

동해-1 가스전 B2 저류층의 생산성 분석에 관한 Field Case Study

권 순 일 · 류 상 수* · 권 오 광* · 성 원 모†
한양대학교 지구환경시스템공학, *한국석유공사 가스 개발 사업단
(2000년 11월 10일 접수, 2001년 3월 26일 채택)

Field Case Study for the Productivity Analysis of B2 Reservoir, Donghae-1 Gas Field

Sun-Il Kwon, Sangsoo Ryou*, Oukwang Kwon* and Wonmo Sung

Dept. of Geosystem & Environmental Eng., Hanyang Univ., Seoul 133-179, Korea
**Gas Development Project Department, Korea National Oil Corp., AnYang 431-065, Korea*

(Received 10 November 2000 ; Accepted 26 March 2001)

요 약

본 연구에서는 국내대륙붕 제 6-1광구 고래 V 구조 (동해-1 가스전)의 B2 저류층에 대한 생산성 분석을 수행하기 위해 상평형 모델과 물질평형식 및 유입유동식에 근거한 사용자 친화적 생산거동분석 모델을 개발하였다. 이 모델에서는 저류층 주변에 대수층이 존재하는 경우에 대해서도 분석이 가능하도록 설계하였다. 또한 콘덴세이트가 생산성에 미치는 효과를 분석하기 위해 저류층에서 생성된 콘덴세이트를 겔보기스킨의 효과로 고려함으로써 저류층 평균압력에 대한 정저압력을 산출하는데 있어서 콘덴세이트에 의한 효과를 묘사하고자 하였다.

상기 모델을 활용하여 다양한 생산시스템에 대해 분석한 결과, B2층을 연간 5500 MMSCF 생산하는 비폐쇄시스템 즉 저류층이 10배 유한대수층과 270' 유입각도로 접해있다고 가정할 때, B2 저류층은 생산 개시 후 8년 6개월이 경과한 시점에서도 계산된 정저압력이 운영 정저압력 1298 psia보다 높게 산출되어 최대 생산을 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한 콘덴세이트는 생산 개시 1100일이 경과한 시점에서부터 생성되기 시작하여 1270일이 지나면 저류층 전체에 콘덴세이트가 존재하는 것으로 나타났다. B2층은 생산이 종료되는 시점까지 많은 양의 물이 유입되는 관계로 저류층의 압력이 충분히 유지되고 콘덴세이트의 생성량이 적어 이에 따라 스킨인자의 증가도 크지 않게 산출되었다.

Abstract - This paper presents the user-interactive productivity analysis model based on material balance as well as deliverability equations equipped with EOS model to perform a productivity analysis for Gora V structure, Donghae-1 gas field. This model is designed to be able to analyze the productivity in the case of reservoir contacting with the aquifer. Also, in order to investigate the effect of condensation on productions, condensation phenomenon is considered as an apparent skin effect in the computation of bottomhole pressure from average reservoir pressure.

By utilizing the developed model, we investigate the productivity analysis for B2 layer

of Gorae V structure with the various production cases in volumetric and non-volumetric reservoirs that contact with aquifer. From the results in the case of 5500 MMSCF/year of production and reservoir-aquifer contacting angle 270° with aquifer size of 10 times greater than reservoir, B2 layer could maintain peak production rate even after 8.5 years of production by considering the bottomhole pressure which is estimated above the operating pressure of 1298 psia. It is also found that condensate will be formed after 1100 days of production and existed throughout the reservoir at 1270 days. Note that the computed reservoir pressure of B2 layer is maintained sufficiently high enough for production due to the water influx into the reservoir, and skin effect caused by condensation is not significant.

Key words : Donghae-1 gas field, Gas productivity, Gas condensate reservoir, EOS, Material balance, Gas deliverability

1. 서 론

동해-1 가스전으로 명명된 국내대륙붕 제 6-1 광구 고래 V 구조는 1969년 대륙붕 탐사를 시작한 이래 약 30년 만에 발견된 경제성 있는 천연가스전이다. 고래 V 구조는 울산 앞 바다에서 남동쪽으로 63 km 지점 울릉분지에 위치해 있다. 동해-1 가스전은 울릉분지 중앙부에 위치하며 수심이 140에서 150 m에 달하는 대륙붕에 속하며, 시추지점의 서쪽 인접지역에는 국부적으로 최대 수심이 190 m 정도 된다. 고래 V 구조의 천연가스 원시매장량은 총 2500억에서 3000억 ft^3 로 추정되고 있으며 이 중 가채매장량은 1700억에서 2000억 ft^3 로 평가되고 있다[1].

1998년 이 구조에 대한 고래 V 탐사정 시추로 가스 및 콘덴세이트 매장량이 확인되어 1999년 동일 구조에 대해 2 개의 평가정을 시추하였다. 이 중 고래 V-1 평가정은 고래 V 탐사정에서 서쪽 1100 m 지점에 위치해 있고 시추심도는 2750 m에 달한다. 또한 고래 V-2 평가정은 고래 V 탐사정으로부터 북동쪽 880 m 지점에 위치하고 2700 m의 심도를 갖는다.

시추된 3개 공에서 가스징후가 나타난 총 11개 구간에 대해 DST를 실시하였고, 이 중 7개 구간에서 가스 및 콘덴세이트가 산출되었다. 이 구조의 총 5 개 저류층 중 주로 B2, B3, B4층에서 가스가 산출되었으며, 순층후는 B2층 48 ft, B3층 28.3 ft, B4층 100 ft 정도인 것으로 나타났다. 이 저류층들을 개발하기에 앞서 생산성 분석을 실시하게 되는데 현 시점에서는 주변 대수층의 특성 및 저류층과의 접촉관계가

불명확한 상태이므로 생산성 분석 시 이에 대한 분석이 필수적이다.

고래 V 구조는 DST 자료 해석[2] 및 PVT 분석 실험 결과, 압력과 온도에 따라 저류층과 생산정 주위에서 일어나는 액화현상에 의해 콘덴세이트가 발생하는 가스-콘덴세이트 저류층으로 판명되었다. 가스-콘덴세이트 저류층에서는 압력 강하로 인해 생산정 주위에 콘덴세이트가 축적되고, 축적된 콘덴세이트는 생산정 주변에서 가스 흐름을 방해하여 생산정의 생산성을 감소시켜 심한 경우 생산정 자체를 폐정해야 하는 경우까지 생기게 된다. 따라서 가스-콘덴세이트 저류층은 저류층의 생산 및 관리를 위해서는 생산정 주위의 콘덴세이트 축적현상과 이에 따른 생산성을 분석해야만 한다.

본 연구에서는 비교적 자료가 충분한 B2 가스-콘덴세이트 저류층에 대해서만 상평형 모델과 물질평형식 및 유입유동식에 근거하여 개발한 생산거동 분석 모델에 적용하여 저류층 유체의 특성, 회수율 및 생산능력 평가, 대수층에 의한 영향 및 콘덴세이트가 생산성에 미치는 영향 등 종합적인 생산거동 분석을 실시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 물질평형 방정식

가스-콘덴세이트 저류층의 생산거동을 분석하기 위해서는 저류층 유체의 특성을 규명하는 작업이 무엇보다 중요하다. 즉, 상평형 분석을 통해 유체의 밀도, 점성도, 물분율, z-factor, 분자량 등과 같은 유체의 특성을 온도와 압력의 변화에 따라 규명하는 작업이다. 본 연구

에 사용된 상평형 모델은 Peng-Robinson 상태 방정식을 기반으로 하여 개발된 것으로, 임계 영역과 포화영역에서의 계산을 가능케 하는 기법인 유전자알고리즘이 적용된 모델이다[3,4,5].

가스-콘덴세이트 저류층에서는 생산에 따른 압력강하로 인해 저류층내에서 콘덴세이트가 생성되어 지상으로 생산되는 gas와 콘덴세이트의 비가 변하게 된다. 따라서 가스-콘덴세이트 저류층에서의 생산능력 평가 즉, 생산에 따른 회수율 및 압력 변화 예측을 위해 저류층에서 생성되는 콘덴세이트의 양을 계산해야 한다. 본 연구에서는 가스-콘덴세이트 저류층의 생산능력을 평가하는 방법으로 간단한 물질평형 기법을 이용하였다. 물질평형 기법은 회수량 예측이나 생산 경향 분석에 일반적으로 많이 사용되는 방법으로 간단하면서도 신속한 분석이 가능한 방법이다. 여기서 사용된 물질평형 방정식은 다음과 같다[6].

$$\frac{p}{z_2} = \frac{p_i V_{hc}}{z_{2i} V_{hc}} \left[1 - \frac{G_p (1 + R_{MLGp})}{G (1 + R_{MLGi})} \right] \quad (1)$$

가스 저류층은 생산 시에 저류층내에서 콘덴세이트의 생성이 없으므로 위 식에서 gas와 콘덴세이트의 누적 몰비 R_{MLGp} 와 초기 몰비 R_{MLGi} 가 생산기간 동안 동일하지만, 가스-콘덴세이트 저류층에서는 압력에 따라 누적 몰비가 변하므로 이의 계산이 요구된다. 이는 상평형 모델에서 압력에 따라 산출된 콘덴세이트와 gas의 비를 이용하여 계산된다. 또한 가스 콘덴세이트 저류층은 가스 저류층과는 달리 2상이 존재하므로 2상 z-factor가[7] 요구되는데 이는 gas와 콘덴세이트 각 상의 z-factor와 몰분율을 사용하여 계산된다. 식 (1)로부터 gas의 누적 회수율 (G_p/G)이 산출되면, 아래의 식에 의해 누적 생산 콘덴세이트 가스 비 및 콘덴세이트의 누적 회수율을 구할 수 있다.

$$R_{MLGp} = 0.5 (G_p/G)_{,1} \sum_{i=1}^n [(R_{MLG})_{,i} + (R_{MLG})_{,i-1}] \quad (2)$$

$$[(G_p/G)_{,i-1} - (G_p/G)_i]$$

$$\frac{G_{Lp}}{G_L} = \frac{G_p}{G} \frac{R_{MLGp}}{R_{MLGi}} \quad (3)$$

한편, 식 (1)에서 저류층이 대수층과 접해있지 않은 폐쇄시스템의 경우에는 탄화수소의 공극부피 V_{hc} 가 변화되지 않으므로 V_{hc}/V_{hc} 가

1.0이 된다. 그러나 저류층이 대수층과 접해있는 경우, 식 (1)의 V_{hc} 는 생산 기간 동안의 탄화수소 부피 변화율 나타내는 변수로서, 아래의 식과 같이 저류층 및 물의 압축율, 물의 생산, 대수층의 유입에 따라 영향을 받는다.

$$V_{hc} = V_p [1 - s_{wi} + (p - p_i)(c_R + s_{wi} c_w)] + W_e - W_p \quad (4)$$

이 시스템의 경우 주변 대수층에 의한 영향은 식 (4)의 물 유입 변수 W_e 에 의해 묘사되는데 시간스텝 n에서 아래의 식으로 정의된다[8].

$$W_e(t_n) = U \sum_{j=0}^{n-1} \Delta p_j W_{eD} [t_D(t_n) - t_D(t_j)] \quad (5)$$

식 (5)에서 볼 수 있듯이 물 유입량을 계산하는데 있어서 저류층의 압력, 생산 시간과 대수층의 물성들이 요구되며, 이는 주변 대수층의 형태에 따라 달리 계산된다.

2.2. 유입 유동식

위에서도 언급한 것처럼 가스-콘덴세이트 저류층은 생산에 따른 압력 강하로 저류층의 압력이 일정압력 (이슬점 압력) 이하가 되면 콘덴세이트가 생성되는데 이것은 gas의 흐름을 방해하게 된다. 즉, 저류층내에서 콘덴세이트가 생성되면 저류층은 2상이 존재하게 되고 이로 인하여 gas의 상대투과도가 감소하게 된다 [9]. 따라서 콘덴세이트가 저류층 내에서 많이 발생하는 경우 생산성이 일반 가스 저류층에서 보다 낮아지게 된다.

가스-콘덴세이트 저류층에서 콘덴세이트의 생성이 생산에 미치는 영향을 분석하는데 있어서는 다음의 준정상 유입유동식을 이용하여 저류층의 생산성, 생산정 주위의 압력 변화 등을 분석할 수 있다[10].

$$q_s = \frac{0.703 \times 10^{-6} kh(m(p_{avg}) - m(p_w))}{T [\ln(r_e/r_w) - 0.75 + S]} \quad (6)$$

이 식은 가스-콘덴세이트 저류층에 적용되는 유입유동식으로서, 이 식에 저류층에서 콘덴세이트의 형성이 가스유동을 방해하는 현상을 걸보기스킨으로 묘사하였다. 여기서 걸보기스킨인자는 콘덴세이트의 생성에 의해 발생하는 스킨인자 S_a 와 기계적 스킨인자 S_m 으로 구성된다[11].

$$S_i = S_m / k_{rg} + S_a \quad (7)$$

$$S_o = \left[\frac{k_e}{k_a} - 1 \right] \ln \left(\frac{r_o}{r_w} \right) \quad (8)$$

S_o 는 콘덴세이트가 생성된 구간 즉 2상이 존재하는 구간을 의미하는 스킨인자이므로 이를 계산하기 위해서는 콘덴세이트가 생성된 구간의 반경 (r_o)을 먼저 산출해야 한다[12].

$$r_o = \exp \left[\frac{0.703 \times 10^{-6} kh(m(p_{acc}) - m(p_{st})) + 0.75 - S_o}{qT} \right] \quad (9)$$

또한, 콘덴세이트가 생성된 구간에서 가스상대 투과도를 구하기 위한 콘덴세이트의 포화도는 다음 식에 의해 계산된다[13].

$$s_o = (f_L / p_o) / (f_L / p_o + f_V / p_g) \quad (10)$$

이 포화도가 임계 포화도 이상이 되면 콘덴세이트가 유동을 하기 시작하는데 이는 다음의 유동식으로 표현된다.

$$q_o = \frac{7.08kh}{[\ln(r_o/r_w) - 0.75 + S_m]} \int_{p_w}^{p_{acc}} \frac{k_{ro}}{\mu_o B_o} dp \quad (11)$$

2.3. 생산거동 분석 모델

생산거동 분석 모델은 물질평형방정식에 근거하여 개발되었으며, 여기서 산출된 가스와 콘덴세이트의 누적회수량을 각각 계산하고 이를 유입유동식에 근거한 유입유동 모델에 유동량으로 입력하였다. Fig. 1은 두 모델이 접합된 생산거동 분석 모델의 흐름도이다.

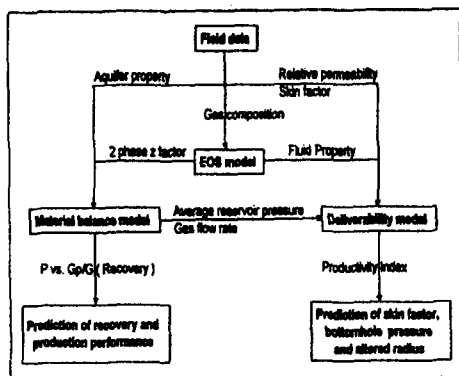


Fig. 1. Production performance analysis model.

이 두 모델을 통합하여 시각화 과정을 거쳐 최종 생산거동 분석 모델을 개발하였다. 개발된 모델은 사용자의 편의를 고려하여 윈도우 환경에서 쉽게 사용할 수 있도록 설계되었다. 이 모델은 입력 자료를 처리하는 부분과 결과를 분석하는 부분으로 크게 나눌 수 있는데 먼저 입력자료를 처리하는 부분은 Fig. 2와 같다.

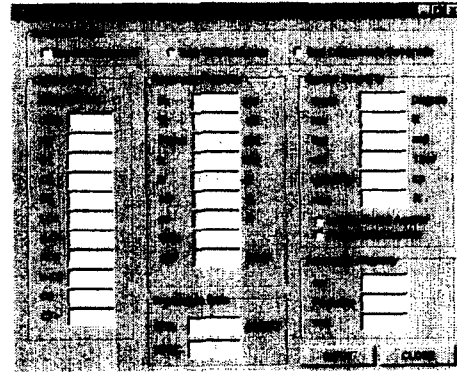


Fig. 2. Input window of the model.

입력창은 저류층의 종류, 저류층 및 유체의 특성, 대수층의 물성을 입력하는 부분과 생산계획을 결정하는 부분으로 구분된다. 먼저 저류층의 종류는 저류층에서 콘덴세이트의 생성 여부와 콘덴세이트 생산 여부에 따라 세 가지 종류 중 하나를 선택하게 된다.

다음으로 가스의 구성성분비는 초기 저류층 가스의 성분비를 나타내는 것으로, 본 모델에서는 상평형 모델과 생산거동 분석 모델이 분리되어 있으므로 단지 초기 가스의 구성 성분비를 보여주는 역할만 하게 된다. 저류층의 특성부분은 저류층 관련 자료들을 입력하는 부분으로, 약어로 입력된 자료명 위에 마우스 커서를 위치시키면 그에 대한 완전한 의미가 나타난다. 또한 대수층의 효과를 분석하기 위해 대수층의 특성들을 입력하도록 되어 있으며, 본 모델이 방사형 대수층에 대해서만 분석이 가능하므로 무한 방사형 대수층 (infinite radial aquifer)과 유한 방사형 대수층 (finite radial aquifer) 중의 하나만 선택할 수 있다. 입력창이 실행되면 기본적으로 무한 방사형 대수층이 입력되어 있고, 사용자가 유한 방사형 대수층을 선택하는 경우에 대해서만 대수층의 외곽 반경 (r_{we})을 입력할 수 있도록 되어 있다. 저류암의 특성부분은 공극율과 임계 콘덴세

이트 포화도를 입력하는 부분이고, 생산 관련 입력 자료는 가스의 생산량 (GPR: gas production rate) 을 MMSCF 단위로 입력하도록 되어있다. 또한 아래 INPUT 버튼을 누르면 입력된 모든 내용들이 프로그램 안의 변수들에 저장되고, 프로그램 실행 시 수정이 필요한 자료는 분석창에 나타난다.

생산거동 분석 모델의 분석창은 Fig. 3과 같으며 4개의 분석창 중 이 그림에 나타나있는 창은 비폐쇄저류층 분석 부분을 보여주고 있다. 여기서 왼쪽의 그래프는 생산에 따른 압력 강하 그림이고, 오른쪽의 그래프는 각각의 경우에 대한 대수층의 유입량을 나타낸다. 분석 그래프에서 볼 수 있듯이 여러 가지 경우에 대하여 동시에 그래프를 그릴 수 있어 각 경우에 대한 비교 분석이 용이하고, 그래프에 나타난 legend나 축의 범위를 실행 중에 사용자가 수정할 수 있게 하여 특정한 부분만을 자세히 분석할 수 있도록 작업하였다. Fig. 3을 살펴보면, 맨 위의 파일 입출력 부분, 창을 선택하는 부분, 결과를 그래프로 출력하는 부분, 입력 자료를 출력하고 수정하는 부분, 마지막으로 실행을 위한 버튼들로 구성되어 있다.

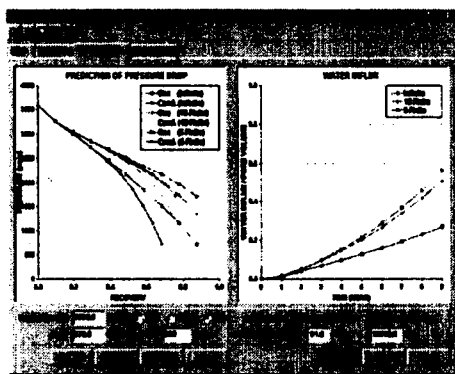


Fig. 3. Main window of the model.

2.4. 적용 및 분석

본 연구의 생산거동 분석 모델을 활용하여 국내 대륙붕 제 6-1 광구 고래 V 저류층의 생산거동 분석 작업을 수행하였다. 분석 요인은 저류층 가스의 물성, 생산능력 평가, 주변 대수층의 영향, 콘덴세이트 형성이 생산에 미치는 영향 등이다. 고래 V 구조의 4개 지층 중에서 자료가 충분하고 상평형 모델에 의한 분석 결과 가스-콘덴세이트 저류층 임이 판명된 B2층에 대해서만 분석을 수행하였다. Fig. 4는

고래 V 저류층의 지질 단면도로서 B2층의 위치와 지질적인 구조를 보여주고 있다.

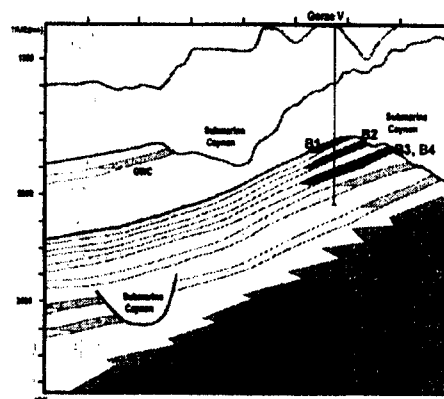


Fig. 4. Sectional view of Gorae V reservoir.

B2층에 대한 자료는 Fig. 5에 나타난 바와 같으며, 저류층의 종류는 가스-콘덴세이트 저류층이고, 대수층의 특성은 저류층과 동일한 것으로 가정하였다. 임계 콘덴세이트 포화도나 저류암의 압축률은 DST 해석 결과 산출된 공극율을 갖는 일반적인 사암의 경우에 대한 값을 사용하였다. 저류층의 외곽 반경은 가스 산출시험에 의해 산정된 원시매장량을 이용하여 탄화수소의 부피 계산식으로 추정하였다. 가스 생산량은 고래 V 전체 층의 일산 50 MMSCF에 기준하여 B2층의 연간 생산량을 산출하였다. 이슬점 압력은 저류층 온도인 226 °F 하에서 상평형 모델에 의해 결정하였다.

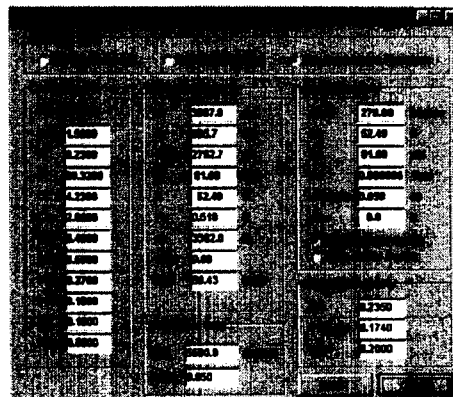


Fig. 5. Input data of B2 layer for production performance analysis.

2.5. 저류층 유체의 특성

가스-콘덴세이트 저류층의 생산거동을 분석하기 위해서는 2상 영역에서의 저류층 가스와 콘덴세이트의 물성 즉, 각 상에 대한 밀도, 점성도, 물분율, z-factor 및 분자량 등이 규명되어야 한다. 본 연구에서는 이들을 B2층의 PVT 분석 자료의 가스 구성 성분비를 사용하여 유전자 알고리즘이 적용된 상평형 모델에 의해 산출한 후, 이들을 온도와 압력의 함수로 묘사함으로써 생산거동분석 모델에서 각 상의 물성을 손쉽게 계산할 수 있도록 하였다.

포화압력: 상평형 모델을 이용하여 B2층의 가스의 성분비 (Fig. 6)에 대한 포화압력을 산정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 15 °F 에서 300 °F까지의 구간에서 이슬점 압력을 산출하였고, 이 결과로부터 B2 저류층의 온도가 226 °F이므로 B2층이 가스-콘덴세이트 저류층임을 확인할 수 있다. 또한 저류층 온도에 대응하는 저류층의 상부 이슬점 압력은 2752.7 psia, 하부 이슬점 압력은 133.0 psia로 나타났다. 이들 이슬점 압력은 가스-콘덴세이트 저류층의 생산거동을 분석하는데 있어서 모두 중요하나 하부 이슬점 압력의 경우 유지하고자 하는 정두압력에 비하여 아주 낮은 값을 나타내므로 본 분석에서는 고려하지 않았다.

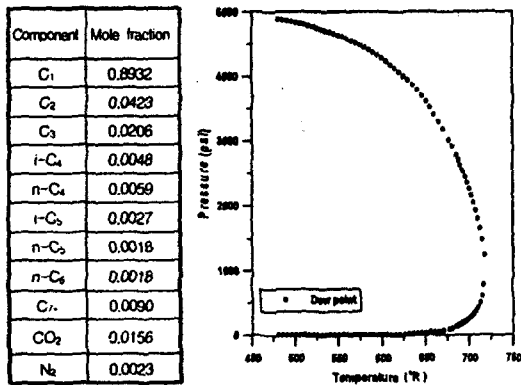


Fig. 6. Fluid composition and the estimated phase envelope.

2상 영역의 z-factor: 가스-콘덴세이트 저류층은 생산 시 저류층에서 콘덴세이트가 발생하여 2상이 존재하게 되고 이 조건에서는 2상

z-factor를 산출하여 생산거동을 분석하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 2상 z-factor를 상평형 모델에 의해 산출된 각 상의 물분율과 z-factor를 이용하여 산정하였다 (부호 참조). 이 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같으며 이 그림에서 이슬점 압력 (2752.7 psia)을 기준으로 왼쪽 부분이 2상 영역에서 z-factor를 나타낸다.

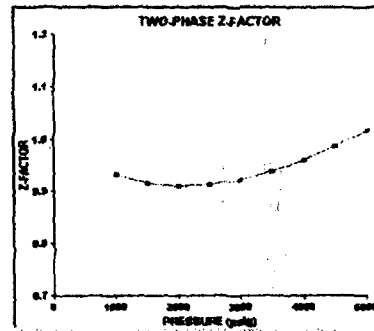


Fig. 7. Two phase z-factor of reservoir fluid at 226 °F.

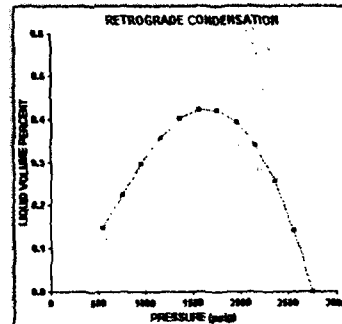


Fig. 8. Retrograde condensation at 226 °F.

역액화현상: 상평형 모델에서 결정된 변수들을 사용하여 저류층 압력강하에 의해 발생하는 콘덴세이트의 부피 변화를 계산하였다. 가스-콘덴세이트 저류층은 저류층 온도하에서 두 개의 이슬점을 갖게 되는데 생산에 따른 압력 강하로 인해 상부 이슬점 압력에서 콘덴세이트가 형성되기 시작한다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 2752.7 psia의 압력에서 콘덴세이트가 생기기 시작하여 압력이 강하함에 따라 콘덴세이트의 양은 증가하게 되고 1530 psia 이후에는 감소하는 경향을 보인다. 콘덴세이트 양의 감소는

하부 이슬점 압력까지 계속되고 그 압력 이하에서는 가스 상만이 존재하게 된다. Fig. 8의 결과로부터 가스-콘덴세이트 저류층인 B2층은 저류층에서 생성되는 최대 콘덴세이트의 부피가 전체 탄화수소 부피의 약 0.42%에 불과하고, 저류층에서 생성된 콘덴세이트는 임계포화도를 넘지 않으므로 유동하지 않는다. 그러나 wellbore 주위에서는 저류층에서 보다 압력강하가 심하므로 콘덴세이트의 생성량이 증가되어 가스의 흐름을 방해하게 되므로 콘덴세이트 생성효과가 고려된 모델을 통하여 분석하는 것이 타당하다.

2.6. 생산능력 평가

회수율 예측: B2 저류층에 대해 생산기간 중 저류층 압력에 따른 회수율을 예측한 결과는 Fig. 9와 같다. 이 결과는 CCE (constant composition expansion) 분석실험과 동일한 과정으로 묘사된 상평형 모델[3]의 결과를 이용하여 산출한 회수율을 나타낸다. 이 그림으로부터 저류층 압력에 따라 회수율을 예측할 수 있는데, 예를들어 가스가 초기 가스 매장량의 70% 회수될 때를 가정하면, 콘덴세이트는 초기 콘덴세이트 매장량의 53% 정도가 생산됨을 알 수 있다. 즉, B2 저류층의 원시매장량이 56.4 BCF일 때, 가스 매장량과 콘덴세이트 매장량은 각각 56.393 BCF와 1.142 MMSTB이 되고 가스 회수율이 70%가 되는 시점에서 콘덴세이트의 총 생산량은 약 750 MSTB로 계산된다.

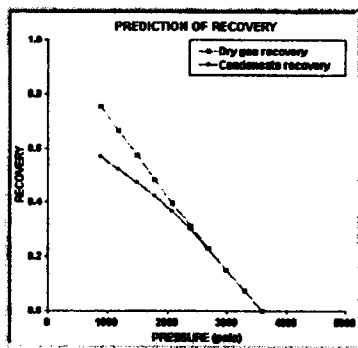


Fig. 9. Prediction of recoveries of gas and condensate.

저류층 압력 강하 예측: 본 분석에서는 일정 생산량에 따른 저류층의 압력을 조사하기 위해

고래 V 구조 B2 저류층을 폐쇄저류층 (volumetric system)과 대수층과 접촉된 저류층 (non-volumetric system)으로 가정하여 아래의 3가지 경우에 대해 분석을 수행하였다. 여기서 B2층의 일정생산량은 고래 V 전체 저류층의 일일생산량 50 MMSCF와 40 MMSCF에 상응하는 연간 생산량 5500 MMSCF, 4200 MMSCF를 사용하였다 (Fig. 10). 또한 운영 정저압력은 고래 V 전체 저류층 생산 시 고려되고 있는 정두압력 1100 psia를 기준으로 노달 분석 모델[14]을 통해 계산된 1298 psia로 설정하였다.

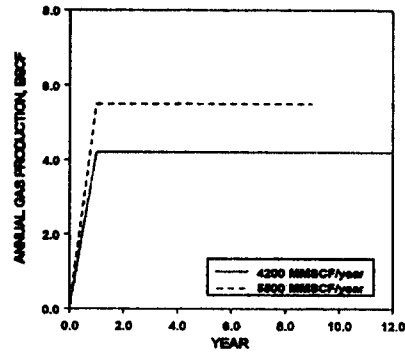


Fig. 10. Production scheme for B2 layer.

폐쇄저류층에 대한 분석 (Case A)

Case A는 폐쇄저류층의 경우 생산량에 따른 저류층의 평균압력과 정저압력 변화를 Fig. 10의 생산계획에 따라 분석하였다.

그 결과로 Fig. 11a는 B2층에서 연간 5500 MMSCF를 생산하는 경우 저류층 평균압력을 예측한 그래프이다. 이 결과로부터 가스 회수율이 90%인 경우는 거의 없으나 단지 회수율이 최대로 도달했을때의 압력 및 콘덴세이트의 생산량을 예측하기 위해 가스를 초기 매장량의 90%까지 생산한다고 가정할 경우, 9년이 소요됨을 알 수 있으며 이때 콘덴세이트는 초기 콘덴세이트 매장량의 64%가 생산되고 9년 간 생산 후 저류층의 압력은 500 psia로 나타났다. 또한 여기서 산출된 저류층 평균압력과 생산량으로부터 계산된 유동량에 의해 생산기간 동안의 정저압력을 도출하여 Fig. 11b에 나타내었다. Fig. 11b에서 운영 정두압력이 1100 psia일 때 정저압력이 1298 psia이므로 콤프레서를

설치하지 않을 경우 5년 3개월이 경과한 시점에서 가스의 회수율은 53%임을 알 수 있으며, 회수율을 향상시키기 위해서는 이 시점 이후부터 콤프레서를 설치해야 한다.

다음은 B2층에서 연간 4200 MMSCF를 생산하는 경우에 대하여 저류층 평균압력 강하를 예측하여 그 결과를 Fig. 12a에 도시하였다. 이 그림으로부터 가스를 초기 매장량의 90%까지 생산한다고 가정할 때 12년이 소요됨을 알 수 있다. 저류층의 압력 강하 경향은 연간 5500 MMSCF를 생산하는 경우와 거의 유사하나 생산기간에서만 차이를 보였다. 또한 Fig. 12b의 결과로부터 정저압력을 1298 psia로 유지하고자 하면 생산 개시 후 7년 5개월 정도가 지난 시점에서는 콤프레서를 설치해야 한다.

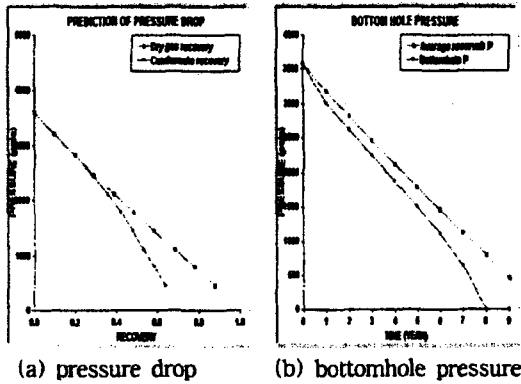


Fig. 11. Prediction of pressure for 5500 MMSCF/year (Case A).

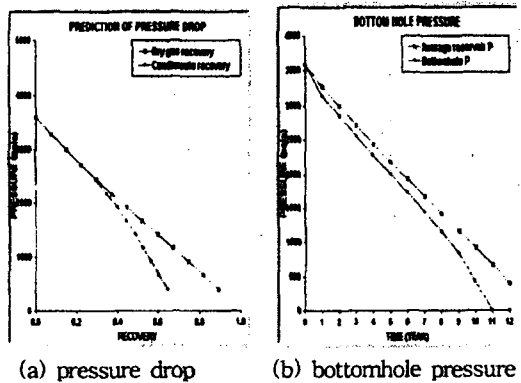


Fig. 12. Prediction of pressure for 4200 MMSCF/year (Case A).

대수층의 크기에 따른 분석 (Case B)

Case B는 대수층의 크기에 따라 저류층의 생산능력을 분석한 것으로서 먼저 B2층에서 연간 5500 MMSCF를 생산할 때의 결과는 Fig. 13과 같다. 이 경우에는 폐쇄시스템에 비해 압력강하가 현저히 적어서 대수층에서 물의 유입이 생산에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 7년 간 생산 후 압력은 무한대수층일 때 2169 psia, 저류층 크기의 10배 유한대수층인 경우 1514 psia인 반면 폐쇄저류층의 경우는 1127 psia로 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 주위에 대수층이 존재하는 경우 생산기간 동안 저류층에서 압력 강하가 적어 콘덴세이트의 생성이 폐쇄시스템에 비해 상대적으로 적어짐을 알 수 있다. Fig. 13b의 결과는 저류층 평균압력과 정저압력을 도시한 그래프로써, 무한대수층인 경우는 생산 개시 후 9년이 경과된 시점에서도 정저압력이 1298 psia 이상이므로 정저압력을 1100 psia 이상 유지할 수 있다. 한편, 5배 유한대수층의 경우는 정저압력이 생산 개시 후 7년이 경과한 시점부터 1298 psia 이하로 떨어지게 되므로 폐쇄시스템과 마찬가지로 최대 생산량을 유지할 수 없음을 알 수 있다. 이번에는 대수층으로부터 물의 유입량을 조사하기 위한 시도로서 Fig. 14a에 시간에 따른 물 유입량을 공극부피의 비로 나타내었다. 이 결과에서 무한대수층의 경우 생산 개시 후 9년이 경과한 시점에서 0.55PV 정도로 많은 양의 물이 유입되는 것을 알 수 있고, 5배의 유한대수층의 경우는 0.27PV 정도가 유입되는 것을 볼 수 있다.

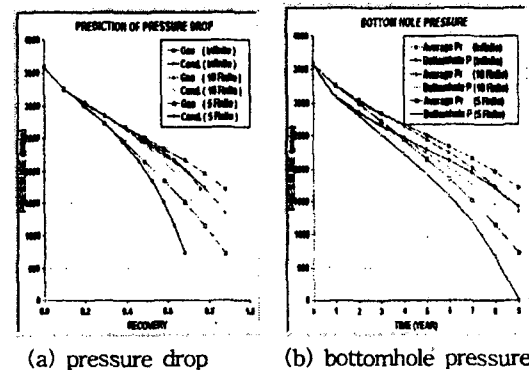


Fig. 13. Prediction of pressure for 5500 MMSCF/year (Case B).

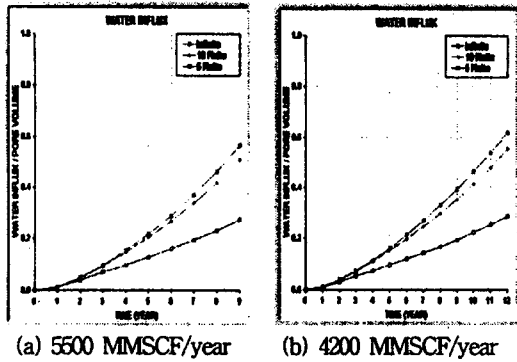


Fig. 14. Prediction of water influx (Case B).

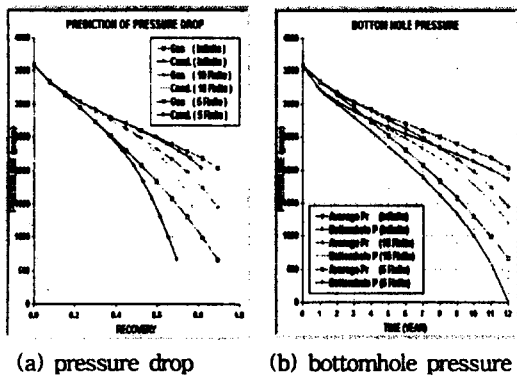


Fig. 15. Prediction of pressure for 4200 MMSCF/year (Case B).

다음에는, 연간 생산량이 4200 MMSCF인 경우에 대한 결과로써 Fig. 15에 도시하였다. Case A의 폐쇄시스템의 경우에는 생산량을 감소하는 것이 생산기간을 연장하는 효과는 있으나 압력 변화 양상은 동일한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 주변에 대수층이 존재하는 경우에는 Fig. 15a에 나타난 것처럼 생산량의 감소가 저류층의 압력 변화에도 영향을 미침을 알 수 있다. 즉, 가스 회수율이 90%인 경우 저류층의 압력이 무한대수층인 경우 2100 psia, 10배 유한대수층의 경우 1400 psia로 연간 5500 MMSCF로 생산하는 경우의 압력보다 높게 나타났다. 이는 연간 생산량을 축소함으로써 생산기간이 늘어나게 되므로 대수층으로부터 유입되는 물의 양이 증가하여 나타나는 현상이다. 이러한 양상은 Fig. 14b의 물의 유입

량 그래프에서도 알 수 있는데 전체 생산기간 동안 유입된 물의 양이 Fig. 14a의 경우보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 15b에 나타난 정저압력도 10배의 유한대수층일 때 생산 개시 후 12년이 경과한 시점에서 정저압력이 운영 정저압력 1298 psia 이상으로 유지됨을 알 수 있다.

저류층과 대수층의 접촉각도에 따른 분석 (Case C)

Case C는 대수층의 크기가 저류층의 10배 되는 유한대수층인 경우에 대해 대수층의 유입 각도가 생산에 미치는 영향을 분석한 것이다. 고래 V 저류층은 대수층의 유입 각도가 270° 정도인 것으로 예상되나 불명확하므로 여기서는 180°, 90° 인 경우에 대해서도 분석을 수행하였다.

그 결과 Fig. 16a에서 볼 수 있듯이, 유입 각도가 90° 일 때 생산개시 후 7년이 경과한 시점에서 압력이 1415 psia, 180°, 270° 일 때 각각 1718 psia와 2014 psia로 대수층의 유입 각도에 따라 압력차가 크게 나타났다. 이러한 양상은 물의 유입량의 차이 때문으로 Fig. 17a에서 그 차이를 볼 수 있다. Fig. 16b는 앞에서 계산된 저류층 평균압력에 대한 정저압력을 예측한 결과로 유입 각도가 270° 일 때 생산개시 후 8년 6개월 정도에서도 기준 정저압력 1298 psia 이상으로서 최대 생산을 유지할 수 있는 반면, 180° 와 90° 인 경우 각각 7년 6개월, 6년 6개월이 경과한 후에는 콤프레셔의 설치가 요구된다.

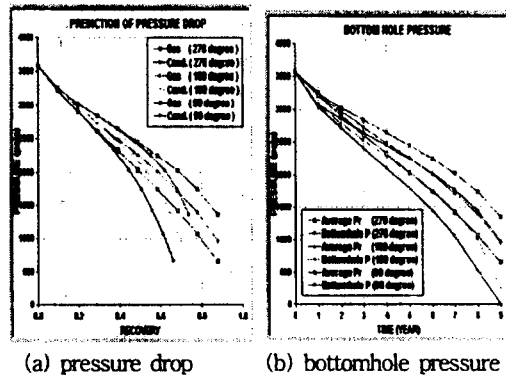


Fig. 16. Prediction of pressure for 5500 MMSCF/year (Case C).

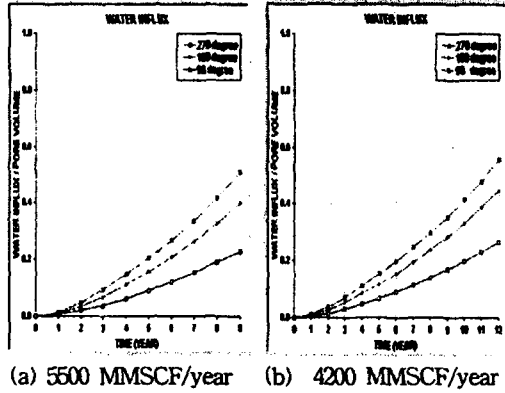


Fig. 17. Prediction of water influx (Case C).

Fig. 18은 B2층의 연간 생산량이 4200 MMSCF인 경우에 대하여 저류층 평균압력과 정저압력을 분석한 결과로 앞의 5500 MMSCF를 생산하는 경우와 비교했을 때, 생산량의 감소로 인하여 생산 기간을 연장할 수는 있으나 압력 강하 경향은 차이가 거의 나지 않는 것을 알 수 있다. 유입각도가 90°인 경우를 살펴보면 5500 MMSCF인 경우와 비교하여 4200 MMSCF일 때 유입된 물의 양은 많으나 (Fig. 17b 참조) 압력의 변화는 거의 같게 나타나므로 이로부터 대수층의 유입각도가 작은 경우도 대수층의 크기가 작은 경우와 마찬가지로 생산 기간 동안 대수층이 저류층 압력 유지에 큰 역할을 하지 못하는 것을 알 수 있다.

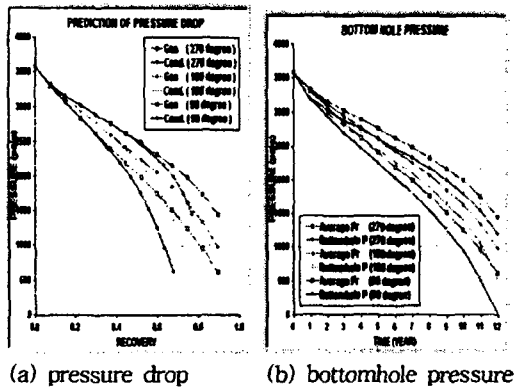


Fig. 18. Prediction of pressure for 4200 MMSCF/year (Case C).

2.7. 콘덴세이트 생성 효과 분석

앞에서도 언급한 것처럼 가스-콘덴세이트 저류층은 생산에 따른 압력강하로 인하여 생산정 주변에서 콘덴세이트가 생성되어 가스의 생산을 방해하게 된다. 여기서는 저류층에서 콘덴세이트가 생성되는 시기와 생성된 콘덴세이트에 의한 효과를 보기 위해 걸보기스킨인자에 의한 영향을 분석하였다. 저류층의 형태는 폐쇄시스템의 경우와 10배 유한대수층이 저류층과 270° 접해있는 비폐쇄시스템에 대하여 영향반경과 스킨인자에 의한 분석 작업을 수행하였다.

영향반경 (2상 영역의 반경): 2상 영역의 반경은 정저압력이 이슬점 압력 이하로 떨어지는 시점에서부터 형성되기 시작하여 저류층 평균압력이 이슬점 압력 이하로 떨어지는 시점까지 증가하는 추세를 보이게 된다.

Fig. 19는 폐쇄 및 비폐쇄 저류시스템에 대하여 산출된 영향반경을 나타낸 그래프로써, 폐쇄시스템의 경우는 생산개시 약 750일이 경과한 시점에서부터 콘덴세이트가 생성되기 시작하여 800일이 지나면 전체 저류층에 콘덴세이트가 존재하게 된다. 비폐쇄저류층에서는 대수층의 효과로 인하여 정저압력이 이슬점 이하로 떨어지는 시간이 상대적으로 길어져 저류층에서 콘덴세이트가 생성되는 시기가 더 늦어지게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이, 생산 시작 후 약 1100일이 경과한 시점에서부터 콘덴세이트가 저류층 내에서 생성되기 시작하여 1270일이 지나면 전체 저류층에 콘덴세이트가 존재하게 된다.

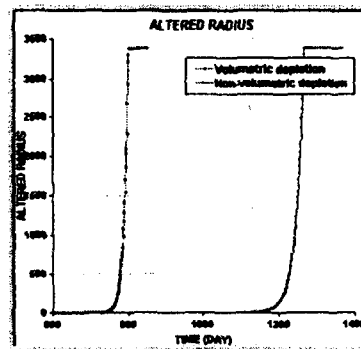


Fig. 19. Prediction of altered radius for 5500 MMSCF/year.

스킨인자의 효과: 생산기간 동안 콘덴세이트의 생성을 묘사하는 걸보기스킨인자에 의한 영향을 분석해 보면, Fig. 20에서 볼 수 있듯이 폐쇄저류층의 경우 초기에 걸보기스킨인자가 9.6에서 콘덴세이트가 생성되기 시작하는 시점인 2년 후부터 증가하기 시작하여 최대 10.0까지 증가한 후 감소하는 추세를 보인다. 이것은 폐쇄저류층인 경우 생산 기간 중 압력 강하가 심하여 생성된 콘덴세이트가 다시 가스로 변하는 현상 때문이다. 비폐쇄저류층의 경우 앞의 영향반경 분석에서 나타난 것처럼 생산 시작 후 3년이 경과한 시점에서부터 걸보기스킨인자가 증가하기 시작하여 생산이 종료되는 시점까지 저류층 압력이 충분히 유지되므로 다시 감소하는 경향을 보이지는 않는다. B2층의 경우 저류층에서 생성되는 콘덴세이트의 양이 적은 관계로 걸보기스킨인자의 증가가 크지 않음을 알 수 있다.

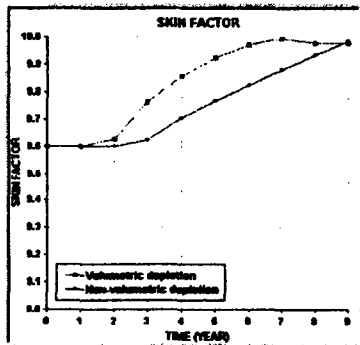


Fig. 20. Prediction of total skin factor for 5500 MMSCF/year.

3. 결 론

본 연구에서는 가스전 및 가스-콘덴세이트전에 대한 생산거동 분석을 수행하기 위해 물질평형방정식과 유입유동식에 근거한 사용자 친화적 생산거동 분석 모델을 개발하였다. 이 모델에서는 가스와 콘덴세이트 2상이 존재하는 영역에서의 유체의 특성을 온도와 압력의 함수로 도출하기 위해 유전자알고리즘을 이용한 상평형 모델과 접합하였다.

개발된 모델을 사용하여 고래 V 구조 중 B2 가스-콘덴세이트 저류층에 대한 생산거동 분석 작업을 시도하였다. 이 작업을 통해 유체의 물

성 규명, 회수율 및 저류층 압력 강하 예측, 콘덴세이트 효과 분석을 수행하였으며, 이 결과로부터 다음의 결론을 도출하였다.

1. B2층에서 시험 생산된 가스의 성분비를 사용하여 상평형 모델에 의해 포화압력을 도출한 결과, B2층은 저류층 온도 226 °F에서 가스-콘덴세이트 저류층임이 판명되었다.
2. B2층에서 연간 5500 MMSCF를 생산하는 폐쇄시스템으로 가정할 경우, 가스가 초기 매장량의 90%까지 회수되는데 9년이 소요되며, 생산 개시 후 5년 3개월 시점에서 정저압력이 1310 psia로서 운영 정저압력 1298 psia (운영 정두압력 1100 psia)에 근사해지므로 이 시점부터 콤프레서의 설치가 요구된다.
3. B2층을 연간 5500 MMSCF 생산하는 비폐쇄시스템 즉 저류층이 무한대수층과 접해있다고 가정할 때, 생산 개시 후 9년이 경과한 시점에서 계산된 정저압력이 운영정저압력 1298 psia보다 높게 산출되어 이 시점까지 목표 생산량을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 이 때 저류층에 유입된 물의 양은 0.55PV인 것으로 산출되었다.
4. B2층을 연간 5500 MMSCF 생산하는 비폐쇄시스템 즉 저류층이 10배의 유한대수층과 270° 유입각도로 접해있다고 가정할 때, 생산 개시 후 8년 6개월이 경과한 시점에서도 계산된 정저압력이 운영정저압력 1298 psia보다 높게 산출되어 최대 생산을 유지할 수 있는 것으로 나타났다.
5. 콘덴세이트 생성 효과 분석에서는, B2층을 연간 5500 MMSCF 생산하는 비폐쇄시스템 즉, 저류층이 10배의 유한대수층과 270° 유입각도로 접해있다고 가정할 때, 생산 개시 1100일이 경과한 시점에서부터 콘덴세이트가 생성되기 시작하여 1270일이 지나면 저류층 전체에 콘덴세이트가 존재하게 된다. 따라서 1100일이 경과한 시점에서부터 스킨인자가 증가하기 시작하지만 저류층으로 많은 양의 물이 유입되는 관계로 압력이 충분히 유지되어 콘덴세이트의 생성량이 적고 이에 따라 스킨인자의 증가가 크지 않은 것으로 산출되었다.

감 사

이 연구는 1999년도 한국석유공사 학술연구
 용역의 일환으로 수행되었으며, 이에 연구비를
 지원해 주신 한국석유공사에 감사드린다.

참 고 문 헌

[1] 한국자원연구소: "대륙붕 제6-1광구 고래
 V 구조 가스전 개발가능성 및 경제성 평
 가 보고서", 한국석유공사 (Mar. 1999).

[2] Sung, W.M., Ryou, S.S., Ra, S.H. and
 Kwon, S.I.: "The Interpretation of DST
 Data for Donghae-1 Gas Field, Block
 VI-1, Korea", KJChE, 18(1), 67-74
 (2001).

[3] 권오광, 성원모: "CO₂, N₂ 및 C₇₊ 성분이
 함유된 오일의 효율적 상 평형 계산을 위
 한 다단계 상 거동 전산모델의 개발 및
 응용", 한국자원공학회지, 31(6), 493-501
 (Dec. 1993).

[4] 서정규, 권오광, 성원모: "유전자 알고리즘
 이 적용된 상 평형 모델의 개발 및 탄화
 수소 혼합물의 상 거동 분석", 한국자원공
 학회지, 35(6), 547-553 (Dec. 1998).

[5] Stryjek, R. and Vera, J.H.: "PRSV - An
 Improved Peng-Robinson Equation of
 State with New Mixing Rules for
 Strongly Nonideal Mixtures", Cdn. J.
 Chem. Eng., 64, 334-340 (1986).

[6] Hagoort, J., "Fundamentals of Gas Reservoir
 Engineering", Elsevier Scientific Publ.
 Company (1988).

[7] Ambastha, A.K. and Barman, I.: "Application
 of Two-phase Deviation Factor to Material
 Balance Calculations for Gas-Condensate
 Reservoirs", Paper, The Petroleum Society,
 presented at the 47th Annual Technical
 Meeting of the Petroleum Society in
 Calgary, Alberta, Canada, 10-12 (June 1996).

[8] van Everdingen, A.F. and Hurst, W.: "The
 Application of the Laplace Transformation
 to Flow Problems in Reservoirs", Trans.
 AIME 186 (1949).

[9] Gravier, J.F., Lemouzy, P., Barroux, C.
 and Abed, A.F.: "Determination of
 Gas-Condensate Relative Permeability

on Whole Cores Under Reservoir
 Conditions", SPEFE, 9-15 (Feb. 1986).

[10] Salam, E.A., Mucharam, L., Abdassah, D.,
 Parhusip, B. and Panjaitan, P.R.:
 "Modification of the CVD Test Approach
 and Its Application For Predicting Gas
 Deliverability From Gas-Condensate
 Reservoir of Talang Akar Formation in
 indonesia", SPE 35648, (1996).

[11] Hwang, M.K. and Odeh, A.S.: "Estimation of
 Condensate Dropout Effects on Well
 Productivity as Skin Change with
 Multiplicative Interactions Among Skin
 Components", SPE 29894, (1995).

[12] Aziz, R.M.: "Deliverability Projection Model
 for Overpressured Gas-Condensate
 Reservoir", SPE 10125, (1985).

[13] Raghavan, R. and Jones, J.R.: "Depletion
 Performance of Gas-Condensate
 Reservoir", JPT, 725 -730 (Aug. 1996).

[14] 김종현, 류상수, 성원모: "사용자 친화적
 노달 분석 모델의 개발 및 생산설비의 유
 동 분석", 한국자원공학회지, 38(1) 42-51
 (2001).

사 용 기 호

B _o :	formation volume factor of condensate [bb/STB]
c :	aquifer compressibility [psi ⁻¹]
c _R :	rock compressibility [psi ⁻¹]
c _w :	water compressibility [psi ⁻¹]
f :	mole fraction [fraction]
h :	thickness [ft]
G :	dry gas initially-in-place [SCF]
G _L :	condensate initially-in-place [STB]
G _p :	cumulative dry-gas production [SCF]
G _{Lp} :	cumulative condensate production [STB]
k :	formation permeability [md]
k _e :	effective permeability [md]
k _{rg} :	gas relative permeability [fraction]
k _{ro} :	oil relative permeability [fraction]
m(p) :	real gas pseudo-pressure [psia ² /cp]
	$= 2 \int_{p_b}^p \frac{p}{\mu Z} dp$
p :	pressure [psia]
p _{avg} :	average reservoir pressure [psia]

D_{dew} :	dewpoint pressure [psia]	T :	temperature [$^{\circ}$ R]
P_i :	initial pressure [psia]	U :	aquifer constant [ft ³ /psi] = $2\pi(\alpha/360)\phi hcr_b^2$
P_{wf} :	flowing wellbore pressure [psia]	V_{hc} :	hydrocarbon pore volume [ft ³]
q :	production rate [MMSCF/day]	V_{pi} :	initial pore volume [ft ³]
q_o :	condensate flow rate [STB/day]	W_e :	volumetric water influx [ft ³]
r_a :	altered radius [ft]	W_p :	volumetric water production [ft ³]
r_b :	radius of aquifer inner boundary [ft]	W_{eD} :	dimensionless aquifer influx [fraction]
r_e :	reservoir outer boundary [ft]	z_2 :	two-phase z-factor [fraction] = $f_g z_g + f_L z_L$
r_w :	wellbore radius [ft]	z_{2i} :	two-phase z-factor at initial condition [fraction]
$R_{MLG(p)}$:	producing molar condensate/gas ratio at pressure p [fraction]		
R_{MLGi} :	initial molar condensate/gas ratio [fraction]		
R_{MLGp} :	cumulative molar condensate/gas ratio [fraction]		
	$= \frac{1}{G_p} \int_{p_i}^p R_{MLG}(p) \frac{dG_p}{dp} dp$		
S_o :	condensate saturation [fraction]	α :	contact angle of aquifer-reservoir [degree]
S_{wi} :	initial water saturation [fraction]	ϕ :	porosity [fraction]
S_a :	skin factor due to condensate formation [fraction]	μ :	viscosity [cp]
S_m :	mechanical skin factor [fraction]	ρ :	molar density [lbm mol/ft ³]
S_t :	total skin factor [fraction]		
t :	time [hours, days or years]		
t_D :	dimensionless time [fraction]		
	$= \frac{k}{\phi \mu cr_b^2} t$		

그리스 문자

α :	contact angle of aquifer-reservoir [degree]
ϕ :	porosity [fraction]
μ :	viscosity [cp]
ρ :	molar density [lbm mol/ft ³]