

유정시험 자료에 포함된 경계효과를 고려하기 위한 경계요소법의 적용

이 원 석¹⁾ · 성 원 모²⁾ · 허 대 기¹⁾

1. 서론

유정시험 방법 중 하나인 간섭시험은 정호 간의 연결성(inter-well connectivity), 이방성(anisotropy) 및 불균질성(heterogeneity)에 대한 자료를 제공해 주므로, 추가 생산정의 위치 선정 등과 같은 저류층의 특성 규명 뿐 아니라 지하수 개발이 주변 지역 환경에 미치는 영향 평가에 있어서 매우 효과적으로 사용될 수 있다[Earlougher, 1977; Sabet, 1991].

간섭시험 자료 분석에 있어서 이론해를 이용한 분석법은 기본적으로 많이 사용되지만, 저류층의 규모가 크지 않거나 외곽경계가 관측정 주위에 근접하게 위치한 시스템에서 획득된 자료는 빠른 시간 안에 경계효과를 포함할 수 있으므로 천이구간(transient period) 자료만을 해석하는 기존의 방법은 적용 한계성을 갖는다.

경계요소법은 불규칙한 형태의 시스템을 해석하는데 있어서 수치분산이나 격자방향효과가 배제된 해를 제공하므로 외곽경계 효과를 포함한 양수시험 자료의 해석 등에 적용할 경우 이론해에 가까운 정확한 결과를 도출할 수 있다. 이에 본 연구에서는 경계요소법에 근거한 간섭시험 해석모델을 개발하였으며, 간단한 형태의 시스템에 대한 이론해와 비교하여 타당성을 검증하였다. 또한 시간에 따른 저류층의 압력분포와 압력미분곡선을 산출하여 자료에 경계효과가 나타나기 시작하는 시기를 판단하고자 하였으며, 천이구간 자료만을 해석한 경우와 경계효과를 포함한 자료의 분석 결과를 비교하여 본 모델의 적용성을 확인하고자 하였다.

2. 이론적 고찰

경계요소방정식 : 확산지배방정식을 라플라스 변환한 후 경계적분식(boundary integral equation)으로 전환하고, 국부좌표계로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[Sung et al., 1999].

$$\begin{aligned}
 C(S) \tilde{p}_D(S, s) + \sum_{i=1}^E \sum_{k=1}^2 \tilde{p}_D(B, s) \int_{-1}^{+1} \frac{\partial \tilde{G}}{\partial n}(S, B, s) \psi_i(\xi) \mathcal{J}(\xi) d\xi \\
 = \sum_{i=1}^E \sum_{k=1}^2 \frac{\partial p_D}{\partial n}(B, s) \int_{-1}^{+1} \tilde{G}(S, B, s) \psi_i(\xi) \mathcal{J}(\xi) d\xi \\
 + \sum_{j=1}^W \frac{q_{Dj}}{s} \tilde{G}(S, S_w, s)
 \end{aligned} \tag{1}$$

계산된 라플라스 영역에서의 시스템 내부의 압력은 Stehfest 알고리즘을 이용한 역변환을 통해 최종해가 된다.

3. 결과 분석

타당성 검증 : 이론해와 본 모델에 의한 결과를 비교한 Fig. 1은 생산정 A에서 일정 유량으로 생산할 때 생산정 A 및 관측정 B, C에서 관측된 압력을 도시한 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 모

든 관측점에서 이론해와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 형상함수의 차수(order)에 의한 영향을 살펴보면, 선형의 형상함수가 상수의 형상함수를 사용한 경우보다 이론해와 근접함을 알 수 있다. 특히 곡선의 굴곡 부분, 즉 외곽경계의 효과가 나타나는 부분에서는 이와 같이 간단한 시스템에서도 미세하지만 선형의 형상함수를 사용했을 경우에 있어서 보다 정확한 해를 도출함을 알 수 있다.

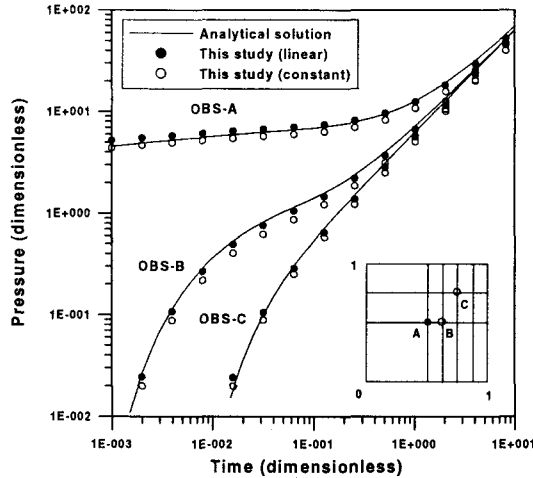


Fig. 1. Comparison of BEM solution with analytical solution at various observing points in closed square system with a well at the center.

유사정상상태 판단 : 다수의 정호가 존재하는 복잡한 형태의 저류층에서, 생산이 지속됨에 따라 관측정 자료에서 경계효과가 나타나는 시기를 판단하고 경계효과를 포함한 자료의 해석을 위해 Fig. 2에 도시된 균질저류시스템을 제시하였다.

생산에 따른 시스템의 압력 변화를 정성적으로 살펴보기 위해 시간대에 따른 압력분포를 계산하였다. 중앙에 위치한 정호 ATV-1에서 100 *bbl/day*의 양으로 생산을 할 때, 시스템 내부 160여 개 지점에서 관측된 압력을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3의 (b)와 같이 약 6일 경과 후에 생산에 의한 영향이 남쪽의 불투과 경계에 미치는 것을 확인 할 수 있으며, 전과 속도를 감안하면 Fig. 3의 (c)와 같이 약 8일 경과 후부터 OBS-1에서 관측된 자료에 경계효과가 포함되기 시작할 것으로 판단된다. 반면에 일정 압력 경계와 근접한 OBS-2에서 관측된 자료는 (f)에서와 같이 20일이 경과한 후에도 생산에 의한 영향을 크게 받지 않고 압력이 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

다음으로 두 관측정에서 측정된 압력자료에 대한 압력미분곡선을 도출하여 경계조건에 의한 영향과 안정화 도달시간의 양상을 살펴본 결과는 Fig. 4에 도시된 바와 같다. 관측된 압력을 살펴보면 주변의 외곽 경계조건과 생산정에 의한 영향으로 OBS-1에서의 압력변화는 OBS-2에 비해 세 배 이상 크게 강해지며 안정화 도달시간도 매우 늦게 일어나는 것을 알 수 있다. 반면에 관측정 OBS-2의 압력미분곡선이 관측정 OBS-1에 비해 안정화가 빨리 일어나며 더 작은 값을 보이는 데, 이것은 일정 압력 경계에 의한 영향으로 판단되며 이는 Kikani and Horne[1992]이 발표한 결과와도 일치하는 현상이다. 또한 두 관측정 자료에서 압력미분곡선이 20일을 전후해서 0으로 접근하는 현상은 일정압력 경계조건에 의해 안정화 될 때 나타나는 현상으로써, 일정 압력경계에 보다 가까이 위치한 OBS-2에서 보다 빠른 시간에 이 현상이 나타남을 알 수 있다.

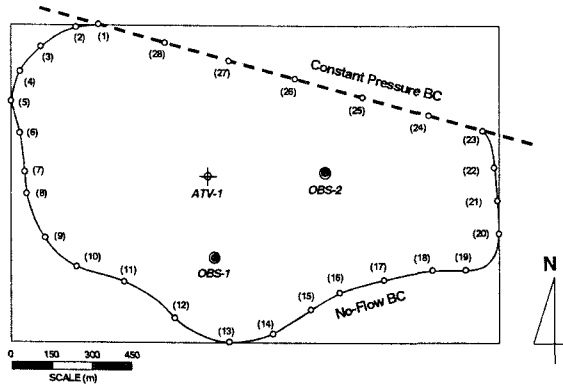


Fig. 2. Schematic diagram of synthetic field map.

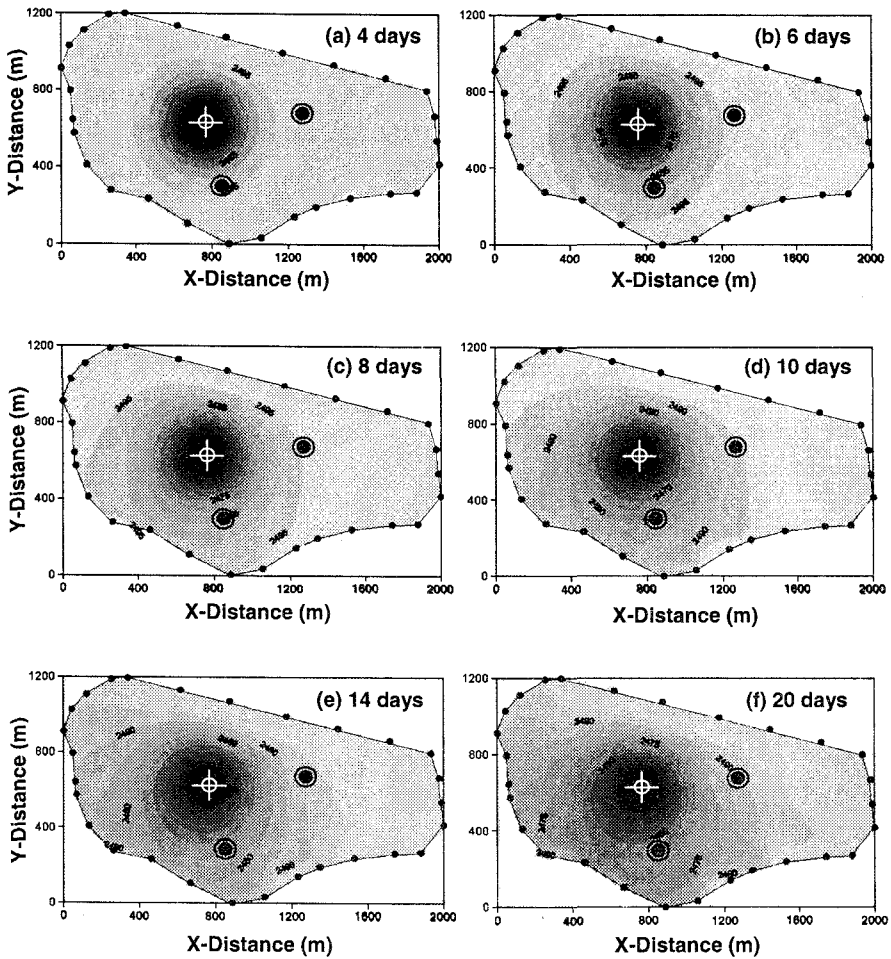


Fig. 3. Observed pressure distribution for various time intervals.

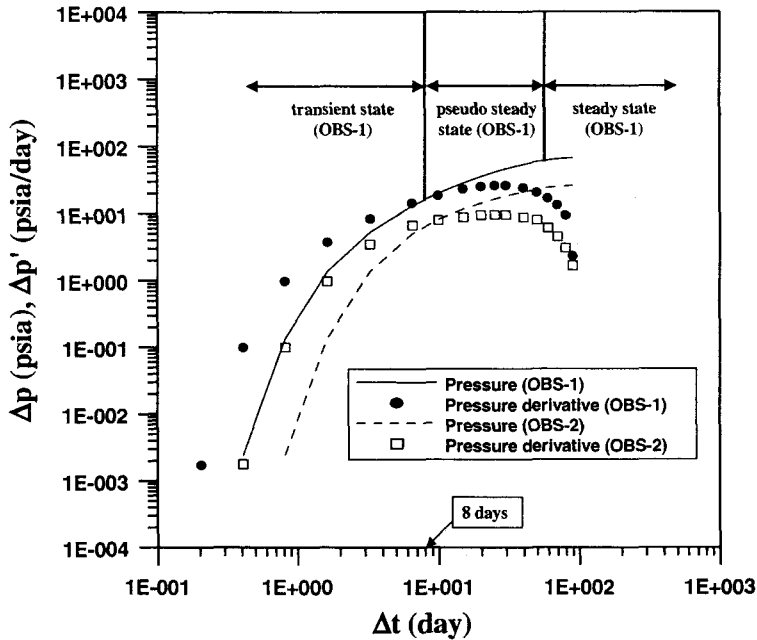


Fig. 4. Pressure and pressure derivative curves for OBS-1 and OBS-2.

천이구간 및 유사정상상태 자료 해석 비교

위에서 분석한 바와 같이 OBS-1에서 관측된 자료는 약 8일 후부터 외곽 경계의 영향을 포함하게 되므로 이 이후의 자료는 이론해에 의한 방법으로는 분석이 불가능하다. 따라서 관측정 OBS-1에서 관측된 자료 중에서 천이구간의 자료만을 분석했을 경우와 유사정상상태 자료까지도 포함한 분석을 비교하여 본 연구에서 개발된 모델의 적용성을 확인하고자 하였다. 저류층의 실제 투과도 15.0 md에 의해 도출된 천이구간 자료, 즉 8일 이전의 자료만을 이용하여 분석한 결과는 약 15.16 md로써 상대 오차 1.07%를 보였으며, 천이구간 뿐 아니라 경계효과를 포함한 90일까지의 자료를 포함하여 분석한 투과도는 약 14.80 md로써 상대오차 1.33%를 나타내었다. 두 결과는 모두 허용치 이내의 값으로써 본 모델이 경계 효과를 포함한 자료 분석에 매우 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

1. 개발된 모델을 간단한 정방형 시스템에 적용한 결과 어느 관측 지점에서든 Ei 해와 정확히 일치하였으며, 간단한 시스템에서도 높은 차수의 형상함수가 보다 이론해에 근사한 해를 도출함을 알 수 있었다.
2. 본 모델을 이용하여 도출된 시간에 따른 압력분포 변화 양상은 다수 정호에서의 생산 및 주입에 의한 효과와 복잡한 외곽 경계에 의한 영향을 효과적으로 나타내주고 있으며, 관측정 자료의 유사정상상태 진입 시기를 정성적으로 판단하는데 유용한 정보를 제공함을 확인하였다. 또한 압력미분곡선은 압력분포 변화 양상과 함께 유사정상상태 진입 시기의 정량적 특성 파악 및 자료의 안정화 도달 시간 판단에 효과적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.
3. 본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 천이구간의 자료만을 분석했을 경우와 유사정상상태 자료까지

도 포함한 분석을 비교한 결과, 두 결과는 모두 허용치 이내의 유사한 결과를 보였으며, 이를 통해 본 모델이 유사정상상태 자료 분석에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

- Sung, W., Lee, W., and Kim, I., 1999, "Development and Validation of Interference Testing Analysis Model Using Boundary Element Method for Geometrically Complex Reservoirs," paper SPE 54272 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia.
- Earlougher, R. C. Jr., 1977, *Advances in Well Test Analysis*, Monograph Series, SPE, Richardson, TX, pp. 186-91.
- Kikani, J. and Horne, R. N., 1992, "Pressure-Transient Analysis of Arbitrarily Shaped Reservoirs with the Boundary-Element Method," *SPEFE*, March, pp. 53-60.
- Sabet, S. A., 1991, *Well Test Analysis*, Gulf Publishing Company, USA, pp. 291-323.

-
- 1) 한국지질자원연구원
 - 2) 한양대학교