

## 메탄 하이드레이트의 생산 기술 현황과 환경에 미치는 영향

### Methane hydrate : The state of the art of production technologies and environmental issues

장 승 룡 (Seungyong Chang)

#### 요 약

메탄 하이드레이트는 메탄가스를 포함하고 있는 얼음 같은 고체 상태 물질이며 물분자들이 가스 분자들을 둘러싸고 있는 clathrate 혼합물이다. 낮은 온도와 높은 압력의 환경에서 탄화수소 가스는 하이드레이트를 형성하며 이러한 형성 조건으로 인하여 극지방의 육성 퇴적층과 약 300 m 이상 수심이 깊은 해저 퇴적층 내에서 발견된다. 메탄 하이드레이트의 매장량은 정확히 예측하기는 어려우나 그 양은 엄청날 것으로 예상되며, 이와 같은 이유로 향후 천연가스 공급원으로서 주된 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 그러나 그 생산 기술은 아직도 취약하며, 또한 메탄 하이드레이트의 해리에 의하여 발생하는 대기 온난화 문제도 심각한 환경 문제로서 대두되고 있다. 이와 같은 관점에서 본 논문에서는 메탄 하이드레이트 생산 기술 현황과 환경에 미치는 영향 등을 분석하여 메탄 하이드레이트의 실체와 연구 방향을 밝히고자 한다.

**주요어 :** 메탄 하이드레이트, 대기 온난화

**Abstract :** Methane hydrate is an ice-like solid material and it has a structure which water molecules enclose gas molecules. For low temperature and high pressure, hydrocarbon gas forms hydrate and due to this condition, it is existed in the arctic region or deep sea. Presently, the amount of methane hydrate is unpredictable, but it is assumed that the amount will be enormous. For this reason, it is expected that it will play a major role as natural gas resources in the future. However, the production technologies are stayed on the low level and the economical technology was not developed yet. Also, the emission of natural gas from methane hydrate will cause global warming and thus it is considered as a critical environmental problem. In this paper, the state of the art of the production technologies and environmental effects of methane hydrate were summarized.

**Key words :** methane hydrate, global warming

#### 서 론

메탄 하이드레이트는 주로 해저와 극지방에 존재하며 메탄가스를 포함하고 있는 얼음 같은 고체 상태 물질이며 물분자들이 가스 분자들을 둘러싸고 있는 clathrate 혼합물이다 (McGuire, 1982) (그림 1).

낮은 온도와 높은 압력의 환경에서 탄화수소 가스는 하이드레이트를 형성하며 이러한 형성 조건으로 인하여 약 300 m 이상 수심이 깊은 해저와 극지방의 퇴적층 내에서 발견된다.

하이드레이트 내부에 함유된 메탄은 유기물이 풍부한 퇴적물내의 미생물 작용에 의해 생성되거나 또는 더욱 깊은 심부의 메탄 가스로부터 이동한 것이다. 하이드레이트 층은 수백 미터의 두께를 가질 수 있으며 때때로 자유 가스 (Free Gas)가 하이드레이트 층 하위에 발달된 층에서 발견된다.

하이드레이트의 유형은 다음과 같이 분류할 수 있다.

1) **Disseminated Type** : 이 type의 하이드레이트는 멕시코만의 Orea와 Mississippi Canyon 지역에서 발견되었다.

2) **Nodular Type** : 이 type의 하이드레이트는 5 cm까지의 지름을 가지며 Green Canyon과 멕시코 만 등에서 발견되었다.

3) **Layered Type** : 이러한 type의 하이드레이트는 Blake-bahama Ridge에서 회수된 암주와 같이 얇은 퇴적층에 의하여 분리되어지며 극지방과 해저 모두에서 형성될 수 있다.

4) **Massive Type** : 이것은 3~4 cm의 두께를 가지며 95% 이상의 하이드레이트와 5% 이하의 퇴적물을 포함한다.

자연 발생적인 하이드레이트에 저장된 천연 가스량은 약  $10^{16}$  kg 이상으로 예측되며 메탄하이드레이트의 전체 체적은  $10^{14}$  m<sup>3</sup>을 초과한다. 만약 전 세계의 모든 하이드레이트를 지구 표면에 고르게 분배한다면 그 고체 층은 20 cm 이상의 두께가 될 것이다. 모든 하이드레이트의 분해 시 30 m의 메탄가스 층이 생성되고 지구 평균 반지름은 8 cm 감소할 것이며 지역적으로 퇴적암의 침하도 110~160 m에 달할 것이다.

최근 메탄하이드레이트에 대한 관심이 크게 증가하고 있는데, 이러한 관심의 증가는 다음과 같은 이유들 때문이다.

1) 청정에너지인 천연가스 공급을 증가시켜야 할 필요성 인식

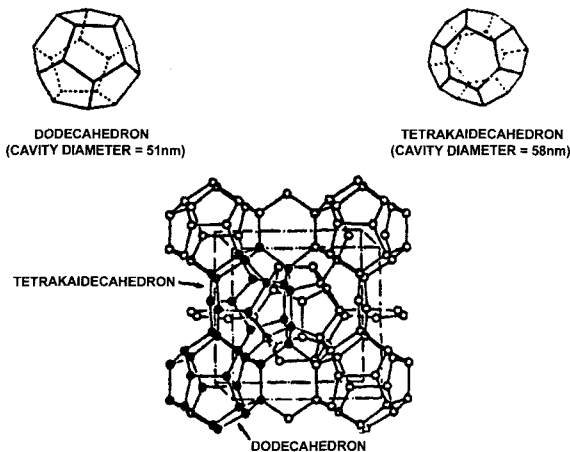


Fig. 1. Lattice structure of methane hydrate.

증가

2) 석유와 천연가스 생산이 더욱 열악한 지역으로 이동함에 따라 유정/가스정과 파이프라인의 막힘, 또는 유전/가스전 지역 침하에 메탄하이드레이트가 주된 원인이 입증

3) 최근 개발된 생산 및 수송 설비로 인하여 하이드레이트 가스의 경제적인 생산 가능성 증대

4) 최근 Kyoto 회의에서 증폭된 지구 기후 온난화에 대한 메탄 하이드레이트의 역할을 이해할 필요성 대두

5) 일본과 인도의 하이드레이트 개발 사업과 연구 개발 경비의 증가로 인하여 가까운 장래에 경제적인 생산 가능성 증대

일반적으로 하이드레이트는 파이프라인 내에 달라붙거나 조업 활동 시 기타 관련 문제점들을 발생시키므로 파이프라인과 천연가스 수송 시 조업자들에게 중대한 고민거리로 생각되었다. 그러나 본 글에서 기술하고자 하는 방향은 이것과 조성은 동일하나 천연가스의 보고로서 사용될 새로운 종류의 천연가스 자원 측면이다.

그러나 그 생산 기술은 아직도 취약하며 경제적인 생산 기술은 개발되지 못하고 있는 실정이다. 또한 메탄 하이드레이트의 해리에 의해 야기되는 대기 온난화 문제도 심각한 환경 문제로서 대두되고 있다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 메탄 하이드레이트 생산 기술 현황과 환경에 미치는 영향 등을 분석하여 메탄하이드레이트의 실체와 연구 방향을 밝히고자 한다.

### 메탄 하이드레이트 매장량

메탄 하이드레이트는 극지방과 해저 퇴적층에 광범위하게 분포되어 있으므로 이들은 향후 잠재적인 에너지 자원으로 고려되고 있다. 전세계 메탄하이드레이트 저류층 내에 포함된 메탄 양은 극지방의 경우 약  $14 \sim 34,000 \times 10^{12} \text{m}^3$ 이며 해저 퇴적층의 경우  $3,100 \sim 7,600,000 \times 10^{12} \text{m}^3$  정도로 예측된다. 그러나 그 예측은 상당히 가변적이며 전반적인 세계 하이드레이트 저류층 내의 메탄가스는 현재 약  $2.0 \times 10^{16} \text{m}^3$  정도로 예측하고 있다 (Kvenvolden,

1993). 이러한 예측이 타당하다면 하이드레이트 가스량은 약  $2.5 \times 10^{14} \text{m}^3$ 로 예측되는 회수 가능한 기존의 전체 메탄가스 자원의 거의 100배에 이를 것으로 전망된다 (Masters *et al.*, 1991).

그러나 이러한 메탄하이드레이트 가스의 잠재성을 입증하기 위해서는 지속적인 연구 개발이 필요하며 경제적인 생산까지 상당한 문제점들이 존재할 수 있다.

## 생산 기술 및 모델

### 1. 생산 기술 (Recovery Method)

비록 하이드레이트가 심해저 퇴적층과 극지방에 부존되어 있다는 것은 알려져 있지만, 하이드레이트의 경제적인 생산 기술은 거의 알려져 있지 않다. 현재까지 하이드레이트에서 가스 생산을 위해 제안된 방법들은 다음과 같이 현장에서 메탄 하이드레이트를 분해시키는 것이다.

#### 1) 열자극법 (Thermal Stimulation)

뜨거운 물 또는 증기를 이용하여 하이드레이트 평형 온도 이상으로 저류층을 가열하여 하이드레이트 결합을 분해시키고 가스를 방출시킨

#### 2) 억제제 주입법 (Inhibitor Injection)

하이드레이트에 인접한 액상에 메탄올 또는 글리콜 같은 물질을 주입하여 저류층 온도와 압력 이상으로 하이드레이트 평형 조건을 대체시킨

#### 3) 감압법 (Depressurization)

하이드레이트가 분해되도록 평형 조건 이하로 하이드레이트 표면의 압력 감소

#### 4) 염분 파쇄법 (Salt-Frac)

일반적으로 하이드레이트 저류층은 하이드레이트와 고화되지 않은 모래와 자갈들로 구성되어 있다. 이러한 저류층의 경우 암석층은 수압 파쇄 시 주입된 촉진 물질(proppant) 주위에서 쉽게 붕괴하므로 균열이 유지될 수 없다. 만약 균열이 개방된 채로 유지된다 해도 파쇄 유체와 하이드레이트 분해에서 방출된 수분이 결합하여 균열을 막으므로 가스 생산을 크게 감소시킨다. 그러므로 하이드레이트 저류층의 파쇄 목적은 촉진제에 의해 암석에 개방된 균열을 생성하는 것이 아니라 얼음으로 인한 막힘 현상이 없는 높은 투수율의 유동 경로를 암석 매체에 유지하는 것이다.

염분파쇄법은 충분한 염분을 이용하여 균열 주위의 얼음 또는 하이드레이트를 녹이고 유정 수명 동안 재 응고를 막을 수 있도록 설계된다. 만약 이것이 가능하다면 일반적인 하이드레이트 저류층의 투수율은 분해 가스에 대한 훌륭한 유동 경로를 공급하기에 충분하다. 하이드레이트 저류층의 수압 파쇄시 가장 좋은 유체는 점성력을 가진 촉진제로서 각각  $-83^\circ\text{C}$ 와  $-55^\circ\text{C}$ 의 낮은 응고점을 가진  $\text{CaBr}_2$  또는  $\text{CaCl}_2$  소금물과 polymer viscosifier의 혼합체를 사용한다. 염분 파쇄법에서 이 유체는 지상에서 혼합되어 유정 안으로 주입되며 이러한 높은 염도는 하이드레이트에서 방출된 물에 의해 상당히 희석된다 해도 유동 경로를 재 응고로부터 막고 균열 자극이 오랫동안 효과적으로 남을 수 있는 역할을 한다.

열 자극법의 주요 단점은 분해 발생 전에 상당한 열이 주입되어 야만 하며 따라서 상당한 양의 열이 하이드레이트를 포함하지 않은 층으로 소실되므로 주입 열량의 약 10~75%가 소실된다. 연구 결과 열 자극법은 경제적 타당성을 위하여 65~120°C의 주입수 온도에서 하이드레이트 저류층은 최소한 15%의 공극률과 7.5 m 두께를 가져야 한다는 것이 밝혀졌다 (Deka and Barnwal).

억제제를 사용한 방법도 기술적으로는 가능성을 보여주었으나 역시 비효율적이므로 이 가운데 감압법이 가장 경제적인 회수 방법으로 고려되고 있다 (Collett, 1998). 서부 시베리아 분지의 북부 지역에 있는 Messoyakha 가스전은 실제 현장의 메탄하이드레이트로부터 메탄 가스를 생산한 예로서 널리 인용된다 (Kolodenznyi and Arshinov, 1972).

**2. 생산 모델 (Recovery Model)**

**1) Frontal Sweep Model**

그림 2는 온수를 중심의 주입정으로 주입하고 이에 따라 분해된 하이드레이트 가스가 주변 생산정들로 흐르는 Frontal Sweep 생산 시스템의 평면도이다 (McGuire, 1982).

이 시스템은 중질유의 증진 회수 시 사용되는 증기 침수법과 유사하며 생산 장비와 사용되는 저류층 분석 기술도 매우 유사하다. 이 모델은 열 전달 모델로서 열 주입, 하이드레이트 지역의 상, 하부 지역으로의 열 손실, 저류층 온도를 하이드레이트 분해 온도로부터 유체 주입 온도로 상승시키기 위하여 필요한 잠열 사이의 시간 종속적인 에너지 균형을 나타낸다 (McGuire, 1981; Marx and Langenheim).

이 모델의 사용 시 필요한 가정들은 다음과 같다.

- 1) 효율적인 침투를 위한 충분한 현장 투수율이 하이드레이트 지역 내에 존재한다.
- 2) 분해 전방에서 분해되어 생산된 가스는 생산정으로 이동함에 따라 하이드레이트로 재결합되지 않는다.

이 모델은 생산량의 최대 경계치를 나타내기 때문에 하이드레이트 가스의 최대 가능 생산량을 예측할 수 있다.

**2) Fracture Flow Model**

그림 3은 수압 파쇄(Hydraulic Fracturing)에 의하여 단일 생산

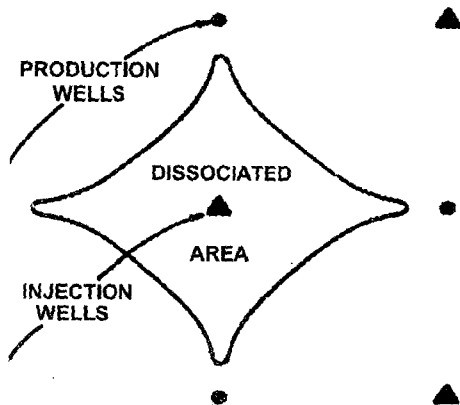


Fig. 2. Frontal-Sweep production system (McGuire, 1982).

정으로 연결되어진 주입정으로 온수를 주입하는 Fracture Flow 생산 시스템의 평면도이며 이 방법은 하이드레이트에 의한 공극 채널의 막힘으로 인하여 현장 투수율이 매우 낮을 때 하이드레이트 저류층에서 사용 가능한 생산 기술이다.

이 모델은 Frontal Sweep 모델보다 효율성이 낮는데 그 이유는 주입 에너지의 상당 부분이 생산정에서 저류층으로부터 제거되고 손실되기 때문이다. 열 전달 효율은 유정 사이의 유동 경로가 증가함에 따라 감소하며 더 높은 생산수의 온도와 더 낮은 가스 생산량을 초래한다. 이 모델의 주요 변수들은 저류층 두께, 공극률, 주입 온도와 균열 길이 등이다. 이 모델은 하이드레이트 지역의 상, 하위 퇴적층으로의 열 손실을 고려하지 않으므로 그 결과들은 주입 온도에 상당히 둔감하다.

Frontal Sweep 모델의 경우와 같이 열 전달 모델이며 주어진 하이드레이트 저류층을 평가하기 위하여 이 결과들을 사용하기 전에 이 모델의 한계점을 파악하여야 한다. 이 모델은 하이드레이트 가스 생산 시 최소 경계치를 나타내므로 실제 시스템은 더욱 효과적이어야 한다. 그러므로 하이드레이트 지역의 투수율이 높을수록 높은 효율의 Frontal Sweep 모델 결과에 더욱 근접될

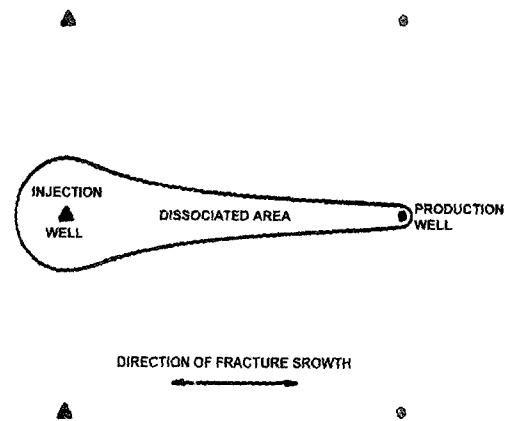


Fig. 3. Fracture-Flow production system (McGuire, 1982).

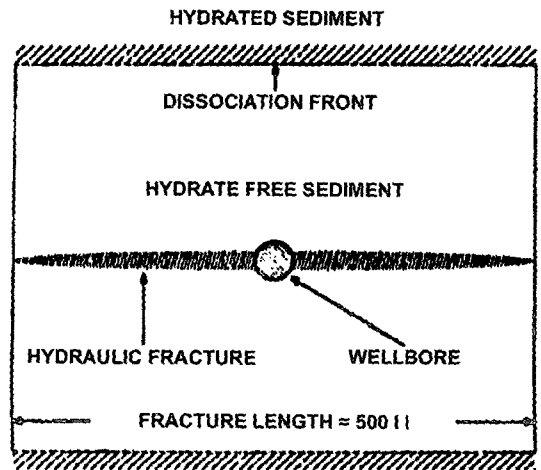


Fig. 4. Decompression model.

것이며 만약 하이드레이트 지역이 불투수층이라면 수압 파쇄가 요구되고 이 경우는 낮은 효율의 Fracture Flow 모델 결과로 근접할 것이다.

3) Depressurization Model

그림 4는 수압 파쇄정에서 정저 압력(Bottomhole Pressure)을 100~200 psia로 감압시켜 생산하는 감압 생산 시스템의 평면도이다 (McGuire, 1982).

메탄하이드레이트는 이러한 낮은 압력에서 불안정하여 분해되므로 주위 퇴적층으로부터 열을 흡수하여 얼음과 자유 가스를 형성한다. 이러한 저압 가스는 유정으로 높은 투수율의 균열을 통하여 이동하고 지상에서 압축되어 고압 가스 수송관으로 파이프라인을 통하여 수송된다.

이 모델은 분해 전방이 균열 외부로부터 하이드레이트 층으로 진행되는 1차원 공극 유동 모델이며 방출된 가스는 분해 전방으로부터 균열 내부로 이동한다 (McGuire, 1981). 생산된 지역의 투수율은 하이드레이트 지역보다 훨씬 높는데 그 이유는 하이드레이트가 얼음과 자유가스로 분해될 때 13% 정도 수축하기 때문이다. 즉 공극 내의 100 μm³의 하이드레이트는 87 μm³의 얼음과 13 μm³의 메탄 가스로 분해되어 공극을 통한 유동 경로를 크게 확장시킨다. 분해 과정은 열이 하이드레이트 저류층의 상, 하부로부터 하이드레이트 저류층으로 전달되는 것보다 훨씬 빨리 발생하므로 단일 조건이다 (McGuire, 1982).

환경에 미치는 영향

하이드레이트의 광범위한 분포와 독특한 물리적, 화학적 특성은 메탄하이드레이트가 많은 지역에 중대한 영향을 줄 수 있음을 보여준다. 메탄하이드레이트의 가장 중요한 환경 영향은 엄청난 양의 메탄가스 방출로 인한 지구 온난화이다.

1. 대기 영향

지구의 대기는 다양한 기능을 수행하며 열 조절과 자외선 흡수는 메탄가스, 이산화탄소, 질소 등의 영향을 받는 두 가지 중요한 대기의 기능이다. 메탄 가스는 이산화탄소보다 수십 배 큰 지구 온난화 효과를 발생시킨다 (Rasmussen, 1989).

대기층 상부의 메탄가스 존재는 두 가지, 명백한 메커니즘에 의하여 자외선을 차단하는 오존층을 파괴시킨다. 메탄가스는 공기보다 가벼우므로 쉽게 성층권으로 상승하며 거기에서 오존과 반응한다. 그리고 오존층의 파괴는 광화학 반응 또는 메탄, 오존과 기타 가스를 결합하는 복잡한 조성의 하이드레이트 형성에 의한 두 가지의 중요한 경로를 따른다.

하이드레이트 내의 하이드레이트 형성 가스들과 물분자들은 광분해되기 쉬우며 -25°C 이하의 온도에서 안정화되는 자유 전자들인 Cl<sup>0</sup>, H<sup>0</sup>, O<sup>0</sup>와 기타 자유 기(radicals) 그리고 다른 이온 기(H<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>) 등과 같은 활성화된 부산물들이 이 과정 중에 형성된다. 이러한 활성화된 산화제와 환원제는 아래와 같은 메커니즘에 따라 오존과 함께 높은 속도로 반응한다 (Makogon et al., 1998).



식 (1), (2), (3), (4)는 메탄의 오존 파괴 메커니즘을 나타내며 식 (5)와 (6)은 냉동제인 (R-11)과 (R-12)의 오존 파괴 과정을 나타낸다. 또한 과산화수소 (OH)도 clathrate 격자를 형성하는데 참여할 수 있는데 물의 광분해에 의하여 생성되며 식 (7)과 같이 오존의 분해를 가속화시킨다.



그러므로 대기권 상층부의 메탄은 오존과 반응 시 자유 수 (Free Water)와 산소 형성 반응에 포함되는 수소를 생성하는 광분해 작용이 발생하기 쉽다. 300 V 정도로 큰 포텐셜 차이는 자유 전자들이 참여하는 전기 화학적 반응의 추진력이며 이에 따른 charge 분리는 얼음 또는 하이드레이트 형성과 분해의 변화 과정 동안 상 경계에서 발생한다. 특히 오존 분해 반응은 식 (8)과 같은 메커니즘에 의하여 진행된다.



이와 같은 메탄의 오존 파괴 과정은 언급한 메탄이 연간 5×10<sup>14</sup> kg 이상 대기 중으로 방출되므로 그 심각성이 크며 이 가운데 5~6×10<sup>13</sup> kg이 하이드레이트 저류층에서 방출된다 (Raynaud, 1988; Makogon, 1993). 더욱이 하이드레이트 저류층 부존 지역의 지진 발생 시 정상 시 보다 10배 이상 많은 메탄가스가 방출되고 1년 평균 기타 모든 에너지 자원에서 방출되는 전체 메탄가

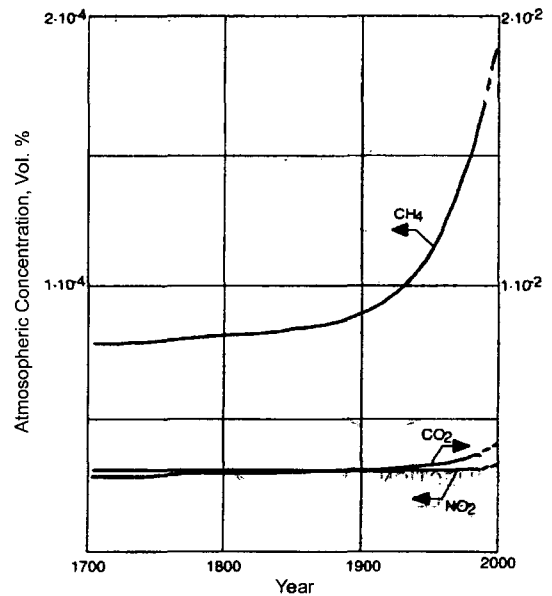


Fig. 5. Atmospheric content of CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO<sub>2</sub>

스 량을 초과할 수 있으며 이러한 엄청난 방출량이 대기에 미치는 영향은 수년동안 지속될 수 있다. 그림 5는 과거 300년 동안 메탄, 이산화탄소와 이산화질소의 대기 중 함량 변화를 나타낸다. 이산화탄소와 이산화질소의 농도는 거의 균일한 속도로 성장하는데 비하여 메탄 함량은 산업 발전기 동안 훨씬 높은 속도로 증가하였다 (Makogon et al., 1998).

**2. 해저면 영향 (Makogon et al., 1998)**

하이드레이트는 하이드레이트 형성 조건에서 충분한 하이드레이트 가스가 존재하는 지역에 안정되게 축적된다. 하이드레이트는 주로 해저에서 발생하며 대개 대륙붕 근처나 해저 경사면에 존재하는 반면 육상에서는 훨씬 지역적으로 제한되어 있는데 그것은 큰 온도 변화, 열 이동과 온도 구배 때문이다. 하이드레이트 층 아래 축적된 자유 가스는 하이드레이트 내에서 이동하여 대기 중으로 빠져나간다. 예로서  $1 \times 10^4 \times 10^6 \text{m}^3$ 의 체적에서 0.2의 하이드레이트 포화 계수를 가지는 경우  $10^8 \text{kg}$ 까지의 메탄이 하이드레이트 저류층에서 방출될 수 있으며 이 양은 대기 중 전체 메탄 함량의 약 5% 정도이다.

해수면이 하강하거나 또는 하이드레이트를 포함한 퇴적층의 온도가 상승 시 해저 하이드레이트 지역은 불안정해지며 하이드레이트가 분해된다. 지난 19,000년 동안 해저 수위는 1,000년 당 25 m까지의 변화 폭으로 주기적으로 변화했으며 그러한 변화 시  $10^{14} \text{kg}$ 까지의 메탄이 가스 하이드레이트 저류층으로부터 대기 중으로 방출되었다. 해저의 하이드레이트 분해는 몇 가지 중요한 문제점을 발생시키는데 하이드레이트 저류층은 종종 경사면에서 발생하므로 분해 시 경사면을 붕괴시키며 이에 따라 거대한 해일인 쓰나미가 해안 지역에 발생하여 재산 파괴를 일으킨다. 또한 해저면을 불안정하게 하여 그 위의 구축된 구조물들의 안전상 문제점들을 발생시킨다.

**연구 개발의 방향과 목표**

메탄 하이드레이트 연구 개발의 최종 목표는 해양 안전과 해저면의 안정성에 대한 메탄 하이드레이트의 잠재적인 위협을 배제시키고 메탄 하이드레이트 가스가 지구 온난화에 미치는 영향을 극소화하면서 청정 연료인 천연가스를 안정적으로 공급 할 수 있도록 하는 것이다. 이것은 다음과 같은 다섯 가지 접근 방법을 통하여 달성될 수 있을 것이다.

**1. 매장량 (How Much?)**

전 세계 에너지 자원으로서 메탄 하이드레이트의 잠재력을 평가하기 위하여 그 에너지 자원의 부존 지역과 물리적 특성 결정

**2. 생산 방법 (How to Produce It?)**

해양과 극지방에 존재하는 하이드레이트 가스의 경제적인 생산을 위하여 필요한 지식과 생산 기술 개발

**3. 영향 평가 (How to Assess Impact?)**

세계 기후 변화에 대한 메탄 하이드레이트의 역할을 정량화 할

수 있는 메탄 하이드레이트 시스템의 동력학적 이해

**4. 조업의 안전성 (How to Ensure Safety?)**

극지방과 해저에서 전통적인 탄화수소물 조업의 안전성에 영향을 주는 메탄 하이드레이트의 잠재적 영향 분석

**5. 해저면 안정성 문제 (How to Ensure Stability?)**

해저 메탄 하이드레이트의 분해에 따라 부존 지역의 퇴적물들이 붕괴할 가능성에 대비하여 이미 설치된 구조물들의 붕괴를 방지할 수 있는 안정성 확보 방안 연구

**결 론**

메탄 하이드레이트는 향후 중요한 에너지 자원의 보고가 될 것으로 전망된다. 그러나 이러한 메탄 하이드레이트에서의 메탄가스의 회수는 그 부존 지역이 매우 광범위하게 분포되어 있고 회수하기 어려운 고체 형태로 존재하기 때문에 여전히 비경제적이다.

메탄 하이드레이트 내에 함유된 메탄 함량은 엄청난 양으로 예측되지만 그 예측량은 매우 가변적이다. 그러나 일반적으로 전 세계의 하이드레이트 가스 량은 알려진 기존 가스 매장량을 훨씬 초과한다.

하이드레이트 가스 회수를 위하여 제안된 방법들은 대개 메탄 하이드레이트를 현장에서 가열 또는 감압에 의하여 분해하는 것이며 다양한 생산 기술 중 가장 경제적으로 타당한 방법은 감압법이다.

메탄 하이드레이트의 정확한 매장량이 거의 알려져 있지 않은 사실에도 불구하고 메탄 하이드레이트는 천연가스의 거대한 보고이며 일본, 인도와 미국의 메탄 하이드레이트 연구들은 이러한 엄청난 자원을 경제적으로 생산 가능한 자원으로 전환하는데 필요한 기술들을 개발할 것으로 기대된다.

하이드레이트 가스는 미래의 주요 에너지 자원으로서 평가받고 있지만 지구 기후, 생태계 등에 미치는 많은 영향들은 하이드레이트 개발 시 신중히 고려되어야 한다.

**참고문헌**

McGuire, P.L., 1982, Recovery of Gas From Hydrate Deposits Using Conventional Technology: paper presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, U.S.A.  
 U.S. Department of Energy, 1998, A Strategy for Methane Hydrates Research & Development, Office of Fossil Energy, U.S. DOE, DOE/FE-0378, Washington DC, U.S.A.  
 Deka, B. and Barnwal, S.K., Gas Hydrate-New Source of Natural Gas, <http://www.sourceindia2.com/cew/cew0497/deka.htm>.  
 Makogon, Y.F., Holste, J.C., and Holditch, S.A., 1998, Implications of Natural Gas Hydrate Deposits for Global Change, paper presented at the International Gas Research Conference, San Diego, U.S.A.  
 Collett, T.S., 1998, Methane Hydrate : An Unlimited Energy Resource?, U.S. Geological Survey.  
 Kolodenznyi, P.A. and Arshinov, S.A., 1972, Engineering the Pumping of Antihydrate Inhibitor into Wells of the Messoyakha Field, Gasov.

- Delo, No. 11.
- Barraclough, B.L., 1980, Methane Hydrate as an Energy Resource: A Review With Recommended Future Research, Los Alamos National Laboratory report, LA-8368-MS.
- Billy, C. and Dick, J.W.L., 1974, Naturally Occurring Gas Hydrates in the Mackenzie Delta, N.W.T., Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Vol. 22, No. 3.
- McGuire, P.L., 1981, Methane Hydrate Gas Production : An Assessment of Conventional Production Technology as Applied to Hydrate Gas Recovery, Los Alamos National Laboratory report, LA-9102-MS.
- Marx, J.W. and Langenheim, R.H., Reservoir Heating by Hot Fluid Injection, SPE Reprint Series No. 7, Thermal Recovery Processes.
- Rasmussen, R.A., 1989, Atmospheric Methane in the Recent and Ancient Atmospheres, J. Geophysics Res.
- Raynaud, 1988, Climatic and CH<sub>4</sub> Cycle Implications or Glacial Interglacial CH<sub>4</sub> Change in the Vostok Ice Core, Nature.
- Makogon, Y.F., 1993, Russian Contribution to the Study of Gas Hydrates, International Conference on Natural Gas Hydrates, New York, U.S.A.
- Kvenvolden, K.A., 1993, Gas Hydrates as a Potential Energy Resource - A Review of Their Methane Content, U.S. Geological Survey paper No. 1570.
- Masters, C.D., Root, D.H., and Attanasi, E.D., 1991, Resource Constraints in Petroleum Production Potential, Science, Vol. 253.
- 
- (1999년 11월 14일 접수)