

지구통계학을 이용한 불균질 이방성 저류층 시스템의 추계학적 모델링

이동성, 강주명*
서울대학교 공학연구소, 서울대학교 자원공학과*

Stochastic modeling for heterogeneous anisotropic reservoir system by using geostatistics

Dongseong Lee, Joe M. Kang*
Research Institute of Engineering Science at Seoul National Univ.,
Dept. of Mineral & Petroleum Eng. at Seoul National Univ.*

I. 서 론

최근들어 지구통계학(geostatistics)적 이론에 기초를 둔 조건부 시뮬레이션(conditional simulation)기법이 이 지하수학과 석유공학분야 등에 도입됨으로써 복잡하고 불균질한 대수층 또는 저류층 시스템의 매질특성 분포를 추계학적으로(stochastically) 모델링하는 방법이 활발히 연구되고 있다. 특히 불균질 저류층의 매질 특성중 유체투과율 분포는 저류층 내 압력 및 유체 거동에 중요한 요소로 작용하기 때문에 이를 적절히 모델링하는 것은 향후 저류층에 대한 생산 및 운영 계획 수립 등 시스템 관리에 매우 중요하다.

불균질 저류층의 유체투과율 분포를 통계적으로 모사하는 방법을 저류층 특성화(reservoir characterization)라 하며 보다 정확한 저류층 특성화를 위해서는 유체투과율과 관련 있는 다양한 형태의 많은 정보를 이용해야 한다. 연구 초기에는 코아분석을 통해 얻은 유체투과율의 평균, 분산, 분포의 공간적 상관관계(spatial correlation)를 나타내는 상관거리(correlation length)등의 정적자료 만을 이용하여 저류층을 특성화하였으나 최근에는 대상지역의 코아분석자료 뿐만 아니라 유정시험자료 등 넓은 지역의 정보를 갖고 있는 공학적, 지질학적 자료도 불균질 저류층 특성화에 이용하고 있다(Alabert, 1989; Sagar, 1994).

그러나 지금까지 진행된 연구는 주로 불균질 등방성 저류층 시스템을 대상으로 한 것이었으며 전세계적으로 널리 분포하고 있는 하성 저류층(fluvial reservoir)이나 미세 균열 저류층(massive fractured reservoir)등과 같이 이방성을 나타내고 있는 저류층에 대한 연구가 미흡했다. 따라서 이 연구에서는 유정시험자료와 코아자료로부터 얻은 유체투과율에 대한 정보를 이용하여 불균질 이방성 저류층을 특성화 할 수 있는 방법을 개발하고 이를 이방성 저류층에 적용하여 그 유용성을 검증하였다. 또한 실제 유전·가스전 개발 상황에서의 적용성 위하여 특성화된 불균질 이방성 저류층에서 수공법을 통한 물 돌파시간(breakthrough time)을 예측하여 그 결과를 추계학적으로 제시하였다.

II. 불균질 이방성 저류층 특성화를 위한 기초 연구

여기에서는 불균질 이방성 저류층 특성화 기법을 개발하기 위한 기초 연구로써 불균질 이방성 유체투과율 장(field) 생성기법, 유정시험해석(ISA)을 통해서 얻은 유체투과율과 격자 유체투과율과의 관계 규명, 그리고 불균질 이방성 저류층을 겉보기 불균질 등방성 저류층으로 보정하기 위한 좌표변환 기법 등의 연구를 수행하였다.

2.1 불균질 이방성 유체투과율 자료 생성

불균질 이방성 저류층에서 유정시험을 모사하기 위한 전산 유동 모형의 입력자료로써 불균질 이방성 유체투과율 장(field)을 생성하고자 한다.

일반적으로 유체투과율은 로그정규분포(log normal distribution)를 나타내는 확률변수(random variable)로 볼 수 있다(Alabert, 1989). 연구에서는 최근들어 많이 사용되고 있는 순차적 가우시안 모사법(sequential Gaussian simulation; sGs)(Deutsch, 1992)을 이용하여 로그정규분포의 유체투과율을 생성했다. 순차적 가우시안 모사법을 이용하여 평균 μ_Y 와 불균질도 V_{DP} 그리고 상관거리 등 x, y 방향에 대하여 각각 원하는 통계치를 갖는 로그정규분포 유체투과율(Y)을 생성할 수 있다.

2.2 유정시험 유체투과율 분석

일반적으로 불균질 등방성 저류층에서 유정시험해석을 통한 유체투과율과 유정시험 조사반경내 격자 유체투과율과의 관계는 Oliver(1990)의 이론해에 근거하여 아래식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Sagar, 1995). 즉, 불균질 등방성 저류층에서 유정시험 유체투과율은 조사반경내 격자 유체투과율의 격자 면적 가중 기하평균값(area-based geometric average)과 가장 비슷하다.

$$\ln \bar{k} \cdot A_r \approx \sum_s \ln k(\vec{s}) \cdot A_b(\vec{s}) \quad (1)$$

2.3 이방성 보정을 위한 좌표 변환

여기서는 불균질 등방성 저류층 특성화에만 적용할 수 있는 역해기법(ISA)을 불균질 이방성 저류층 특성화에도 적용할 수 있게 하기 위하여 불균질 이방성 저류층을 겉보기 불균질 등방성 저류층으로 바꾸는 좌표변환에 대해 알아보하고자 한다. 이방성을 다음과 같이 세가지 범주로 나누고 (국부규모 이방성, 광역규모 이방성, 복합규모 이방성) 각각을 등방성으로 바꾸기 위하여 어떠한 변환을 해야 하는지에 대하여 알아보았다.

2.2.1 국부규모 이방성 보정을 위한 좌표변환

국부적 이방성이란 격자내의 주방향과 종방향에 대한 유체투과율은 다르지만 상관거리는 등방성을 나타내는 이방성 저류층을 말한다. 불균질 국부적 이방성 저류층을 불균질 등방성 저류층으로 바꾸기 위한 좌표변환식은 균질 이방성 저류층의 좌표변환식을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$x' = 4\sqrt{\frac{k_y}{k_x}} x \quad , \quad y' = 4\sqrt{\frac{k_x}{k_y}} y \quad (2)$$

2.2.2 광역규모 이방성 보정을 위한 좌표변환

광역규모 이방성이란 미시적 규모의 격자 유체투과율은 등방성을 나타내지만 공간적 상관관계를 나타내는 상관거리가 방향에 따라 다르므로 해서 나타나는 거시적 규모의 유체투과율 이방성을 말한다. 광역규모 이방성 저류층을 위한 좌표변환식은 국부규모 이방성 보정을 위한 좌표 변환식과 같이 이론식으로 부터 유추할 수 없으며 단지 국부규모 이방성 보정식의 유사성(analogy)을 이용하여 아래식(3)과 같이 상관거리비(ratio of correlation length)의 2ⁿ제곱근으로 표시하고자 한다.

$$x' = 2^n \sqrt{\frac{a_y}{a_x}} x \quad , \quad y' = 2^n \sqrt{\frac{a_x}{a_y}} y \quad (3)$$

불균질 광역적 이방성을 겉보기 불균질 등방성 저류층 거동을 나타낼 수 있도록 하는 적합한 n 값은 유정시험해석을 통해 찾고자 한다. 즉, 유정시험 유체투과율과 조사반경내 격자 유체투과율의 관계를 나타낼 수 있는 일반적인 식(4)에서 2ⁿ제곱근 좌표변환에서 n 값의 변화를 통한 격자 면적값(A_b)과 가중치(ω)를 바꾸어 가며 좌변과 우변의 값의 차이가 최소가 되는 좌표변환을 찾음으로써 최적 n 값을 찾을 수 있다.

$$(\bar{k}A_r)^\omega \simeq \sum_s (k(\vec{s}) A_b(\vec{s}))^\omega \quad (4)$$

여러가지 경우에 대하여 n 과 ω 을 바꾸어가며 역해기법(ISA)을 통한 유체투과율 값과 주어진 조사반경내 격자면적 가중평균값의 차이를 알아본 결과 ω 는 거의 0이며 적정 n 값은 Table 1 과 같다.

2.2.3 복합규모 이방성 보정을 위한 좌표변환

일반적으로 불균질 이방성 저류층이라 하면 앞의 두 가지 요소가 동시에 나타나는 복합규모 이방성 저류층을 의미하며 이를 보정하기 위해서는 앞서 수행한 두 가지 보정을 순차적으로 수행하면 불균질 복합규모 이방성 저류층을 불균질 등방성 저류층으로 나타낼 수 있다.

III. 불균질 이방성 저류층 특성화 및 응용

여기서는 앞서 얻은 결과들을 토대로 코아분석자료와 유정시험자료 해석을 통해 얻은 유체투과율 자료를 이용하여 다양한 형태의 불균질 이방성 저류층을 특성화였다.

저류층 특성화를 위한 역산방법(inverse method)으로는 아닐링 기법(annealing method)을 사용하였으며, 또한 특성화 기법의 현장 적용성 검토를 위하여 특성화된 이방성 저류층에서 2차 생산(secondary production) 계획시 중요한 역할을 하는 물 돌파 시간(breakthrough time)을 예측하고 그 결과를 제시하였다.

3.1 아닐링 역산법

아닐링 기법이란 주어진 조건 하에서 광역적 최적해(global optimum solution)를 찾는 최적화 기법 중의 하나이다. 주어진 제약조건(constraint)을 원하는 값과 추정값의 차이인 목적함수(objective function)로 나타낸 후 추정값을 바꾸어가며 목적함수 값을 줄이므로써 궁극적으로 제약조건 하에서 원하는 해를 찾는 기법이다.

$$\text{목적함수}(E) = |\text{추정값} - \text{원하는 값}| \quad (5)$$

아닐링 역산법에 사용되는 목적함수는 세미베리오그램 목적함수와 유정시험 유체투과율 목적함수이고 결과적으로 최종 목적함수는 이들 두 목적함수의 합으로 나타낼 수 있다(Sagar, 1995).

3.2 복합적 불균질 이방성 유체투과율의 분포 특성화

여기에서는 앞에서 얻어진 결과들을 이용하여 현장에서 나타날 수 있는 형태의 이방성 저류층을 설정하고 유체투과율 분포를 아닐링 역산법으로 특성화하는 방법에 대해서 사례연구(Case Study)를 통해서 살펴보았다. 복합규모 이방성 저류층 특성화에 대해 알아보기 위하여 먼저 V_{DP} 가 0.7, α_x , α_y 는 각각 1500 ft와 550 ft 인 경우에 대하여 알아보았다($k_x=300\text{ md}$, $k_y=100\text{ md}$). 특성화된 유체투과율 장(field)에 대한 압력거동 양상과 유체투과율의 분포가 Fig.1과 Fig.2에 나타나 있다.

3.3 수공법에 의한 물 돌파시간 예측

여기에서는 이방성 저류층에 대한 수공법 계획시 주입정 및 생산정의 위치를 선정하는데 중요한 역할을 하는 물 돌파시간을 특성화된 저류층에서 예측해 보고자 한다.

앞서 세미베리오그램 만을 제약조건으로 하는 경우와 세미베리오그램과 유정시험 유체투과율 모두를 제약조건으로 하여 특성화한 저류층에 대하여 수공법을 실시하여 물 돌파시간을 예측해 보았다. 수공법 모사에 필요한 저류층 자료는 Table 2과 같다.

먼저 물 돌파시간을 알아보았다. Fig.3에서 보듯이 세미베리오그램 만을 제약조건으로 이방성 저류층을 특성화 하였을 때 보다는 세미베리오그램과 유정시험 유체투과율을 제약조건으로 사용하였을 때가 물 돌파시간 예측의 불확실성(uncertainty)을 줄일 수 있었다. 또한 압력과 물포화도 분포양상을 알아보았다. 마찬가지로 세미베리오그램과 유정시험 유체투과율 모두를 이용하여 특성화 하였을 때가 압력 분포양상과 물포화도 분포양상 모두가 참값과 더욱 잘 일치함을 알 수 있었다(Fig.4).

IV. 결 론

1. 제안된 방법에 따라 특성화된 불균질 이방성 저류층에서 압력거동, 유체투과율 분포양상 등을 구해본 결과 압력거동의 경우 참값과 최대오차 10% 내에서 예측하였으며 유체투과율 분포양상도 유사하게 예측함으로써 이방성 저류층의 특성화에 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 광역적 이방성 보정을 위한 좌표변환식은 상관거리비의 2ⁿ제곱근으로 나타낼 수 있으며 일반적으로 종방향과 주방향의 상관거리비가 0.3 이하로 이방성이 클 경우는 n 값을 3, 그 이상에서는 n 값을 6 정도로 하는 것이 적합함을 알 수 있었다.

3. 특성화된 이방성 저류층 위에서 물 돌파시간을 예측해 보았다. 물 돌파시간을 신뢰구간내에서 추계학적으로 예측할 수 있었으며 코아분석을 통해 얻은 세미베리오그램 정보만을 제약조건으로 사용하였을 때 보다 세미베리오그램과 유정시험자료를 함께 이용하여 특성화된 저류층의 경우 불확실성을 더욱 줄여 물 돌파시간을 예측할 수 있었다.

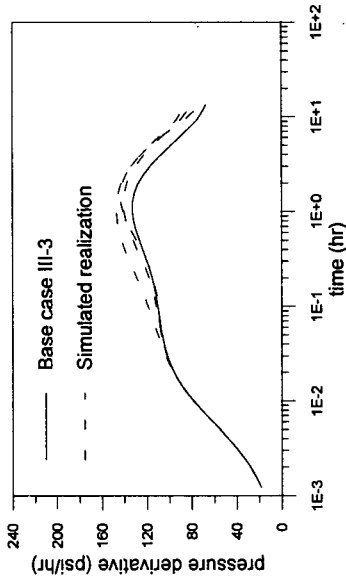
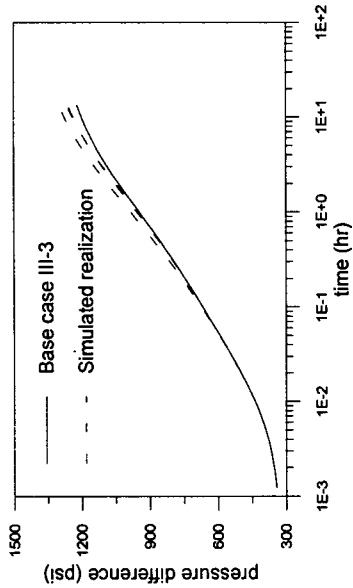
참고문헌

1. Alabert, F.G.: "Constraining Description of Randomly Heterogeneous Reservoirs to Pressure Test Data: A Monte Carlo Study," paper SPE 19600 presented at the 1989 Soc. of Pet. Eng. Ann. Tech. Conf. and Exh., San Antonio, TX, Oct. 8-11.
2. Deutsch, C.V. and A.G. Journel: GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford Univ. Press, New York, NY, 1992
3. Oliver, D.S.: "The Averaging Process in Permeability Estimation From Well-Test Data," SPEFE (Sept. 1990) 319.
4. Sagar, R.K., B.G. Kelkar, and L.G. Thompson: "Reservoir Description by Integrating Well-Test Data and Spatial Statistics," SPEFE(1995) 267-274.

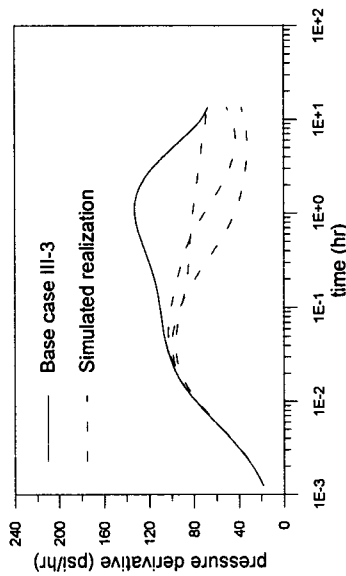
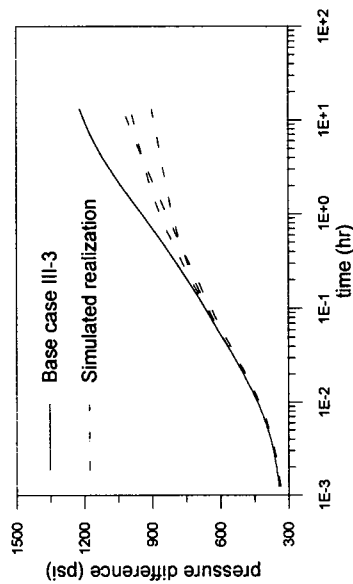
Table 1 N values in coordinate transformation for global scale anisotropic reservoir Table 2 Input data of areal system for reservoir simulation

a_x/a_y	V_{DP}	0.7
0.2 (400/2000)		3~4
0.3 (600/2000)		4~5
0.4 (800/2000)		6 >
0.6 (1200/2000)		6 >

Parameters	Data
Reservoir Size	350 ft × 350 ft
NX × NY	10 × 10
Thickness	10 ft
Porosity	30.0 %
Initial Oil Saturation	80.0 %
Initial Res. Pressure	2000 psia
Injection Rate	400 B/D
Production Rate	50 B/D
Oil Viscosity	0.4 cp
Water Viscosity	1.0 cp



(b) variogram & ISA well-test constraint



(a) variogram constrained only

Fig. 1 Comparison of pressures and pressure derivatives of base case and simulated realization (Case Study)

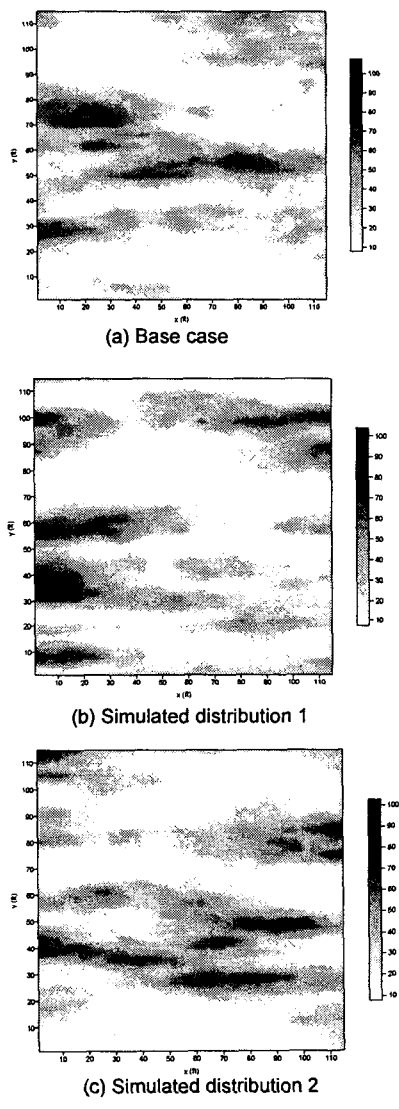


Fig.2 Base case and simulated permeability distribution honoring semi-variogram and ISA constraint.

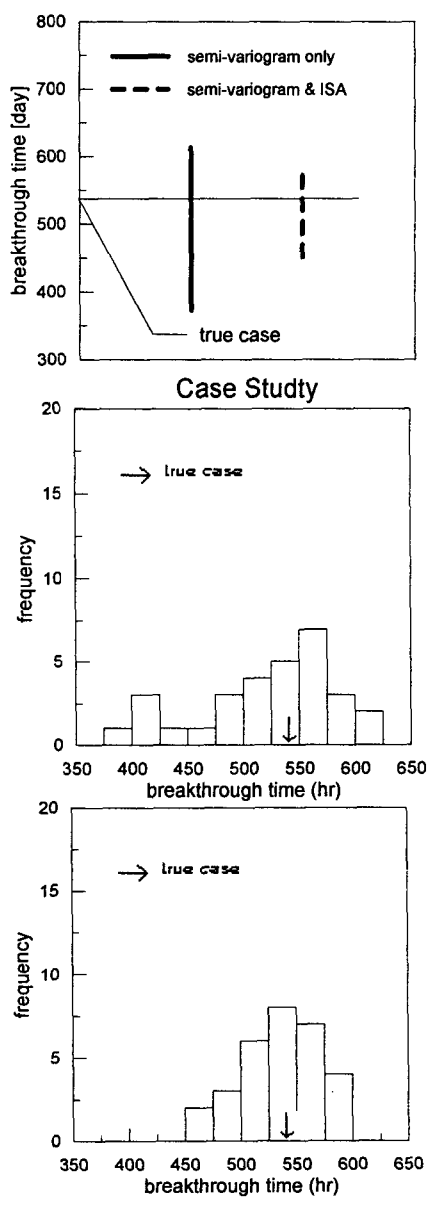


Fig.3 Uncertainty interval of breakthrough time

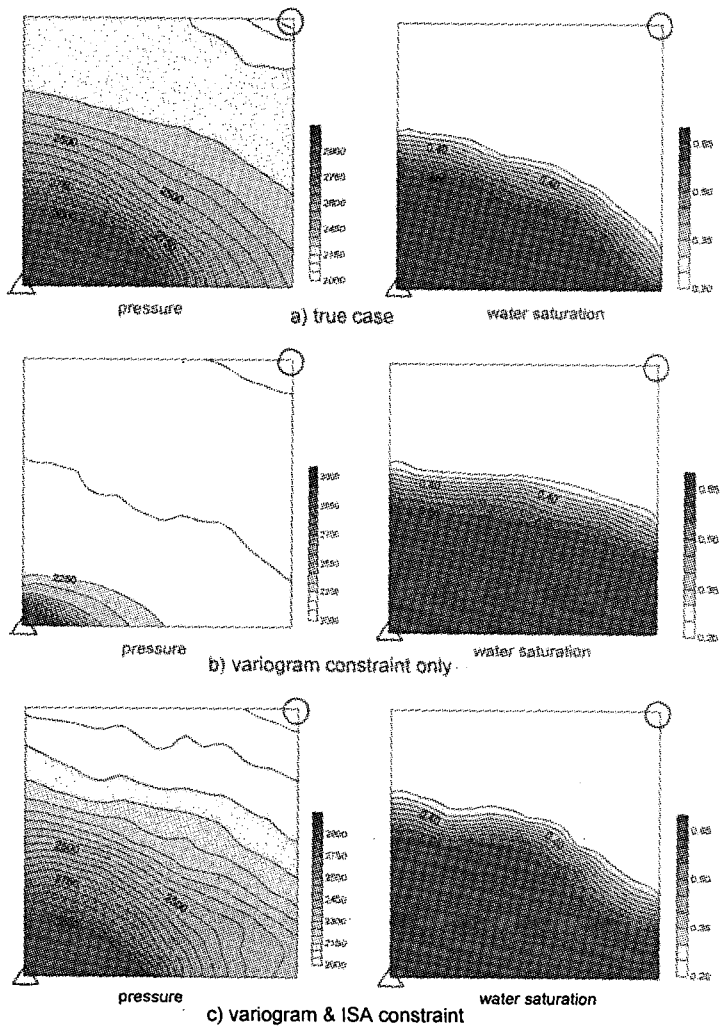


Fig.4. Distributions of pressure and water saturation after 200 days (case study)