

# 가스하이드레이트 생산성 분석에 관한 실험 연구

박승수\*, 한정민, 권옥배, 신창훈, 이정환

## An Experimental Study on the Gas Productivity from Gas Hydrate

Seoungsoo Park, Jeongmin Han, Okbae Kwon, Changhoon Shin, Jeonghwan Lee

### Abstract

In this study, an experimental apparatus has been designed and set up to analyze the dissociating phenomena of hydrate in porous rock. Experiments with the depressurization scheme have been carried out to investigate the dissociation characteristics of methane hydrates and the productivities of dissociated gas and water. From the experiments, it has been provided a determination of volume of gas produced and the progress of the dissociation front, as a function of time when hydrate is depressurized. Also, it has been investigated the flowing behavior of the dissociated gas and water in porous rock and the efficiency of the production

### Key words

Dissociation(해리), Gas Hydrate(가스하이드레이트), Depressurization(감압), Productivity(생산성), Porous Rock(다공질 암석)

\* 한국가스공사 연구개발원

■E-mail : sspark@kogas.re.kr ■Tel : (031)400-7550 ■Fax : (031)416-7231

## 1. 서론

가스하이드레이트는 그 매장량이 방대하고 전세계적으로 부존되어 있는 것으로 알려져 석유자원을 대체할 신에너지자원으로 평가받고 있다. 아직까지 가스하이드레이트의 생산은 생산방법이나 상용화 기술의 개발이 확보되지 않은 상태로 기존의 석유 및 가스생산과 유사한 생산방법 등이 제시되고 있으나, 앞으로 지속적인 연구개발이 필요한 실정이다.

현재 가스하이드레이트에 관한 연구는 전 세계적으로 이루어지고 있으며, 특히 미국, 캐나다, 일본, 러시아, 노르웨이, 영국, 인도 등의 선진국에서 활발히 이루어지고 있다. 국내의 경

우, 정부의 주도로 가스하이드레이트 부존확인을 위한 탐사단계의 연구를 수행중이며, 이와 병행하여 가스공사, 연구소 및 대학에서 하이드레이트에 대한 기초적인 특성파악, 하이드레이트 저류층에서의 천연가스 회수방법 등이 연구가 수행되고 있다. 본 연구는 이러한 연구개발 활동의 일환으로 가스하이드레이트의 회수방법 및 생산성 분석에 대한 연구를 수행하였다.

생산을 위해서는 심해저 퇴적층에서 하이드레이트 해리를 촉진시켜 가스의 회수율을 높이는 기술이 요구되는데, 이러한 방법에는 일반적으로 감압법, 열수 및 증기 주입법, 염수주입법, 첨가제 주입법 등이 있다.

저온, 고압조건에 의한 하이드레이트의 형성 및 해리에 있어

서, 감압법은 해리 시 등온조건에서, 압력 변화를 이용하는 방법으로서, 시베리아의 메소야하(Messoyakha) 가스전에서 가스하이드레이트층 아래의 자유가스 (free gas)의 회수를 통한 저류층의 압력저하를 야기시켜 결과적으로 하이드레이트로부터 해리된 가스를 생산한 적이 있다. 이와 같이, 감압법은 가스하이드레이트층과 하부의 퇴적층 사이에 큰 균열 혹은 공극이 존재한다는 가정 하에, 이 균열공간 또는 공극의 내압을 감소시켜서 가스하이드레이트의 해리를 촉진하는 방법으로서, 자유가스층 존재 시 가스생산량의 약30%정도의 해리가스를 얻을 수 있으나, 적절한 해리속도가 맞지 않을 경우 플러깅현상이 생길 수 있다고 알려져 있다.

본 연구에서는 감압법을 적용하여 다공질 암석에서 하이드레이트의 해리현상을 분석하기 위하여 실험장치를 구성하고 압력변화에 따른 하이드레이트의 형성과 해리의 특성 및 가스 회수 생산성을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험장치 구성 및 방법

그림 1은 실제 구성된 실험장치 블록도이다. 전체장치의 주요부분으로서 저류층의 고압조건을 구현할

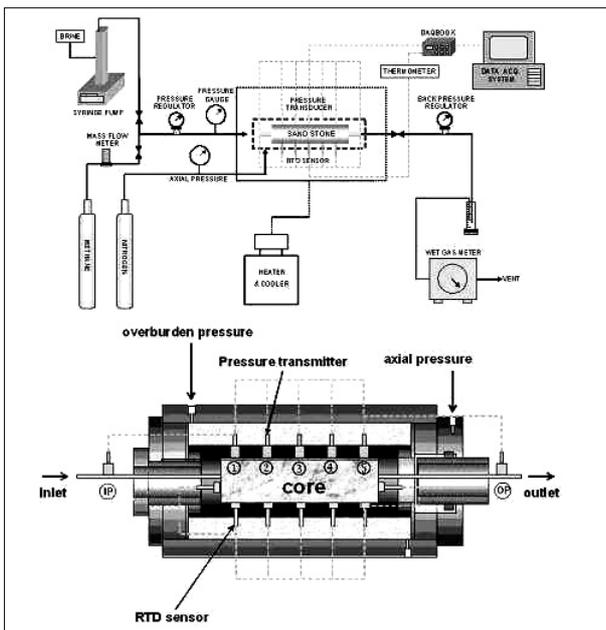


Fig. 1 실험장치 구성도

수 있도록 sus 316재질의 코어홀더와, 심해의 저온상태를 만들 수 있는 워터자켓으로 이루어 졌으며, 상시 압력과 온도를 측정할 수 있도록 PT센서와 RTD센서 포트가 인입되어 있다. 이것은 하이드레이트 형성 및 해리 시 코어의 상태를 실시간으로 기록하여, 감압법에 의한 하이드레이트 회수 시 적절한 조건을 구하는 데이터로 이용된다. 암석은 베레아 사암으로 공극률은 31%, 투과도는 329md이고, 코어의 길이와 직경은 30.4cm, 3.81cm이다. 실험과정은 고순도 99.95%의 메탄가스를 실린더 내 코어로 유입되며, 증류수는 정량펌프에 의해 유입된다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 형성실험

하이드레이트 형성 실험은 감압법의 해리특성을 연구하기 위하여 실행되었다. 형성실험 과정은 다음과 같다. 첫 번째로, 코어는 코어홀더 내에 두고, 약 9.65MPa의 overburden과 9.93MPa의 축방향의 외부압력을 가한다. 그리고 진공펌프로 불순물을 제거하기 위하여 시스템을 진공으로 만든다. 포화될 때까지 증류수와 메탄가스를 순환시켜, 메탄가스를 초기압력까지 높이지도록 코어에 가압하고, 코어홀더를 하이드레이트 형성을 위해 정해진 온도까지 냉각시킨다. 형성단계에서의 압력은 메탄가스가 하이드레이트 격자 내에 포집될 때 감소된다. 반대로, 하이드레이트가 해리될 때 압력은 증가한다. 그림 2는 상기과정을 거쳐 도출된 압력과 온도 거동을 나타낸다. 이 그림에서 주입된 초기압력은 하이드레이트의 형성으로 인해 6.27MPa에서 4.75MPa로 급격히 감소되는 현상을 볼 수 있고, 하이드레이트 형성시 내부온도가 0.2K 증가하는 발열현상을 확인할 수 있다.

형성단계가 끝난 후에, 다공질암석의 공극 내에서 가스와 물의 접촉을 증가시켜 보다 많은 양의 하이드레이트를 형성시키고 코어 전체에 걸쳐 균일한 분포를 구현하기 위해, 2 사이클의 annealing 과정이 진행되었다. 자연상태의 천연가스 하이드레이트는 매우 오랜 기간에 걸친 기후변화에 의해 형성과 해리를 반복하는 과정을 거쳤다고 볼 수 있으므로 이러한 annealing 과정은 실제 현장조건을 반영하는 의미도 지니고 있다.

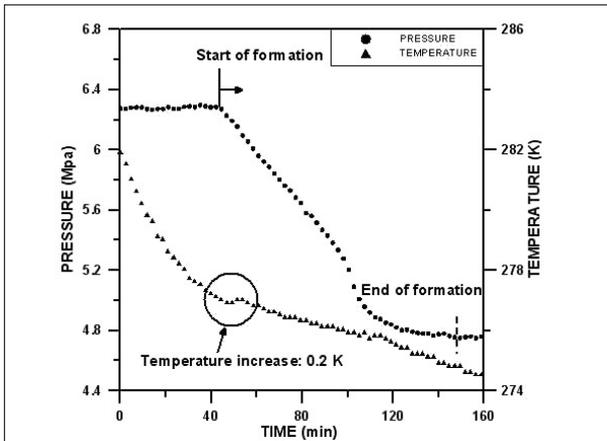


Fig. 2 하이드레이트 형성P-T 곡선

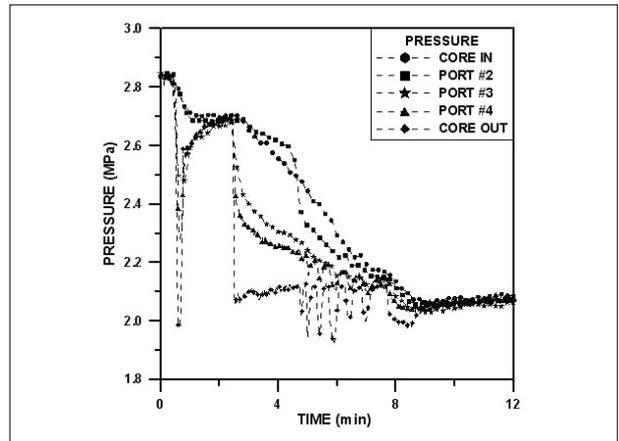


Fig. 3 해리공정의 압력거동

### 3.2 해리실험

코아내부에 하이드레이트를 형성시킨 후 유입부와 유출부의 밸브가 모두 잠긴 closed system에서 역압력조절기를 조절하여 하이드레이트의 평형압력보다 낮은 값으로 해리압력을 설정한다. 이후 유출부의 밸브를 열면 하이드레이트 해리과정이 시작된다. 전 실험과정은 등온인 274.16K에서 수행되었으며 각 포트의 압력의 변화가 없을 때까지 해리압력을 유지하였다.

그림 3은 유출부의 압력을 2.07MPa로 고정하여 해리실험을 수행했을 때, 코아내부의 압력거동을 나타낸 그림이다. 그림 3에 나타나듯이 해리과정이 시작되자 유출부의 압력이 처음상태인 2.84MPa에서 1.98 MPa로 급속히 하강한 뒤 다시 인입부의 압력까지 회복되었고 회복기간 동안 유입부의 압력에는 큰 변화가 없었다. 이러한 유출부의 순간적인 압력변화는 유출부 주변에 형성된 하이드레이트로부터 해리된 가스의 영향뿐만 아니라, 압력측정기의 위치가 코어와 완전히 닿아있지 못해서 생긴 dead volume 내의 유체가 순간적으로 방출되어 압력이 하강한 후 코어 내의 가스 및 해리된 가스로 인해 다시 회복되는 과정 때문인 것으로 분석된다. 포트 3번 역시 비슷한 거동을 나타내나 정도에 있어서는 차이를 나타낸다. 한편 시간이 지날수록 유출부의 압력과 비슷한 압력변화 양상을 볼 수 있으며, 이는 유출부에서 발생한 압력 강하가 각 포트별로 전파되기 때문이다. 해리과정이 계속해서 진행되는 동안 인입부와 2번을 제외한 포트들의 압력은 해리압력을 유지하는 상태에서 펄스형태의 거동을 나타내었다. 이러한 거동은 하이드레이트가 해리될 때 가스보다 물이 더 많이 발생되어 가스포화도에

비해 물포화도가 더 빨리 증가함에 따라 가스 상대투과도는 감소하여 가스 유동이 잘 일어나지 않지만, 하이드레이트가 계속 해리됨에 따라서 가스 포화도가 유동할 수 있는 임계포화도에 도달할 때마다 순간적으로 유출부 쪽으로 유동되기 때문에 나타나는 현상이다. 한편 코아내부 압력은 투과도가 높은 암석시료임에도 불구하고 유출부 압력변화에 반응이 즉각적으로 나타나지 않고 서서히 감소하는 현상을 나타낸다.

### 3.3 생산성 분석

가스하이드레이트 생산성 분석을 위하여, 감압법에 의한 회수생산 실험이 수행되었다. 모든 실험은 274.15 K의 등온조건에서 수행되었으며 3가지 경우의 감압실험에 따른 측정된 결과를 분석하였다. 등온조건에서 1.72MPa (Run A), 2.07MPa (Run B), 2.21MPa (Run C)에서 각각 감압을 수행하여 그 결과를 분석한 결과, Run A 경우에 급격한 압력변화에 의해 하이드레이트가 코아 중간부분에서 재형성되어, 해리시간이 무척 길었으나, 누적된 가스생산량은 가장 많았다. 그러나 Run A의 경우 해리시간에 따른 생산율이 작기 때문에 생산성은 낮다. Run B의 경우 2.07MPa로 출구압력을 낮추었다. 하이드레이트 플러깅 때문에 3.3분까지 흐르지 않다가, 하이드레이트가 해리될 때, 투과성이 증가함에 따라 해리가스가 흐름을 보였다. Run C의 경우 평형압력의 2.21MPa까지 떨어졌는데, 누적된 가스생산량이 Run B와 비슷하나, 해리된 시간은 4배나 짧다. 각각의 경우 가스 생산률을 비교하여 그림 4에 나타내었다. 그림을 통해 Run C의 가스생산률이 가장 높은 것을 확인

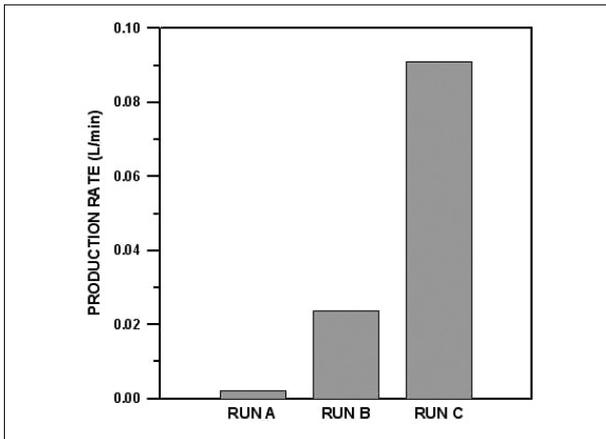


Fig. 4 가스생산율 비교

할 수 있으며, 이는 출구압력이 평형압력에 가까울수록, 해리가 빠르게 진행되며 생산성은 높게 나타난다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가스하이드레이트 저류층에서 감압법을 이용한 형성 및 해리에 대한 기초 실험을 수행하였고, 감압압력에 따른 생산성 분석 결과를 도출하였다. 이들 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 감압법을 통한 해리실험을 수행한 결과, 평형압력대비 과도한 압력강하는 가스하이드레이트 재형성으로 인해 공극이 막히는 플러깅 현상이 발생하며, 이로 인해 전체 가스 생산성은 감소된다.

- 2) 해리실험에서, 인입부와 유출부 압력이 일치하는 시간 즉, 해리시간은 유출부 압력이 평형압력과 가까울수록 짧아지고 생산성은 높아진다.
- 3) 상기 결과로부터, 가스하이드레이트 저류층에서 가스를 생산시, 가스유동 및 해리속도는 감압기준에 따라 변화되며, 감압기준은 중요한 요소로 고려되어야 한다는 것을 실험적으로 확인하였다.

#### References

- (1) Kvenvolden, K. A., and Lorenson, T.D., 2001, The Global Occurrence of Natural Gas Hydrates. In: Natural Gas Hydrates, Occurrence, Distribution, and Detection, 3-18.
- (2) Makogon, Y.F., 1997, Hydrate of Hydrocarbons, PenWell Books, Tulsa, Oklahoma.
- (3) Lee, J. H., Baek, Y. S., Sung, W. M., 2005, The Kinetics on Hydrate Formation in Pipelines, Energy Sources, 27, 9, 875-885.
- (4) Matsumoto, R., Okuda, Y., Aoki, Y., 1994, Methane Hydrate: Natural Gas as Enormous Resources for 21st Century, Tokyo Mikkei Science Publishers, 253.
- (5) Hammerschmidt, E.G., 1934, Formation of Gas Hydrates in Natural Gas Transmission Lines, Ind. Eng. Chem., 26, 8, 851-855.

---

**박승수**



한국가스공사 연구개발원  
(E-mail : sspark@kogas.re.kr)

---

**한정민**



한국가스공사 연구개발원  
(E-mail : jmhan@kogas.or.kr)

---

**권옥배**



한국가스공사 연구개발원  
(E-mail : kwon@kogas.re.kr)

---

**신창훈**



한국가스공사 연구개발원  
(E-mail : chshin@kogas.re.kr)

---

**이정환**



한국가스공사 연구개발원  
(E-mail : jhwan@kogas.re.kr)