

퇴적층 물성이 가스하이드레이트 생산성에 미치는 영향 연구

*박 승수¹⁾, 주 우성²⁾, 한 정민³⁾, 이 계정⁴⁾, 이 정환⁵⁾

A Study on the Gas Hydrate Productivity on the Sediment Properties

*Seoungsoo Park, Woosung Ju, Jeongmin Han, Kyejung Lee, Jeonghwan Lee

Key words : Gas Hydrate(가스하이드레이트), Rock Properties(암석물성), Porosity(공극율), Permeability(투과율), Temperature(온도), Pressure(압력), Dissociation(해리), Depressurization (감압), Productivity(생산성)

Abstract : Conventional gas deposits consist of pressurized gas held in porous and permeable reservoir rocks and its recovery takes place where the natural pressure of the gas reservoir forces gas to the surface. But gas hydrate is a crystalline solid, its prospects require reservoir rock properties appropriate porosity, permeability with mapping of temperature and pressure conditions to define the hydrate stability zone. In this study, we have carried out to investigate the dissociation characteristics of methane hydrates and the productivities of dissociated gas and water with depressurization scheme. Also, it has been conducted the flowing behavior of the dissociated gas and water in porous rock and the efficiency of the production.

Nomenclature

K : permeability, md
 ϕ : porosity, %
 S_w : water saturation, %
 S_h : hydrocarbon saturation, %
P : pressure, MPa
 P_I : initial pressure, MPa
 P_D : dissociation pressure, MPa
 G_p : produced gas, L
DP : depressurization
 P_{Form} : formation pressure
 P_{Eq} : equilibrium pressure

고 또한 해리된 천연가스는 퇴적층의 유체 투과도에 따라 생산성이 결정된다. 해리된 천연가스 생산성은 기존 유·가스 생산방법 및 기술과 유사한 방법으로 생산되나, 급격한 가스 팽창은 압력 상승을 가져와 가스하이드레이트가 재형성되기 때문에 적절한 생산속도 조절이 필요하다. 가스하이드레이트 생산성 실험을 위해서는 암석 입자 크기, 분포 및 방향성, 압축력 등의 다양한 정보의 분석이 필요하겠으나, 본 논문에서는 저류층의 압력을 변환시키는 감압법(Depressurization method)

1. 서론

일반적으로 심해저나 동토지역의 자연 퇴적층에서 가스하이드레이트는 고결암석이나 비고결 퇴적층내에 존재한다. 그러나 지층 압력과 적절한 유체투과도에 의해 생산정도로 자연 생산되는 기존 유·가스전과는 달리 고체상태의 가스하이드레이트는 1차로 가스하이드레이트의 해리가 필요하

-
- 1) 한국가스공사 연구개발원
E-mail : sspark@kogas.re.kr
Tel : (031)400-7550 Fax : (031)416-9014
 - 2) 한국가스공사 연구개발원
E-mail : wsju@kogas.or.kr
Tel : (031)400-7556 Fax : (031)416-9014
 - 3) 한국가스공사 연구개발원
E-mail : jmhan@kogas.or.kr
Tel : (031)400-7545 Fax : (031)416-9014
 - 4) 한국가스공사 신에너지팀
E-mail : korealkj@kogas.or.kr
Tel : (031)710-0252 Fax : (031)710-0159
 - 5) 한국가스공사 연구개발원
E-mail : jhwan@kogas.re.kr
Tel : (031)400-7481 Fax : ((031)416-9014

을 이용하여 암석의 공극율과, 유체투과율에 따른 해리특성 및 생산성을 고찰하고자 하였다.

1.1 공극율(Porosity) 및 압축력(Compaction)

석유나 가스전과 마찬가지로 공극율은 탄화수소 매장량을 결정하는데 가장 중요한 요소이고, 공극과 공극이 상호 연결된 유효공극속의 가스는 강제적인 기술 적용 없이 생산될 수 있고, 가스와 지층수의 흐름을 만들 수 있어 생산력을 증대시킨다. 메켄지 델타의 말릭 5L-38 퇴적 시료의 경우 최대 약 80%의 공극을 갖고 있고[Uchida et al., 2003], 심해저 낭카이 심해저 가스하이드레이트 퇴적층의 경우 약 40~80%[Matsumoto et al., 2003]의 공극을 갖는 것으로 알려져 있다.

암질구성 화학적 성질은 지층수 염분을 제외하고는 가스하이드레이트 형성에 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. 퇴적층에서 공극은 주로 퇴적층의 형태와 압축정도에 따라 달라진다. 사암으로 이루어진 퇴적층일 경우 높은 압축강도를 가질지라도 보통 30~40%의 높은 공극률을 가질 수 있다고 알려져 있다[Nur et al., 1998]. 사력 저류층일 경우에는 이보다 더 좋은 공극을 가질 것이나, 진흙층과 같은 머드로 이루어진 퇴적층은 퇴적 초기에 좋은 공극을 함유 할 수 있으나, 높은 압축력이 작용한다면 상대적으로 낮은 공극을 가질 것이다. 예를 들어, 셰일의 경우 표면에서 60%의 공극을 함유할 수 있지만, 1 km 지층에서는 30%, 2 km 지층에서는 20%로 줄어들기도 한다[Magra, 1968]. 사암, 진흙 등이 섞여있다면 공극률의 분포가 다양해지고, 퇴적형태와 퇴적당시 환경에 따라 유추할 수 있다.

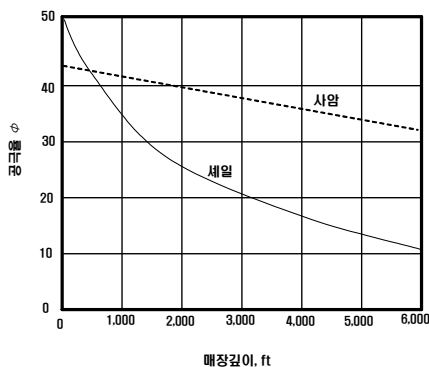


Fig. 1 Compaction effect of formation porosity

일반적으로 지층압력증가로 인한 공극률 감소는 암석내 입자들간의 재배열로 인해 발생하기 때문에 각 입자가 잘 분산되어 있는 셰일에서 이 효과가 잘 나타난다[Fig. 1]. 그림 같이 모래와 같

은 사암보다 진흙과 같은 셰일층에서 지층압력증가로 인한 공극률 감소가 크게 나타난다. 본 실험에 사용된 시료는 일정 압축력으로 이루어져 있는 균질의 베레아 사암을 사용하였다.

1.2 유체투과도(Permeability)

일반적인 유·가스전에서 유체가 흐를 수 있는 능력을 말하는 유체투과도는 모든 자원개발에 있어서 생산성과 가장 민감하게 작용한다. 탄화수소가 가득 차있는 공극율이 큰 사암층일지라도 공극과 공극이 상호 연결되어 있지 않다면, 유체의 투과성은 현저히 낮아지고, 원하는 양의 가스는 생산될 수 없다. 보통 탄화수소 저류층에서 유체 투과도는 매우 다양하게 분포하나, 인장력이 작용하는 단층 저류층이나 균열 저류층에서는 훨씬 좋은 투과도를 보여준다. 본 실험에서는 절대투과도만을 대상으로 고려하여 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 구성

장치 구성은 심해저 자연상태의 퇴적층 환경 조건을 반영하고자 Fig. 2와 같이 구성하였다. 수직방향으로 수심 1,000m 이상의 해수압력 및 수평방향으로는 연속적인 지층의 횡압력을 주었다. 이러한 실제 현장조건을 반영하기 위해 코아홀더 내 실험코아 내부압력보다 높은 조건의 봉압(overburden pressure)을 가압하였고 축방향 코아 양쪽으로 축압력을 가압하였다. 실험장치내 축압력을 가할 경우, 가스주입시 엔드플러그를 코아시료에 밀착시킴으로써 면접촉을 최대한 만들어내는 효과를 거둘 수 있다

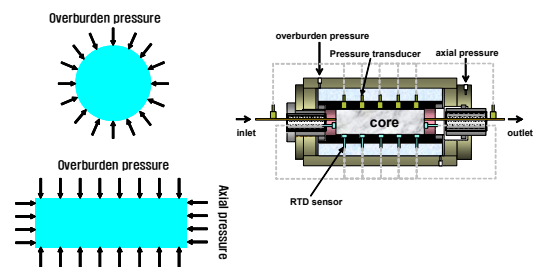


Fig. 2 Realization of deepsea sediment environment

2.2 실험 조건

실험에 사용된 시료의 물성을 측정된 결과 아래 Table 1과 같이 나타났다. 모든 실험에서 고결암석에 가스하이드레이트 형성 및 균질화 과정을 반복하여 전체 암석내에 가스하이드레이트가 전영역에서 형성되도록 하였다. 시료의 물성이 공

극율에 따라 유체투과도 일치하지 않는 현상을 나타냈다. 이는 앞에서 언급했듯이 공극과 공극이 상호 연결되지 않는 사암의 경우 유체투과도가 떨어질 수 있음을 나타낸다.

2.3 실험 결과

아래 Fig. 3은 공극률과 유체투과도를 일정하다고 가정할 때, 일반적인 가스하이드레이트 저류층의 지층압력과 시추공(wellbore) 주변의 이상적인 특성을 나타낸다. 시추공의 중심으로부터 자연감압에 의해 지층 해리의 일정패턴을 보여 주고 있다. 자연 감압에서 wellbore 주변의 해리된 반경은 단지 시간의 함수임을 보여준다. 일정한 공극율과 투과도를 갖는 가스하이드레이트 지층 압력(P_i) 감소 및 해리반경 증가 현상을 보여주고 있다 [Fig. 3]. Fig. 4의 경우 전형적인 가스하이드레이트 해리시 압력거동을 나타내며, 실제 필드를 상정, 생산정의 밸브를 약 지층대비 79%로 오픈하자, 시추정으로부터 가장 가까운 압력포트가 가장 먼저 해리압으로 떨어지고 이후 시추정으로부터 각각 일정 이격된 압력 값들이 약 90분 만에 해리압으로 수렴되었다.

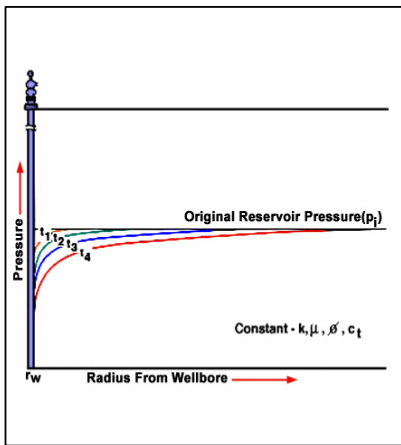


Fig. 3 Nomal pressure response of gas hydrate reservoir

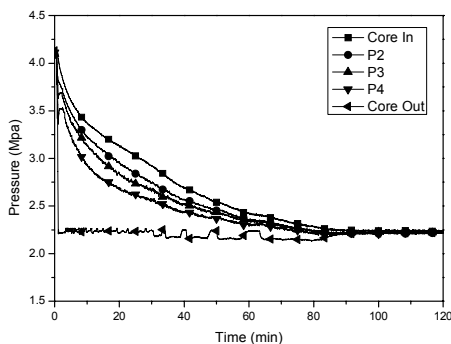


Fig. 4 Run DP1B pressure curves during dissociation

그러나 일부 실험에서 목격되어졌던 급격한 해리는 오히려 가스하이드레이트 재형성의 과정을 가져 왔고, 이는 공극과 공극의 연결을 단절시키는 플러깅 현상을 초래하여 생산성을 저해하였다 [Fig. 5].

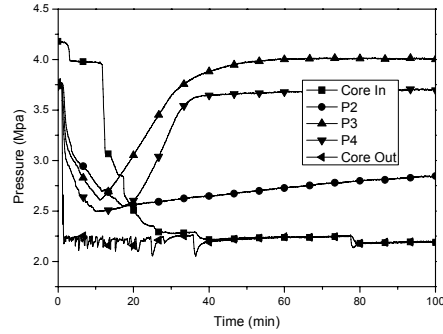


Fig. 5 Run DP3D plugging phenomenon during dissociation

2.4 결과 분석

Table 1과 같이 Run DP1B, Run DP2C, Run DP3B의 5분부터 20분까지 압력변화는 각각 0.55 MPa, 0.89 MPa, 0.98 MPa이었으며, 단위 분당 해리 압력 변화는 0.036 MPa, 0.059 MPa, 0.65 MPa의 결과를 보였다. 상대적으로 DP1B에 비하여 DP2C가 약 163%, DP3B가 약 180%의 해리속도 변화 향상을 보였다.

Table 1 Result for the different properties at the Run DP1B, DP2C, DP3B (2.79MPa, 273.76K)

RUN	DP1B	DP2C	DP3B
K (%)	71	119 (41%)	169 (57%)
ϕ (%)	31	18	13
P_D (MPa)	2.20	2.20 (0%)	2.07 (6%)
ΔP (MPa)	0.55	0.89	0.98
P/min.	0.036	0.059 (163%)	0.065 (180%)

Table 1에 나타난 실험결과를 통해 단위시간당 해리압력의 변화는 유체투과도에 의해 지배된다는 사실을 확인할 수 있으며, 이는 절대 공극률이 높더라도 상호 단절된 공극은 지층의 해리를 방해하고, 가스하이드레이트가 재형성은 wellbore 외과의 해리되어 있는 메탄가스 흐름을 방해하는 작용으로 이어질 수 있다는 것을 의미한다. 이는 기존 유/가스전의 세일이 섞인 퇴적층으로 해석될 수 있어 가스 생산성에 민감하게 작용될 수 있다.

한편 이와 같이 지층내에서의 압력변화를 어떻게 제어함으로써 생산성을 높일 수 있는가에 대한 방법은 가스하이드레이트 생산에 있어 중요

한 요인으로 작용 할 수 있다. 해리된 지층의 압력변화는 결국 생산정에서의 쇼크밸브를 통하여 조절될 수 있을 것이다. Table 2는 감압법 적용을 위해 준비한 기초 시료의 물성과 이에 적용한 조건들을 요약한 것이다. 탄화수소 포화율, 포화압력은 거의 유사동일인 시료에 대한 비교 결과이다. 해리압력은 평형압력 2.78 MPa 대비 각각 13% (2.41 MPa), 20% (2.20 MPa), 25% (2.07 MPa), 40% (1.72 MPa)의 감압을 수행하였다.

Table 2 List of depressurization methods (2.79MPa, 273.76K)

RUN	DP3G	DP2C	DP3C	DP3A
K (md)	169	119	169	169
ϕ (%)	13	18	13	13
S_h (%)	36	42	36	38
P_Form. (MPa)	6.0	6.1	6.0	6.0
P_Eq. (MPa)	2.78	2.78	2.78	2.78
P_D (MPa)	2.41	2.20	2.07	1.72
$P_D/P_{Eq.}$ (%)	13	20	25	40

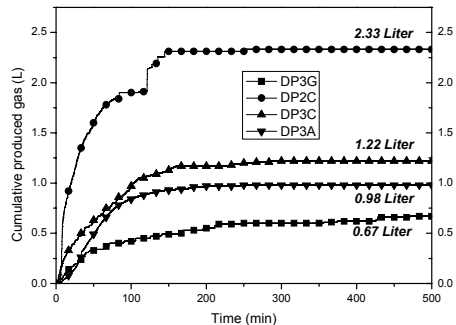


Fig. 6 Productivity of Run DP3G, DP2C, DP3C, DP3A

Fig. 6은 감압법을 이용하여 도출된 종합적인 가스하이드레이트 해리 실험 결과를 나타낸다. Run DP3G, DP2C, DP3C, DP3A의 해리시 초기부터 500분 동안 생산량을 나타낸 그래프이고, 평형압력 2.78 MPa 대비 각각 13% (2.41 MPa), 20% (2.20 MPa), 25% (2.07 MPa), 40% (1.72 MPa)의 감압을 시행하였을 때, 생산량은 각각 0.67 Liter, 2.33 Liter, 1.22 Liter, 0.98 Liter을 나타냈다. 이를 다시 단위 시간당 생산성으로 분석하면, 각각 1.34 ml/min., 4.66 ml/min., 2.44 ml/min., 1.96 ml/min.로 나타내었다.

결과적으로, Run DP2C의 경우가 가장 높은 생

산량 (2.33 Liter) 으로 나타났다. Run DP2C의 경우 공극률과 탄화수소 포화율은 타 실험보다 상대적으로 좋았으나, 이것이 생산성을 월등하게 향상시킬 수 있을 정도로 높은 값은 아닌 것으로 사료된다. 더욱이 유체투과율은 비교대상 실험보다 낮아 오히려 생산성을 떨어뜨릴 수 있다. 그러나 평형압력 (2.78MPa)대비 약20%, 지층압력 (6.1 MPa)대비 약 36%로 감압하였을 때 생산량은 가장 뛰어났고, 4.66 ml/min.의 생산성을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 가스하이드레이트 회수생산 장치를 이용 다공성 사암에서의 공극률과 유체투과도에 따른 가스하이드레이트 생산성을 고찰하고자 하였고, 상기한 실험 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

가. 가스하이드레이트 생산시, 적정 감압압력은 평형압력대비 20% 부근에서 결정하였을 때 가장 생산성이 높은 것으로 나타났다. 이로써 가스하이드레이트 생산시 적정 감압압력기준이 존재함을 확인하였고 그 정량적인 수치기준을 제시하였다.

나. 서로 다른 특성을 갖는 퇴적물에 대한 해리 고찰 결과, 단위시간당 해리압력 변화는 여러 가지 물성중에서 상대적으로 퇴적층의 유체투과도에 의해 지배된다는 사실을 실험적으로 증명하였다.

References

- [1] Michael D. Max, Arthur H.Johnson P.Dillon 2006, "Economic Geology of natural Gas Hydrate"
- [2] 이정환, 박승수 외, 2005, 2006, 2007, 가스하이드레이트 개발 및 생산(I), 한국가스공사
- [3] 박승수, 이정환 외, 2006, 가스하이드레이트 생산성 분석에 관한 실험 연구", 한국신재생에너지학회 2006, 춘계학술논문집, pp. 412~414
- [4] 박승수, 이정환, 2007, "The Expectation and Development Prospect for Gas Hydrate as an Energy Source", International Symposium on "Circum-Pacific ptroleum and Alternative Energy Resources.
- [5] S.R.Dallimore and T.S. Collett, 2005, "Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada."