

## 다중공 평판형 장비를 이용한 감압법과 열자극법에 의한 하이드레이트 가스 생산성 분석

이영수 · 왕지훈 · 박정균 · 성원모<sup>†</sup>

한양대학교 공과대학 지구환경시스템공학과  
133-791 서울시 성동구 행당동 17  
(2008년 12월 19일 접수, 2009년 1월 18일 채택)

### Hydrate Production Performance Analysis with Multi-Well, Plate-Type Apparatus Using Depressurization and Thermal Methods

Youngsoo Lee, Jihoon Wang, Jungkyoon Park and Wonmo Sung<sup>†</sup>

Department of Geoenvironmental Eng., Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea  
(Received 19 December 2008; accepted 18 January 2009)

#### 요 약

본 연구에서는 투과도 80 md, 하이드레이트 포화도 30%의 다중공 평판형 시스템에서 열자극-감압법에 의한 생산실험을 수행하여 하이드레이트의 해리양상 및 생산효율을 관측 및 분석하였다. 감압의 크기에 따른 실험결과에서, 운영 압력을 낮게 설정하면 높은 가스회수율을 얻을 수 있지만 생산초기 나타나는 강한 펄스가 생산전 운영에 무리를 줄 수 있다고 판단되었다. 또한 흡열반응에 의한 하이드레이트 재형성으로 오히려 회수율이 감소하는 경우가 발생하였다. 감압법 적용시의 생산거동을 더 상세히 분석하기 위해, 감압크기 140 psi와 320 psi에 대해 각각 4, 6회의 반복실험을 진행하였다. 그 결과, 140 psi로 감압크기를 설정한 경우, 생산초기에 불안정한 거동이 나타나지만, 빠르게 안정화됨을 알 수 있었다. 320 psi의 실험결과에서 불연속적이며 간헐적인 생산거동을 확인할 수 있었다. 열자극 실험은 안정적인 생산거동을 보이며 회수율이 비교적 낮아 열자극의 효과를 잘 관찰할 수 있는 압력차 80 psi를 적정운영 압력으로 설정하여 수행하였다. 열자극-감압 혼용기법의 결과로부터 열자극시간이 증가할수록 가스회수율은 증가하였지만, 반면 에너지효율은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 열을 2분간 가한 후 열흡수 시간을 1분으로 설정한 경우 본 시스템에서는 회수율이 상승하였으며, 에너지효율 또한 증가되는 결과를 얻었다. 하지만, 열흡수 시간이 1분 이상일 경우 오히려 더 낮은 회수율과 에너지효율을 보였는데 이는 긴 열흡수 시간으로 인한 열손실에 기인한 것으로 판단된다.

**Abstract** – This paper presents the experimental study to analyze the pressure and production behavior using depressurization and thermal methods in order to evaluate the hydrate productivity in the 2-D multi-well, plate-type apparatus which has 80 md permeability and 30% hydrate saturation. Injecting methane gas through multi-well allowed to set up the highly saturated hydrate system and combining two different sorts of sands made possible to build up the low permeability system. In this system, both depressurization and electric stimulation methods were applied. When operating pressure was low, according to the depressurization experiments results, the gas recovery was high, however strong pulses which appeared at initial stage of production would damage the operation system. Moreover, cases that hydrate reformed have occurred by endothermic reaction. We have conducted experiments four and six times for the depressurization magnitudes of 140 psi and 320 psi, respectively, to analyze production behavior for the method more in detail. For the cases that the depressurization magnitude was set as 140 psi, the unstable period appears in the results, but stabilized soon. In the experiment results for 320 psi the discontinuous and intermittent behavior has been observed. Thermal stimulation experiments was conducted with depressurizing 80 psi which is the case that shows stable behavior and low recovery. In the results, the gas recovery was high and the energy efficiency was low for long stimulating time. The energy efficiency and gas recovery increased for the soaking time of 1 minute after 2 minute-preheating. In the cases of which the soaking time exceeds 1 minute, energy loss by long soaking time caused low gas recovery and poor energy efficiency.

Key words: Hydrate, Depressurization, Electric Stimulation, Recovery, REER

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: wmsung@hanyang.ac.kr

### 1. 서 론

하이드레이트 가스전에서 천연가스 생산을 위한 방법은 감압법 (Depressurization), 열자극법(Thermal stimulation), 화학첨가제 주입법(Inhibitor injection) 등으로 구분할 수 있다. 감압법은 저류층의 압력을 평형조건의 압력보다 낮게 떨어뜨려 하이드레이트를 생산하는 방법이며, 열자극법은 하이드레이트 저류층에 열을 주입하여 지층의 온도를 평형조건보다 높게 유지시킴으로써 하이드레이트를 해리시키는 방법이다. 여기서 열을 주입하는 매체로는 증기, 열수, 전기열 등이 있다. 또한 화학첨가제 및 염수주입법은 메탄올과 같은 화학첨가제나 염화나트륨이 함유된 물을 주입하여 하이드레이트의 평형조건 자체를 변화시켜 해리시키는 방법이다. 이와 같은 생산기법의 성공적인 적용을 위해서는 저류층 공극내에서의 하이드레이트 형성 및 해리메커니즘에 대한 이해와 해리된 기체와 물의 동시유동현상을 규명하는 것이 필수적이다. 이에 관한 하이드레이트 개발 실험연구로는 Yousif 등[1, 2]이 베레아 사암을 사용하여 하이드레이트의 형성 및 해리현상을 관찰한 바 있다. Uchida 등[3, 4]은 실리카 겔을 이용하여 인공적으로 형성한 미고결 공극내에서 하이드레이트 상평형 실험을 수행하여 공극의 크기가 하이드레이트 평형조건에 미치는 영향을 분석하였다. Sung 등[5]은 베레아 사암에서 하이드레이트의 형성 및 해리현상을 관찰하고, 감압법, 열자극법, 화학첨가제 주입법에 의한 생산 실험을 수행하였다. Kneafsey와 Tomutsa[6]은 사암 내에서 하이드레이트의 형성, 열자극 및 감압법에 의한 생산 실험을 수행하여 매개체의 열적특성을 평가하고 하이드레이트가 비평형상태로 변화하는 과정을 관측하였다. Sakamoto와 Komai[7]는 열수주입에 의한 메탄하이드레이트의 해리에 관한 실험연구를 수행하여, 이 실험결과를 토대로 하이드레이트 생산 시뮬레이터를 개발하였다.

본 연구에서는 열자극법과 감압법을 병행하는 하이브리드 생산기법을 이용한 하이드레이트 생산실험을 수행하기 위해 고온·고압용 다중공 평판형 하이드레이트 유동실험 장치를 고안하여 설계 및 제작하였으며, 이 장치를 이용하여 미고결시료 공극시스템에서의 하이드레이트 해리에 의한 감압법과 열자극법에 의한 생산실험을 수행하여 메탄하이드레이트의 생산기동을 분석하였다.

### 2. 하이드레이트 생산장비 및 실험방법

#### 2-1. 하이드레이트 생산장비

본 연구에서는 하이드레이트의 생성 및 생산실험을 위해 Fig. 1과 같이 실험 시스템을 구성하였으며, 다중공 평판형(multi-well, plate-type) 하이드레이트 유동실험 장치를 고안하여 설계 및 제작하였다. 이 장치를 이용, 여러 지점에서의 생산 및 주입은 물론 생산·주입 정들 간의 간섭효과와 관찰을 가능하게 함으로써 실제 하이드레이트 저류층으로의 적용성을 높이고자 하였다. 하이드레이트 저류층의 낮은 온도 및 높은 압력조건을 구현할 수 있도록 강한 재질의 금속인 “sus”로 제작된 셀장치는 내경 200 mm, 외경 250 mm, 높이 120 mm의 원판형이다(Fig. 2). 장비를 원판형으로 설계하고 나선형으로 잠금장치를 제작함으로써 고압의 메탄가스를 사용하는 본 실험의 경우 압력을 제어하기가 용이할 수 있도록 하였다. 셀장치는 미고결 다공성매질뿐만 아니라 고결 암석시료를 사용할 수 있도록 설계되었으며, 직경 200 mm, 두께 20~30 mm 부피의 매질을 이용하여 실험

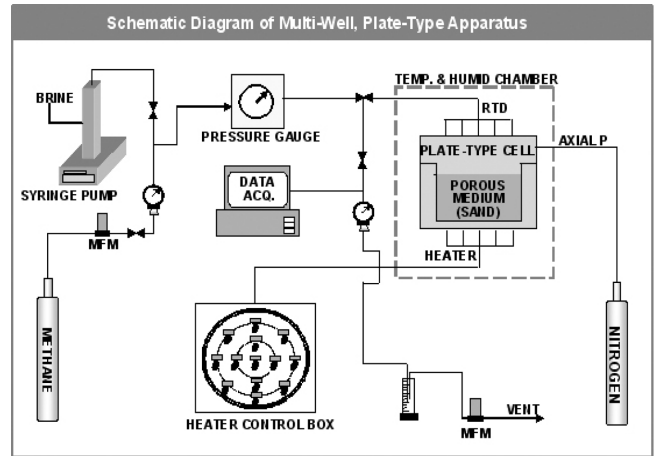


Fig. 1. Schematic diagram of total system.

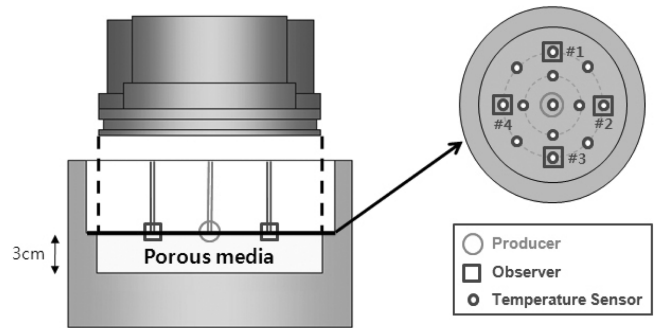


Fig. 2. Schematic diagram of 2-D cell apparatus.

를 수행할 수 있다. 또한 질소를 이용하여 상부실린더로부터 슬리브로 봉한 다공성매질에 봉압을 가함으로써 유체가 매질 내부로만 유동이 일어날 수 있도록 하였다. 셀의 상부에는 압력포트 13개와 온도 관찰을 위한 RTD 센서 13개가 위치하여, 생산시 가스 고립이나 하이드레이트 플러깅 현상이 나타나는 지점의 압력과 온도 변화를 관찰할 수 있도록 하였으며, 하부셀 판과 나선형식으로 접합되도록 제작하여 높은 압력에도 견딜 수 있도록 하였다. 셀의 하부에는 열자극법 실험을 수행할 수 있도록 13개의 히터를 상부셀 판의 압력포트 및 RTD 센서의 위치와 동일하게 설치하였다. 히터는 외부의 컨트롤 박스와 연결되고 압력포트와 RTD 센서는 자료취득 시스템에 연결되어 실시간으로 압력 및 온도가 측정되도록 설계하였다. 또한 미고결 시료를 사용하기 때문에 매질과 튜빙 사이에 시브(sieve)를 설치하여 시료입자가 유체와 함께 생산되는 현상을 방지하였다.

#### 2-2. 하이드레이트 생산실험 방법

본 연구에서는 균질한 투과성 매질을 구성하기 위하여 입자직경이 300 μm 크기인 모래와 180 μm 크기인 모래를 8:2 비율로 배합하여 투과도 80 md 시스템 조건에서 생산실험을 수행하였다. 또한, 실험 수행과정에서 타당한 자료취득을 위해 균질한 하이드레이트 분포 구현을 목표로 하여 메탄가스의 단계적 주입방법과 가열냉각(annealing) 과정을 적용하였다. 단계적 주입방법은 가스를 주입하여 하이드레이트를 형성시킨 후, 하이드레이트 형성으로 인해 시스템내의 압력이 하강하면 가스를 재주입하여 하이드레이트를 추가로 형성시키는 방법이다. 하지만 하이드레이트가 형성됨에 따라 시스템의 투과도

가 감소하여 추가적인 가스 주입이 어려워지기 때문에 본 연구에서 설계한 다중공을 이용하여 가스를 주입함으로써 높은 하이드레이트 포화율의 시스템을 빠른 시간내에 구현할 수 있었다. 가열냉각과정은 하이드레이트 형성 후 시스템의 온도를 상승시켜서 생성된 하이드레이트를 해리시키는 과정을 수차례 반복함으로써 하이드레이트가 시스템 전체에 균질하게 분포되도록 하는 방법으로, 지속적인 모니터링과 적절한 온도-시간 설정이 중요하다.

현재 전세계에서 상업적인 생산을 목표로 해양 하이드레이트를 개발중인 프로젝트들의 하이드레이트 포화율은 10~60%이며, 대부분 30% 내외의 하이드레이트 포화율을 나타내고 있다. 또한 60%의 하이드레이트 포화율을 구현하기 위해서는 실험시간 및 재현성의 문제가 발생하였으며 낮은 포화율에서는 너무 빠른 시간에 생산이 종료되어 하이드레이트의 해리 및 생산 경향을 판단하기 어려운 문제가 있었다. 따라서 본 연구에서는 시스템의 하이드레이트 포화율을 30%로 선정하여 2회의 가열냉각 과정을 거쳐 하이드레이트를 생성하였다.

하이드레이트의 포화율을 계산하기 위하여 다음의 식을 적용하였다[8].

$$S_H = \frac{Q_w [m^3]}{172} \cdot \frac{\Delta P [MPa]}{P_0 [MPa]} \cdot \frac{T_0 [K]}{T_f [K]} \cdot \frac{1}{A [m^2] L [m] \phi} \quad (1)$$

여기서,  $Q_w$ 는 주입된 메탄가스에 의해 제거된 물의 부피,  $\Delta P$ 는 초기압력과 하이드레이트가 형성된 후의 압력차,  $P_0$ 는 표준압력,  $T_0$ 은 표준온도,  $T_f$ 는 하이드레이트의 형성 온도,  $A$ 는 시료의 단면적,  $L$ 은 두께,  $\phi$ 는 공극률을 의미한다.

### 3. 결과분석

#### 3-1. 평형조건 측정

본 연구에서는 하이드레이트의 생성 및 해리현상을 육안으로 직접 관찰할 수 없는 경우에도 사용할 수 있는 장점을 가진 등적실험을 통해 하이드레이트의 평형조건을 측정하였다.

미고결시료로 패키징된 셀에 일정한 압력으로 물과 가스를 주입한 후, 셀 내부 온도를 서서히 하강시키면 하이드레이트가 형성됨에 따

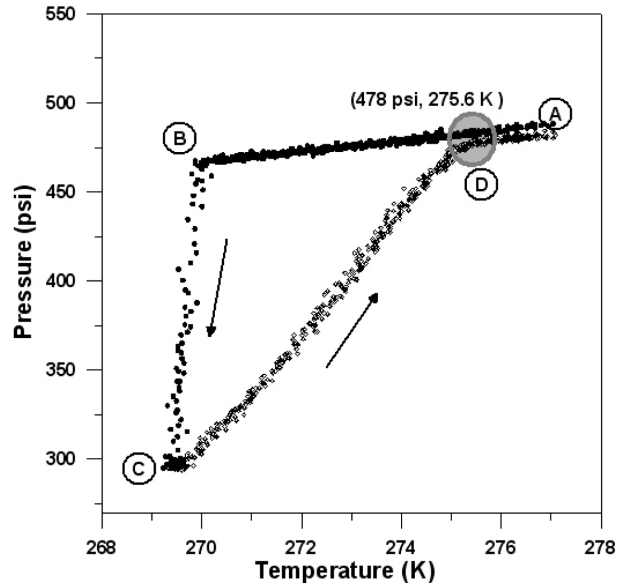


Fig. 4. Temperature and pressure traces for formation of simple methane hydrates.

라 압력이 급격하게 감소된다. 이 때, 더 이상의 압력변화가 없으면 온도를 서서히 올려주면서 압력변화를 측정한다. Fig. 4는 시작점 A(488 psi, 0 K)에서 등적실험을 수행하여 취득한 온도-압력 곡선이다. 그림에 나타난 바와 같이 온도를 감소시키에 따라 압력이 서서히 감소하고 B에서부터 하이드레이트 형성으로 인해 압력이 크게 낮아지게 된다. 하이드레이트가 충분히 형성되어 더 이상의 압력변화가 없는 C지점에서 온도를 서서히 높여가며 해리곡선을 산출하였다. 하이드레이트의 형성곡선과 해리곡선이 만나는 점 D(478 psi, 275.6 K)가 하이드레이트의 평형조건이다. 이상의 실험을 3회 수행하여 얻은 결과를 탱크형 반응기에서 평형실험을 실시한 Sloan[9]의 결과와 비교하였으며, 본 연구에서의 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

#### 3-2. 감압법에 의한 생산 실험 결과 분석

본 연구에서는 감압크기( $\Delta P$ )에 따른 하이드레이트 해리거동을 분석하기 위해 감압크기를 80 psi에서 320 psi까지 60 psi 간격으로 조정하며 총 5회의 실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

이 결과, 감압크기가 비교적 작은 80, 140, 200 psi의 경우(Fig. 5) 일정시간 경과 후 생산거동이 안정화되는 것으로 나타났으나, 감압크기가 비교적 큰 260, 320 psi의 경우(Fig. 6)에서는 전 구간에서 불안정한 생산거동이 관찰되었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 이 결과를 생산시작으로부터의 경과시간에 따라 A, B, C의 세 구간으로 나누어 분석하였다. 먼저 80 psi의 경우, 생산 종료시점까지 생산량의 급격한 변화없이 생산됨을 보이고 있다. 압력차가 140 psi인 실험결과에서는 구간의 초기에 생산량이 급격히 변화하는 펄스현상이 관찰되었지만, 생산시작 5분 이후부터는 안정적인 생산거동을 보였다. 또한 200 psi의 실험결과에서는 A구간에서의 강렬한 펄스와 B구간 초기에서의 생산량 변동 양상을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 하이드레이트의 해리속도와 생산속도의 차이로 인한 것으로 분석된다. 생산초기에 생산정 주변의 자유가스가 먼저 생산

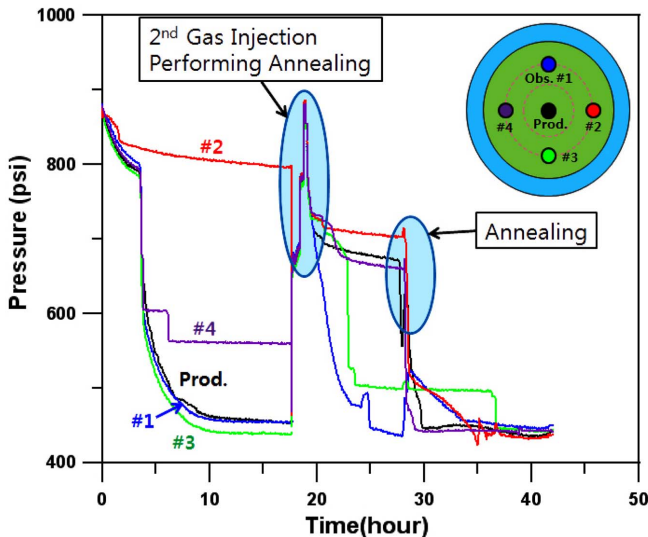


Fig. 3. Hydrate formation and annealing process.

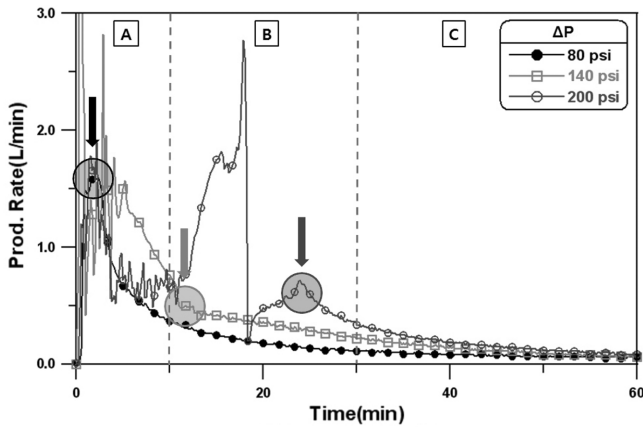


Fig. 5. Gas production performances by using depressurization method.

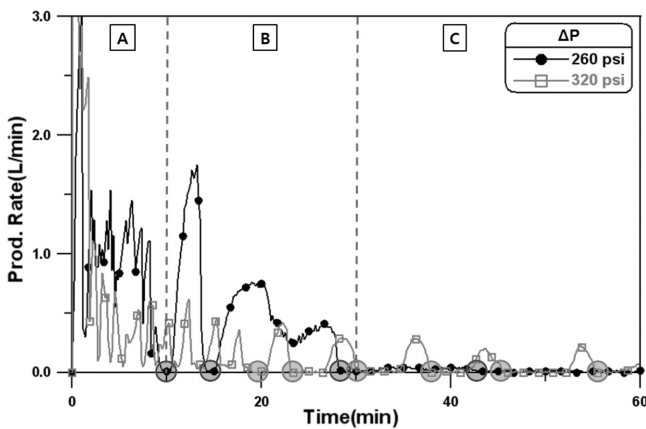


Fig. 6. Gas production performances by using depressurization method.

되기 시작하며 이에 따른 압력강하로 인해 하이드레이트가 해리되기 시작한다. 감압의 크기가 큰 경우 생산이 해리보다 빠르게 이루어짐에 따라 생산정 주변의 자유가스가 모두 생산된 후 추가적인 해리가 일어날 때까지 생산량이 감소하고 잠시후 해리가스의 생산이 재개되는 불연속적 거동이 나타나게 된다. 이후 가스의 생산속도와 해리속도가 평형을 이루는 시점으로부터 안정적인 생산이 진행되는 것이라 판단된다. 따라서 감압크기 140 psi 및 200 psi의 결과에서 나타나는 펄스현상은 하이드레이트의 생산속도와 해리속도의 차이로 인한 것으로 분석되며, 80 psi의 결과에서는 이러한 과정이 나타나지 않고 생산시작시점부터 안정적인 생산이 진행되는 것이 관찰된다.

비교적 감압크기가 큰 260, 320 psi의 실험결과(Fig. 6), 생산기간의 전 구간에서 생산이 일시적으로 중단되는 현상이 반복하여 나타나는 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 해리된 가스가 낮은 운영압력으로 인하여 급속도로 빠져나간 후 하이드레이트가 해리될 때까지 일정시간이 소요되고, 다시 하이드레이트가 해리됨에 따라 생산이 재개되어 나타나는 현상으로 판단된다. 이때 재개된 생산량은 앞선 200 psi 감압실험의 경우보다 작는데 이것은 플러깅 현상에 의해 감압의 영향이 좁은 지역에 국한되었기 때문으로 분석된다. Fig. 6에 표시된 부분과 같이, 감압크기 260 psi 실험의 경우 일시적인 생산 중단 현상이 4회(10분, 15분, 28분, 44분) 나타난 반면, 감압크기가 가장 큰 320 psi의 경우 이 현상이 6회(20분, 23분, 30분, 38분, 46분, 55분) 관찰되었다.

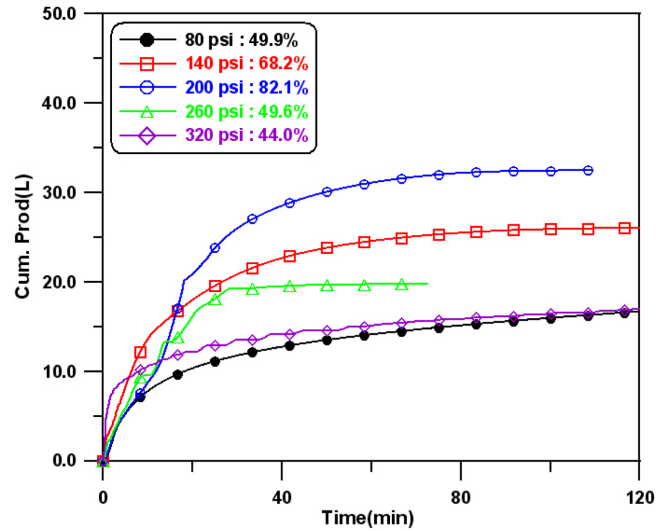


Fig. 7. Cumulative gas production for each operating pressure during hydrate dissociation using depressurization method.

감압법에 의한 생산실험 결과로 나타난 가스 생산량을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림을 살펴보면, 감압크기가 비교적 작은 200 psi 까지의 결과에서는 회수율이 감압의 크기가 커짐에 따라 증가하지만, 260 psi 이상의 경우에는 오히려 회수율이 감소하는 것으로 나타났다. 전자의 경우, 감압의 크기가 커짐에 따라 생산되는 자유가스의 양이 늘어나기 때문에 감압이 커질수록 회수율이 증가한 것이다. 반면 후자의 경우에는 공극내 하이드레이트의 플러깅 현상으로 인한 가스고립 때문에 감압이 커져도 회수율은 작아짐을 볼 수 있다. 따라서 감압크기에 따른 하이드레이트 생산실험 결과, 운영압력을 낮게 설정 즉 감압을 크게 하여 운영하는 것은 지층과 생산정 및 운영장비에 무리를 줄 수 있으며, 오히려 생산성도 감소할 수 있으므로 안정적 생산운영과 높은 가스생산성을 위하여 감압의 크기를 적절하게 설정하는 것은 매우 중요한 과업이라 판단된다. 본 시스템의 경우 가스의 회수율은 감압크기 200 psi 일 때가 가장 양호하였지만 불연속·불안정적인 생산거동이 나타났기 때문에, 회수율이 70% 이상이며 비교적 안정적인 생산거동을 보인 감압크기 140 psi가 생산 적정압력이라 판단된다.

3-3. 동일 감압크기에 대한 반복생산 실험 결과 분석

시스템에 형성된 하이드레이트 분포의 차이에 의해 감압크기가 동일한 경우일지라도 매번 실험을 수행할 때마다 다른 생산거동을 보일 수 있으므로 이러한 양상의 변화를 관찰하고, 이를 통해 일반적인 생산 경향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 안정적 생산거동을 나타낸 140 psi와 불안정적 거동을 보인 320 psi를 선정하여 수차례의 반복실험을 수행하였다.

먼저, 감압크기 140 psi의 결과, 생산거동 양상을 살펴보면 4회의 실험 모두에서 동일한 거동이 나타난다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 6분부터 12분 사이에서 일시적인 불연속적 생산거동이 관찰되었는데, 이는 하이드레이트의 해리보다 생산이 빠른 속도로 일어나기 때문에 나타나는 현상으로 분석된다. 생산초기, 생산정 주변의 자유가스가 생산된 후 추가적인 해리가 일어날 때까지 일시적인 불연속적 거동이 나타나며, 이후 가스의 생산속도와 해리속도가 평형을 이루면서 안정적인 생산이 진행되는 것이라 판단된다. 가스누적생산량

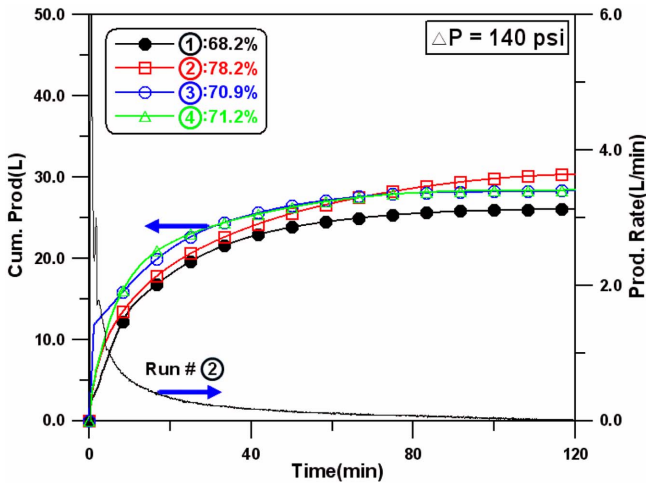


Fig. 8. Gas production rate(#2) and cumulative gas production for P = 140 psi during hydrate dissociation using depressurization method.

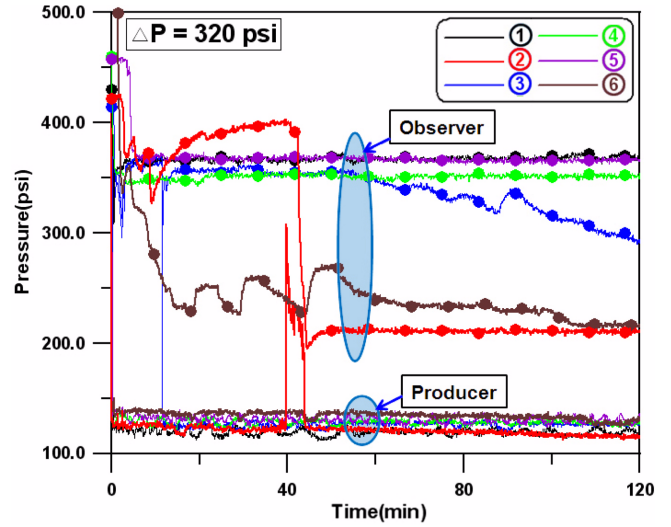


Fig. 10. Pressure behavior using depressurization method.

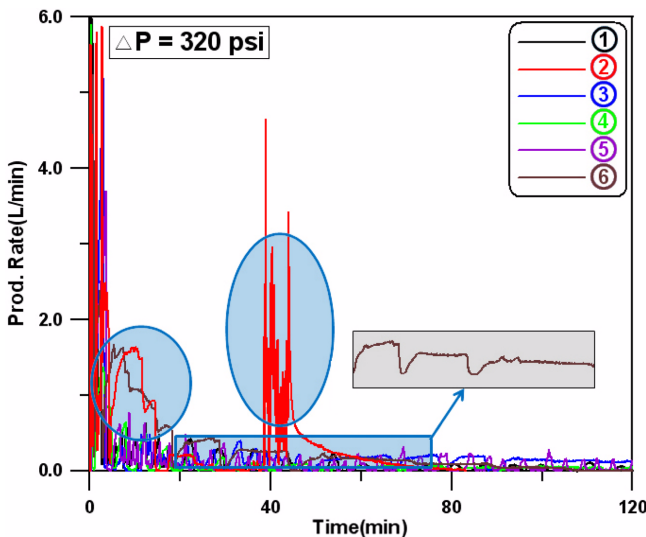


Fig. 9. Gas production rate for during hydrate dissociation using depressurization method.

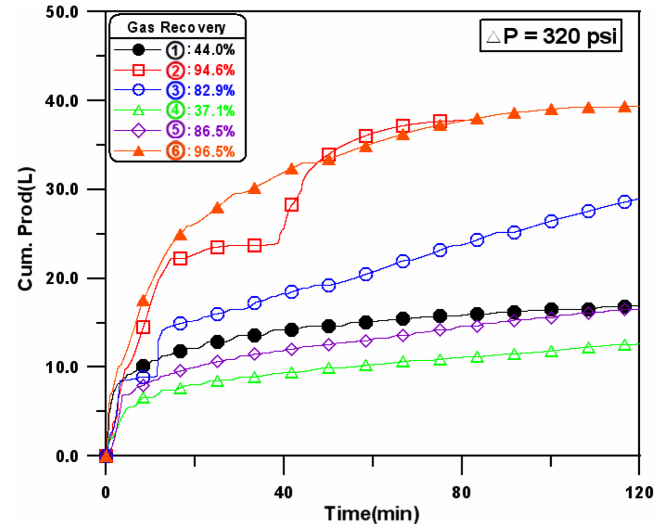


Fig. 11. Cumulative production for during hydrate dissociation using depressurization method.

결과(Fig. 8)에서 보듯이, 4회의 실험에서 나타난 회수율 또한 생산 거동과 마찬가지로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

반면에, 큰 감압크기로 인하여 하이드레이트의 분포변화에 따라 생산거동에서의 변동이 크게 나타날 것으로 예상된 감압 320 psi에 대한 반복실험을 총 6회 수행하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 모든 실험결과에서 생산초기의 강렬한 펄스와 일시적 생산중단-재개가 반복되는 생산거동이 관찰되었는데, 그 중 ②번과 ⑥번 실험의 경우 표시된 부분과 같이 많은 양의 가스가 생산되는 현상이 나타났다. 이러한 거동이 나타나는 것과 동시에 관측점 지점의 압력이 약 400 psi에서 200 psi로 감소하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 10). 이는 관측점 지점에 고립되어 있던 자유가스가 생산된 것으로 판단된다. 생산시간이 2시간 경과한 후 생산정과 관측점 지점의 압력차이는 번과 번을 제외한 실험에서 200 psi 이상으로 나타나 많은 양의 자유가스가 생산종료시점까지도 생산되지 못하고 고립되어 있는 것을 알 수 있으며, 각 실험의 가스생산량(Fig. 11)에서도 가스고립으로 인한 낮은 회수율을 확인할 수 있다. 이러한 결과에서 알 수 있

듯이, 감압의 크기가 클 경우 시스템의 변동에 따라 생산-압력 거동과 회수율에서의 큰 차이가 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

### 3-4. 열자극법에 의한 생산 실험 결과 분석

가스 하이드레이트 해리를 위한 세 가지 방법 중에서 감압법은 가장 경제적이라 할 수 있지만, 해리속도와 회수율이 저조한 생산 기법이기 때문에 효과적인 하이드레이트 생산을 위하여 생산 전 혹은, 생산초기에 하이드레이트 해리를 촉진할 수 있는 자극(stimulation) 기법이 요구된다. 이에 본 연구에서는 하이드레이트 해리를 촉진하고 감압법의 효율성을 극대화하고자 전기적 열자극법(electric heating stimulation method)을 이용, 생산실험을 수행하였다. 이와 같이 열 자극-감압 혼용기법을 적용하여 열자극 시간(heating time)과 열흡수 시간(soaking time)에 따른 하이드레이트 해리 및 생산 거동양상과 에너지효율을 계산, 분석하여 가장 효율적인 생산기법을 도출하고자 하였다. 에너지효율(EER; energy efficiency ratio)은 다음의 식과 같이 정의된다[10].

$$EER = \frac{\text{Energy of Cum. Gas Produced}}{\text{Cum. Heating Energy Supplied}} \quad (2)$$

본 연구에서는 EER, factor를 이용하여 REER(Relative Energy Efficiency Ratio)을 산출하고 감압 실험과의 비교를 통한 상대적 효율을 분석하고자 하였다. EER는 각 열자극 실험에서 구한 EER을 외삽법을 이용하여 구한 값으로, 최소한의 에너지 주입 시, 즉 열자극이 없을 때의 EER을 의미한다.

$$EER = \frac{\text{Energy of Cum. Gas Produced}}{\text{Cum. Heating Energy Supplied}} \quad (3)$$

열자극법 실험을 수행하기 위해, 회수율이 비교적 낮아 열자극 및 열흡수에 의한 회수율 상승효과를 관찰하기 용이할 것이라 판단되는 감압크기 80 psi를 운영 압력으로 결정하였다.

열은 시스템 중앙의 생산정 하부에서 일정하게(10 J/sec) 주입되며, 열자극 시간을 2, 3, 5, 7분으로 설정하여 실험을 수행하였다. 열자극 적용 실험의 생산거동 결과는 생산시작 후 10분까지의 시간을 기준으로 구분하여 도시하였다(Fig. 12, 13).

생산시작 후 10분까지의 결과(Fig. 12)를 보면 열자극 시간을 2분으로 설정한 경우 생산초기 불연속적 거동이 나타나는데, 이것은 짧

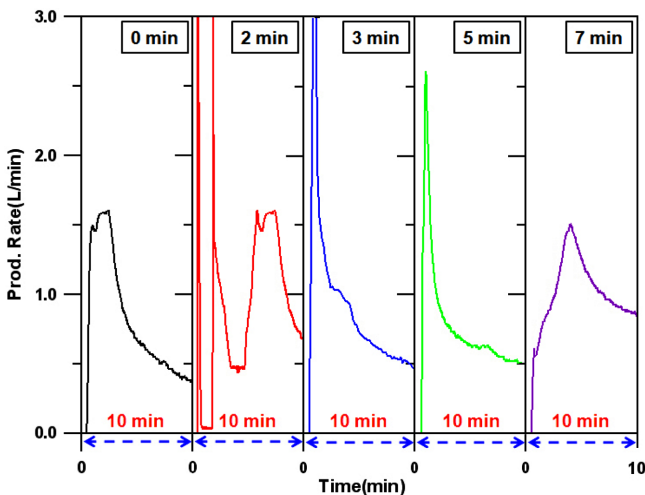


Fig. 12. Gas production rate during hydrate dissociation using thermal stimulation method.

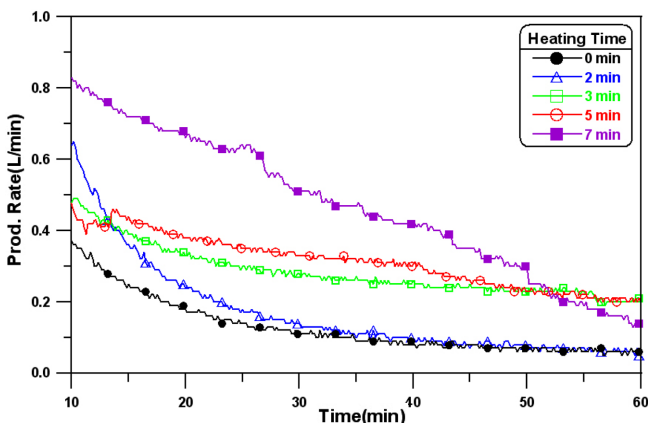


Fig. 13. Gas production rate during hydrate dissociation using thermal stimulation method.

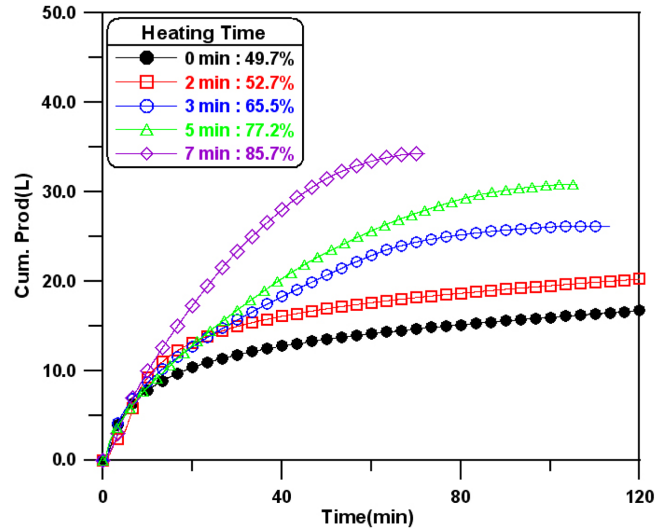


Fig. 14. Cumulative production during hydrate dissociation using thermal stimulation method.

은 열자극 시간으로 인해 열자극의 효과가 좁은 지역에 국한되었기 때문으로 분석된다. 반면 3, 5, 7분 열자극을 시행한 결과(Fig. 13), 열자극 시간이 길수록 시간당 가스유동량과 회수율(Fig. 14)이 증가하며 초기 생산량이 감소하는데, 이는 더 넓은 지역의 하이드레이트가 해리되어 그에 따른 투과도 상승에 의해 생산정에서 먼 지역에서의 하이드레이트가 생산되기 때문이다. 각 열자극 시간에 따른 회수율 결과를 감압법만을 적용한 결과와 비교해보면, 2분간 열자극을 시행한 경우에는 회수율 상승효과가 3%로 미미했지만, 열자극을 3분 이상 시행하면 15% 이상의 회수율 증진효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

각 실험 결과의 효율성 및 적정성을 판단하기 위해 Table 1과 같이 REER을 평가하였다. 그 결과 열을 적게 주입할수록 REER이 높게 평가되었으므로, 열주입의 최적조건을 판단하기에는 무리가 있었다. 따라서 열흡수 과정을 적용하여 주입된 열이 주변으로 전달될 수 있도록 함으로써 동일한 에너지 주입으로 높은 회수율을 얻고자 하였다. REER이 가장 높고 회수율이 낮은 열자극 시간 2분을 적정 열자극 시간으로 설정하고, 열자극 후의 열흡수 시간을 1분, 2분, 4분 적용하여 생산실험을 수행하였다. 이 결과로부터 각 열흡수 시간에 따른 가스의 생산거동 양상과 회수율, REER의 변화 등을 살펴보았다. 생산시작 10분부터의 가스 생산거동 그래프(Fig. 15)를 보면, 열흡수 시간 1분을 적용한 경우 열흡수 시간을 가지지 않은 결과와 비교했을 때 생산 감쇄율이 작아진 것을 관찰할 수 있다. 하지만, 2분, 4분 동안 열흡수 시간을 적용한 경우, Fig. 15의 표시된 부분과 같이 불연속적인 생산거동이 관찰되었는데, 이는 길 열흡수 시간 적용으로 인하여 열의 손실이 발생하였기 때문으로 분석된다. 가스생산량 결과(Fig. 16)를 보면, 열흡수 시간 1분을 적용하였을 때

Table 1. REER for both each heating time and each soaking time

Heating Time (min)	REER (%)	Soaking Time (min)	REER (%)
2.0	75.37	0.0	75.37
3.0	62.40	1.0	80.54
5.0	44.16	2.0	75.43
7.0	35.01	4.0	72.51

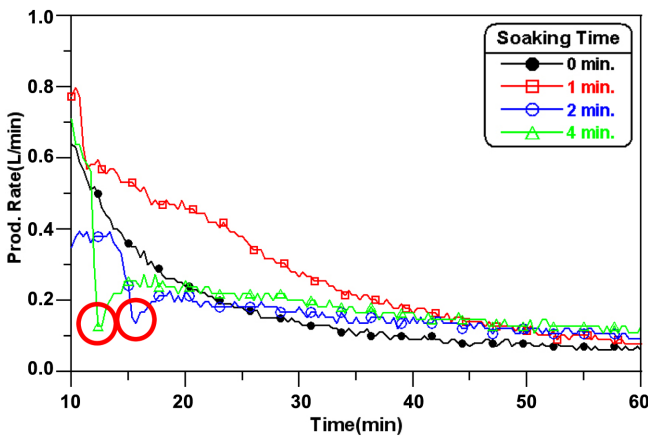


Fig. 15. Gas production rate for each soaking time after 2 min. preheating.

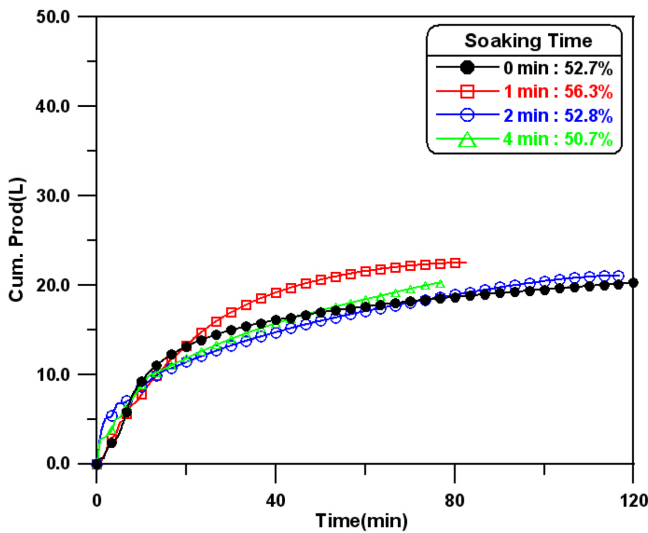


Fig. 16. Cumulative gas production for each soaking time after 2 min. preheating.

의 회수율이 가장 높으며, 열흡수 시간을 길게 적용할수록 열의 손실로 인해 회수율이 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. REER 결과 (Table 1)에서도 열흡수 시간 1분의 경우가 가장 에너지효율이 높으며, 2분, 4분으로 열흡수 시간이 길어짐에 따라 에너지효율이 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다중공 평판형 하이드레이트 유동실험 장치를 제작하여 이 장치에서 감압법 및 열자극법에 의한 생산실험을 수행하였으며 하이드레이트의 해리양상 및 생산효율을 관측 및 분석하였다. 서로 직경이 다른 두 종류의 모래를 일정비로 혼합하여 투과도 80 md의 시스템을 구성하였으며, 가스의 단계적주입방법과 가열냉각과정을 통하여 균질한 30% 포화율의 하이드레이트 분포를 구현하였다.

(1) 감압법 적용 실험결과에서, 감압크기를 크게 하면 높은 가스 회수율을 얻을 수 있지만 생산초기 나타나는 강한펄스가 생산전 운영에 무리를 줄 수 있다고 판단되었다. 또한 감압크기가 260 psi 이

상으로 클 경우, 흡열반응에 의한 하이드레이트 재형성으로 오히려 회수율이 감소한 경우가 발생하였다.

(2) 감압크기를 140 psi로 설정하여 추가실험을 진행하여, 생산초기의 일시적 불연속적 거동과 그 이후의 안정적인 생산 거동을 총 다섯 번의 실험을 통해 확인하였다. 감압크기 320 psi에 대한 총 6 번의 실험결과, 불안정한 생산거동과 간헐적인 가스생산이 관찰되었다.

(3) 하이드레이트 가스전의 가장 양호한 생산기법인 감압법과 열자극법의 혼용기법을 통하여 하이드레이트 생산실험을 수행하였다. 열자극 시간을 2분으로 설정한 경우 열자극의 효과가 좁은 지역에 국한되어 생산초기 불연속적 거동이 나타났다. 열자극 시간을 길게 할수록 초기 생산량이 감소하고 회수율이 증가하였으며, 에너지효율인 REER은 감소하였다.

(4) 열자극을 2분동안 수행한 후 열흡수 시간을 적용한 결과, 1분 동안 열흡수를 시행한 경우 회수율이 상승하였으며, REER 또한 증가된 결과를 얻었다. 하지만, 열흡수 시간을 길게 설정한 경우 회수율과 REER이 더 낮아졌는데 이는 긴 열흡수 시간으로 인한 열의 손실에 의한 것으로 판단된다.

#### 감 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 지원을 받아 수행되었습니다(하이드레이트 생산 실험연구).

#### 참고문헌

1. Yousif, M. H., Li, P. M., Selim, M. S. and Sloan, E. D., "Depressurization of Natural Gas Hydrate in Berea Sandstone Cores," *Journal of Inclusion Phenomena & Molecular Recognition Chemistry*, **8**(1-2), 71(1990).
2. Yousif, M. H., Abass, H., Selim, M. S. and Sloan, E. D., "Experimental and Theoretical Investigation of Methane-Gas-Hydrate Dissociation in Porous Media," paper SPE 18320, *Journal of SPE Reservoir Engineering*, **6**(1), 69-76(1991).
3. Uchida, T., Ebinuma, T. and Ishizaki, T., "Dissociation Condition Measurements of Methane Hydrate in Confined Small Pores of Porous Glass," *Journal of Physical Chemistry B*, **103**(18), 3659-3662(1999).
4. Uchida, T., Ebinuma, T., Takeya, S., Nagao, J. and Narita, H., "Effects of Pore Sizes on Dissociation Temperatures and Pressures of Methane, Carbon Dioxide, and Propane Hydrates in Porous Media," *Journal of Physical Chemistry. B*, **106**(4), 820-826(2002).
5. Sung, W. M. and Kang, H., "Experimental Investigation of Production Behaviors of Methane Hydrate Saturated in Porous Rock," *Energy Sources*, **25**(8), 845-856(2003).
6. Kneafsey, T. J., Tomutsa, L., Taylor, C. E., Gupta, A., Moridis, G., Freifeld, B. and Seol, Y., "Methane Hydrate Formation and Dissociation in a Partially Saturated Sand," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **56**(1-3), 108-126(2004).
7. Sakamoto, Y., Komai, T., Kawamura, T., Minagawa, H., Tenma, N. and Yamaguchi, T., "Laboratory-scale Experiment of Methane Hydrate Dissociation by Hot-water Injection and Numerical Analysis for Permeability Estimation in Reservoir," *International Journal of Offshore and Polar Engineers*, **17**(1), 47-56(2007).

8. Sakamoto, Y., Komai, T., Kawabe, Y., Tenma, N. and Yamaguchi, T., "Gas Hydrate Extraction from Marine Sediments by Heat Stimulation Method;" 14th International Offshore and Polar Engineering Conference held in Toulon, France, 23-28 May, 52-55(2004).
9. Sloan, E. D., *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, Marcel Dekker, Inc., New York(1998).
10. Islam, M. R., "A New Recovery Technique for Gas Production From Alaskan Gas Hydrates;" paper 22924 presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, TX, 6-9 October(1991).