러 분야에 활용될 수 있다. 따라서 본 원고에서는 아직 우리에게 생소한 천연가스 하이드레이트의 전반적인 내용과 함께 국가 R&D를 수행하고 있는 미국과 일본의 연구개발 동향에 대해 소개하고자 한다.



## 2. 천연가스 하이드레이트의 중요성

천연가스 하이드레이트에 포획된 메탄의 추정 매장량은 10,000 Gt으로 유전과 천연가스전에 포함된 메탄 양의 25배 이상으로 막대하다(Makogon, 1997). 천연가스 하이드레이트의 주 구성성분인 메탄은 연소될 때 발생하는 이산화탄소의 양이 현재 사용되고 있는 휘발유에 비하여 0.7배 정도로 매우 환경 친화적이다(松本 外, 1994). 재래형 석유와 천연가스의 매장량에는 한계가 있으며, 기후협약 등 환경보호 정책에 따라 석탄의 소비도 점차 감소될 전망이다. 그러나 현재 에너지 수요의 대부분을 차지하는 이들 화석 에너지(fossil energy)를 대체할 새로운 에너지원의 개발은 매우 미흡한 실정이다. 따라서 천연가스 하이드레이트는 미래의 청정 에너지원으로 큰 잠재력을 가지고 있다.

고체상의 가스 하이드레이트는 투수율(permeability)이 낮기 때문에 하위에 부존되어 있는 천연가스의 방출을 막는 덮개(seal) 역할을 한다. 또한 지하 심부로부터 단층(fault) 등을 따라 이동(migration)된 천연가스가 하이드레이트 안정영역(stability zone)에 도달하게 되면 물과 결합하여 특이한 물리적·음향학적 성질을 가지는 천연가스 하이드레이트로 상변화(phase change)를 하게 되며, 이러한 특성은 탐사에 있어 매우 중요한 지시자(indicator) 역할을 한다.

이밖에 영구 동토지역과 심해에서 재래형 천연가스의 개발과 운송 시 천연가스 하이드레이트의 생성과 해리(dissociation)는 가스폭발(gas kick), 플러깅, 지반침하 및 시설물의 손상 등의 문제를 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1970년부터 억제제(inhibitor)에 대한 연구가 현재까지 추진되고 있다.

천연가스 하이드레이트는 환경오염과 지질재해(geohazard)에 심각한 영향을 미친다. 온도·압력 조건이 조금만 변해도 천연가스 하이드레이트는 해리

되며, 해리된 가스(대부분 메탄)는 대기로 방출되어 온실효과(greenhouse effect) 증대에 큰 영향을 미친다(Rodhe, 1990; Lashof and Ahuja, 1990).

근래에 들어 지구의 온도는 점차 높아지고 있으며, 이는 안정하게 존재하는 천연가스 하이드레이트를 해리 시키고 대기로 방출시키게 된다. 이로 인하여 지구의 온도는 더욱 상승될 것이며, 더욱 더 많은 양의 메탄이 대기권으로 방출되어 지구의 온실효과는 더욱 가중될 것으로 전망되고 있다(Engelozos, 1996; Henriet, 1996). 또한 심해저에서 천연가스 하이드레이트의 해리는 해저붕락(slumping)과 지반침하를 야기시키며, 이는 광케이블과 같은 해저 시설물에 손상을 입히게 된다.

Berner(1992)는 천연가스 하이드레이트를 통한 재래형 가스의 저장과 선박수송의 개념적 디자인을 평가했으며, Gudmundsson and Børrehaug (1996)는 천연가스를 하이드레이트로 만들어 수송하는 방법이 LNG(liquefied natural gas)로 만들어 수송하는 것 보다 경제성이 좋다고 보고하였다. 이밖에 천연가스 하이드레이트 관련기술은 온난화 가스의 처리와 격리(sequestration), 해수의 담수화, 휘발성 유기 화합물(VOC: volatile organic compound) 제거 등 여러 가지 분야에 활용될 수 있다.

## 3. 천연가스 하이드레이트의 구조, 기원, 생성 및 부존

### 3.1. 구조

천연가스 하이드레이트를 포함 모든 가스 하이드레이트의 결정구조(crystal structure)는 수소 결합으로 이루어진 물분자에 의하여 형성된 다면체(polyhedra)의 공동(cavity)으로 구성되어 있다. 7가지의 가스 하이드레이트 결정구조 중 천연가스 하이드레이트는 구조-I(SI), 구조-II(SII) 및 구조

-H(SH)를 형성하며(Fig. 1), 구조의 종류는 포획 되는 가스 즉, 객체분자의 크기에 의해 결정된다.

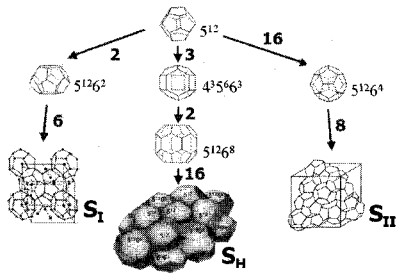


Fig. 1. Structures of natural gas hydrates(류병재 외, 2000 modified after 松本 外, 1994; Sloan, 1990 and 1998; Mehta and Sloan, 1996).

가스 하이드레이트 구조-I과 구조-II는 1965년 McMullen과 Jeffrey 그리고 Mark와 McMullen에 의한 X-선 회절분석(X-ray diffraction) 연구에 의하여 밝혀졌다. 메탄, 이산화탄소(carbon dioxide) 및 에탄(ethane) 등의 객체분자들은 단일 하이드레이트(single hydrate)로 구조-I을 형성한다. 수소(hydrogen), 질소(nitrogen), 프로판(propane) 및 아이소-부탄(iso-butane) 등은 단일 하이드레이트로 구조-II를 형성한다. 구조-H의 존재는 1987년 Ripmeester et al.의 핵자기 공명 분광법(NMR spectroscopy)과 X-선 회절분말분석(X-ray power diffraction) 연구에 의하여 밝혀졌다.

가스 하이드레이트 구조-H가 안정하기 위해서는 크기가 다른 2개의 객체분자가 요구된다(Sloan, 1998). 이때, 메탄 및 황화수소(hydrogen sulfide)와 같은 작은 분자들은 작은 공동(512, 435663)에 들어가며, 7.4Å 보다 큰 네오헥산(neohexane)과 같은 분자들은 큰 공동(51268)에 들어가게 된다.

### 3.2. 기원

천연가스는 대부분 미생물분해(microbial degradation)와 열분해(thermal degradation)

에 의하여 생성된다. 생물기원(biogenic)의 가스는 비교적 천부에 분포된 퇴적물 내에서 박테리아(bacteria)에 의하여 유기물이 분해될 때 생성되며, 대부분 메탄으로 구성된다. 열기원(thermogenic)의 가스는 압력과 온도가 높은 심부에서 세립질의 근원암(source rock)에 포함된 유기물과 석탄 또는 원유가 열분해작용을 받으면서 생성된 것으로 메탄 이외에 에탄, 프로판, 부탄 등 무거운 탄화수소 가스를 포함한다.

천연가스 하이드레이트의 기원은 포획된 메탄에 대한 안정동위원소 분석을 통하여 규명할 수 있다. 즉, 탄소동위원소비( $\delta^{13}C$ )가  $-60\% \sim -90\%$  ( $< -55\%$  after Makogon, 1997)의 가벼운 값을 가지는 경우 생물기원에 해당하며,  $-30\% \sim -60\%$  ( $< -55\%$  after Makogon, 1997)으로 무거운 경우에는 열기원에 해당한다(松本 外, 1994; Kvenvolden, 1996). 이밖에 탄화수소 가스비(hydrocarbon gas ratio:  $R=C1/(C2+C3)$ )를 이용하여 기원을 구분하기도 한다(Makogon, 1997). 즉, R 값이 100 보다 큰 경우에는 생물기원, R 값이 80 보다 작을 경우에는 열기원에 해당된다.

### 3.3. 생성과 부존

천연가스 하이드레이트가 생성되어 안정하게 존재하기 위해서는 전기한 바와 같이 고압·저온의 조건이 요구되며, 이 생성조건은 천연가스와 간극수(interstitial water)의 성분에 의해 영향을 받는다(Fig. 2).

이밖에 퇴적물 내 0.5% 이상의 총유기탄소(TOC: total organic carbon) 함량, 1 l의 짙은 퇴적물(wet sediment) 내에 10 ml/l 이상의 잔류 메탄농도(residual methane concentration), 높은 퇴적률(30 m/106 year  $\sim$  300 m/106 year after Kvenvolden, 1988), 생성된 탄화수소 가스가 삼투(percolation)될 수 있는 공극(pore)과 투

수성(permeability)이 천연가스 하이드레이트 생성을 위하여 요구된다(松本 外, 1994, Sloan, 1990, 1998; Max and Lowrie, 1996).

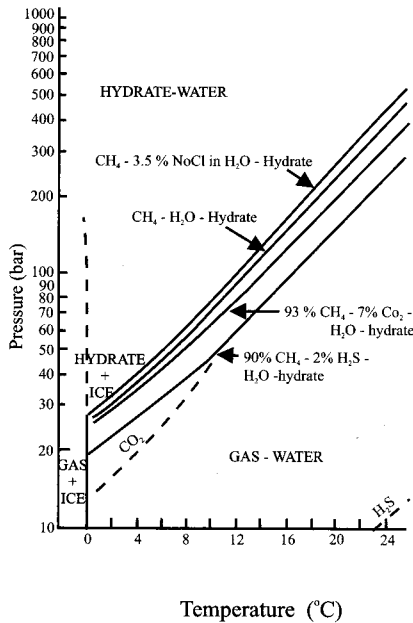


Fig. 2. Stability zone of natural gas hydrates (松本 外, 1994).

광물의 경우 특정한 온도와 압력 하에서 생성되고 나면, 이들 조건이 변하여도 쉽게 용해되거나 분해

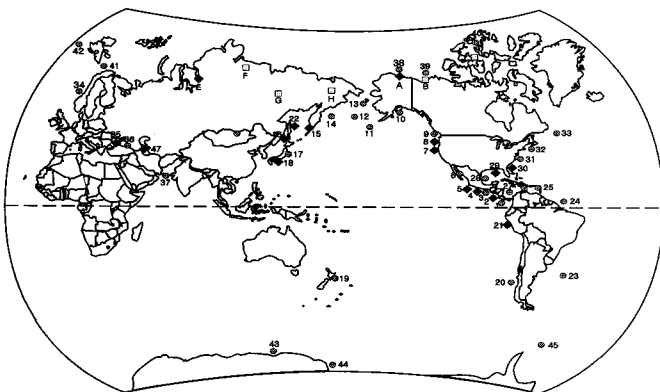


Fig. 3. Location of known and inferred natural gas hydrate deposits in ocean(●) and permafrost(■) (Kvenvolden, 1993).

되지 않는다. 반면에 천연가스 하이드레이트는 안정하게 존재할 수 있는 저온·고압 조건에서 벗어나면 쉽게 가스와 물로 해리(dissociation) 된다. 따라서 천연가스 하이드레이트는 이러한 물리적 조건을 충족하고 있는 영구 동토지역과 심해저의 얇은 퇴적층에 국한되어 분포하고 있다.

## 4. 천연가스 하이드레이트의 탐사 및 개발 방법

### 4.1. 탐사

천연가스 하이드레이트의 부존을 규명하는 탐사방법은 지구물리탐사와 지질·지화학 탐사로 구분된다. 지구물리 탐사 방법에는 물리검층(well logging), 탄성과 탐사(seismic survey), 해저면 측사기(side scan sonar) 또는 다중 채널 음향 측심기(multichannel echo sounder)를 이용한 해저지형 조사, MT (magnetotelluric) 탐사 등이 있으며(Sloan, 1990, 1998), 이들 탐사는 천연가스 하이드레이트가 가지는 특이한 물리적·음향학적 특성을 이용한다(Collet, 1983; Davison et al., 1983; Dillon and Paull, 1983; Pearson et al., 1983; Kvenvolden and

McDonald, 1985; Mathews, 1986; Prenskey, 1995). 이들 탐사방법 중 탄성과 탐사자료에서 BSR (bottom simulating reflector)을 확인하는 것이 천연가스 하이드레이트 부존 규명을 위해 현재 이용되는 가장 보편적이고 효과적인 방법이다.

BSR은 천연가스 하이드레이트로 포화된 퇴적층과 하위에 발달된 가스 또는 물로 포화된 퇴적층과의 경계면에서 탄성과 속도 및 밀도 차이에 기인한 극성역전(polarity reversal)을 동반

한 강진폭의 반사면으로 해저면과 평행하게 발달된다. 탄성과 탐사자료 해석 시 주의하여야 할 점은 단면도에 나타나는 큰 진폭의 반사면이 모두 천연가스 하이드레이트에 기인한 것이 아니라는 점이다. 즉, 화산재(volcanic ash) 층의 하부 그리고 오팔-A(opal-A)와 오팔-CT 혹은 오팔-CT와 석영(quartz)의 경계면에서 BSR과 유사한 큰 진폭의 반사면이 나타날 수 있다(松本 外, 1994).

또한 퇴적층이 해저면과 평행하게 발달되어 있는 경우 탄성과 탐사자료로부터 BSR을 확인하는 것은 쉽지 않다. 또한 천연가스 하이드레이트로 포화된 퇴적층 하위에 자유가스(free gas)가 존재하지 않거나 빠른 탄성과 속도를 가지는 퇴적층에서는 BSR이 명확하게 나타나지 않는다(Kvenvolden and Barnard, 1983; Max, 1990; 倉本, 1997). 따라서 BSR로 추정되는 강한 반사면이 천연가스 하이드레이트에 의한 것인지를 규명하기 위해서는 구간 속도 분석 등의 탐사자료 전산처리가 필요하다.

지질·지화학 탐사는 천연가스 하이드레이트는 물론 천부가스의 부존을 간접적으로 탐사하는 방법으로 퇴적물의 간극수 또는 해저면의 물을 채취하여 가스 및 물에 대한 분석, 직접 채취된 가스의 분석과 퇴적물에 포함된 유기물, 가스 및 속성 작용 광물을 분석하는 방법이 있다. 최근 수년 전부터 천연가스 하이드레이트 저류층의 온도와 압력을 그대로 유지시켜 하이드레이트 시료를 해리되지 않은 상태로 회수할 수 있는 압력-온도 코어 샘플러(pressure-temperature core sampler)가 이용되고 있다.

#### 4.2. 개발

천연가스 하이드레이트의 모든 생산방법은 하이드레이트의 해리를 전제로 한다. 자연상태의 천연가스 하이드레이트를 개발하기 위해서 사용하는 방법에는 감압법(depressurization), 열주입법(thermal

method), 억제제 주입법(inhibitor injection) 그리고 이 3가지 방법을 혼합한 하이브리드(hybrid) 방법 등이 있다.

서시베리아의 Messoyakha Field에서는 자유가스와 함께 천연가스 하이드레이트로부터 해리된 가스를 생산한 바 있다. 그러나 아직까지는 천연가스 하이드레이트에 대한 특성이 명확히 알려져 있지 않으며, 이들을 회수하는 방법도 완전하게 그 공정이 개발된 것도 아니기 때문에 현재 상업적 생산이 이루어지고 있지 않다. 시베리아, 알래스카 및 캐나다 북부에서의 경험으로 미루어 볼 때 천연가스 하이드레이트의 개발을 위해서 하이드레이트의 해리속도를 제어하는 방법이 해결되어야 할 중요한 기술적 과제이다.

또한 해저와 같이 연약한 퇴적층에서 천연가스 하이드레이트를 생산할 때 하이드레이트 해리에 의한 지반침하, 생산설비의 손상 및 환경오염 등의 문제 해결을 위한 연구가 수행되어야 한다. 미국과 일본의 경우 2015년 천연가스 하이드레이트의 상업적 생산을 목표로 국가 차원에서의 R&D program을 수행하고 있다.

### 5. 천연가스 하이드레이트에 대한 연구개발 동향

#### 5.1. 미국

미국의 경우 천연가스 하이드레이트에 대한 R&D는 대부분 연방정부 주도로 추진되고 있다. 천연가스 하이드레이트 R&D 프로그램을 정부가 주도하는 목적은 천연가스 하이드레이트로부터 천연가스를 안전하고 경제적으로 생산함으로써 원활한 에너지 공급을 통한 국가 경제 발전을 꾀함과 동시에 기후변화와 오염의 요인을 제거하여 환경의 질을 향상시키고, 국민들에게 천연가스 하이드레이트의 중요성과 국가 에너지 정책을 이해시키는데 있다.

현재 천연가스 하이드레이트에 대한 연구는 에너지성/화석연료실(DOE/FE: Department of Energy /Office of Fossil Energy)의 국립에너지기술연구소(NETL: National Energy Technology Laboratory), 내무성(DOI: Department of Interior) 소속의 지질조사소(USGS: U.S. Geological Surtvey)와 광산관리국(MMS: Mineral Management Service), 국방성(DOD: Department of Defense) 소속의 해군연구소(NRL: Naval Research Lab.), 상무성(DOC: Department of Commerce) 소속의 해양기후국(NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration), 국립과학재단(NSF: National Science Foundation), 대학 그리고 에너지 관련 기업체 등에서 수행하고 있다.

미국에서 천연가스 하이드레이트 연구는 가스 파이프라인이 막히는 사고가 천연가스 하이드레이트에 의한 것이라는 연구결과의 발표 이후 활발해지기 시작하였으며, 이 문제점의 해결을 위한 R&D가 현재 까지 수행되고 있다. 1972년에는 알라스카 Prudhoe Bay Field의 Arco Exxon N.W. Eileen State No. 2탐사정으로부터 천연가스 하이드레이트 시료가 회수되었다. 1982년에 천연가스 하이드레이트의 물리·화학적 성질과 생성·해리 메카니즘(mechanism), 심해 및 극지에 부존되어 있는 하이드레이트의 지질·지구물리·지화학적 특성 그리고 하이드레이트 부존 지역과 열역학적 성질의 규명을 목적으로 8백만 US\$가 투자된 에너지성 지원의 10개년 R&D 프로그램이 착수되었다.

1985년 전 세계 천연가스 하이드레이트 부존지역에 대한 지도가 에너지기술성(DET: Department of Energy & Technology)에 의해 작성되었으며, 1998년 발간되었다(Kvenvolden, 1988, 1993). 1990년에는 알라스카에서 천연가스 하이드레이트 개발에 대한 상업적 시험이 수행되었다(MacDonald, 1990). 1995년 알라스카를 포함한 자국내 5개 지역

(province)에 부존되어 있는 천연가스 하이드레이트 내에 포함된 가스 매장량에 대한 평가(in-place gas resources:  $9,066 \times 10^{12} \text{ m}^3$ )가 수행되었다(Fig. 4: Collett, 1996).

에너지성/화석연료실은 1997년과 1998년에 각 3십만 US\$, 1999년에 5십만 US\$ 그리고 2000년에 약 2백만 US\$를 지질조사소, 해군연구소, 아이다호 국립공학·환경실험실(Idaho National Engineering & Environmental Laboratory) 및 콜로라도광산대학(Colorado School of Mine)에 연구비를 지원하였다(Allison, 2000).

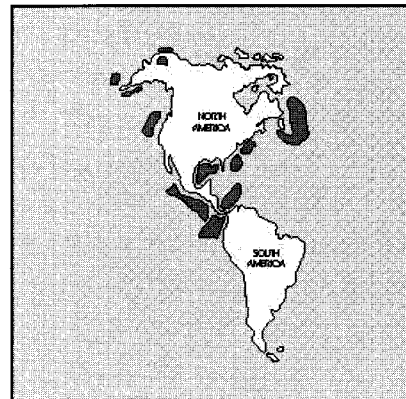


Fig. 4. Location of natural gas hydrate deposits in U.S. (Collett, 1996).

1997년에 대통령과학기술자문위원회(PCAST: The Presidents Committee of Advisors on Science & Technology)는 “21세기 도전을 위한 에너지 R&D에 관한 보고서(Report on Energy R&D for the Challenges of the 21st Century)”를 통하여 에너지성/화석연료실로 하여금 관·산·학·연의 여러 전문기관과 공동으로 전세계적인 천연가스 하이드레이트 잠재력에 대한 과학기반 프로그램을 수립할 것을 권고하였다(DOE website). 1997년 11월 Daniel Akaka 상원의원이 “메탄 하이드레이트 R&D 법안(Methane

Hydrate R&D Act; S. 1418)”을 의회에 제출하였다. 1998년 5월 21일 이 법안에 대한 상원 ‘에너지 천연자원 위원회’의 청문회가 개최되었으며, 동년 7월 17일 상원에서 만장일치로 통과되었다. 1998년 에너지성은 1월과 5월에 천연가스 하이드레이트 R&D에 관련된 워크샵(workshop)의 개최를 지원하였으며, 8월에 “메탄 하이드레이트의 R&D 전략(A Strategy for Methane Hydrate Research and Development)”을 발표하였다(Allison, 2000).

에너지성/화석연료실은 1999년 6월 산·학·연 관련 기관과 공동으로 “다개년 국가 메탄 하이드레이트 R&D 계획(National Methane Hydrate Multi-Year R&D Program Plan)”을 수립하였다(Allison, 2000; DOE website). 1999년 “메탄 하이드레이트 R&D 법안”이 상원과 하원에서 통과되었으며, 2000년 5월 승인되었다(Methane Hydrate Legislation P.L. 106-103). 이에 의거 2001년부터 5년 동안 47.5백만 US\$이 천연가스 하이드레이트 연구에 투자될 계획이며, 2015년 천연가스 하이드레이트의 상업생산을 목표로 하고 있다.

## 5.2. 일본

자국 내 화석 에너지원의 부존이 매우 빈약한 일본의 경우 에너지원의 안정적 확보는 매우 중요한 국가적 과제이다. 따라서 천연가스 하이드레이트에 대한 국가 차원의 R&D는 미국보다도 더 적극적이고 신속하게 진행되고 있다.

현재 경제산업성(METI: Ministry of Economic Trade & Industry; 구 통상산업성(MITI: Ministry of International Trade & Industry)) 산하의 일본석유공단(JNOC: Japan National Oil Corp.), 신에너지산업기술총합개발기구(NEDO: New Energy & Industrail

Technology Development Organization), 공업기술원(AIST: Agency of Industrial Science & Technology) 소속의 연구기관인 일본지질조사소(GSJ: Geological Survey of Japan), 자원환경총합연구소(NIRE: National Institute of Resources & Environment), 북해도공업기술연구소(HNIRI: Hokkaido National Industrial Research Institute) 그리고 문부과학성(MEXT: Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Technology; 구 과학기술청(STA: Science & Technology Agency) 산하의 해양과학기술센터(JAMSTEC: Japan Marine Science & Technology Center), 대학 및 에너지 관련 기업체 등에서 천연가스 하이드레이트에 대한 연구를 수행하고 있다.

일본에서 천연가스 하이드레이트 연구는 Nankai Trough에서 1970년대 말과 1980년대 초 일본지질조사소가 수행한 대한 해저지질도 작성사업과 일본석유탐사주식회사(JAPEX: Japan Petroleum Exploration Co.)가 수행한 석유탐사 사업을 통하여 획득된 탄성과 탐사자료에서 BSR이 확인이 되면서 시작되었다(Okuda, 1977a and 1977b; Okuda et al., 1978; Aoki et al., 1983). 이후 탐사자료에 대한 재처리 및 재해석 작업을 통하여 천연가스 하이드레이트 부존지역을 지시하는 BSR이 여러 해역에서 확인되었다(Fig. 5).

천연가스 하이드레이트 시료의 회수는 1989년 Hokkaido 서부해역의 Okushiri Ridge에서 수행된 ODP(Ocean Drilling Program) Leg 127(Site 796)을 통해 이루어졌으며(Tamaki et al., 1990). 1990년에는 Shikoku 해역의 Nankai Trough에서 수행된 ODP Leg 131(Site 808)을 통하여 천연가스 하이드레이트 시료와 저염도를 보이는 지층수가 확인되었다(Taira et al., 1991; Fig. 5).

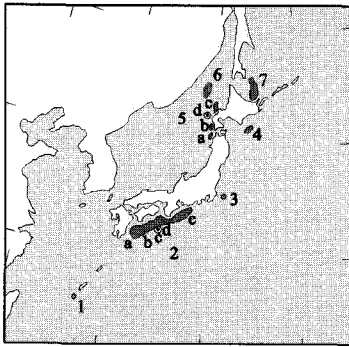


Fig. 5. Location of natural gas hydrate deposits around Japan, O: samples recovered by ODP drilling (Okuda, 1996; Satoh et al., 1996).

1990년 천연가스 하이드레이트의 연구, 탐사 및 개발에 대한 타당성 연구(feasibility study)가 응용에너지연구소(IAE: Institute of Applied Energy)에 의해 수행되어 자국은 물론 외국의 천연가스 하이드레이트 관련 정보가 취득·종합되었다(Okuda, 1996). 1992년 자국 주변 해역의 천연가스 하이드레이트 매장량에 대한 개략적인 평가 결과(in place  $6 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup> at standard condition)가 포함된 중간보고서가 응용에너지연구소에 의해 작성되었다.

이 중간보고서 제출 직후 Kyoto에서 개최된 29차 국제지질학술회의(IGC: International Geological Congress)에서 미국 에너지성에 의해 평가된 Nankai Trough 해역의 천연가스 하이드레이트 매장량( $0.42 - 4.2 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>)이 발표되었다(Krason, 1992). 이후 일본 주변해역에 부존된 천연가스 하이드레이트의 추정 매장량은 자유가스를 포함  $7.4 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>으로 발표되었다(Okuda, 1996; Satoh et al., 1996).

1994년 석유위원회(Petroleum Council)는 통상산업성, 일본지질조사소, 일본석유평단 및 석유개발 관련 민간회사와 함께 향후 석유자원 탐사 방향에 대하여 협의를 하였으며, 1995년 4월 약 5천만

US\$가 투자되는 통상산업성 5개년 천연가스 하이드레이트 프로젝트가 착수되었다. 이 프로젝트에는 일본석유평단을 주축으로 일본지질조사소 등의 국립 연구기관, 학교 및 10개의 민간기업이 콘소시움을 구성하여 참여하였다(Okuda, 1996).

1995년과 1996년에 이 프로젝트의 일환으로 Nankai Trough에서 미국 해군연구소의 DTAGS (Deep Taw Acoustic Geophysics System)를 이용하여 탐사자료를 취득하였다. 1996년과 1997년 두차례에 걸쳐 캐나다와 공동으로 워크샵을 개최하였다. 1997년 10월과 11월에는 Nankai Trough에서 러시아의 시추선을 이용하여 시험시추를 실시하였다. 1998년 2월부터 3월까지 일본석유평단, 일본석유평사주식회사 및 캐나다지질조사소(GSC: Geological Survey of Canada)가 공동으로 캐나다 북서부 MacKenzie Delta에서 Mallick 2L-38 well을 시추하였다(Dallimore et al., 1999). 이때 천연가스 하이드레이트 시료가 해리되지 않은 상태로 회수할 수 있는 온도-압력 코어 샘플러(PTCS)가 시험되었으며, 이수 시스템(mud system) 등 개발에 필요한 다양한 기술들이 적용되었다.

1999년 6월에서 9월까지 Nankai Trough에서 BSR의 분포와 심부 구조를 보다 명확하게 규명하기 위해 R/V Maurice Ewing을 이용하여 미국과 공동으로 3차원 탄성과 탐사를 수행하였다(Morita et al., 2000). 1999년 11월부터 2000년 2월에 Nankai Trough에 부존된 천연가스 하이드레이트의 잠재력 평가를 위해 일본석유평사주식회사가 운영자(operator)로 3개 공(well)에 대한 시추를 성공적으로 완료하였다(Uchida et al., 2000). 시추 결과 천연가스 하이드레이트의 포화도가 예측한 것보다 높은 것으로 평가되었다(Lu et al., 2000).

일본석유평단 주도의 프로젝트와는 별도로 신에너지산업기술총합개발기구는 1997년부터 “뉴선샤인(New Sunshine) 계획”의 선도연구로 천연가스 하



이드레이트의 자원이용기술 개발을 위한 기초연구를 통상산업성의 공업기술원으로부터 위탁받았다. 이 기초연구는 일본지질조사소, 자원환경기술총합연구소, 북해도공업기술연구소 등에서 수행되었다. 이밖에 과학기술청의 위탁을 받아 해양과학기술센터가 일본 주도의 OD21(Ocean Drilling in the 21th Century)을 추진 중에 있으며, 이 프로그램의 천연가스 하이드레이트에 대한 연구가 주요한 연구로 포함되어 있다.

2010년대에 천연가스 하이드레이트의 상업생산을 목표로 현재 경제산업성 R&D 프로그램이 일본 석유평단의 주도로 수행 중에 있으며, 금년 초 캐나다 MacKenzie Delta에서 시험생산을 위한 시추가 캐나다, 미국 및 독일과 공동으로 수행되었다(GSC website, 2002). 이 경제산업성 R&D 프로그램의 일환으로 수행되는 천연가스 하이드레이트의 탐사와 개발에 직접적으로 투자되는 비용 이외에 천연가스 하이드레이트의 추출(extraction)을 위한 시뮬레이션 시스템(simulation system) 개발 그리고 천연가스 하이드레이트의 특성과 동력학(kinetic)에 대한 실험연구를 위해 2015년까지 매년 10억엔 이란 막대한 연구비가 투자될 계획이다 (pers. comm. with Komai, 2001).

## 6. 결 언

현재 천연가스 하이드레이트는 막대한 매장량에도 불구하고 초보단계에 있는 개발기술, 개발에 따른 환경 문제 및 낮은 경제성으로 인하여 상업적인 생산이 이루어지고 있지 않다. 그러나 기존 재래형 석유와 천연가스 매장량의 한계, 연소될 때 이산화탄소를 적게 방출하는 청정성 및 온실가스 방출에 대한 규제 강화 등으로 미루어 새로운 에너지원으로 각광을 받을 것으로 판단된다.

천연가스 하이드레이트는 에너지원으로 뿐만 아니

라 심해저 및 영구 동토지역에서의 재래형 석유자원 탐사와 개발 그리고 지구환경 측면에서도 매우 중요하다. 또한 천연가스 하이드레이트 관련 연구결과는 재래형 천연가스 및 온난화 가스의 저장과 수송, 담수화 그리고 휘발성 유기 화합물의 처리 등 여러 분야에 활용될 수 있다.

우리나라는 에너지의 약 98%를 해외로부터의 수입에 의존하고 있으며, 이를 위하여 총 수입액의 20%에 달하는 막대한 외화를 지출하고 있다. 우리 관할 해역에서 천연가스 하이드레이트 부존을 확인하는 것은 에너지원의 확보 차원은 물론 인접국가와의 대륙붕 한계획정에 대비하여 매우 중요하다. 이밖에 현재 정부투자기관에서 추진 중인 대륙붕 6-1 광구 동해 가스전과 시베리아 가스전 개발을 위해서도 천연가스 하이드레이트 기술의 확보가 절실하다.

한국지질자원연구원은 1996년부터 천연가스 하이드레이트에 관한 기초연구를 과학기술부와 국무총리실 기관고유사업의 일환으로 수행하였다. 천연가스 하이드레이트에 대한 체계적인 연구는 2000년부터 착수된 것으로 볼 수 있다. 이 연구는 산업자원부 “국가 지질조사 및 자원탐사 연구사업”의 일환으로 한국지질자원연구원과 한국가스공사가 공동으로 수행 중에 있다.

본 연구를 통하여 국내 해역에서 천연가스 하이드레이트 부존 유망지역 규명을 위한 탐사와 함께 천연가스 하이드레이트의 개발과 활용에 필요한 기반기술의 확보를 위한 연구를 한국지질자원연구원, 한국가스공사 연구개발원, KAIST 및 한양대학교에서 수행하고 있다. 한국석유평사의 경우 2001년 말 대륙붕 6-1광구에서 천연가스 하이드레이트에 대한 기초탐사를 수행하였다. 이밖에 인하대학교와 고려대학교에서 천연가스 하이드레이트 관련 실험연구를 수행하고 있다. 천연가스 하이드레이트 R&D의 효과적인 수행을 위해서는 정부차원에서의 지속적인 지원과 산·학·연의 유기적인 협력이 요구된다.

## 참고문헌

1. 류병재 외: 가스 하이드레이트 탐사 및 개발 연구, 2000년도 중간보고서, 비발칸, (2000).
2. 松本良, 奥田義久, 青木豊: 메탄화이드레이트 21세기의巨大天然가스 자원, 日經サイエンス社, 東京, 253, (1994).
3. 倉本眞一: モラ17の 海底面-BSR-, 地質ニコース, 510, 12-17, (1997).
4. Allison, E.: Annals of the New York Academy of Science, 912 (Gas Hydrates, Challenges for the Future, Holder, G.D. and Bishnoi, P.R. ed.), 437-440, New York, (2000).
5. Aoki, Y., Tamano, T., Kato, S.: Amer. Assoc. Petr. Geol. Mem., 34, 309, (1983).
6. Collett, T.S.: Prudhoe Bay, Alaska. M.S. Thesis, Univ. Alaska, USA, (1983).
7. Collett, T.S.: Proceedings of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrate, 499-506, (1996).
8. Dallimore, S. R., Uchida, T., Collett, T.S.: Geol. Surv. Canada Bull., 544, 403, (1999).
9. Davison, D.W., El-Defrawy, M.K., Fugiem, M.O. and Judge, A.S.: Proceedings of 3rd International Conference on Permafrost 1, 938-943, (1983).
10. Dillon, W.P. and Paull, C.K.: Marine Gas Hydrate-II : Geophysical Evidence, In Natural Gas Hydrates (Cox, J.L. ed.) : Properties, Occurrence and Recovery, Butterworth, Boston, 73-90, (1983).
11. Englezos P.: Proceedings of Canada-Japan Joint Science and Technology Workshop on Gas Hydrate Studies, 55-82, (1996).
12. Gudmundsson, J. and Børrehaug, A.: Proceedings of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrates, 415-422, (1996).
13. Henriot, J.P.: In Proceedings of Gas Hydrates: Relavance to World Margin Stability and Climatic Cjange Conference (Tutorial and Abstracts Vols.), (1996).
14. Krason, J.: Abs., 29th I.G.C., (3), 802, (1992).
15. Kvenvolden, K.A. and Barnard, L.A.: Initial Report, DSDP 76 (Sheridan, R.E., Gradstein, F. et al., eds), U.S Govt. Printing Office, Washington, D.C., 335-365, (1983).
16. Kvenvolden, K.A. and MacDonald: Initial Report, DSDP 84 (Huene, R., Aubouin, J. et al. eds.), U.S Govt. Printing Office, Washington, D.C., 667-682, (1985).
17. Kvenvolden, K.A.: Chem. Geol., 71, 41-51, (1988).
18. Kvenvolden, K.A.: The Future of Energy Gases, Prof. Paper of USGS, 1570, 555-561, (1993).
19. Kvenvolden, K.A.: J. Org. Geochem. 997-1008, (1996).
20. Lahof, D.A. and Ahuju, D.R.: Nature, 344, 529-531, (1990).
21. Lu, H., Uchida, T., Matsumoto, R., Tomaru, H. and Oda, H.: Proceedings of 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, 59, (2000).
22. MacDonald, G.J.: Annual Review of Energy, 15, 53-83, (1990).
23. Mark, T.C.F. and McMullen, R.K.: J. Chem. Phys., 42, 2725-2732, (1965).
24. Makogon, Y.F.: Hydrate of Natural Gas, Nedra, Moscow, (1974).
25. Makogon, Y.F.: Hydrate of Hydrocarbons, PennWell Books, Tulsa, Oklahoma, 482, (1997).
26. Makogon, Y.F., Dunlap, W.A., and Hoiditch, S.A.: Proceedings of Offshore Technology Conference, 225-234, (1997).
27. Mathews, M.A.: The Log Analyst., (1986).
28. Max, M.D.: Report of U.S. Naval Research Laboratory, 9235, 68, (1990).
29. Max, M.D. and Lowrie A.: J. Petrol. Geol., 19, 41-56, (1996).
30. McMullen, R.K. and Jeffery, G.A.: J. Chem. Phys., 42, 2725-2732, (1965).
31. Mehta, A.P. and Sloan, D.E.: Proceedings of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrates, 1-8, (1996).
32. Morita, S., Ashi, J., Kumamoto, S., Taira, A., Bangs N.L., Shipley, T.H., Moore, G.F.: Proceedings of 2000 Western Pacific Geophysics Meeting, 60-61, (2000).
33. Okuda, Y.: Geol. Surv. Japan Marine Geol. Map. Ser. 5, (1977a).
34. Okuda, Y.: Geol. Surv. Japan Marine Geol. Map, Ser. 8, (1977b).
35. Okuda, Y.: Proceeding of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrate, 633-639, (1996).
36. Pearson, C.F., Halleck, P.M., McGulre, P.L., Hermes, R. and Mathews, M.: J. Phys. Chem., 87, 4180-4185, (1983).
37. Prensky, S.E.: Presented at the Meeting of the Soc. of Prof. Well Log Analysts, (1995).
38. Rodhe, H.: Science, 248, 1217-1219, (1990).
39. Ripmeester, J.A., Tse, J.S., Ratcliffe C.I. and Powell, B.M.: Nature, 325, 135-136, (1987).
40. Satoh, M., Maekawa, T. and Okuda Y.: J. Geol. Soc. Japan, 102, 959-971, (1996).
41. Shipley, T.H. and Didyk, B.M.: Occurrence of Methane Hydrates Offshore Southern Mexico Initial Report, DSDP Leg 66 (Watkins, J.S., Moore, J.C. et al., eds.), U.S Govt. Printing Office, Washington, D.C., 547-555, (1982).
42. Sloan, E.D.: Clathrate Hydrate of Natural Gases (1st edition), Marcel Dekker, New York, 641, (1990).
43. Sloan, E.D.: Clathrate Hydrate of Natural Gases (2nd edition), Marcel Dekker, New York, 705, (1998).
44. Taira, A., Hill, I. and Firth, J.V.: ODP Init. Rep., 131, 71, Texas. (1991).
45. Tamaki, K., Pisciotto, K. and Allan, J.: ODP Init. Rep., 127, 247, Texas. (1990).
46. Udachin, K.A. and Lipkowski, J.: Proceedings of 2nd International Conference on Natural Gas Hydrates, 25-32, (1996).