

메탄 하이드레이트의 부존 가능성과 평형조건

류 병재¹⁾, 허 대기¹⁾, 선우 돈¹⁾, 정 태진¹⁾, 김 현대¹⁾, 김 세준¹⁾, 이 호섭²⁾

¹⁾ 한국자원연구소 석유·해저자원연구부, 대전광역시 유성구 가정동 30

²⁾ 한양대학교 자원환경공학과, 서울특별시 성동구 행당동 17

ABSTRACT

Methane hydrate is ice-like solid compound consisting of mainly methane and water, and is stable under specific low temperature and high pressure conditions (HSZ : methane hydrate stability zone) that occurs in permafrost regions and in the ocean floor sediments. Geophysical survey was implemented in the southern area of the East Sea, and the HSZ of the study area is determined by the temperature, pressure and local heat flow obtained from the survey and well data. In the study area, methane hydrates could exist in the sediments below the water depths of about 300 m, and the base of HSZ is about 600 m beneath the seafloor. The acoustically blanking zones in the sediment and phenomena of gas seepage were detected from the seismic section. These sediments have the sufficient physical condition for the formation of methane hydrate. The temperature and pressure conditions were experimentally measured for the dissociation of methane and propane hydrates in pure water. Equilibrium conditions of methane and propane hydrates were obtained in the pressure range up to 19050 Kpa and 401.3 Kpa. Under same temperature condition, propane hydrate was dissociated at lower pressure than that of methane hydrate.

1. 서론

메탄 하이드레이트는 화학명으로 클라스레이트 (clathrate)로 불리는 가스 하이드레이트의 일종으로 영구 동토지역과 심해저 퇴적층에 부존되어 있는 in-situ 가스 하이드레이트의 대부분을 차지하며, 수소결합을 하는 고체상 격자 (hydrogen-bonded solid lattice) 내에 탄화수소 (hydrocarbon) 화합물 중 가장 단순한 물질인 메탄이 포획되어 형성된 외관상으로 얼음과 비슷한 고체 포유물이다.

순수한 메탄 하이드레이트는 물분자 46개에 8개의 메탄분자가 포획되어 구조-I을 형성하는 결합체로, 그의 분자식은 $CH_4 \cdot 5.75 H_2O$ 로 표시된다 (Fig. 1). 그러나 포획된 메탄에 프로판 혹은 부탄이 1% 이상 포함될 경우 구조-II가 형성된다 (Yousif, 1994). 구조-I은 6개의 14-hedra ($5^{12}6^2$ large cavity = tetrakaidecahedron; 12 pentagonal face & 2 hexagonal face)와 2개의 12-hedra (5^{12} small cavity = pentagonal dodecahedron; 12 pentagonal face)로 구성되어 있으며, 구조-II는 16개의 12-hedra와 8개의 16-hedra ($5^{12}6^4$ large cavity = hexakaidecahedron; 12 pentagonal face

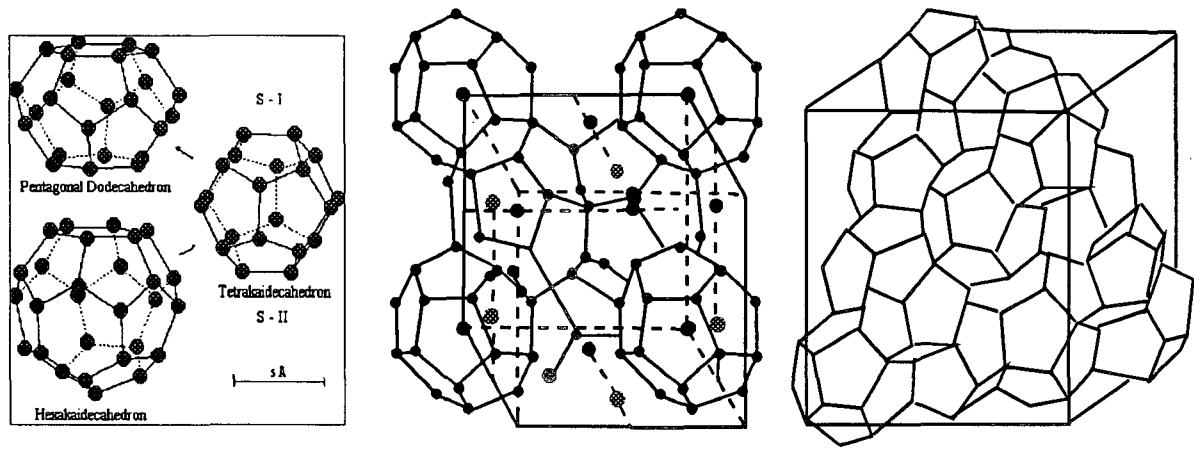


Figure 1. Basic crystalline cavities and structures of gas hydrate (GSJ, 1995).
left : crystalline cavities, middle : structure-I, right : structure-II

& 2 hexagonal face)로 구성되어 있다. 포획되는 가스의 종류는 구조를 형성하는 cavity의 크기에 따라 포획되는 가스의 종류가 결정된다. 가스 분자의 직경이 5.2 Å 미만인 메탄, 에탄, 질소, 황화수소, 이산화탄소 등은 구조-I을, 프로판과 옥탄 등은 구조-II을 형성한다 (Sloan, 1990).

메탄 하이드레이트는 저온과 고압 하에서 안정하며, 가스 체적 1 m³의 메탄 하이드레이트는 상온, 상압에서 172 m³의 메탄가스와 0.8 m³의 물로 解離된다 (Okuda, 1996). 메탄을 형성하는 기본적인 원소인 유기탄소 (organic carbon)의 경우 약 1 x 10¹⁹ g이 메탄 하이드레이트 내에 포획되어 있으며, 이는 화석 에너지 (fossil fuel)에 포함된 유기탄소의 2배가 되는 막대한 양이다 (Kvenvolden, 1988). 또한 메탄은 연소시 발생하는 이산화탄소의 양이 현재 사용되고 있는 휘발유에 비하여 0.7배 정도로 매우 환경 친화적이다 (松本 外, 1994). 따라서 영구 동토지역과 심해저 퇴적층에 광범위하게 부존되어 있는 메탄 하이드레이트는 미래의 청정 에너지원으로서 높은 잠재력을 가지고 있다.

메탄 하이드레이트가 지구의 환경 변화에 미치는 영향은 매우 크다. 근래에 들어 지구의 온도가 점차 높아지고 있으며, 이는 메탄 하이드레이트의 안정 영역을 파괴하여 메탄의 해리 (dissociation)와 대기로의 방출을 야기 시킨다. 이로 인하여 지구의 온도는 더욱 더 상승되며, 더욱 더 많은 양의 메탄가스가 방출되고 온실효과 (greenhouse effect)는 가중될 것이다. 즉, 대기권에 포함되어 있는 가스 양의 증가는 지구 온도를 연간 0.006 °C 내지 0.08 °C 정도 상승 시키며, 이 결과 100년 내에 영구 동토지역 역시 녹게 될 것이다 (Engelozos, 1996).

메탄 하이드레이트의 부존을 간접적으로 확인하는 방법에는 탄성과 탐사, 전기 비저항 탐사, MT 탐사, 고해상 해저면 중·자력 탐사 등이 있다. 이중 탄성과 탐사가 가장 효과적이며, 탐사자료 상에서 나타나는 acoustically blanking zone과 이의 하위에 나타나는 BSR (bottom simulating reflector)는 메탄 하이드레이트의 acoustic velocity와 밀도에 기인된 것이다 (Max *et al.*, 1997). 메탄 하이드레이트가 안정하게 퇴적층에 부존하기 위하여서는 필요한 압력과 온도 조건이 충족되어야 하며, 이들 온도, 압력은 메탄에 포함된 다른 가스의 종류와 양 그리고 지층수의 염도 등에 영향을 받는다 (Sloan, 1990; 松本 外, 1994; Maekawa *et al.*, 1995; Engelozos, 1996). 메탄 하이드레이트의 부존 여부를 파악하기 위하여 안정 영역에 대한 규명이 필수적이며, 이를 위하여 온도, 압력 및 지온 구배 (geothermal gradient) 자료가 요구된다. 우리

나라 해역에서의 메탄 하이드레이트 부존 가능성 규명을 위한 물리탐사와 수온 및 압력자료 획득을 위한 조사가 포항 남동쪽 약 200 km 해상에서 수행되었다. 탄성과 탐사자료 상에서 acoustically blanking zone과 가스의 seepage로 판단되는 징후를 확인하였다. 또한 획득된 자료를 이용하여 분석한 결과 전기한 이상 징후가 나타나는 퇴적층을 포함 수심 약 300 m 이하에 분포된 퇴적층에는 메탄 하이드레이트가 안정하게 부존될 수 있는 물리적 조건 (온도, 압력)을 충족하고 있으며, 메탄 하이드레이트 안정영역의 하한은 해저 면에서 약 600 m 깊이에 위치하는 것으로 밝혀졌다.

메탄 하이드레이트를 인공적으로 합성하고 이들이 형성되고 해리되는 온도와 압력 조건을 규명하는 것은 자연 상태에서 메탄 하이드레이트의 부존 여부와 부존 가능지역에 대한 파악은 물론 천연가스의 개발과 수송 시 발생하는 문제점을 해결하기 위해서도 매우 중요하다. 또한 이러한 실험 결과를 응용할 경우 향후 이산화탄소 등 지구 환경 오염원을 지하에 하이드레이트 상태로 저장할 수 있을 것으로 판단된다. 순수한 물에서 메탄 하이드레이트가 형성되고 해리되는 압력은 온도가 높을수록 증가한다. 즉, 메탄 하이드레이트의 평형 조건은 274.4 °K (= 1.25 °C)에서 2410 Kpa, 291.1 °K (= 17.95 °C)에서 19050 Kpa로 측정되었다. 구조-II를 형성하는 부탄 하이드레이트의 경우 메탄 보다 훨씬 낮은 압력에서 형성과 해리가 되며, 평형 조건은 275.3 °K (= 2.15 °C)에서 199.9 Kpa, 277.6 °K (= 4.45 °C)에서 401.3 Kpa이다.

2. 메탄 하이드레이트의 부존 가능성

2.1. 메탄 하이드레이트 탐사

우리 나라 해역에서의 메탄 하이드레이트 부존 가능성 규명을 위하여 한국자원연구소 탐해-2호를 이용 포항에서 남동쪽으로 약 200 km 떨어진 해역에서 약 400 L-km의 물리탐사 수행을 수행하였다 (Fig. 2). 연구지역은 북동 남서 방향을 갖는 쇄설성 퇴적암으로 이루어진 신생대 퇴적분지에 위치하고 있으며, 수심은 북동쪽으로 가면서 깊어진다. 탐사는 메탄 하이드레이트의 부존을 간접적으로 지시하는 acoustically blanking zone과 BSR의 확인을 목적으로 하였으며, 과거 pock mark가 발견된 지역을 중심으로 대륙사면이 잘 발달된 지역을 택하여 수행하였다. 탐사지역의 수심은 약 700 m에서 1500 m에 달한다.

탐사는 air-gun seismic system, sub-bottom profiler 및 multi-beam을 이용하여 북동-남서 방향의 측선 6개와 북서-남동 방향의 측선 5개 등 총 11개 측선에 대하여 실시하였다. 북동-남서 측선의 경우 측선 간 간격은 2 km로 하였으며, 북서-남동 방향 측선의 간격은 8 km로 설정하였다. 탐해-2호의 속도를 시간 당 평균 5 knot로하여 탐사를 수행하였으며, positioning을 위해서는 Furuno G-80 GPS Receiver와 Simrad ECDIS SDN 60을 이용하였다.

단채널 탄성과 탐사자료 취득 시 수신 장치는 선미 좌현 후방 250 m 예인하였고, 에어건 (air gun)은 선미 중우현 50 m 후방에 설치하였다. 수신 장치는 Benthose MESH200P Hydrophone Array를 사용하였으며, active section 길이는 30m, AQ-1 Hydrophone Cartridge 수신소자가 200 개 병렬로 연결된 고감도의 심해저 탐사용 수신기를 사용하였으며, 주파수 응답은 0.3 Hz - 3 KHz이다. 음파발생 장치는 Bolt 1900LL Air Gun을 사용하였으며, 용량은 북서 - 남동 측선의 경우 290 inch², 남서 - 북동 측선의 경우 90 inch² 를 적용하였다. 음원 발생장치는 Hamworthy

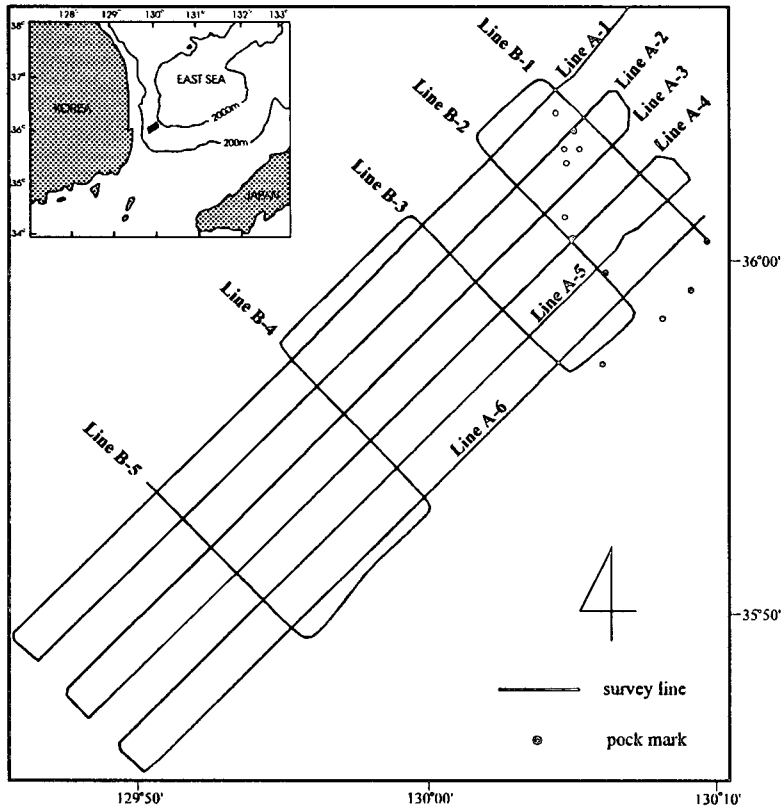


Figure 2. Study area and survey lines.

Marine 3TH90W100B Air Compressor을 사용하였으며, 압축 공기의 압력은 2000 PSI로 하여 5초 간격으로 발사하였다. 기록 장치는 EPC 9802 Thermal Graphic Recorder, Krohn-Hite 3700 Band Pass Filter, Technics XR-2000R Analog Magnetic Tape Recorder를 사용하여 동시에 기록하였다. 기록 시 filter의 설정은 20 Hz - 200 Hz로 하였으며, 자기 테이프 (magnetic tape)에 analog로 수록된 자료를 실내에서 digital 자료로 전환하여 전산처리가 가능케 하였다.

전산처리 장치는 영국 GeoAcoustic SE881 Sonar Enhancement Work Station이며, 사용된 software는 version 3.5이다. 탐사자료 전산처리는 analog 자기 테이프에 수록된 탄성과 신호를 A/D converter를 이용하여 트레이스 당 4초를 1ms 간격으로 표본화하여 digital 자료로 전환하였으며, 아래와 같은 자료처리 과정을 통해 최종 해저지층 단면을 완성하였다 ; Gain (Base, TVG) Recovery, Contrast Stretching - Gamma Correction, Rectification, Swell/Wave Compensation, Band Pass Digital Filtering, Long Multiple Suppression, DC Component Removal, Water Column Removal, Single Channel Stacking.

상기한 과정을 통하여 취득되고 처리된 자료의 질은 양호하였으며, 단면상에서 acoustically blanking zone과 가스의 seepage로 판단되는 징후를 확인하였다. 따라서 메탄 하이드레이트의 정확한 부존 여부를 판단하기 위하여서는 향후 정밀탐사를 수행하고 AVO 또는 velocity analysis의 수행이 요구된다.

2.2. 메탄 하이드레이트의 안정 영역과 부존 가능성

탄성과 탐사자료 상에서 acoustically blanking zone, 강한 반사면, 가스로 충전된 퇴적층과 가스의 seepage 현상이 발견되었다 하더라도 메탄 하이드레이트가 부존되었다고 단정할 수는 없다. 메탄 하이드레이트의 경우 특정한 온도와 압력 조건 하에서만 안정하게 존재할 수 있다. 이러한 물리적인 조건을 규명하기 위하여 다중 채널 음향 측심기를 이용하여 탐사지역의 압력을 지시하는 수심을 측정하였으며, 이때 이용된 장비는 다음과 같다 ; Simrad EM12/EM950 Transducer & Receiver, Transceiver Unit, Bottom Detect Unit (BDU), Operator Unit (OPU), Merlin (data logging system), Neptune (data processing system), IRAP (data presentation system). 대부분의 해양탐사 장비와 같이 다중 채널 음향 측심기 역시 전기 에너지를 음파 에너지로 변환시키는 transducer를 이용 음파를 발생시킨다. 발생된 음파는 물을 통과하여 해저면의 특성에 따라 여러 방향으로 반사된 후 음향 측심기의 수신기 (transceiver)에 도달되어 음파 에너지가 다시 전기 에너지로 전환되어 해저면의 발달 상태가 기록되게 된다. 따라서 자료 취득과 처리 시 Neptune이라는 소프트웨어를 이용하여 자료 왜곡 요인에 대한 매개변수들인 rolling, pitching, yawing, positioning, tide, heaving, sound velocity 등의 보정을 행하였다. 연구지역의 경우 남쪽에서 북동쪽으로 가면서 수심이 점차 깊어진다.

그밖에 탐사지역에서의 메탄 하이드레이트 안정영역 규명을 위해 북위 36° 05.5832', 동경 130° 06.2636' 지점에서 수심에 따른 수온을 측정하였다. 이때 이용된 장비는 투하식 XBT probe (expendable bathythermograph)로 해수에 투하되는 탐지기 (probe), 탐지기를 투하하고 탐지기와 기록장치를 전기적으로 연결해 주는 투하기 (launcher)와 자료의 기록과 보관, 처리 및 전송 등을 수행하는 단말기 (XBT PC)로 구성되어 있다. 측정 결과 천부에서는 수온이 급격히 하강하나, 수심 약 200 m에서 해저면까지 구간에서는 이하 깊이에서는 아주 미약하게 감소를 한다. 수심 1460.4 m의 해저면에서 최저 수온은 0.128 °C로 측정되었다. 지온 구배 (geothermal gradient)는 탐사지역에서 남쪽으로 얼마 떨어지지 않은 곳에 시추된 고래 1-1공의 값 (3.1 °C/100 m)을 이용하였다.

탐사와 시추자료로부터 획득된 온도, 압력 (수심) 및 지온 구배 값과 기존 발표된 메탄 하이드레이트의 phase boundary를 도표에 plotting한 결과, 탐사 지역의 경우 수심 약 300 m 이하에 분포된 퇴적층에서는 메탄 하이드레이트가 안정하게 부존될 수 있는 조건을 충족하고 있으며, 안정영역의 하한은 해저면으로부터 약 600 m에 위치하는 것으로 규명되었다 (Fig. 3). 탄성과 탐사자료 상에서 acoustically blanking zone과 가스의 seepage 현상으로 판단되는 징후가 확인된 퇴적층에서는 메탄 하이드레이트가 안정하게 부존될 수 있는 물리적 조건이 충족되는 것으로 해석되었다 (Fig. 3).

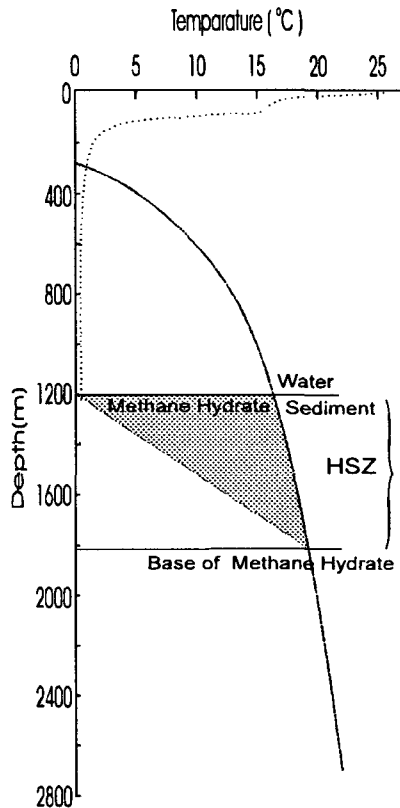


Figure 3. Methane hydrate stability zone in the study area. The stability curve of methane hydrate is based on Field and Kvenvolden (1985).

— : Gas hydrate phase boundary (stability curve of methane hydrate)
 - - - - : Geothermal gradient, · · · · : Hydrothermal gradient

3. 메탄 및 프로판 하이드레이트의 형성 및 평형 조건

3.1. 실험장치

메탄과 프로판 하이드레이트의 형성과 평형 조건 실험을 위하여 사용된 기기는 크게 하이드레이트를 형성시키고 해리시키는 고압용 반응 cell (high pressure hydrate cell)과 주변 기기로 구성되어 있다 (Fig. 4). 고압용 cell은 316 stainless steel로 제작되었고 부피는 56.52 cc이며, 온도가 조절되는 수조 (temperature controlled water bath) 내에 놓인다. 하이드레이트가 형성되고 해리되는 현상을 관찰할 수 있도록 cell의 앞과 뒤에 sapphire glass를 설치하였다. 이 때 사용된 sapphire glass의 크기는 직경이 4 cm이고 두께는 1.5 cm로 허용 압력은 30 Mpa이다. 가스 cylinder에서 나온 가스의 불순물을 제거하기 위해서 line filter를 설치하였고 역류를 방지하기 위해 check valve를 설치하였다.

가스 하이드레이트의 형성을 촉진시키기 위해서는 물과 가스의 접촉면을 증가시켜야 한다. 이를 위하여 magnetic bar를 사용 물과 가스를 혼합하였다. Cell을 원하는 온도로 유지시키기 위해 저온·향온 순환수조를 이용하였다. 셀 안의 온도는 thermocouple을 이용하여 측정되었으며, thermocouple은 오차가 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 인 수은 온도계를 이용하여 보정 하였다. 이때 측정되는 온도의 오차는 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 이다. 압력의 측정을 위하여 40 Mpa까지 측정 가능한 heise gauge를 이용하였으며, 오차는 ± 50 Kpa이다. Cell의 압력은 hand pump를 사용하여 조절하였다.

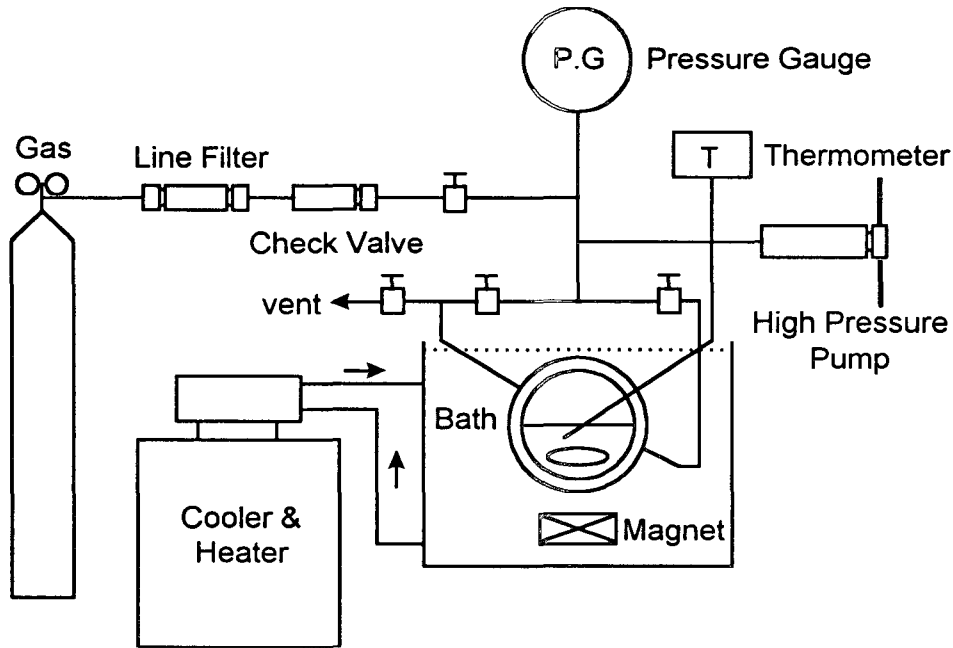


Figure 4. Schematic diagram of experimental apparatus for the determination of phase equilibrium condition of gas hydrate.

3.2. 실험 방법

가스 하이드레이트 실험을 상평형 (phase equilibrium) 관점에서 볼 때 주어진 온도에서 형성 압력과 해리 압력이 서로 같아야 한다. 그러나 가스와 물이 결합하여 고체인 가스 하이드레이트가 형성되는 현상은 실험적으로나 이론적으로 복잡한 양상을 나타내기 때문에 가스 하이드레이트의 형성 조건을 정확하게 구하기가 힘들고 재현성이 있는 해리 조건과 다소 차이를 나타낸다. 평형 조건을 규명하는 실험 방법으로는 등온실험, 등압실험 및 등적실험을 들 수 있다. 본 실험에서는 등온실험으로 형성된 메탄과 프로판 하이드레이트가 완전히 해리된 상태를 평형 상태라고 규정하였으며, 실험 방법은 다음과 같다; 반응 cell의 조건을 원하는 온도에서 하이드레이트가 형성할 수 있는 압력 보다 높은 압력을 유지시킨다. 하이드레이트가 형성된 후에는 온도를 일정하게 유지하면서 압력을 서서히 감소시킴으로써 하이드레이트의 평형 조건을 구한다. 이 때 급격한 압력의 변화는 온도를 하강시키므로 주의하여야 한다.

본 실험에서는 순수한 물 (증류수)과 Scientific Gas Production Co.에서 생산된 순도가 99.97%인 메탄가스와 PRAXAIR Co.의 순도 99.5%인 프로판가스를 사용하였다. 우리 나라 동해의 경우 최대 수심은 약 2000 m에 달하며, 이는 20000 Kpa의 압력을 의미하는 것이다. 따라서 메탄 하이드레이트의 경우 cell의 온도를 1.25 °C에서 17.95 °C까지 약 2 °C 간격으로 변화시키며 최대 19050 Kpa까지의 평형 압력을 구하였다. 프로판 하이드레이트의 경우는 4가지 온도 조건하에서 평형 조건을 구하였다. 또한 자체적으로 제작된 장치의 정밀도와 실험 결과에 대한 검증을 위하여 본 실험을 통하여 얻어진 결과를 지금까지 외국에서 발표된 기존의 실험 결과와 비교하였다.

3.3. 실험 과정

메탄과 프로판 하이드레이트의 형성과 해리 조건 측정을 위한 실험은 아래와 같은 순서로 진행되었다 ;

- Cell을 물이 담긴 저온·항온 순환수조에 고정시키고 불순물을 제거하기 위하여 가스를 주입한 후, cell에 증류수를 주입하였다.
- 항온 수조를 이용하여 실험하고자 하는 온도를 유지하면서 하이드레이트가 형성될 수 있다고 예측되는 압력보다 높은 압력으로 가스를 주입하였다.
- 하이드레이트는 가스와 물의 접촉면에서 형성되는데 이러한 접촉면을 증가시키기 위해 magnetic stirrer를 사용하였다. 최초의 하이드레이트는 마치 안개가 피어나는 것처럼 형성된 후, 물과 가스의 경계면으로 상승하여 서로 결합해서 하이드레이트층을 이루게 된다. 하이드레이트가 형성되면 가스가 갇히게 됨에 따라 압력이 감소하게 된다.
- 형성된 하이드레이트층이 충분히 성장할 때까지 기다린 후, hand pump를 이용하여 압력을 서서히 감소시켰다.
- 압력을 감소시킨 후 cell 전체가 평형 상태에 도달할 수 있도록 충분한 시간을 두고 관찰하여야 하였다. 평형 상태에 도달하기 이전에 압력을 다시 감소시키면 해리 압력이 실제의 압력보다 낮게 측정되는 오류를 범하게 된다.
- 위와 같은 방법을 하이드레이트가 완전히 해리될 때까지 반복하여, 일정한 온도에서 하이드레이트의 해리 압력을 측정하였다.

3.4. 실험 결과 및 토의

반응 cell의 온도를 약 2 °C 간격으로 변화시키면서 순수한 물에서 메탄 하이드레이트가 형성된 후, 해리되는 온도와 압력 조건을 구하였으며, 각각의 온도 조건하에서 평형 압력은 Table 1과 같다. 본 실험에서 얻어진 메탄 하이드레이트의 평형 조건은 기존 외국에서 발표된 실험 결과와 잘 일치하므로 이번 실험에 사용된 기기와 방법이 타당함을 알 수 있었다 (Fig. 5a).

Table 1. Experimental equilibrium conditions of methane hydrate.

| Temperature | | Pressure (Kpa) |
|-------------|-------|-------------------|
| (°K) | (°C) | |
| 274.4 | 1.25 | 2410 |
| 276.5 | 3.35 | 3640 |
| 278.3 | 5.15 | 4425 |
| 280.2 | 7.05 | 5470 |
| 282.2 | 9.05 | 6760 |
| 284.2 | 11.05 | 8350 |
| 286.2 | 13.05 | 10550 |
| 288.1 | 14.95 | 13150 |
| 290.2 | 17.05 | 16750 |
| 291.1 | 17.95 | 19050 |

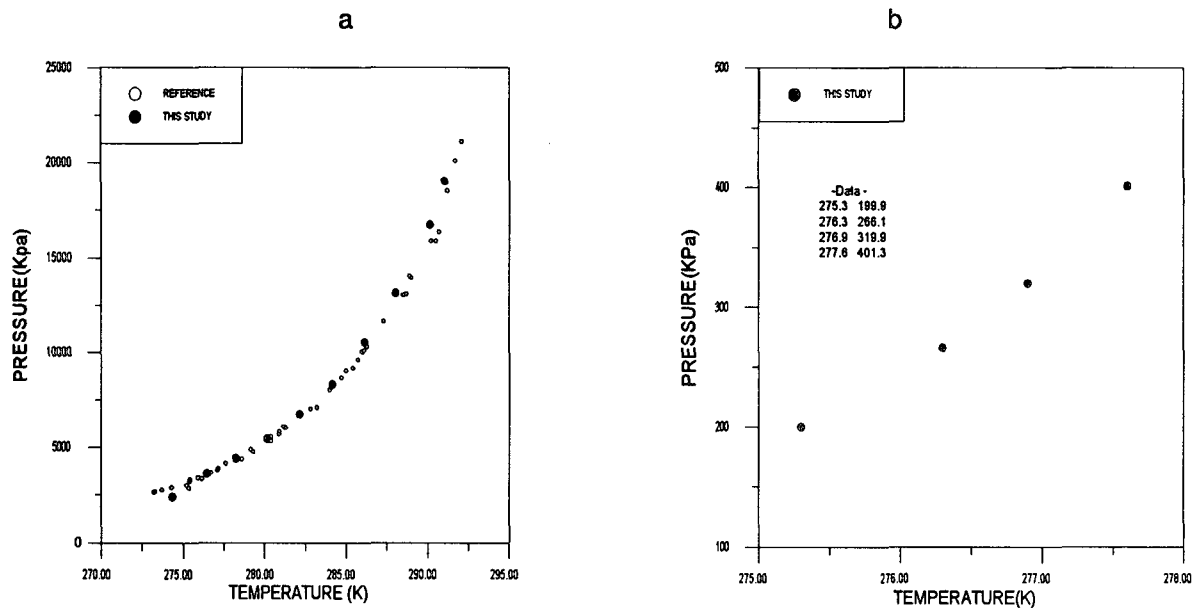


Figure 5. The experimental equilibrium condition of gas hydrate in pure water
a : methane hydrate, b: propane hydrate

구조-II를 형성하는 프로판 하이드레이트의 평형 조건 파악을 위한 실험에서 역시 순수한 물을 이용하였으며, 4가지 온도 조건하에서 평형 압력을 구하였다. Figure 5에서 나타난 바와 같이 동일한 온도 조건하에서 프로판 하이드레이트는 메탄 하이드레이트에 비해 상당히 낮은 압력에서 형성되고 해리된다.

지층수의 염도와 메탄에 포함된 다른 가스의 종류와 양이 in-situ 메탄 하이드레이트의 평형조건에 영향을 미친다 (Kobayashi *et al.*, 1951; Sloan, 1990; 松本 外, 1994; Maekawa, 1995; Engelozos, 1996). 따라서 향후에는 용액의 농도를 변화시키며 다양한 혼합가스를 이용한 평형조건 규명 실험이 요구된다.

4. 결론

우리 나라 해역에서 메탄 하이드레이트의 부존 가능성과 안정영역 규명을 위한 탐사 결과 acoustically blanking zone과 seepage 현상으로 판단되는 징후를 확인하였다. 또한 탐사지역에서의 메탄 하이드레이트 안정 영역을 분석한 결과, 전기한 징후가 나타나는 퇴적층을 포함 수심 약 300m 이하에 분포된 퇴적층에서는 메탄 하이드레이트가 안정하게 부존될 수 있으며, 안정영역의 하한은 해저면으로부터 약 600 m 깊이에 위치하는 것으로 밝혀졌다.

가스 하이드레이트의 평형 조건 규명을 위하여 실험 기기를 제작하였으며, 이를 이용 메탄과 프로판 하이드레이트를 순수한 물에서 인공적으로 합성하고 각각의 평형 압력과 온도를 측정하였다. 반응 cell의 온도를 1.25 °C에서 17.95 °C까지 약 2 °C 간격으로 높이면서 10가지 온도 조건하에서 구조-I을 형성하는 메탄 하이드레이트의 해리 압력을 측정하였다. 본 실험 결과에 의하면 해리 압력은 온도가 높아짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 또한 이 평형 조건을 Sloan (1990)

에 수록된 많은 연구자들에 의하여 수행된 결과와 비교한 결과 잘 일치하였다. 4.45 °C까지 4가지 온도 조건하에서 프로판 하이드레이트의 해리 압력을 구하였으며, 실험 결과 동일한 온도 조건하에서 프로판 하이드레이트는 메탄 하이드레이트에 비해 상당히 낮은 압력에서 해리되는 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

- 松本 良, 奥田義久, 青木 豊, 1994, 메탄하이드레이트 21세기의巨大天然가스資源, 日經サイエンス社, 東京, 253 p.
- Engelozos, P., 1996, Fundamentals and technological applications of gas hydrates, In proceedings of Canada-Japan Joint Science and technology Workshop on gas hydrate studies, pp. 55-82.
- Field, M. E. and Sloan, E. D., 1985, Gas hydrates on the northern California continental margin, *Geology*, 13, pp. 513-520.
- GSJ, 1995, Courtesy of Geological Survey of Japan.
- Kvenvolden, K. A., 1988, Methane hydrates - a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?, *Chem. Geol.* 71, pp. 41-51.
- Max, M. D., Pellanbarg, R. E. and Hurdle, B. G., 1997, Methane hydrate, A special clathrate : Its attributes and potential, Report of US Naval Research Laboratory, NRL/MR/6101--97-7926, Washington, 74p.
- Maekawa, T., Itoh, S., Sakata, S., Igari, S. and Imai, N., 1995, Pressure and temperature conditions for methane hydrate dissociation in sodium chloride solutions, *Geochem. Jour.* 29, pp. 325-329.
- Okuda, Y., 1996, Exploration research on gas hydrates in Japan, In proceedings of 5th Petroleum exploration and development symposium, pp. 62-98
- Sloan, E. D., 1990, Clathrate hydrate of natural gases, Marcel Dekker Inc., New York, 641p.
- Yousif, M. H., 1994, The kinetics of hydrate formation, SPE, 28479, pp. 169-177.