

감압법을 이용한 메탄하이드레이트 생산에 대한 수치적 연구

김 진홍¹⁾, 천 원기²⁾, 김 남진³⁾

Numerical Study on the Production of Methane Hydrate by Depressurization Method

Jinhong Kim, Wongee Chun, Namjin Kim

Key words : Methane Hydrate(메탄 수화물), Porous Media(다공성 매질), Depressurization Method (감압법), Reservoir Simulation(저류층 모사)

Abstract : Gas(or methane) hydrates are solid solutions when water molecules are linked through hydrogen bonding and create host lattice cavities that can enclose a large variety of guest gas molecules. The natural gas hydrate crystal may exist at low temperature above the normal freezing point of water and high pressure greater than about 30 bars. A lot of quantities of natural gas hydrates exists in the earth and many production schemes are being studied. In the present investigation, depressurization method was considered to predict the production of gas and the simulation of the two phase flow - gas and water - in porous media is being carried out. The simulation show about the fluid flow in porous media have a variety of applications in industry. Results provide the appearance of gas and water production, the pressure profile, the saturation of gas/ water/ hydrates profiles and the location of the pressure front.

Nomenclature

B : 용적계수 (ρ_{st}/ρ)
 C_l : l 상의 등온 압축계수 (Pa^{-1})
 g : 메탄 가스
 H : 메탄 하이드레이트
 k : 절대 유체 투과도 (m^2)
 K_d : 분해상수 ($\text{Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$)
 k_{rl} : l 상의 상대 유체 투과도
 \dot{m}_l : 단위 부피당 l 상의 질량 생성률
 N_H : 하이드레이트 수
 P : 압력 (Pa)
 P_c : 모세관 압력 (Pa)
 P_e : 평형 압력 (Pa)
 S_l : l 상의 포화도 (무차원)
 t : 시간 (s)
 w : 물
 x : 거리 (m)
 Φ : 다공도
 Φ_{wg} : 단위 부피 당 물과 가스가 차지하는 부피
 μ_l : l 상의 점성계수
 Δx : 차분 거리 (m)

1. 서론

천연가스를 대체하며 21세기 신 에너지원으로 기대되고 있는 메탄 하이드레이트는 99% 이상이 메탄가스로 구성되어 있는 가장 일반적인 가스 하이드레이트의 일종으로, 해저 또는 영구동토층 지대에 전 세계적으로 고르게 분포하고 있으며, 그 매장량은 현재 화석연료가 지닌 탄소량의 2배 정도로 기존의 확인 매장량보다 수십배 이상에 달하는 막대한 양으로 평가되고 있다. 따라서 메탄 하이드레이트는 신 에너지자원으로서의 중요한 위치를 차지할 것으로 기대된다. 메탄 하이드레이트를 생산하기 위해서는 어떠한 방법을 사용하더라도 고체상태로 존재하는 메탄 하이드레이트의 분해를 전제로 한다. 실제로 개발 생산 시 메탄 하이드레

-
- 1) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : kimjin9078@naver.com
Tel : (064)754-3643 Fax : (064)757-9276
 - 2) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : wgchun@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3646 Fax : (064)757-9276
 - 3) 제주대학교 에너지 공학과
E-mail : jnkim@cheju.ac.kr
Tel : (064)754-3643 Fax : (064)757-9276

이트 저류층의 부존자료를 기초로 하여 생산정의 배치나 예측 생산량을 결정하고 생산개시 이후에 승은, 감압 등의 방법에 의해서 메탄 하이드레이트의 분해를 진행시킨다. 또한 메탄 하이드레이트를 생산하면서 메탄 하이드레이트의 분해가 촉진되면 그 결과 저류층 내 뿐만 아니라 저류층의 상하에 있는 지층 내에도 가스와의 이동이 일어날 가능성이 있으므로 저류층 상하지층의 공극률 및 침투률에 대한 평가를 수행하여 생산방법을 선택하여야 한다.

따라서 본 연구는 메탄하이드레이트 생산 방법에 대한 기초 연구로 감압법을 이용할 경우의 가스 생산에 관한 수치적인 연구이다.

2. 수치적 모델링

2.1 다공성 매질

메탄 하이드레이트는 땅속 저류층에 존재하는 경우가 많고, 이 저류층은 석회암이나 사암으로 구성되며, 석회암의 경우 5~25%, 사암의 경우 10~40%의 다공도를 갖는 다공성 매질이다.⁽¹⁾ 따라서 다공성 매질 내에서의 물과 가스의 유동이 중요한 상황이다. 이러한 다공성 매질에서의 유체유동을 표현하는데 Darcy 방정식이 사용된다. 아래 그림은 이번 모사에서 사용된 공극률과 각종 투과도와의 관계를 나타낸다.

2.2 감압 모델링

Fig. 3은 한국 자원연구소에서 탐사를 행한 동해 중부 해역에 대한 하이드레이트 안정영역(HSZ)을 나타내는 그래프이다. 깊이 약 1100m 지점, 수평으로 1차원의 단위 단면적을 가진 형상에 대해서 계산을 했으며, 감압에 의한 하이드레이트 분해가 일어날 경우, 그 평형점이 약 8°C 에서 형성됨을 가정하여 모사를 행했다. 시간이 0일 때, 경계 x=0에서의 압력이 평형압력 p_e (=6 MPa)보다

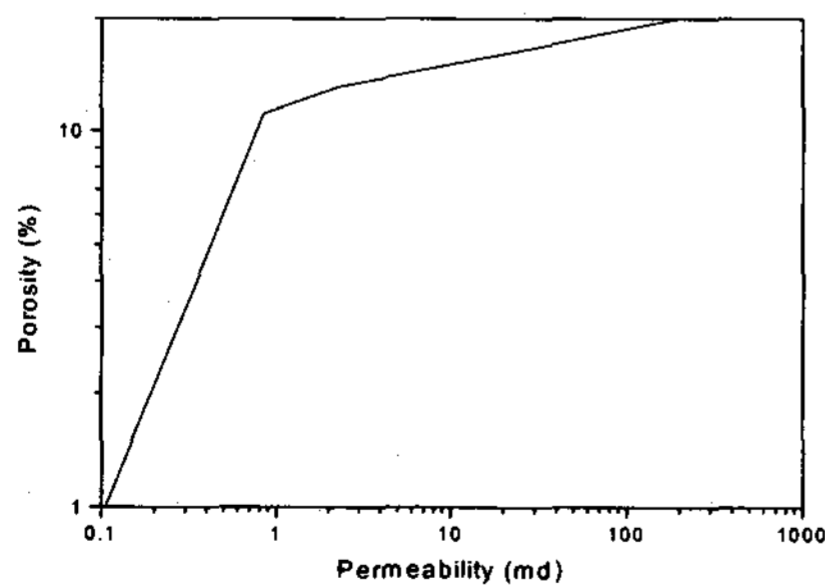


Fig. 1 Porosity - absolute permeability relation

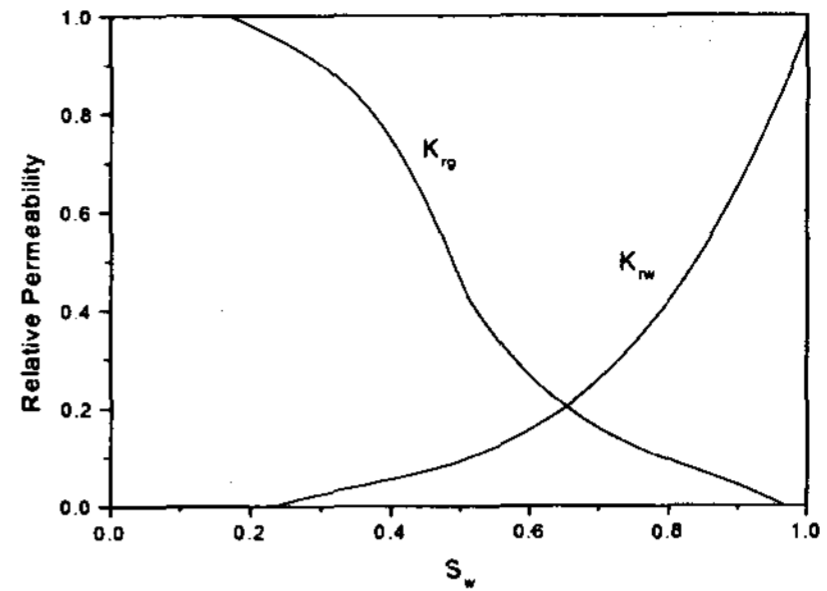


Fig. 2 Sw - relative permeability relation

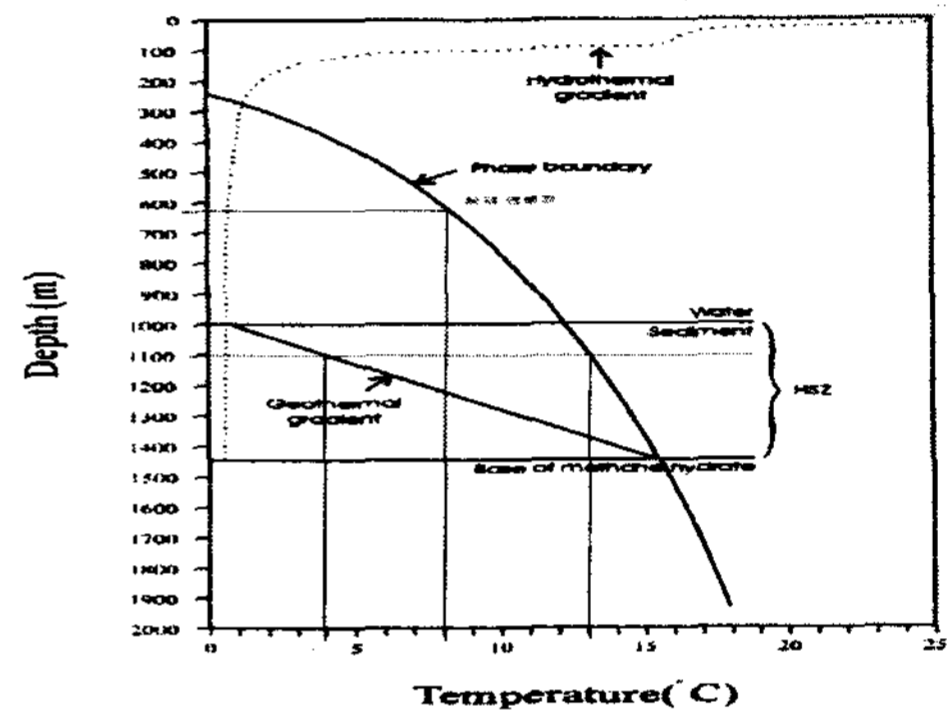


Fig. 3 HSZ of southeast sea in Korea

아래로 떨어진 후 일정한 압력(=3 MPa)을 유지한다. 그러면 하이드레이트의 분해가 시작되고 시스템을 통한 압력과 포화도의 분포가 이루어진다. 물과 가스는 압력구배에 의해 흐르게 되고, x=0인 경계점에서 생산되게 된다.

2.2.1 2상 유동 지배방정식

연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho_g V_g)}{\partial x} + m_g = \frac{\partial(\phi \rho_g S_g)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_w V_w)}{\partial x} + m_w = \frac{\partial(\phi \rho_w S_w)}{\partial x} \quad (2)$$

$$-m_H = \frac{\partial(\phi \rho_H S_H)}{\partial t} \quad (3)$$

$$S_g + S_w + S_H = 1 \quad (4)$$

Darcy 방정식으로 표현되는 l 상의 운동량 방정식은 아래와 같다.

$$v_l = \frac{k k_{rl}}{\mu_l} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

압력과 3개의 포화도 총 4개의 미지수를 구한다.

위 식들을 풀기 위해 저류층 모사 방법을 이용하였고, 밀도 대신 용적계수 B를 사용하여 일반적인 다공성 매질에서의 3상 유동에 대해 전개하였다.

2.3 연속 방정식

상 l 에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{(k\Delta y h)}{\Delta x} \frac{k_{rl}}{\mu_l B_l} (p_{i-1} - p_i) \\ & + \frac{(k\Delta y h)}{\Delta x} \frac{k_{rl}}{\mu_l B_l} (p_{i+1} - p_i) \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{V_p S_l}{B_l} \right)^{n+1} - \left(\frac{V_p S_l}{B_l} \right)^n \right] \end{aligned} \quad (6)$$

좌변을 간략화하여 표현하면

$$\Delta a_l \Delta p^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{V_p S_l}{B_l} \right)^{n+1} - \left(\frac{V_p S_l}{B_l} \right)^n \right] \quad (7)$$

2.4 IMPES Method

IMPES 방법은 압력에 대해서는 implicit method를 포화도에 대해서는 explicit method를 사용하는 방법이다. 이때 압력을 먼저 풀고 포화도를 나중에 풀게 된다.

식 (7)을 S_l^{n+1} 에 대해서 전개하고 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 1 & = \frac{B_o^{n+1}}{V_p^{n+1}} \left[\left(\frac{V_p S_o}{B_o} \right)^n + \Delta t \left(\Delta a_o \Delta p^{n+1} \right) \right] \\ & + \frac{B_w^{n+1}}{V_p^{n+1}} \left[\left(\frac{V_p S_w}{B_w} \right)^n + \Delta t \left(\Delta a_w \Delta p^{n+1} \right) \right] \\ & + \frac{B_g^{n+1}}{V_p^{n+1}} \left[\left(\frac{V_p S_g}{B_g} \right)^n + \Delta t \left(\Delta a_g \Delta p^{n+1} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

등온 압축계수(isothermal compressibility) 개념을 도입하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B_l^{n+1} = B_l^n [1 - c_l(p^{n+1} - p^n)] \quad (9)$$

이 식을 (8) 식에 넣고 다시 정리하면,

$$B_o^{n+1} \Delta a_o \Delta p^{n+1} + B_w^{n+1} \Delta a_w \Delta p^{n+1} \quad (10)$$

$$+ B_g^{n+1} \Delta a_g \Delta p^{n+1} = \frac{V_p^n c_t}{\Delta t} (p^{n+1} - p^n)$$

$$(C_t = C_f + C_o S_o^n + C_g S_g^n + C_w S_w^n)$$

여기서 V_p^n 은 공극의 부피를, C_f 는 공극의 압축계수를 나타낸다. 위 식이 최종 압력식이 된다. 포화도를 풀 때는 (7) 식을 풀면 된다.

2.5 분해율 운동역학

(3)식을 풀 때의 모델은 다음과 같다.

$$\dot{m}_g = k_d A_s (p_e - p) \quad (11)$$

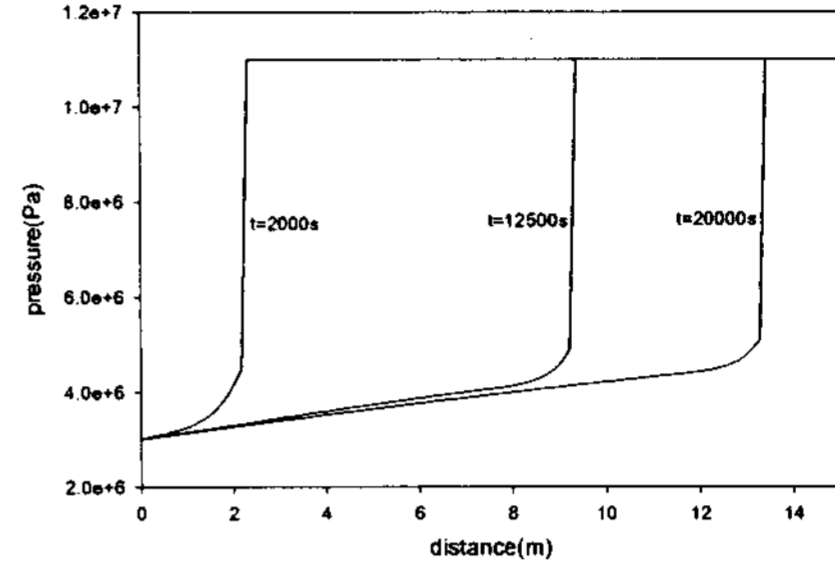


Fig. 4 Pressure profile at time 2000, 12500, 20000 sec

$$\dot{m}_g = \dot{m}_H \frac{M_g}{N_H M_w + M_g} \quad (12)$$

(11)식은 하이드레이트의 분해에 대한 반응식으로 Kim 모델을 사용하였고, K_d 는 6.821×10.0^{-16} 이다. A_s 를 구하는 식은 Parallel-Cylinder 모델⁽³⁾을 이용하였다.

$$A_s = (\phi_{wg}^3 / 2k)^{1/2} \quad (13)$$

2.6 초기 및 경계 조건과 풀이 방법

▷ 초기조건 ($i=1 \sim n, t=0$)

$$p_i = 11 \text{ MPa},$$

$$S_H = 42.76\% \quad S_w = 17\% \quad S_g = 40.24\%$$

▷ 경계조건 ($t \geq 0$)

$$p_{1/2} = 3 \text{ MPa}, \quad p_{n+1/2} = 11 \text{ MPa}$$

계산 시 퇴적층에 관련된 정보, 즉 다공성 매질에 관련된 정보는 Berea Sandstone Core에 대한 정보를 이용하였다.⁽⁴⁾ IMPES 방법에서 압력 식을 풀 때는 Gauss-Seidel scheme을 이용하였고, 반복계산 중 최근의 정보를 이용하기 위해 Newton method를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 압력 분포

Fig. 4는 3개의 시간대에 따른 압력 분포를 나타낸다. 하이드레이트가 전혀 녹지 않은 구간에서는 실제 다공도가 10.76% ($0.188 \times (1 - 0.4276)$)이므로 물의 상대 유체투과도가 0이므로

물은 흐르지 않으며, 이 구간에서의 압력변화는 거의 없다. 끝단에서 감압되어 하이드레이트가 녹기 시작하면서 압력구배에 의한 물과 가스의 유동이 일어나게 된다. 그 형상은 분해가 일어나는 면에서 갑작스런 압력강하가 생기고 이후 분해된 영역에서는 완만한 압력구배를 갖는다. 분해면에서의 갑작스런 압력강하는 분해 후 형성된 gas와 물의 유동에 많은 영향을 준다.

3.2 포화도 분포

Fig 5에서 보면 하이드레이트의 분해 구간은 약 1.8m 정도로 형성되는데, 이 구간은 실제 절대 유체투과도의 값이 변화하는 구간이다. 왜냐하면 고체 상태로

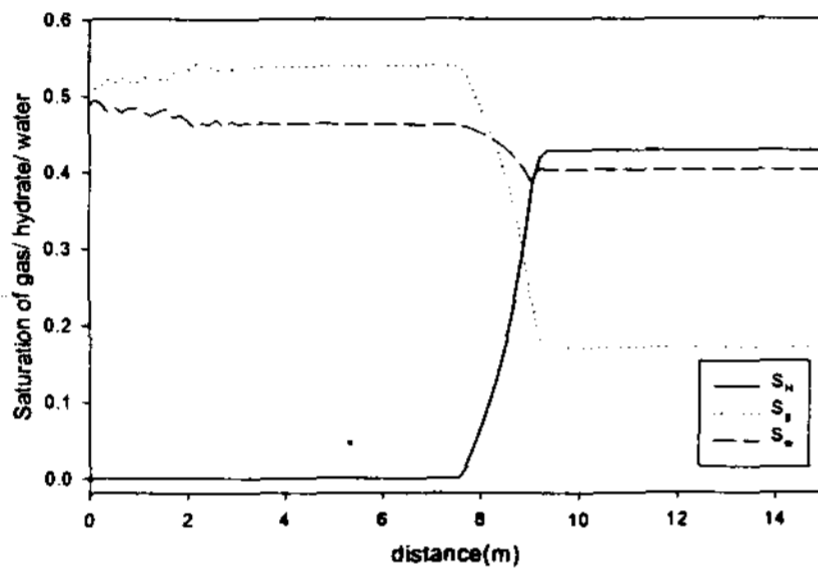


Fig. 5 Saturation profile at time 12500s.

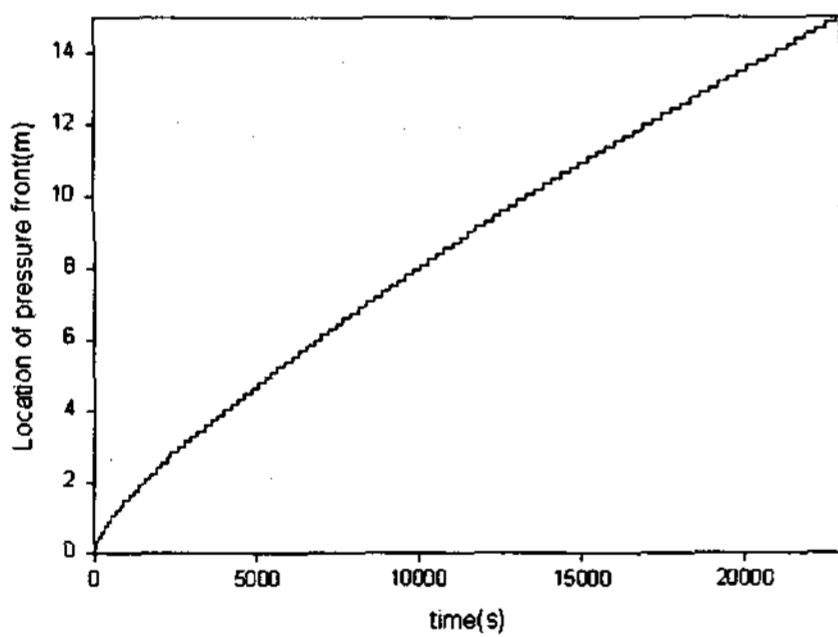


Fig. 6 Location of dissociation front

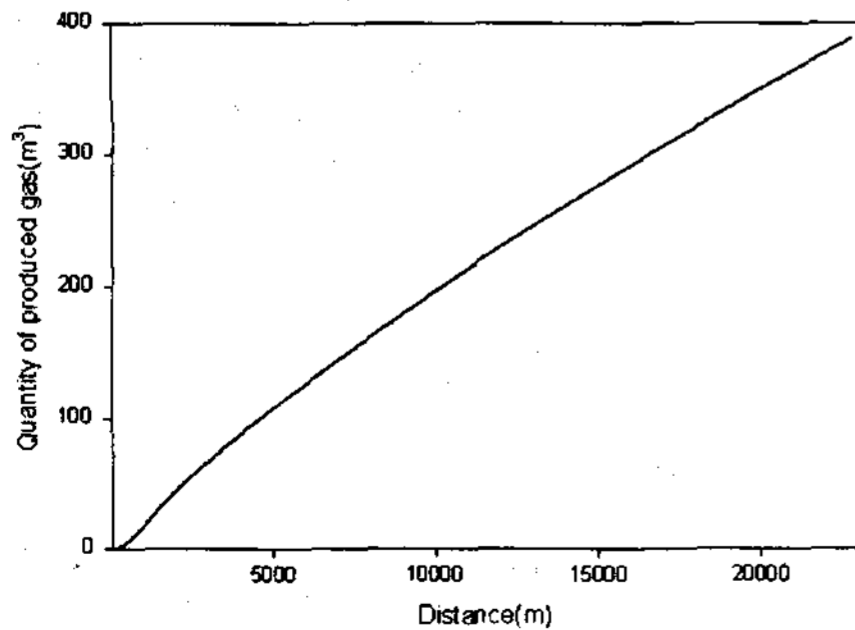


Fig. 7 Quantity of gas recovery

존재하는 하이드레이트가 녹아서 유효 공극이 큰 값을 갖기 때문이다. 따라서 절대 투과도의 값도 이 영역에서는 유동 방향으로 증가하는 값을 갖고, 유체 유동을 용이하게 만든다. gas와 물의 포화도 분포를 보면, 구배를 갖는 부분에서 진동현상을 볼 수 있는데 이 이유는 물의 포화도가 증감할 때 그 변화에 반대되는 방향으로 물의 상대유체투과도가 변화하기 때문으로 생각된다. 즉, 물의 포화도가 증가할 경우 상대유체투과도는 증가하게 되고(Fig.2) 물의 흐름이 많아지게 된다. 이점이 또 공극 내에 물의 포화도를 낮추게 된다. 이렇게 반복적인 현상으로 인해 포화도의 분포가 진동의 현상을 갖는다. 물의 상대 유체투과도는 물의 포화도가 50% 이하인 동안 아주 낮은 값을 갖기 때문에 흐르지 못하고, 공극의 50% 이상을 차지하게 된다. 최종 출구에서도 평균적으로 물과 가스의 부피비가 약 50% 정도로 나오고 있다. 분해면에서의 갑작스런 압력강하는 상대유체 투과도가 큰 gas의 유동을 빠르게 하고, 물은 상대적으로 느리므로 공극 내에 쌓여서 급격히 포화도가 증가한다.

3.3 분해면 전파속도와 가스 생산량

Fig. 6과 Fig. 7은 분해면의 전파속도와 시간에 따른 생산되는 가스의 양을 나타낸다. 15m의 샘플에 대한 계산 결과 분해 전파는 약 380분 이상이 걸린다. 다 분해되었을 때 생산된 가스량은 표준상태에서의 부피로 약 390m³이다

4. 결론

본 연구에서는 15m의 다공성 샘플에 대해 감압에 의한 메탄 하이드레이트의 분해 후에 형성된 물과 가스의 분해 유동을 모사하였다. 계산 시 사용된 방법은 저류층 모사 기법으로 IMPES 방법을 이용하였고, 반복 계산으로는 Gauss-Seidel을 사용하였다. 그 결론은 다음과 같다.

1. 15m의 다공성 샘플에 대해 감압에 의해 하이드레이트가 완전히 녹는데 걸리는 시간이 약 380분 정도이고, 전파 속도는 분당 약 3.95cm 나아간다. 가스 생산량은 시간에 대해 거의 직선적인 분포를 보인다.
2. 각각의 유체가 생산되어 나오는 x=0인 지점에서 생산이 정상상태를 유지하면서부터 물의 부피비가 약 50%정도를 차지한다는 사실은 주목할 만한 사실이다.
3. 분해가 시작되면서 갑작스런 압력 강하를 보인 후 비교적 일정한 압력 구배를 갖는다. 포화도 분포를 보면, gas와 물의 포화도가 갑작스런 증가를 보이는데, 상대유체투과도 값이 작은 물의 포화도가 더 큰 증가폭을 갖는다. 이 이후 정상 상태의 값을 갖다가 출구 부근에서 값의 진동을 보이며 변화한다.
4. 분해 후 가스의 속도가 물의 속도보다 평균적으로 두 차수정도 작은 값을 보인다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구됨(KRF-2006-003-D00050)

참고문헌

- (1) 강주명, 1994, 석유공학 개론 서울대학교 출판사.
- (2) Kim, H. C. et al., 1987, "Kinetics of methane hydrate dissociation", Chem. Eng. Sci., 42, No. 7, 1645.
- (3) Amyx, J. W., Bass, D. M. and Whiting, R. L., 1960, "Petroleum engineering-Physical properties", McGraw-Hill Book Co., New York City, pp. 98~194.
- (4) M. H. Yousif et al., 1991, "Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media", SPE Journal, Reservoir Engineering, Feb.