

다중공 평판형 셀기에서 하이드레이트 생산실험 분석연구

배재유 · 성원모 · 권순일^{*†}

한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과

133-791 서울시 성동구 행당동 17

*한국석유공사

431-711 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-14

(2007년 1월 10일 접수, 2007년 2월 22일 채택)

An Experimental Analysis of Hydrate Production using Multi-Well, Plate-Type Cell Apparatus

Jaeyu Bae, Wonmo Sung and Sunil Kwon^{*†}

Dept. of Geoenvironmental System Eng., Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Sungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

*Korea National Oil Corporation, 1588-14 Gwanyang-dong, Dongan-gu, Anyang, Gyeonggi 431-711, Korea

(Received 10 January 2007; accepted 22 February 2007)

요 약

본 연구에서는 감압법 및 열자극법에 의한 메탄하이드레이트 생산실험을 수행하기 위해 고압의 다중공 평판형 셀기를 설계·제작하였다. 이 실험장비를 이용하여 고투과성 미고결 시료 공극시스템에서 감압법과 열자극법에 의한 생산실험을 수행하여 생산메카니즘을 분석하였다. 감압법에 의한 생산실험 결과, 일반 가스전과는 달리 하이드레이트 해리에 의한 공극내에서의 소스효과로 인해 일시적으로 압력이 상승하고 또한 흡열반응으로 인해 온도가 하강함을 확인하였으며, 열자극 생산실험을 수행한 결과에서는 감압법의 경우 열자극법에 비해 해리속도가 느리게 진행되어 가스생산이 낮은 상태로 지속되는 것으로 나타났다. 한편, 열자극법 중 열을 가한 후 곧바로 생산하는 경우, 주입지점 주변에서만 해리되고 또한 그 지역에서만 투과도가 커지는 것으로 나타났으며, 생산초반 이후 해리속도는 soaking까지 시행한 경우에 비해 해리가 느리게 진행됨을 알 수 있다. 한편, 본 연구의 낮은 하이드레이트 포화도를 갖는 미고결 시료 공극시스템에서 열자극법의 적정 soaking 시간 규명실험을 통해 압력과 생산거동을 고찰하였다. 그 결과, 6분간 soaking한 경우, 온도 하강에 의한 하이드레이트의 재형성으로 2분 및 4분간 soaking한 경우보다 낮은 회수율을 보였다. 본 연구의 실험결과들은 향후 높은 하이드레이트 포화도를 갖는 고결 시료 공극시스템에서의 실험을 통해 더욱 확연히 드러날 것으로 예상된다.

Abstract – In this study, the 『Multi Well Plate-type cell Apparatus』 was designed and setup for performing the producing experiments of methane hydrate by depressurization, heat stimulating methods. In order to characterizing the producing mechanism of hydrate through porous materials, the experiments for various producing methods have been conducted with the aid of the apparatus which has high permeability. In the experimental result of depressurization method, the pressure is temporarily increased unlikely conventional gas reservoir due to the sourcing effect of hydrate dissociation in the pore. Meanwhile, the temperature is decreased because of the endothermic reaction while hydrate is dissociated. In the experimental results of heat stimulating method, the dissociation in depressurization method is more slowly processed than that in thermal method, and hence, its gas production is lower. In the case of production right after heating, hydrate is dissociated only near injecting point and the permeability becomes greater at that area only. It infers that the more gas is produced during relatively earlier producing period. Since then, the hydrate is more slowly dissociated than the case of production after heating and soaking. This time, the performances of pressure and production obtained by thermal method have been analyzed in order to investigate the effect of soaking time on gas recovery. As a result, the gas recoveries in the case of 2 min and 4 min soaking are higher than case in 6 min soaking. This is reason that hydrate is reformed due to the decrease of temperature. It is expected that the experimental results obtained in this work may be more clearly explained by utilizing the lower permeable porous system with the greater hydrate saturation.

Key words: Hydrate, Multi-well Plate-type Cell, Production Experiment, Depressurization, Thermal Stimulation

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sikwon@hanyang.ac.kr

1. 서 론

하이드레이트 가스전으로부터 천연가스를 회수하는 방법은 기본적으로 세가지로 구분된다. 이들 회수법에는 McGuire[1]와 Bayles 등[2]이 제안한 열주입법[3-5]이나 Verigin 등[6]과 Yousif 등[7, 8]이 제안한 감압법과 같이 저류층의 온도와 압력을 변화시키므로써 해리시키는 방법이 있다. 또한 해리조건을 변화시키기 위해 메탄올이나 글리콜 등과 같은 화학첨가제를 주입하는 방법이 있다(Seo 등[9], Sung 등[10]). 이들 중 감압법은 열주입법과는 달리 외부에너지가 필요하지 않으므로 세가지 방법 중 가장 경제적인 방법이지만 하이드레이트가 매우 느리게 해리되는 단점이 있다(Yousif 등[8]). 반면에, 화학첨가제 주입법은 해리를 촉진 시킬수는 있으나 생산초기에는 하이드레이트의 존재에 의한 막힘현상으로 인해 투과도가 매우 낮으므로 주입효율이 저조하다. 또한 Islam[5]은 화학첨가제인 메탄올을 주입할 경우 매우 양호한 해리효과를 얻을 수 있으나 구입비용이 크기 때문에 경제적으로 비효율적일 수밖에 없다고 보고하였다. 따라서 가장 양호한 생산방법으로 감압법과 열주입법을 함께 병행하는 하이브리드 생산기법이 제시되었다. 이 기법은 열주입으로 인하여 하이드레이트 해리를 촉진시키고 감압법에 의해 해리된 가스를 생산하므로 생산성을 증진시키고자 하는 기법이다.

일반적으로 중질유전(heavy oil)에 적용되는 열주입·자극법은 열수(hot water) 및 증기(steam)를 주입하게 된다. 그러나, 하이드레이트 가스전은 주로 동토층이나 심해저 퇴적층에 존재하므로 저류층의 상·하부층이나 주입정내에서의 열손실이 크게 발생하게 된다(Selim 등[4]). 이에 Islam[5]은 열손실을 최소화하기 위해 주입정 하단에서 열을 가하는 electromagnetic heating 법을 제안하였으며, 이를 증기주입법 및 열수주입법 결과와 비교한 결과, electromagnetic heating 법이 보다 효율적임을 제시하였다. Sung 등[11]은 1차원 실린더형 실험장치를 이용하여 연속열주입법과 열자극법에 의한 생산실험을 수행한 바 있다. 이들의 결과에서 연속열주입법은 주입정 주변에서만 온도와 압력이 급격히 상승하고 공극내에 고체인 하이드레이트의 존재에 의해 열전달 효율성이 낮으므로 열자극법이 연속열주입법보다 효과적임을 보여주었다.

본 연구에서는 감압법과 열주입·자극법에 의한 생산실험이 가능할 수 있도록 하기 위해 고압의 다중공 평판형 셀장치(MWPA; multi-well,

plate-type cell apparatus)를 설계·제작하였다(Fig. 1). 이 MWPA는 주입정 또는 생산정을 최대 13개 포트까지 설치할 수 있으며, 각 포트마다 개별적으로 압력과 온도를 측정할 수 있도록 설계하였다. 본 연구에서 제작된 실험장비를 이용하여 미고결 시료 공극시스템에서 감압법과 열주입·자극법에 의한 하이드레이트 해리 및 생산실험을 수행하여 메탄하이드레이트의 생산거동을 분석하였다.

2. 실험장비 제작 및 기본물성 측정

본 연구에서 개발한 실험장비의 전체적인 모식도와 사진을 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. 실험장비 중 가장 핵심부분인 셀장치(Fig. 1)는 저류층의 높은 압력조건을 구현할 수 있도록 강한 재질의 금속(STS 316)으로 제작되었으며, 2차원 평판형으로 제작함으로써 여러 개의 well을 동시에 적용할 수 있도록 하였다. 셀장치는 직경 20 cm, 높이 3 cm 크기로서, 셀 상단부에서 압(confining pressure)을 가하여 주입된 유체가 시스템 내부로만 유동되도록 하였다. 평판셀에는 13개의 튜빙을 설치하여 주입정이나 생산정 또는 관측정이 위치할 수 있도록 하였고, 각각의 지점에 압력센서와 온도측정용 RTD 센서를 장착하였다. 동시에 열주입·자극법 실험을 위해 10 Watt의 열량을 갖는 히터를 압력포트와 동일한 포트에 설치하였다. 실험과정에서 취득된 자료인 압력과 온도는 자료 취득 시스템(Daqbook216)에 의해 실시간으로 측정되었다.

실험에서 사용된 셀내부의 매질은 180~250 μm 입자크기를 갖는 모래로 패킹한 미고결 시료 공극시스템이다. 또한, 실험에 사용된 물은 1.5 wt%의 염화나트륨 용액으로써 ISCO 사의 정량주입펌프

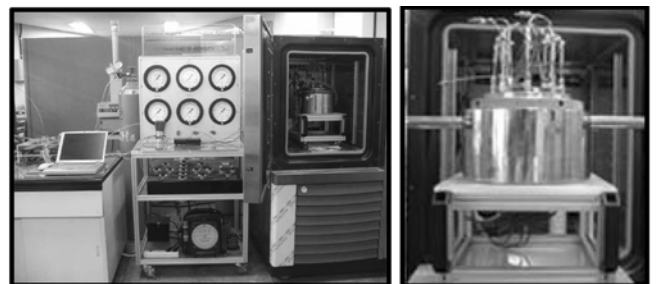


Fig. 2. Pictorial view of multi-well, plate-type cell apparatus (『MWPA』).

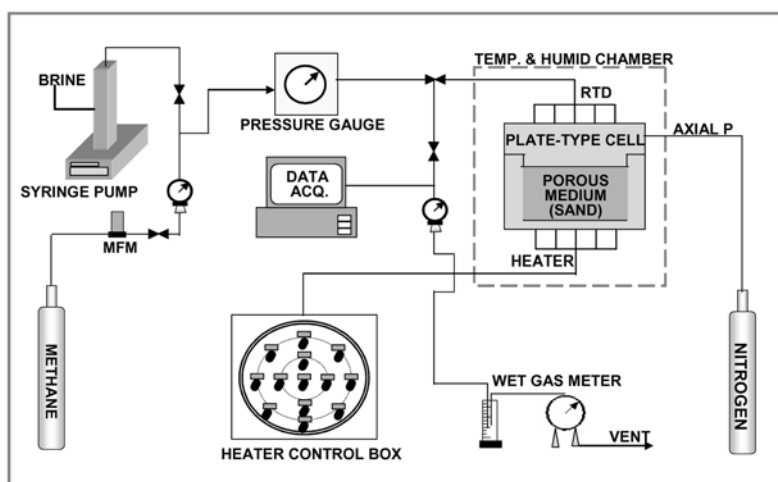
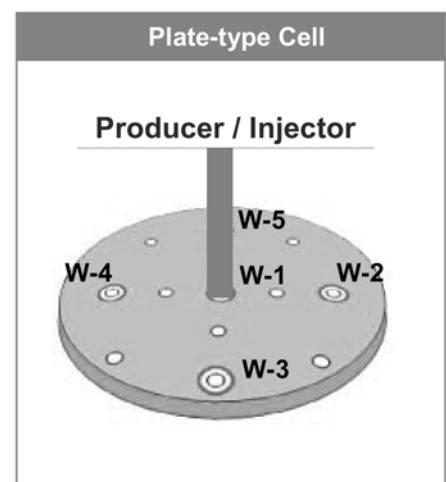


Fig. 1. Schematic diagram of multi-well, plate-type cell apparatus (『MWPA』).



를 이용하여 주입하였으며, 가스는 99.995%의 고순도 메탄가스를 하이드레이트 형성가스로 사용하였다. 하이드레이트의 형성과 해리 과정 동안에 셀을 온습도 조절기(TH-G-180-L) 내부에 장착함으로써 온도가 제어되었다. 생산과정 동안 생산운영압력은 유출부에 설치된 역압력조절기(BPR; backpressure regulator)에 의해 일정하게 유지시킴으로써 감압법과 열주입·차극법의 하이브리드 생산기법에 의한 하이드레이트 생산실험을 수행할 수 있도록 하였다.

본 실험장치인 MWPA를 이용하여 미고결시료 공극시스템에 대한 기본물성을 측정된 결과, 공극율은 37%, 투과도는 685 millidarcy(md)로 산출되었다. 하이드레이트 평형조건 측정실험을 상평형관점에서 볼 때 주어진 온도에서 형성압력과 해리압력이 서로 같아야 한다. 그러나 기체인 가스와 액체인 물의 물리적 결합으로 고체인 하이드레이트가 형성되는 현상은 실험적으로나 이론적으로 복잡한 양상을 나타낸다[12]. 그렇기 때문에 형성조건을 정확하게 구하기가 힘들고 재현성이 있는 해리조건과 다소 차이를 나타낸다. 따라서 하이드레이트의 평형조건을 도출해내기 위한 실험방법으로 등압실험법, 등온실험법, 등적실험법이 있으며, 그 중 등적실험을 이용하여 평형조건을 측정하였고, 그 결과는 Fig. 3에 도시하였다. 이 그림에서 보듯이, 초기온도 3.89 °C 하에서 초기압력을 488.3 psi로 설정하였으며, 온습도 조절기에 의해 온도가 하강함에 따라, 온도, 압력 조건이 하이드레이트 형성조건에 도달하면(B 지점), 하이드레이트 형성으로 인해 압력이 급감하다가 하이드레이트가 충분히 형성되어 더 이상의 압력강하가 없는 C 지점에서 형성과정이 종료된다. 여기부터 온도를 서서히 높여 가며 해리과정을 거치게 되는데, 하이드레이트 해리에 의해 압력이 급히 상승된다[13, 14]. 이 결과로부터 형성곡선과 해리곡선의 교차점(D 지점)인 온도 2.45 °C 하에서 압력 478 psi가 하이드레이트의 평형조건으로 산출되었다. 본 실험에서는 초기조건을 (3.89 °C, 488.3 psi), (4.84 °C, 438.6 psi), (4.03 °C, 381.8 psi)로 설정한 3회의 평형실험을 통해 산출된 결과를 탱크형 반응기에서 평형실험을 실시한 Sloan[15]의 결과와 비교하였다. 이 결과는 Fig. 4에서 볼 수 있는데, Sloan의 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

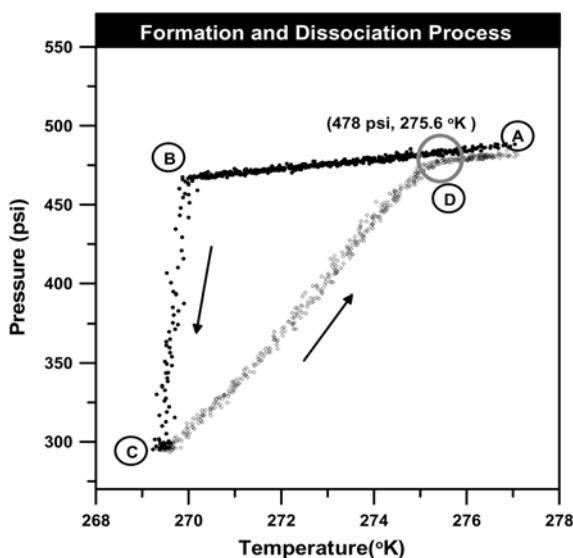


Fig. 3. Experimental Results of equilibrium condition for methane hydrate.

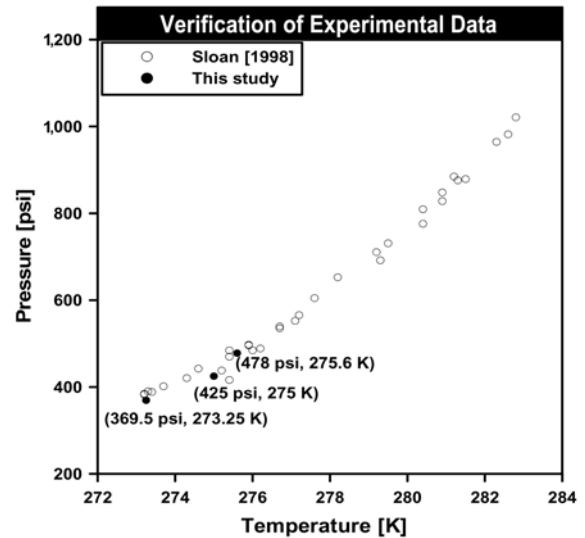


Fig. 4. Verification of experimental results for equilibrium conditions of methane hydrate comparing to results from Sloan (1998).

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 하이드레이트 형성실험

하이드레이트 생산실험의 첫번째 단계는 셀의 미고결시료 공극시스템내에 하이드레이트를 형성시키는 과정이다. 물로 100% 포화된 시스템에 온도 0.6 °C 하에서 압력 970 psi로 메탄가스를 주입하였다. 이 조건에서 가스와 물에 의해 하이드레이트가 형성됨에 따라 압력이 하강하는데 이 결과는 Fig. 5에서 보여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 가스와 물이 주입된 포트 1에서는 압력이 계속적으로 하강하나 주변의 포트 2~5에서는 일정시간동안 압력이 하강하고 그 이후는 더 이상 떨어지지 않음을 볼 수 있다. 이는 주변 포트 2~5에서는 부분적으로 하이드레이트가 형성되거나 물이 얼어서 공극을 막게 되므로 물과 가스가 각각 고립, 분리되어 더 이상 하이드레이트가 형성되지 못하기 때문에 일어나는 현상이다. 이를 해결하기 위한 방법으로 일단 온도를 높여서 얼음을 녹이거나 하이드레이트를 해리시킨 후 다시 온도를 낮춰서 하이드레이트가 재형성되도록 하는 annealing 과정을 2회 진행하였다. 하이드레이트 형성실험

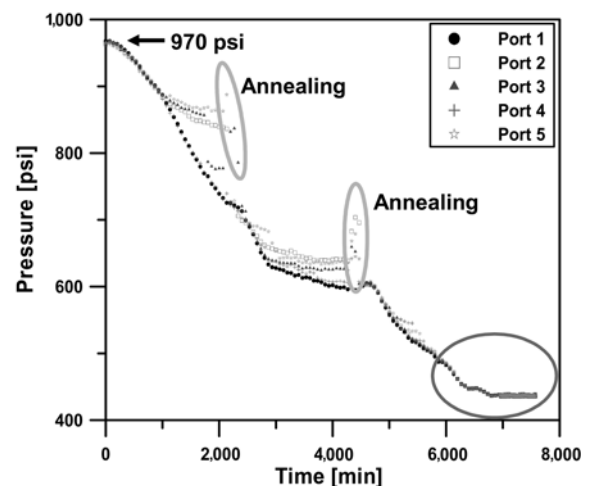


Fig. 5. The annealing process for hydrate forming in porous media.

험결과, 초기 물 포화도를 71%로 설정함에 따라, 압력 438 psi, 온도 0.6°C에서 가스포화도 29%, 하이드레이트 플러스 얼음 포화도 71%(하이드레이트 포화도는 산출공식[16]에 의해 약 10%)로 산출되었다. 여기서, 온도와 압력에 따른 물의 부피변화는 없으며, 또한 산출공식에서는 하이드레이트 형성시 가스가 172배 압축되는 것으로 가정하였다. 본 실험의 결과에서 하이드레이트 포화도가 10%인 것은 매우 낮게 산출된 결과로서, 이는 후속실험의 annealing 과정에서 개선되어야 할 과제이다. 즉, 모래입자의 균질한 형상, 물을 수시로 배출하고 주입하는 등의 annealing 과정의 개선을 통해 얼음이 형성되는 것을 방지하고 하이드레이트 포화도를 더욱 높여야 할 것으로 판단된다.

3-2. 감압법 생산실험

이상에서 산출된 가스-물(얼음)-하이드레이트로 포화된 미고결 시료 공극시스템으로부터 하이드레이트 해리에 의한 생산실험을 수행하였다. 하이드레이트 가스전에서는 하이드레이트 해리가 공극내에서 소스로 작용하므로 일반가스전에서의 생산에 따른 지속적인 압력강하 양상과는 다르게 일정시간 압력상승 효과가 나타난다. 이러한 생산거동 양상을 분석하기 위해 먼저 감압법에 의한 생산실험을 수행하였다. 이 실험은 초기온도 0.6°C와 초기압력 458 psi 하에서 BPR 압력(운영압력)을 358 psi 즉, Δp 를 100 psi로 하여 생산하였다. 여기서 이 시스템의 평형압력 즉, 해리압력은 405 psi이다.

생산실험 결과, Fig. 6에서와 같이 압력거동의 전체적인 양상을 보면 일반 가스전과는 달리 초기에 자유가스가 빠져나간 이후 하이드레이트 해리로 인하여 미약하나마 압력이 일시적으로 증가했다가 감소하는 양상을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 높은 하이드레이트 포화도를 갖는 고결 시료 공극시스템에서는 확연히 드러날 것으로 예상된다. 이는 특히 CBM(coalbed methane)의 가스생산과정에서 볼 수 있는 negative production 양상으로서, 해리현상 정도나 투과도와 같은 시료특성에 따라 압력상승기간 및 상승크기가 다르게 나타난다. Fig. 6의 온도변화에 있어서도 하이드레이트가 해리되면서 나타나는 흡열반응에 의해 일반 가스전에서의 등온과정과는 달리 온도가 하강하는 경향을 볼 수 있다. Sung 등[17]은 하이드레이트 저류전산모델링을 통하여 압력상승현상이 하이드레이트 해리에 의한 효과임을 분석하여 제시한 바 있다.

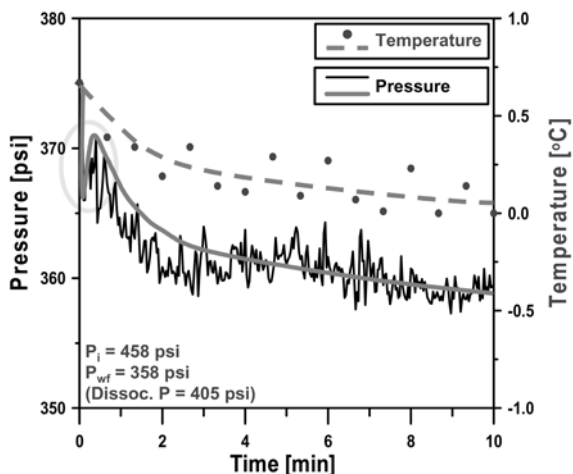


Fig. 6. The pressure and temperature behaviors observed under depressurization method.

3-3. 열주입·자극과 감압의 혼용기법에 의한 생산실험

다음은 앞에서 시행한 감압법의 실험결과에 기초하여 열주입·자극법과 감압법을 혼용한 하이브리드 생산기법에 의한 생산실험을 수행하여 각 생산기법에 따른 생산효율을 비교, 분석하였다. 열주입·자극법 실험은 감압법과 동일한 초기온도, 초기압력 및 BPR 압력조건하에서 수행하였다. 이 실험은 2분간 열을 가한 후 생산하는 경우(Case 2)와 2분간 열을 가하고 2분간 주변으로 열이 전달되도록 soaking 시간을 가진 후 생산하는 경우(Case 3)에 대해 수행하여 감압법(Case 1) 결과와 비교하였다. 이 실험의 결과에서 측정된 온도 변화, 압력변화 및 회수량을 Fig. 7~9에 도시하였다.

생산기법에 따른 실험결과, Fig. 7은 주입·생산 지점인 포트 1에서 측정된 시간에 따른 온도변화를 도시한 그림이다. 이 그림을 보면 Case 1, 2, 3 모두 시스템으로부터 자유가스를 생산함과 동시에 하이드레이트의 해리작용에 의해 온도가 급격히 하강함을 볼 수 있다. 또한, 히팅 후 soaking 시간을 갖는 Case 3의 경우에는 히팅 후 곧바로 생산하는 Case 2에 비해 열이 주변으로 보다 넓게 전달되므로 해리영역을 크게 하는 효과를 기대할 수 있다. Fig. 8의 압력거동을 통해서도 해리양상을 파악할 수 있다. 즉, Case 1, 2, 3 모두 생산 초기단계에서 하이드레이트 해리에 의한 소스효과로 인하여 압력상승이 일시적으로 발생함을 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 생산개시 이전에 열을 가하게 되면 보다 이른 시점에서 하이드레이트가 해리되어 보다 빠른 시점에서 압력 상승 현상이 나타나는 것으로 측정되었다. 이러한 양상은 고결시료에서 높은 하이드레이트 포화도를 갖는 시스템의 경우에는 보다 명확한 경향을 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 이번에는 3가지 생산기법에 대한 실험결과 측정된 가스의 생산거동 양상을 살펴보았다(Fig. 9참조). 이 결과로부터 Case 1의 감압법의 경우, 열주입·자극법에 비해 해리속도가 느리게 진행되어 가스누적 생산량이 낮은 상태로 지속되는 것으로 나타났다. 한편, 열주입·자극법 중 열을 가한 후 곧바로 생산하는 Case 2의 경우에는 주입지점 주변에서만 해리되어 그 지역에서만 투과도도 커지므로서 비교적 생산 초반부에서 많은 가스가 생산된다. 그 이후 해리속도는 soaking까지 시행한 Case 3에 비해 느리게 진행되어 가스누적 생산량에서 역전되고 있음을 볼 수 있다. 즉, Case 3의 경

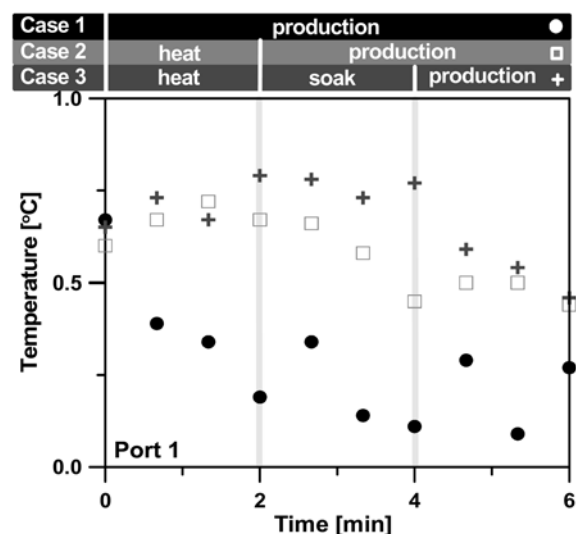


Fig. 7. The temperature versus time under various production methods of methane hydrate.

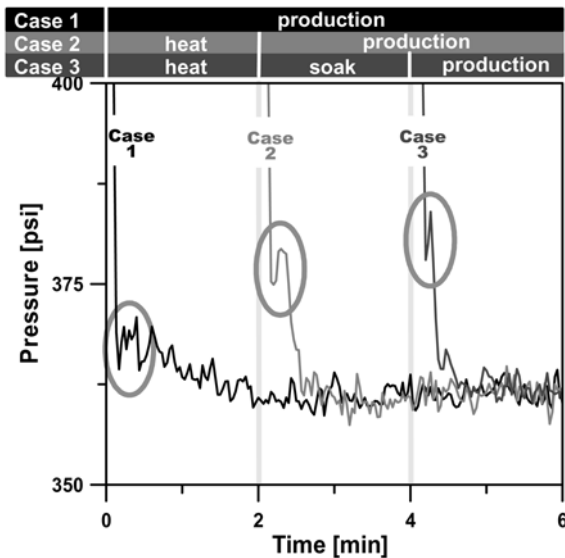


Fig. 8. The pressure behaviors observed under various production methods at port 1.

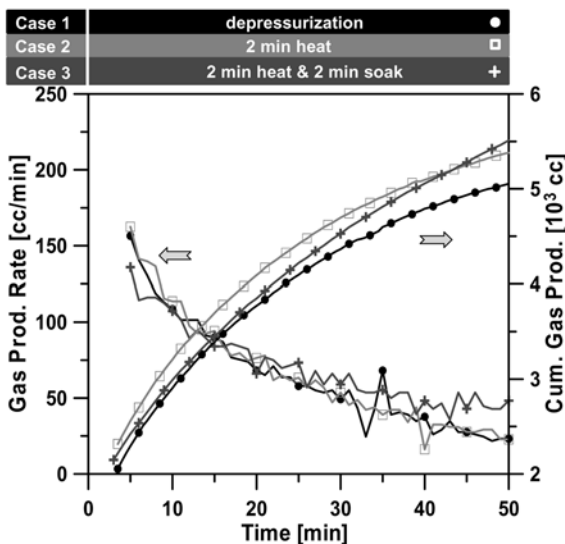


Fig. 9. The production performances observed under various production methods.

우, soaking에 의해 주입지점 주변으로 열이 전달되어 해리영역이 넓어지므로 궁극적으로는 해리가 더 많이 발생하게 된다.

3-4. 적정 soaking 시간 규명실험

열자극법은 열을 주입한 다음 주변으로 열이 전달되도록 하기 위해 soaking 시간을 거친 후 동일한 well에서 생산하는 기법으로 이러한 사이클이 여러번 반복되어 진행된다. 실제 중질(heavy) 유전개발 현장에서 열자극법 적용을 위한 설계시, 주입시간과 soaking 시간 및 사이클 수는 오일 및 저류층의 특성에 따라 결정되는 중요한 요인이다. 여기서 soaking 시간은 열주입 후 soaking 하는 동안에 주변으로 열이 전달되면서 온도가 점차 감소되므로 적절한 soaking 시간이 요구된다. 실제로 하이드레이트 가스전에서 너무 오랫동안 soaking하면 히팅에 의해 상승된 온도가 점차 감소되어 하이드레이트가 재형성될 수 있다. 이에 본 실험의 시스템에서 적정 soaking 시간을 규명하고자, 2분간 히팅하고 2, 4, 6분간 soaking한 후 생산

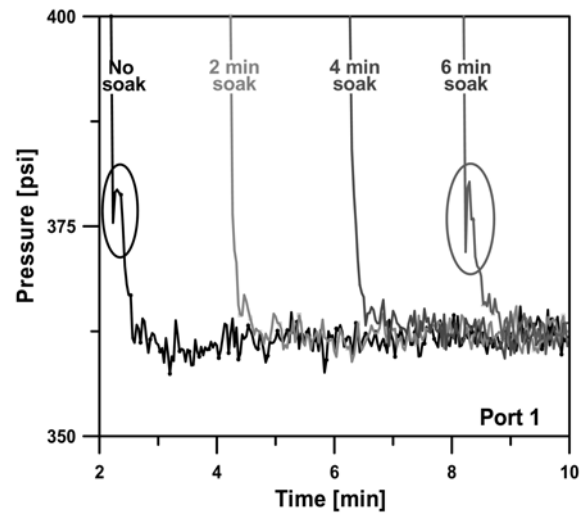


Fig. 10. The pressure versus time observed under thermal stimulation method.

하는 3가지 실험을 하이드레이트 포화도가 낮은 미고결시료 공극시스템에서 수행하였다. 열자극에 의한 3가지 생산실험 결과, 포트 1 지점에서의 압력측정 결과를 Fig. 10에 도시하여 비교, 분석하였다.

Fig. 10의 결과에서 볼 수 있듯이, 히팅 후 곧바로 생산(no soak) 시에는 하이드레이트 해리에 의해 일시적으로 압력이 상승함을 볼 수 있다. 그러나 본 연구의 시스템에서는 히팅 후 2분 및 4분간 soaking한 경우 생산개시 이전에 이미 하이드레이트가 해리되어 가스가 생산되므로 압력상승 없이 단순하강하는 것으로 나타났다. 반면에 가장 길게 soaking한 6분의 경우에는 과다한 soaking으로 인해 해리된 가스가 생산된 이후, 온도가 하강하여 하이드레이트가 재형성되었다가 다시 감압에 의해 해리되면서 일시적인 압력상승이 일어났음을 볼 수 있다. 이러한 양상은 Fig. 11의 회수율 측면에서도 볼 수 있다. 즉, soaking을 2분 및 4분간 진행한 경우 회수율이 각각 생산개시 50분 시점에서 58.5%, 59.3%로서 soaking을 하지 않은 경우의 57.1%에 비해 양호한 것으로 나타났다. 한편, 6분간 soaking했을 때는 회수율이 57.6%로서 2분 및 4분간 soaking한 경우에 비해 오히려 생산량이 감소함을 확인 할 수 있다. 또한 2분 및 4분간 soaking한 경우 시간에 따른 회수율이 감소하지 않고 유지되

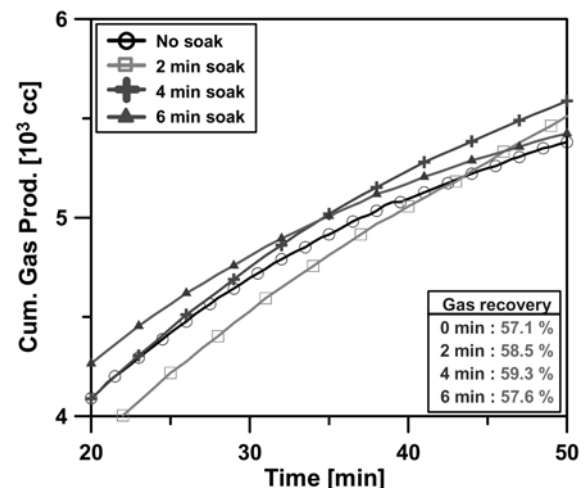


Fig. 11. The cumulative gas production observed under thermal stimulation method.

는 양상을 보이므로, 하이드레이트 포화도가 높고 투과도는 낮은 경우 시간에 따른 회수율 차이가 확연히 드러날 것으로 예상되며, 이는 향후에 필히 수행되어야 할 과제이다.

4. 결 론

본 연구에서는 메탄하이드레이트 시스템에서 감압법 및 열주입·자극법에 의한 생산실험을 수행하기 위해 고압의 다중공 평판형 셀기기 MWPA를 설계·제작하였다. 이 실험장비를 이용하여 미고결 시료 공극시스템에서 감압법과 열주입·자극법에 의한 하이드레이트 해리 및 생산실험을 수행한 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 제작한 실험장치 MWPA에서 등적실험법에 의한 하이드레이트의 평형조건 도출 실험결과, 평형조건은 온도 0.6 °C 하에서 압력 478 psi로 산출되었다. 또한 3회의 평형실험을 통해 산출된 결과는 기존의 문헌에서 보고된 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다.

(2) 공극율 37%, 투과도 685 md의 고투과성 미고결 시료 공극시스템에 가스와 물을 주입하여 하이드레이트 형성실험을 수행한 결과, 2회의 annealing 과정을 거쳤음에도 공극을 메운 고체 포화도(얼음과 하이드레이트) 71% 중 하이드레이트 포화도는 10%로 매우 낮게 산출되었다.

(3) 감압법에 의한 가스생산 실험결과, 일반 가스전에서는와는 다르게 하이드레이트 해리에 의한 공극내에서의 소스효과로 인해 일시적으로 압력이 상승함을 알 수 있다. 또한 하이드레이트는 해리되면서 흡열반응을 일으키기 때문에 온도가 하강함을 확인하였다. 이로 인해 하이드레이트가 재형성될 수 있으므로 감압법에 열주입·자극법을 병행하는 하이브리드 생산기법이 효율적임을 판단할 수 있다.

(4) 열주입·자극법의 생산실험을 수행하여 감압법의 결과와 비교한 결과, 감압법의 경우 열주입·자극법에 비해 해리속도가 느리게 진행되어 가스생산이 낮은 상태로 지속되는 것으로 나타났다. 한편, 열주입·자극법 중 열을 가한 후 곧바로 생산하는 경우 주입지점 주변에서만 해리되고 또한 그 지역에서만 투과도도 커짐으로서 비교적 생산초반부에서 많은 가스가 생산된다. 그 이후 해리속도는 soaking까지 시행한 경우에 비해 해리가 느리게 진행됨을 가스누적생산량 거동양상에서 알 수 있다.

(5) 본 연구의 낮은 하이드레이트 포화도를 갖는 미고결 시료 공극시스템에서 열자극 생산실험을 통한 적정 soaking 시간을 규명하고자 하였다. 이 실험에서 측정된 압력과 생산거동을 살펴본 결과, 6분간 soaking한 경우 회수율이 57.6%로서, 2분 및 4분간 soaking한 경우의 58.5%와 59.3%에 비해 보다 낮은 회수율을 보였다. 이는 온도하강에 의한 하이드레이트 재형성 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 실험을 통해 얻은 결론은 높은 하이드레이트 포화도를 갖는 고결시료 공극시스템에서는 더욱 확연히 드러날 것으로 예상되며, 이는 향후에 필히 시행되어야 할 과제이다.

참고문헌

- McGuire, P. L., "Recovery of Gas from Hydrate Deposits Using Conventional Technology," paper SPE/DOE 10832 presented at the Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, PA, May, 373-387(1982).
- Bayles, G. A., Sawyer, W. K., Anada, H. R., Reddy, S. and Malone, R. D., "A Steam Cyclic Model for Gas Production from a Hydrate Reservoir," *Chem. Eng. Comm.*, **47**(2), 225-245(1986).
- Kamath, V. A. and Godbole, S. P., "Evaluation of Hot Brine Stimulation Technique for Gas Production From Natural Gas Hydrates," *JPT*, **39**(11), 1379-1388(1987).
- Selim, M. S. and Sloan, E. D., "Hydrate Dissociation in Sediment," *SPE*, May, 245-251(1990).
- Islam, M. R., "A New Recovery Technique for Gas Production From Alaskan Gas Hydrates," paper SPE 22924 presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX, Oct.(1991).
- Verigin, N. N., Khabibullin, I. L. and Khalikov, G. V., "Linear Problem of the Dissociation of the Hydrates of Gas in a Porous Medium," *Izvest. Akad. Nauk. SSR, Mekhanika Zhidkosti Gaza*, **1**, 174-177(1980).
- Yousif, M. H., Li, P. M., Selim, M. S. and Sloan, E. D., "Depressurization of Natural Gas Hydrate in Berea Sandstone Cores," *J. Inclusion Phenomena & Molecular Recognition Chem.*, **8**, 77-88 (1990).
- Yousif, M. H., Abass, H., Selim, M. S. and Sloan, E. D., "Experimental and Theoretical Investigation of Methane-Gas-Hydrate Dissociation in Porous Media," *SPE*, Feb., 69-76(1991).
- Seo, Y. T., Kang, S. P. and Lee, H., "Experimental Determination and Thermodynamic Modeling of Methane and Nitrogen Hydrates in the Presence of THF, Propylene Oxide, 1,4-Dioxane and Acetone," *Fluid Phase Equilibria*, **189**(1-2), 99-110(2001).
- Sung, W. M., Lee, H. S., Kim, S. J. and Kang, H., "Experimental Investigation of Production Behaviors of Methane Hydrate Saturated in Porous Rock," *Energy Sources*, **25**(8), 845-856(2003).
- Sung, W. M., Lee, H. S. and Yang, H. J., "An Experimental Study for Hydrate Dissociation Phenomena and Gas Flowing Analysis by Electric Heating Method in Porous Rocks," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **42**(1), 115-120(2004).
- Lee, H., Lee, C. S. and Kang, J. M., "Carbon Dioxide Ocean Sequestration Using Gas Hydrate," *HWAHAK KONGHAK*, **41**(2), 135-146 (2003).
- Kang, S. P., Lee, H., Lee, C. S. and Sung, W. M., "Hydrate Phase Equilibria of the Guest Mixtures Containing CO₂, N₂ and Tetrahydrofuran," *Fluid Phase Equilibria*, **185**(1-2), 101-109 (2001).
- Seo, Y. T., Kang, S. P., Lee, H., Lee, C. S. and Sung, W., "Hydrate Phase Equilibria for Gas Mixtures Containing Carbon-Dioxide: A Proof-of-Concept to Carbon Dioxide Recovery from Multi-component Gas Stream," *KJCHE.*, **17**(6), 659-667(2000).
- Sloan, E. D., *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York(1998).
- Sakamoto, Y., Komai, T., Kawabe, Y., Tenma, N. and Yamaguchi, T., "Gas Hydrate Extraction from Marine Sediments by Heat Stimulation Method," *ISOPE.*, 52-55(2004).
- Sung, W. M., Lee, H. S. and Huh, D. G., "Development of 3D, Multi-phase Simultaneous Flow Model for Hydrate Gas Reservoir," paper SPE 59472 presented at Society of Petroleum Engineers Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Yokohama, Japan, April(2000).