

다층 저류층에서의 층간유동 및 생산특성 연구동향

남상구¹⁾ · 박창협^{1)*} · 정승필²⁾

Research Trends of Cross-flow Behaviors and Production Characteristics in a Multi-layered Reservoir

Sang-Gu Nam, Changhyup Park* and SeungPil Jung

Abstract : This paper presents research reviews for flow behaviors occurred in multi-layered reservoir. According to geological formation and flow regime, the production characteristics are divided into three parts; interlayer cross-flow, commingled, and wellbore cross-flow system. Most heterogeneous reservoirs show interlayer cross-flow communicating fluids between interconnected formations but the conventional production systems have considered commingled-flow. The unaccurate estimation of reservoir pressure could result in wellbore cross-flow within a production tubing after well completion. Recent researches have focused on characterizing the effects of cross-flow with relation to production optimization. The works integrating skin factor with comparison of reservoir properties have been done to detect cross-flow on the surface. Production allocation in multi-layered reservoirs and uncertainty quantification affecting the system design are actively investigated to accomplish production optimization as well as the robust design of petroleum production system.

Key words : Multi-layer reservoir, Cross-flow, Production optimization, Production characteristics, Skin factor

요약 : 이 연구에서는 다층 저류층에서 발생하는 유동특성을 구분하고, 각 유동특성에 따른 저류층 분석기술과 연구동향을 살펴보았다. 생산 가능한 저류층의 구조가 점점 복잡해지면서 불균질 다층 저류층의 유동 특성화 연구는 복합적인 해석을 요구하고 있다. 다층 저류층은 유동특성에 따라 매질 층간유동(interlayer cross-flow), 혼합생산(commingled), 시추정 층간유동(wellbore cross-flow) 시스템으로 구분할 수 있다. 대부분의 불균질 다층 저류층은 매질 층간유동 시스템의 특징을 갖고 있으나 생산 시스템은 층간유동을 무시한 혼합유동 양상을 가정하는 경우가 많다. 유정완결 시 생산층 압력예측의 부정확성으로 생산정 내에서 층간유동이 발생하기도 한다. 최근에는 분석결과의 정확성과 유체의 생산성을 향상시키기 위해 층간유동이 생산특성에 미치는 영향을 분석하는 연구가 주를 이루고 있다. 층별 생산량 할당과 층간유동 예측 모델 구축을 기반한 생산최적화 연구는 층간유동 및 다층 유정 시스템의 효과를 고려한 통합적인 분석과 영향인자의 정량화 연구를 바탕으로 수행 중이다.

주요어 : 다층 저류층, 층간유동, 생산최적화, 생산특성, 표피손상인자

서론

지질학적 불균질 다층 구조(multi-layer)를 가진 생산 유가스전은 유체거동 분석이 매우 난해하다. 이는 서로 다른 두 개 이상의 저류층서에서 압력, 유체투과도, 유체

포화도, 공극률 등이 다르게 나타나기 때문이다. 만약 석유의 생산이 저류층 사이의 유체유동 없이 이루어진다면 유동해석을 단순화할 수 있다. 그러나 대부분의 생산 유가스 저류층은 복합적 생산 층서로 구분되어 있는 다층 구조로서 층간유동이 발생하며, 층서의 물성에 따라 복잡한 유동양상이 나타날 수 있다.

층간유동의 문제점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 각 지층에서 발생하는 유체의 유동을 정확하게 파악할 수 없으므로 생산거동 예측에 상당한 오류가 발생할 수 있다. 둘째, 유정생산시험과 산출시험에서도 다른 층의 유체가 유입됨으로써 저류층의 물성치가 변할 수 있기 때문에 분석결과의 오차가 발생할 수 있다. 생산 저류층에서 발생하는 층간유동은 생산기간동안 각 층의

2012년 12월 12일 접수, 2013년 3월 15일 심사완료

2013년 4월 11일 게재확정

1) 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과

2) 한국석유공사 생산기술처

*Corresponding Author(박창협)

E-mail; changhyup@kangwon.ac.kr

Address; Department of Energy & Resources Engineering,
Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do
200-701, Korea

압력을 지속적으로 변화시킬 수 있으며, 층서별로 개별적인 생산량 분석을 어렵게 만든다. 특히 유정 운영을 까다롭게 만들어 생산 효율 및 회수증진 효율을 저하시킬 수 있다. 마지막으로 시멘팅이 불량한 상태에서 케이싱 바깥면을 통해 층간유동이 발생할 경우에는 완결작업이 이루어지지 않은 대수층으로 유체가 유입되면서 대수층을 오염시키기도 한다(Caillabet *et al.*, 2001; Zhu *et al.*, 2002; Bakulin and Korneev, 2008).

대부분의 다층 저류층은 층서별로 완결작업과 생산이 이루어지기 때문에 다수의 생산구간이 발생하며, 이러한 생산구간 사이의 층간유동은 생산시설의 설계와 생산추이 예측을 어렵게 만든다. 효과적인 유정완결 및 생산최적화를 위해서 별도의 복합적인 해석이 필요하며, 특히 저류층 내에서 발생하는 층간유동을 파악하는 것이 중요하다. 층간유동 파악 기술로는 유정시험(well test), 산출시험(DST; Drill Stem Test), 생산검층(production logging) 등이 있다(Economides and Joseph, 1987; Petricola and Watfa, 1993; Alghareeb *et al.*, 2009; Sydansk and Romero-Zeron, 2011).

이 연구에서는 층간유동 시스템에서의 생산거동 특징과 다층 저류층 유체거동에 대한 최근 연구동향을 조사하였다. 저류층 조건에 따라 유동특징을 특성화하는 연구동향을 파악함으로써 다층 저류층 유체거동 모델링에 적용 가능한 기초자료를 정리하고 연구방향을 제시하고자 한다.

다층 저류층의 유체거동 특징

다층 저류층은 각 층의 구조와 유동형태에 따라서 크게 매질 층간유동, 혼합생산, 시추정 층간유동 시스템으로 구분할 수 있다(Fig. 1). 매질 층간유동 시스템은 각 저류층 사이의 매질을 통해 유체의 교류가 발생하는 구조를 말하며, 혼합생산 시스템은 층간교류가 발생하지 않는 구조를 말한다. 시추정 층간유동 시스템의 경우, 각각의 저류층을 통과하는 시추정(wellbore) 또는 생산관(production tubing)을 통해 유동 역류가 발생하는 구조이다. 시추정 층간유동은 각 층서간 유체의 교류가 발생한다는 점에서 혼합생산 시스템과 구분해야 하지만, 층

서 사이의 매질을 통해 유동이 발생하지 않기 때문에 혼합생산 시스템의 범주에 포함시킬 수 있다(Economides and Joseph, 1987; Petricola and Watfa, 1993; Dindoruk and Firoozabadi, 1996; Pederson *et al.*, 1998; Chaudhry, 2004; Spivey, 2006; Song, 2012).

Fig. 2는 매질 층간유동 시스템의 유동 양상을 나타낸 그림으로써 저류층 내 각 층의 접촉면을 통해 유체의 층간유동이 발생하는 것을 보여준다(Russell and Prats, 1962). 매질 층간유동 시스템에서의 유동은 초기 저류층 환경에 의존하여 발생하며, 매질을 통한 유체의 이동방향은 각 층의 압력에 의해 결정된다. 저류층 특성 중 유체투과도는 층간유동에 영향을 미치는 주요인자이다. Darcy방정식으로 층간유동을 설명하면 유체투과도가 낮은 지층에서 높은 층으로 이동하는 특징을 가진다. 유정완결 후 저류층의 압력은 유체투과도가 낮을수록 더 천천히 감소하기 때문에, 낮은 유체투과도를 가진 층이 높은 유체투과도를 가진 층보다 더 높은 압력을 형성하게 된다. 추가적으로 중력, 모세관압, 점성도, 상거동 및 압축성, 확산효과 등도 층간유동에 영향을 미치는 요인이 될 수 있다(Fig. 3; Dindoruk and Firoozabadi, 1996; Nikjoo and Hashemi, 2012).

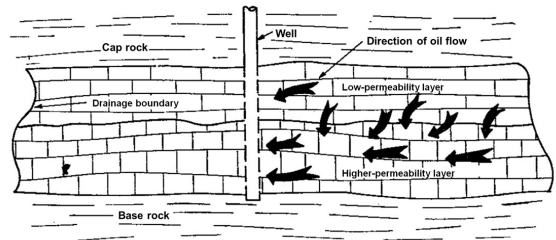


Fig. 2. Schematic cross section of a portion of a two-layer reservoir with interlayer cross-flow (Russell and Prats, 1962).

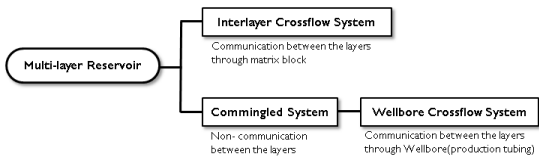


Fig. 1. Flow classification occurred in multi-layer reservoirs.

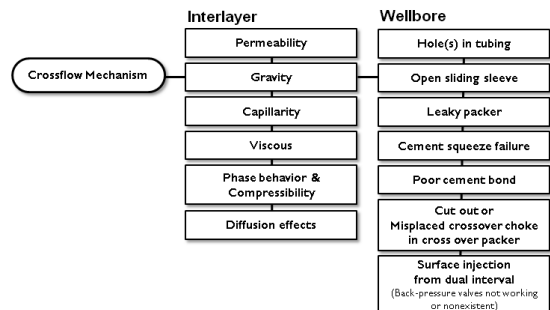


Fig. 3. Major reservoir properties and operation factors of the possible cross-flow through interlayer and also wellbore.

Fig. 4는 혼합생산 시스템을 모사한 그림이다(Spivey, 2006). 혼합생산 시스템은 저류층의 경계를 지나는 유효 수직 유체투과도의 값이 매우 낮거나 0일 때 발생할 가능성이 크다. 혼합생산 시스템에서는 각 저류층에서 유정으로만 유동이 발생하며, 생산관으로 유입된 유체는 다른 층으로 빠져나가지 않는다는 것을 가정한다. 다중 유정 시스템을 통해 각 층을 모두 천공하여 완결하였을 경우에는 유체가 생산관 내로 유입된 후 다른 층으로 빠져나가면서 시추정 층간유동이 발생할 수 있다.

매질 층간유동이 서로 인접한 층으로만 발생하는 것과는 달리, 시추정 층간유동은 멀리 떨어진 지층으로도 유체의 교류가 발생할 수 있는 특징을 가지고 있다(Fig. 5; Economides and Joseph, 1987). 시추정 층간유동은 시추정 내부가 높은 유체투과도를 가진 연결통로와 같은 상태로 변하여 유동이 수월해질 때 발생한다. 시추정 층

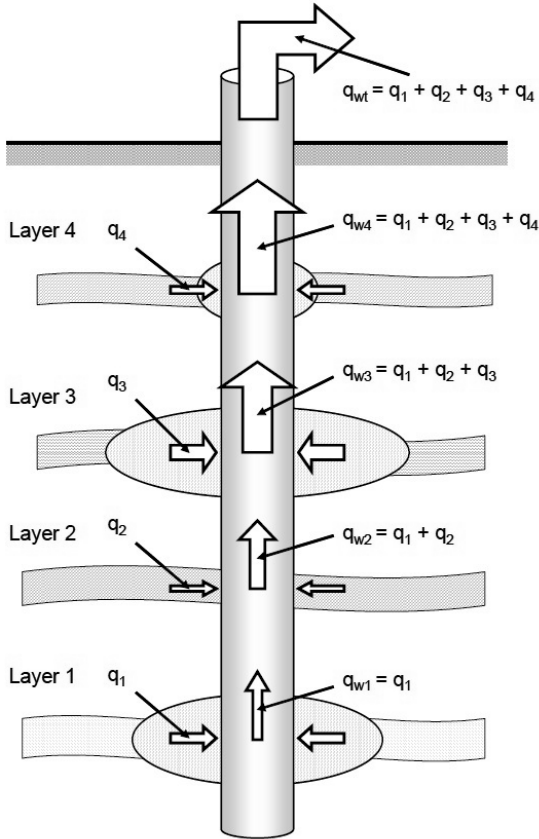


Fig. 4. Tight gas well in a multilayer unconventional reservoir with commingled production (Spivey, 2006). q represents flow rate from the formation and the subscript 1, 2, 3, and 4 mean the different formation.

간유동은 유정의 운영상태에 따른 후천적 요인(예, 불완전한 완결작업, 케이싱 및 시멘팅 결함 등)에 의해 발생하는 것이 대부분이다(Fig. 3; Pederson *et al.*, 1998). 층간 유동량의 예측은 저류층 간의 상대 유체투과도와 압력의 차이, 시멘트의 품질, 케이싱의 부식정도를 평가함으로써 이루어진다. 유체를 생산중이거나 폐쇄(shut-in)상태에 있는 유정에서는 각 층간의 추가적인 압력차이를 분석함으로써 시추정 층간유동을 감지할 수 있다(Petricola and Watfa, 1993; Pederson *et al.*, 1998; Zhu *et al.*, 2002; Sommerauer and Zerbst, 2006). 이산 시추정 모델(discretized wellbore model)은 시추정 층간유동을 모사하기에 적합한 것으로 알려져 있다(Sharma *et al.*, 1996).

두 개의 층으로 이루어진 다층 저류층에서 수직정을 통해 하나의 층만 천공 하였을 경우, 해당 층에서만 유체의 생산이 이루어진다. 이때 유체가 생산되면서 형성된 빈 공극에 다른 층의 유체가 유입되어 채워지면서 매질 층간유동이 발생할 수 있다(Scholz *et al.*, 2008). 물 주입법(water injection) 또는 가스 주입법(gas injection) 등의 인공채유(artificial lift)를 통한 석유회수 시에도 매질 또는 시추정 층간유동이 발생할 수 있다. 저류층 간의 압력차이와 유정시스템 또는 저류층 내에 존재하는 채널

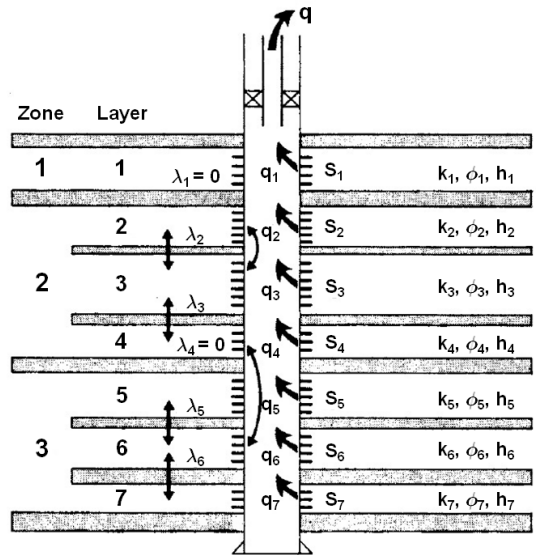


Fig. 5. Flowing well penetrating a multilayered reservoir (Economides and Joseph, 1987). q represents flow rate from the reservoir, λ is the dimensionless semi-permeability between layers, S , k , ϕ , and h are skin factor of the layer, the permeability, the porosity, and the formation thickness, respectively.

(channel)로 인하여 주입유체(drive fluid)가 다른 층으로 유실되면서 회수증진효율이 떨어지기도 하며, 물 주입정에서의 높은 주입압력이 주입정 부근에 채널을 생성하여 물 주입 공정의 효율을 떨어뜨릴 수도 있다(Addoun *et al.*, 2011; Sydansk and Romero-Zeron, 2011).

층간유동 분석의 난점은 생산과정에서 저류층 물성변화로 인한 히스토리매칭의 어려움으로 요약할 수 있다. 층간유동 시스템에서 초기 저류층 물성은 전체 생산기간 동안 큰 영향을 주지 못하며, 층간유동으로 인해 지속적으로 변화하는 저류층 물성이 실제 유체거동에 영향을 주기 때문에 히스토리 매칭의 신뢰도는 떨어진다. 저류층 분석의 오차를 최소화시키기 위해서 각 층간유동 시스템에 적합한 감지 및 제어기술이 필요하며, 생산 시 유체의 상호작용을 차단할 수 있는 폭넓게 적용 가능한 완결방안이 필요하다(Caillabet *et al.*, 2001; Zhu *et al.*, 2002; Bakulin and Korneev, 2008; Addoun *et al.*, 2011).

다층 저류층의 유동 분석과 연구동향

매질 층간유동 분석

다층 저류층 유체거동에 관한 초기 연구는 혼합생산 시스템에서의 압력반응 분석에 대한 것으로 Lefkovits 등(1961)이 최초로 소개하였다. 이후 Russell과 Prats(1962)에 의해 매질 층간유동이 발생하는 다층 저류층에 대한 연구가 처음 진행되었지만 이론적 배경을 검증하는 수준에 그쳤다. 1980년대 들어 검증 장비를 이용한 분석방법이 소개되면서 층간유동을 고려한 모델링이 활성화되기 시작하여 시추정 압력의 측정 및 평가에 의해 저류층 변수들을 해석하는 연구가 중점적으로 이루어졌다. Bourdet (1985)은 유사정상상태의 다층 저류층에서 매질 층간유동의 압력 반응을 모사하기 위한 분석기법을 제시하였으며, Economides와 Joseph(1987)은 Bourdet(1985)의 다층모델을 일반화하기 위한 분석기법을 연구하였다. Gomes와 Ambastha(1993)도 유사정상상태의 내부층위에서 발생하는 매질 층간유동을 고려한 다층 저류층 분석모델을 개발하였다. Khattab 등(1991)은 유한요소 모델을 이용하여 압력천이시험을 모델링 하였고 혼합생산과 층간유동 시스템, 또는 균열 시스템에서의 압력천이 분석모델을 개발하였다. 이와 같은 동적자료를 통해 저류층 물성을 특성화하고 시추정저장계수(wellbore storage)와 표피손상인자(skin factor)로 유체유입 특징을 규명하였다. Kuchuk과 Habashy(1996)는 매질 층간유동을 고려한 다층 저류층의 수평정에서 시추정저장계수와 표피손상인자를 계산하기 위해 라플라스변환(Laplace transform)도메인 기반의 분석기법을 개발하였다. 이 기법은 압력

평균법(pressure averaging method)을 사용하여 유정의 위치에 따른 압력변화를 계산하고 매질 층간유동을 감지할 수 있다.

Lu(1997)는 매질 층간유동이 발생하는 위치를 감지하기 위해 경사정과 수평정에서의 압력천이거동(pressure transient behavior)에 대한 연구를 하였다. 다층 혼합 시스템에 대한 그린함수(Green's function)를 획득하기 위해 라플라스변환과 이중 푸리에 코사인변환(double Fourier cosine transform)을 사용하였다. Fig. 6은 혼합생산 시스템과 매질 층간유동 시스템에서의 압력 차이를 보여준다. 혼합생산 저류층에서는 시추정을 통한 상호작용이 일어나지 않기 때문에, 저류층 내의 각 유정이 단일 유정에서와 같은 압력거동을 나타낸 반면 매질 층간유동이 발생하는 층에서는 후기에 접어들면서 각 저류층 압력이 서로 비슷해지는 결과를 보여주었다. 이 현상은 유정시험에 기반한 매질 층간유동을 파악하는 대표적인 사례로, 다른 각 층서 사이에서 층간유동이 발생함에 따라 압력거동이 평균으로 수렴하기 때문에 발생한다.

Haq과 Reis(1993)는 물 주입을 통한 석유회수증진기법에서 매질 층간유동 예측 모델을 이용한 연구를 실시하였다. 높은 투과성 지층에서 인접한 층으로 발생할 가능성이 있는 모세관압에 의한 층간유동을 예측하였다. Fig. 7은 모세관 흡입작용(capillary imbibition)에 의한 매질 층간유동 모델을 도식화 한 것이다. 예측 모델은 주입유체와 높은 투과성 지층에 축적되는 유체, 그리고 모세관압에 의해 주변의 낮은 투과성 지층으로 유실되는

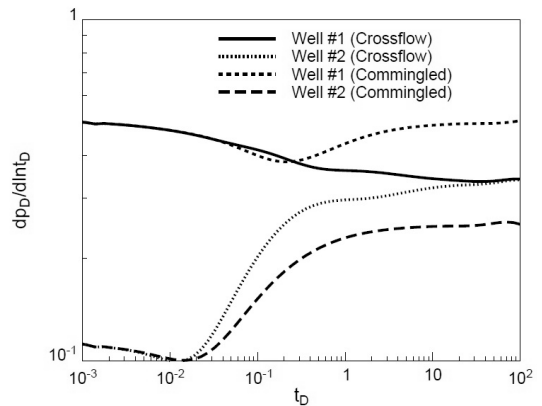


Fig. 6. Effect of cross-flow in pressure and pressure derivative curves for well testing (Lu, 1997). Comparison of crossflow and commingled performances shows the characteristics of cross flow. When crossflow occurs, the pressure derivative converges as time goes by(see the crossflow case of Well #1 and Well #2).

유체사이의 물질평형 방정식을 기반하였다. 일반적으로 낮은 유체투과도를 가진 지층에서 높은 유체투과도를 가진 지층으로 발생하는 층간유동이 모세관압에 의해 역방향으로도 발생할 가능성을 제시하였으나 이 모델은 중력 또는 점성으로 인한 층간유동을 고려하지 않았다는 한계가 있다.

Dindoruk과 Firoozabadi(1996)는 균열층에서의 매질 층간유동에 대해 연구하였으며, 균열층에서는 모세관압에 비해 중력이 보다 주요한 영향인자로 작용함을 밝혔다. 모세관압은 물주입 공정에서 층간유동을 유발하는 요인 중 하나인 반면 높은 압력의 가스 주입공정에서는 모세관압의 영향이 미비하였다. Aguilera(1998)는 균열 저류층을 가정한 수치 모델을 통해 유체투과도와 층간유동 사이의 연관성을 연구하여 균열로 구분되는 유체투과도 차가 매질 층간유동을 유발하는 주요한 원인임을 수치적으로 규명하였다.

이론적 방법으로는 Gao(1984)의 반 유체투과 모델(semi-permeability model)이 대표적이다. 단, 이 모델은 오일과 물의 이상유체 거동분석에 제한되며 가스 저류층에는 적용이 불가능하다. 또한 음의 포피손상인자에 대한 시추정 압력 측정의 신뢰도가 낮은 문제점도 있다. Sun 등(2002)은 Gao(1984)의 연구에 대한 단점을 보완하기 위해 반 유체투과 월 모델(semi-permeable wall model)을 개발하였다. 유정생산시험을 통해 도출된 압력거동을 분석함으로써 매질 층간유동과의 상관성을 연구하였고, 수학적 계산을 이용하여 각 층의 포피손상인자를 비교하였다. 매질 층간유동은 큰 포피손상인자를 갖고 있는 층에서 작은 포피손상인자를 가진 층으로 발생함을 규명하였다. 이후 이중층 층간유동 저류 모델(double layers cross-flow reservoir model)을 새로 개발하여 포피손상인자의 부호에 관계없이 수치적으로 수렴

성이 높은 모델로 향상시켰다(Sun *et al.*, 2003).

Al-Ajmi 등(2003)은 매질 층간유동이 발생하는 다층 저류층에서의 저류계수비(storativity ratio)와 투과계수비(transmissivity ratio)의 연관성을 분석하였다. 다층 저류층에서 수직 간격에 대한 투과계수비의 영향을 알아보기 위한 방법으로는 민감도분석을 이용하였다. 이중 유체투과(dual permeability) 모델에서 이중 공극률(dual porosity) 모델로의 정확한 천이를 통해 내부공극 유동 상관계수(interporosity flow coefficient) 결정의 효율성을 높였으며, 수직간격의 함수로 나타나는 저류계수비 계산에 대한 실질적인 방법을 제시하였다. 기존에 회귀 분석과는 달리 층별 포피손상인자가 있는 불균질한 환경에 대하여 예측성능을 향상시켰으나 시추정저장계수와 포피손상인자를 무시한 한계가 있다.

매질 층간유동 실험연구는 Cinar 등(2006)의 유동 가시화 실험과 비혼합성 유체 주입실험이 대표적이다. 실험의 검증은 유한차분법 기반의 수치모델링을 통해 이루어졌다. Fig. 8은 Cinar 등(2006)의 실험장비 모식도이다. 각 저류층의 공극률과 유체투과도는 원통형 튜브 내의 균질한 팩을 사용하여 각각 별도로 측정하였다. 이 연구는 2차원 2층 구조에서 비혼합 유동을 모사하였으나 원시포화율(connate wetting phase saturation)의 영향을 고려하지 않았다는 한계를 가지고 있다. 실제 저류층처럼 공극수의 영향을 구현하려고 했지만 실패하였으며, 전산모사 역시 모세관압, 점성도, 중력의 영향인자를 포함시켰으나 모세관압의 영향이 큰 경우에는 예측성능이 낮았다. 최근 Nikjoo와 Hashemi(2012)는 매질 층간유동 시스템을 가정한 압력천이거동 분석을 통해 Cinar 등(2006)의 수치모델을 보완 하여 저류층 유체포화도의 불균질도, 유동도, 포피손상인자, 평균저류층 압력에 따른 매질 층간유동특징을 모사하였다.

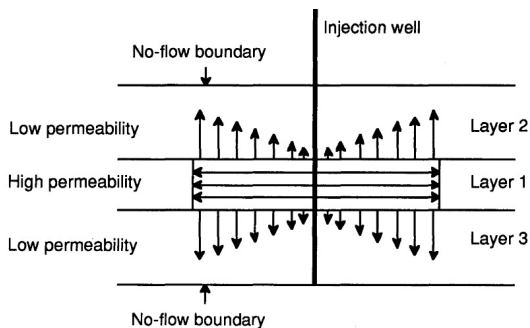


Fig. 7. Schematic of cross-flow model by capillary imbibition for a 3-layer system (Haq and Reis, 1993).

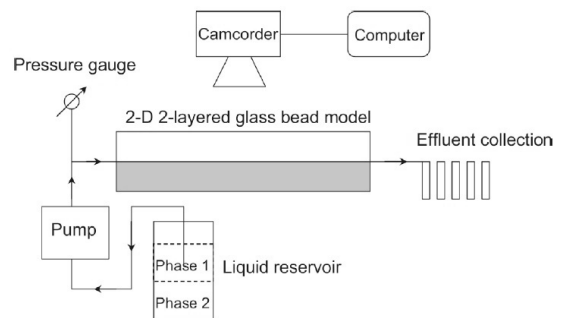


Fig. 8. Schematic diagram of experimental apparatus to demonstrate the cross-flow (Cinar *et al.*, 2006).

시추정 층간유동 분석

시추정 층간유동은 대부분 유정 시스템의 인위적 결함에 의해 발생한다. 시추정 층간유동과 관련된 연구는 다중 유정시스템 내에서의 시추정 층간유동 감지연구가 주를 이루고 있다. 물리검층에 기반한 시추정 층간유동 감지를 위해 Petricola와 Watfa(1993)는 지온변화율(geothermal gradient)과 온도검층자료를 비교하였다. Fig. 9는 시추정 층간유동 분석과정을 나타낸 그림이며 Fig. 10은 지온변화율과 온도검층자료를 비교하여 시추정 층간유동을 감지하는 특징을 도식화한 것이다. 지온변화율은 깊이에 따라 일정한 증가를 보이지만 실제의 지층 온도는 압력변화에 따라 변칙적인 거동을 보인다는 것을 가정하였다. Fig. 10(a)는 간헐촬영(time-lapse)에 의해 측정된 온도 프로파일을 사용하여 지온변화율과 비교한 그림이다. 층간유동의 발생은 유실층의 압력 손실을 가져와 지층의 온도를 감소시킨다는 것을 보여준다. 온도 변화를 분석함으로써 케이싱 누수 또는 시멘팅 불량으로 인해 발생하는 시추정 층간유동을 감지할 수 있다. Fig. 10(b)에서는 유정완결 후 생산관을 통해 발생하는 층간유동을 도식하였다. 천공이 이루어진 저류층의 온도는 기존의

지온변화율보다 높게 형성되며, 시추정 층간유동이 발생할 경우 유체가 유입되는 층의 온도는 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다(flowing with leak; middle line in Fig. 10(b)). Bakulin과 Korneev(2008)는 음향신호와 주파수 영역을 지속적으로 측정하는 방법을 이용하여 시추정 층간유동이 발생하는 저류층의 특성을 규명하기 위한 연구를 하였다. 원치 않은 시멘트의 균열로 인하여 서로 다른 생산구간 사이에서 발생하는 시추정 층간유동을 감지할 수 있었다.

전산모사 연구로 Wong과 Fong(1997)은 IMplicit-EXplicit(IMEX) 블랙오일 시뮬레이터를 이용하여 수평정을 따라 층간유동이 발생하는 저류층의 유체거동 및 생산거동을 특성화하고 생산전략을 수립하였다. 관측된 시추정 층간유동 현상은 3차원 수평정 시뮬레이션 모델을 이용하여 성공적으로 매칭할 수 있었다. Caillabet 등(2001)은 다성분 시뮬레이터(compositional simulator)를 이용하여 유정에서 발생하는 성분변화와 상거동 특성을 모사하였다. 최근 Yudin과 Lubnin(2011)은 다층 저류층의 유정 시뮬레이션을 위해 노달분석(nodal analysis) 기법을 이용한 모델링 방법을 제안하였다. 개발한 모델을 바탕으로 생산 계획과 시추정 층간유동의 평가, 후보지 선정 등의 연구를 수행하였다.

최근들어 신석유자원(unconventional petroleum resources)에 대한 관심이 고조되면서 치밀저류층 등에서 발생하는 층간유동 특성화 연구가 다수 수행되고 있다(Abacioglu et al., 2009; Guo et al., 2011). 수압파쇄에 의한 유정부근의 인공균열은 자연균열과 달리 유정과 매질 사이에 통로를 제공함으로써 시추정 부근의 층간유동 유발인자로 작용하고 있다(Agarwal et al., 1979). Abacioglu 등(2009)은 치밀가스 저류층에서 시추정 층간유동을 전산모사하였으며, Guo 등(2011)은 셰일가스 저류층의 시추정 층간유동 분석을 위한 수학적 모델을 제시하고 민감도분석을 통해 각 영향인자들이 생산성에 미치는 영향력을 분석하였다. Rotramel(2011)은 석탄층 메탄가스 생산 시 시추정 층간유동의 발생 가능성을 제시하였다. 일부 유정에서 음향신호 측정이 불가능하다는 한계를 보완하기 위해 공저압(BHP; Bottom Hole Pressure) 측정게이지를 이용한 압력 모니터링을 실시하였다. 압력 모니터링을 이용한 다수의 파일럿 시험(pilot test)을 통해 석탄층 메탄가스의 최적 생산추이를 구성할 수 있었다.

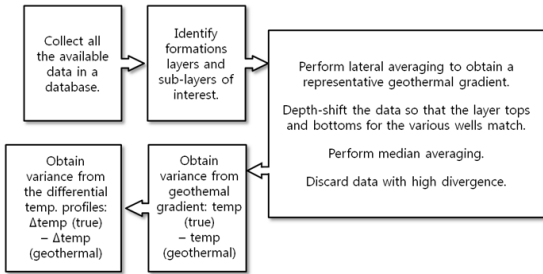


Fig. 9. Data base application for interpreting temperature profiles (Petricola and Watfa, 1993).

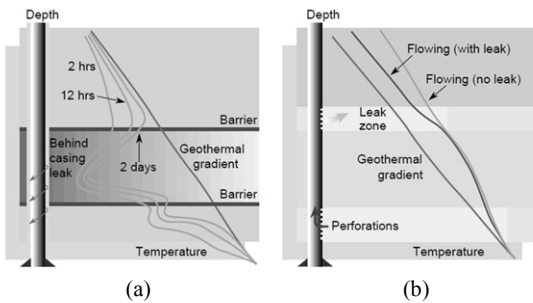


Fig. 10. The use of time-lapse temperature profiles to (a) detect zone isolation, and (b) detect fluid leaks into the production string (Petricola and Watfa, 1993).

최적화 모델 및 현장적용

층간유동은 저류층 분석결과에 대한 불확실성을 높여 준다. 분석결과의 정확성을 높이기 위해서 가장 먼저 선

행되어야 하는 것은 층간유동을 감지하는 것이지만, 층간유동을 사전에 억제시키거나 최소화시키는 것도 중요한 작업이다. 하지만 현장적용을 위한 다층 저류층의 초기 연구는 층간유동을 고려하지 않은 연구가 대부분이었다. Bennett 등(1985)은 혼합생산 시스템을 가정한 수직 균열 생산장에서 천이유동에 적용할 수 있는 분석해를 유도하였으며, 이후에는 천이유동 기간동안 다층 저류층 균열 생산에서의 반응을 관찰하는 연구가 다수 수행되었다(Bennett *et al.*, 1986; Camacho *et al.*, 1987; Ryou, 2000). Bennett 등(1986)은 균등 균열길이(equal fracture length)를 가정하고 Camacho 등(1987)은 비균등 균열길이를 가정하여, 다층 저류층의 해를 단층 저류층의 해로 단순화하는 방법을 제안하였다. Ryou 등(1994)은 서로 다른 경계크기와 균열길이를 갖고 있는 다층 저류층의 혼합생산거동을 연구하였다. 생산 시 다층 저류층 해들을 단일층 해들로 대비하는 3차원 분석모델을 개발하였고 이 모델을 텍사스 카시지(Carthage) 치밀가스 필드에 적용하였다.

혼합생산 시스템을 가정한 모델을 현장에 적용하는 것은 층간유동으로 인한 불확실성을 증가시킨다는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 층간유동을 고려한 다층 저류층의 연구가 다수 수행되었다(Zhu *et al.*, 2002; Kuhl, 2003; Scholz *et al.*, 2008; Alghareeb *et al.*, 2009; Addoun *et al.*, 2011). 층간유동을 제어하고 저류층 특성에 맞는 시추 및 생산전략을 수립하기 위한 연구가 주를 이루었다. Kuhl(2003)은 저류층 시뮬레이션을 이용하여 매질 층간유동이 발생하는 다층 저류층으로부터 회수율을 높일 수 있는 최적 천공전략을 제시하였고, 이를 멕시코만 가스컨덴세이트 필드에 적용하였다. Scholz 등(2008)은 가스전에서 발생하는 매질 층간유동이 매장량과 생산성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 히스토리 매칭을 통해 매질 층간유동을 최소화한 최적 개발전략을 제안하였다. Zhu 등(2002)은 시추정과 저류층의 압력변화를 비교 분석함으로써 층간유동을 감지하였으며, 유정 구조와 석유의 생산추이를 최적화하여 시추정 층간유동 발생을 억제시키기 위한 생산 전략을 수립하였다. 비용 효율적이라는 장점과 함께 석유회수증진분야에서 폭넓게 사용하고 있는 수평정, 다가지(multi-branching) 또는 다중(multilateral) 유정을 중심으로 연구를 진행하였다.

Alghareeb 등(2009)은 실시간 생산 자료를 사용한 다중정(multilateral well)에서의 오일 회수 최적화 기법을 개발하여 복합 저류층(complex reservoir)에서 석유 회수를 증진시키기 위한 큰 가능성을 제공하였다. Fig. 11은 다중 스마트 유정에 대한 그림이다. 스마트 유정은 온

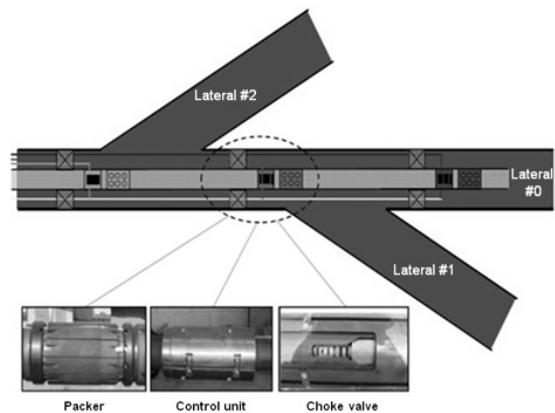


Fig. 11. Schematic of components of a multilateral smart well(Alghareeb *et al.*, 2009).

도와 압력 거동을 지속적으로 모니터링 할 수 있는 센서와 함께 다층 저류층의 각 생산구간을 독립적으로 제어할 수 있는 ICV(Inflow Control Valves)를 갖추고 있어, 균열로 인해 발생가능한 뜻하지 않는 물의 생산을 완화시켜준다. 또한 각 층별로 생산량을 통제하는 선별적 생산을 가능하게 하지만 각 층이 서로 다른 생산성 지수(productivity index)를 갖고 있는 경우 스마트 유정을 이용한 효율적 생산이 어려울 수 있다는 한계가 있다. 생산성 지수가 다를 경우 층 사이에서 물질의 교류가 발생할 가능성이 높아지기 때문이다. 이러한 상황에서 스마트 유정을 최적화하기 위해서는 지하 내부에서 유동 조절 장치의 역할을 하는 ICV의 환경 설정치를 포함한 매개 변수들에 대한 연구가 필요하다. Alghareeb 등(2009)은 회수율(recovery factor), 순현재가(NPV; Net Present Value)와 같은 저류층 운영과 관련된 매개변수들을 최적화하고 적절한 ICV 설정치를 찾기 위한 연구를 하였다. 최적화 과정에서 불균질 저류층 내의 자연발생적 균열이 미치는 영향력을 분석하고 균열의 효과를 정량화 하였으며, 유전학적 알고리즘(GA; Genetic Algorithm)을 주요 최적화 엔진으로 사용하였다. 요구되는 시뮬레이션 실행 횟수를 줄이기 위해 고유의 데이터 라이브러리(proxy)를 활용하였고, ICV 설정에 대한 결과값을 예측하는 도구로서 상용 저류층 시뮬레이터를 사용하였다. 최적설계 프레임워크(optimization framework)를 위한 전반적 과정의 흐름도(flow chart)는 Fig. 12와 같다. 알고리즘의 사용 목적은 물 생산비(water cut)의 최소화, 최대생산(plateau) 기간의 확장, 순현재가의 최대화이다. 현장에서 활용 가능한 알고리즘은 산출된 생산량에 대한 ICV 설정값을 각각 적용하기 위해 경우에 따라 다르게 설계하

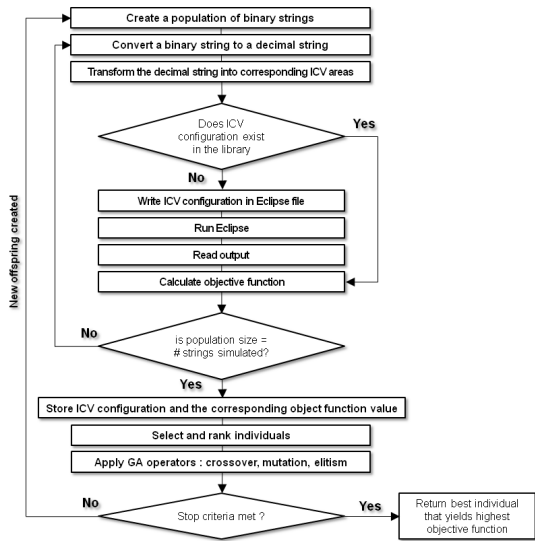


Fig. 12. Example of optimization framework with ICV (Inflow Control Valve) configuration using GA algorithm (Alghareeb *et al.*, 2009).

였다. 균열이 주입유체 유동전단면(floodfront)과 가까이 위치한 경우 최적 ICV설정값은 큰 영향을 미치지 않았지만 균열이 유동전단면으로부터 멀리 떨어져 있는 경우 균열의 위치는 최적 ICV값 설정에 영향을 미쳤다. 이러한 연구를 통해 균열의 위치는 스마트 유정의 생산최적화에서 매우 중요한 것으로 나타났다.

Addoun 등(2011)은 Ourhoud 유전에서 시추정 충전유동 발생에 대한 문제점을 해결하기 위해 스트래들(straddle) 시스템을 적용하였다. 정지(Shut-down)상태의 주입정을 통해 저류층 상하부로 발생하는 충전유동을 방지하기 위하여 다층 저류층의 각 구간을 분리시킬 수 있는 스트래들 팩터를 유동이 발생하는 시추정 내에 설치하였고 유동구간을 성공적으로 차단하였다. 이 연구에서는 새로 설계된 싱글트립(single-trip) 스트래들 시스템을 적용하여 생산 효율을 향상시키고, 시추정 충전유동에 대한 영향을 최소화시킬 수 있었다.

국내 연구동향

초기의 국내 저류층에 관한 연구는 대상 유가스전을 단층의 균질 저류층으로 가정한 저류층 특성화 연구가 대부분이었다(Ryou, 2000; Son, 2001; Park *et al.*, 2002; Sung *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2009; Song, 2012). 다층 저류층 대상의 연구에서도 충전유동이 발생하지 않는 혼합생산 시스템을 가정하거나 다층 저류층을 단일층 저류층으로 단순화하는 방법론에 대한 연구가 주를 이루었

다. Ryou(2000)는 다층 저류층을 모델링하기 위한 방법들을 평가하고, 분석기법을 개발하기 위한 연구를 진행하였다. 연구는 2개층 이상의 다층 저류층에서, 유동은 오직 생산정에서만 일어난다는 가정에 이루어졌으며, 상관계수들은 정수역학적 균열을 가진 다층 저류층의 압력 반응을 단일층 저류층으로 구축할 수 있도록 하였다. 이 연구에서는 각 층에서 손상계수를 가지는 다층 저류층의 압력 반응을 단일층 저류층의 해로 모델링하였고, 다층 저류층을 단일층 저류층으로 구축하기 위한 단계별 절차를 제시하였다. 상용 시뮬레이터를 사용하여 얻은 해들의 정확성을 증명하기 위해 천이유동 시 균등 균열의 길이를 Bennett 등(1985; 1986)이 제시한 해들과 비교하였으며 비균등 균열길이는 Camacho 등(1987)의 해와 비교 분석 하였다. 균등 균열 길이에 대한 검증 작업에서 Bennett 등(1985; 1986)은 일정압력 생산을 가정한 반면 Ryou(2000)는 일정유량 생산을 고려하였다. 양의 포피손상인자를 갖는 비균질성 및 균질성 다층 저류층 유정 반응과 등가 포피손상인자를 갖는 단일층 저류층 해와의 상관성을 시험하였다. 균질 다층 저류층에서 균등한 양의 포피손상인자를 갖는 유정들로부터의 반응들은 등가 단일층 해로 대비시킬 수 있음을 보여주었고, 다층 저류층 천이유동분석은 단일층 저류층으로 해석될 수 있기 때문에 추가 형태곡선이 필요하지 않다는 결론을 얻었다.

Son(2001)은 매질 충전유동이 발생하는 다층 저류층을 대상으로 수평정 압력거동에 관한 연구를 실시하였다. 이 연구에서는 기존의 수평정 연구에서 다루었던 단일층 저류층에서의 단일 수평정 시험의 한계를 보완하기 위하여, 보다 실제적인 저류층 형태를 가정하였다. 매질 충전유동을 고려한 다층 저류층의 수평정 압력거동 분석을 위해 수평정이 위치하는 층과 수평정이 위치하지 않은 층에 대한 각각의 이론해를 충전유동에서의 반사전이법으로 통합하였다. 그리고 다층 저류층에서의 수평정 압력거동에 대한 이론해를 도출하였다. Fig. 13은 이러한 이론해를 얻기 위한 일련의 과정들을 순서도로 나타낸 것이다. 도출된 해를 이용하여 수평정 압력거동에 영향을 미치는 유체 특성 및 저류층 물성 등에 대한 민감도분석을 실시하였다. 수평정이 위치한 하부층과 수평정이 위치하지 않은 상부층 각각에 대한 유체 특성 및 저류층 물성을 상대적으로 적용하여 이에 따른 압력거동의 변화를 유동기간 별로 분석하였다. 특히 1차 원형유동기간의 해석 결과, 다층 저류층의 수평정 유정생산시험에서는 이 기간에 대한 분석이 필수적이며 상부층의 유체 특성을 파악하기 위해서는 유정생산시험이 장기간 실시되어야 함을 알 수 있었다. Park 등(2002)도 수평정이 시

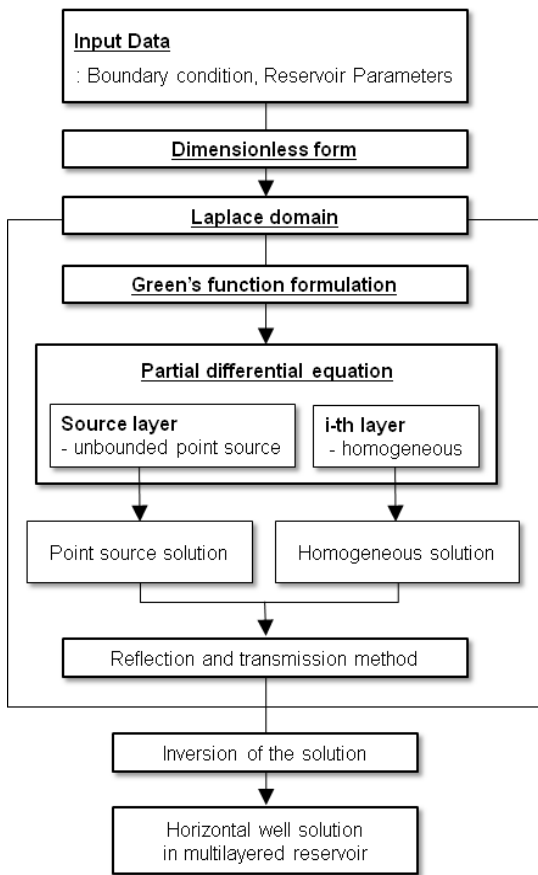


Fig. 13. Example of inverse modeling for horizontal well solution in multi-layered reservoir with cross-flow (modification from Son, 2001).

추진 다층 저류층의 특성을 규명하기 위해서 매질 층간 유동을 고려한 이론해 모델을 개발하였다. 반사전이법을 이용한 압력 평균법을 통해 매질 층간유동을 적용하였고, 이론해 모델을 활용하여 저류층의 특성에 따라 다르게 나타나는 압력 커브의 유동구간에 대한 특징을 분석하였다.

Sung 등(2002)은 다층 구조의 가스전에서 매질 층간 유동을 고려한 저류층 물성의 효과를 확인하기 위해 해석 모델을 개발하였고, 생산성 영향인자를 규명하기 위한 연구를 하였다. 단일층 단일 수평정 모델을 포함하여, 다층 단일 수평정 모델과 다층 다중 수평정 모델에 대한 이론해를 이용하였으며, 수평정의 물리적 개념을 모사하였다. 이를 기반으로 수평정 영향인자들에 대한 영향 평가를 실시하였다. Lee 등(2009)은 생산중인 가스전의 층별 생산량을 규명하기 위한 최적화 모델을 개발하였다.

저류층 물성과 생산자료를 바탕으로 층별 유체투과도, 표피손상인자, 저류층 압력을 도출하였다. 이를 최적화 모델에 적용함으로써 각 층별 생산량 및 할당비를 산출하였다. Song(2012)은 다층 구조의 치밀가스 저류층에서 생산거동 예측 연구를 하였다. 가스의 생산을 위해 적용되는 수압파쇄법은 다수의 생산구간을 발생시킨다. 이때 각 층은 서로 다른 균열의 크기와 유체투과도를 갖게 되어 서로 상이한 유동 양상을 보여줄 수 있다. 이 연구에서는 천이유동자료가 지배적인 치밀가스 저류층의 층별 생산특성을 고려하는 개선된 감퇴곡선 분석법을 제시하였다. 천이유동자료를 통해 감퇴지수를 계산하고, 감퇴곡선 방정식을 이용하여 생산추이를 예측하였다. 이를 기존의 분석법과 비교하였으며, 실제 현장자료를 이용하여 제안한 방법의 효용성을 검증하였다.

결론

이 논문은 다층 저류층 유동평가 시 층간유동의 영향을 고려한 감지기술과 저류층 모델링 연구동향을 주로 다루었다. 다층 유·가스전에서는 층 사이의 매질과 시추정을 통해 층간유동이 발생할 가능성이 크다. 층간유동이 발생하는 시스템을 매질 층간유동과 시추정 층간유동 시스템으로 구분하였으며 층간유동이 발생하지 않는 생산 시스템은 혼합생산 시스템으로 구분하였다.

1. 혼합생산 시스템은 유동이 시추정 내에서만 발생하는 것을 가정한다. 실제 다층 저류층의 경우 전체 생산기간동안 혼합생산 시스템의 특징만을 갖고 있기는 어려우나 다층 저류층의 초기 연구에서는 연구의 용이성 때문에 주로 혼합생산 거동을 가정하였다. 특히 다층 구조를 단일층으로 단순화하는 저류층 특성화 연구가 주를 이루었지만 층간유동을 고려하지 않아 결과의 오차를 발생시킬 수 있다는 한계가 있었다.
2. 매질 층간유동은 각 저류층 간의 압력 및 유체투과도의 차이, 중력, 모세관압 등에 의해 발생할 수 있다. 불균질 다층 저류층을 대상으로 각 층의 물성을 비교하여 층간유동 방향과 유동량을 예측하는 연구가 활발하였다. 매질 층간유동의 압력반응을 분석하여 최적의 시추 및 완결방안을 모색하는 연구가 이루어졌다.
3. 시추정 층간유동은 다중 유정 시스템에서 다층 저류층의 각 층을 모두 천공하였을 경우 발생할 수 있다. 불량한 완결작업과 케이싱, 시멘트의 결함 등이 주요 원인이다. 시추정 층간유동 시스템에서는 물

리검층을 통한 층간유동 감지연구가 많았다. 시추정 모니터링과 유정 시스템을 통해 시추정 층간유동을 제어 하는 실증연구가 다수 수행되었다.

생산 가능한 저류층의 구조가 점점 복잡해짐에 따라 저류층 평가를 위한 유동 특성화 기술은 보다 더 복잡한 해석을 요구하고 있다. 2차/3차 회수 단계에 있는 저류층 또는 신석유자원의 개발에서는 층간유동에 대한 불확실성이 더 커질 전망이다. 불확실성을 최소화시키기 위해서는 정확한 층간유동 감지방법을 모색해야 하며, 층간유동 영향인자의 정량화를 위한 민감도 분석이 병행되어야한다. 또한 주입유체와 생산유체의 유실을 최소화하고 유체의 이동방향을 제어할 수 있는 EOR(Enhanced Oil Recovery)기법을 모색해야한다. 더 나아가 저류층에서의 층간유동과 다중 유정의 효과를 고려하여 석유회수 기법에 따라 적용 가능한 모델을 개발하고 생산인자를 규명하는 연구가 폭넓게 이루어져야 하겠다.

사 사

이 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제의 결과물입니다. (No. 20122010300020).

사용문자의 정의

- d_g : grain diameter of glass beads [L]
- h_j : formation thickness of layer j [L]
- k : absolute permeability [L^2]
- k_j : permeability-thickness product for layer j [L^3]
- q : surface production rate [L^3T^{-1}]
- q_j : flow rate from layer j [L^3T^{-1}]
- q_w : flow rate in wellbore [L^3T^{-1}]
- S_j : wellbore skin factor for layer j [dimensionless]
- λ_j : dimensionless semi-permeability between layers j and j+1 [dimensionless]
- ϕ : porosity [dimensionless]
- ϕ_j : porosity for layer j [dimensionless]

참고문헌

Abacioglu, Y., Sebastian, H.M. and Oluwa, J.B., 2009, "Advancing Reservoir Simulation Capabilities for Tight Gas Reservoirs," paper SPE 122793 presented at the 2009

SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference, Denver, Colorado, USA, April 14-16.

Addoun, M., Maraf, K., Tighe, M., Bramwell, J. and Snaas, A., 2011, "Initial Deployment of a New Design One-Trip Straddle System Resolves High Pressure Cross-Flow Problem in Water Injection Well in Algeria," paper SPE 143336 presented at the *SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition*, Woodlands, Texas, USA, April 5-6.

Agarwal, R.G., Carter, R.D. and Pollock, C.B., 1979, "Evaluation and Performance Prediction of Low-Permeability Gas Well Stimulated by Massive Hydraulic Fracturing," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 362-372.

Aguilera, R., 1998, "Well Test Analysis of Multi-layered Naturally Fractured Reservoirs," paper SPE 98-49 presented at the *49th Annual Technical Meeting of The Petroleum Society*, Calgary, Alberta, Canada, June 8-10.

Al-Ajmi, N.M., Kazemi, M. and Ozkan, E., 2003, "Estimation of Storativity Ratio in a Layered Reservoir with Crossflow," paper SPE 84294 presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, October 5-8.

Alghareeb, Z.M., Horne, R.N., Yuen, B.B. and Shenawi, H., 2009, "Proactive Optimization of Oil Recovery in Multilateral Wells Using Real Time Production Data," paper SPE 124999 presented at the *2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, USA, October 4-7.

Bakulin, A. and Korneev, V., 2008, "Acoustic Signatures of Crossflow Behind Casing in Commingled Reservoir: A Case Study from Teapot Dome," *Geophysics*, Vol. 73, No. 4, pp. E145-E152.

Bennett, C.O., Camacho, R.G. and Reynolds, A.C., 1985, "Approximate Solutions for Fractured Wells Producing Layered Reservoirs," *SPE Journal*, Vol. 25, No. 5, pp. 729-742.

Bennett, C.O., Raghavan, R. and Reynolds, A.C., 1986, "Analysis of Finite-Conductivity Fractures Intercepting Multilayer Reservoirs," *SPE Formation Evaluation*, Vol. 1, No. 1, pp. 259-274.

Bourdet, D., 1985, "Pressure Behavior of Layered Reservoirs With Crossflow," paper SPE 13628 presented at the *1985 Annual California Regional Meeting*, Bakersfield, California, USA, March 27-29.

Caillabet, Y., Fabrie, P., Lemonnier, P., Masson, R. and Ricois, O., 2001, "Representation of Crossflow Effects in Advanced Wells in a Multipurpose Reservoir Simulator," paper SPE 66372 presented at the *SPE Reservoir Simulation*

- Symposium*, Houston, Texas, USA, February 11-14.
- Camacho, R.G., Raghavan, R. and Reynolds, A.C., 1987, "Response of Wells Producing Layered Reservoirs: Unequal Fracture Length," *SPE Formation Evaluation*, Vol. 2, No. 1, pp. 9-28.
- Chaudhry, A.U., 2004, *Oil Well Testing Handbook*, Elsevier, USA, pp. 504-512.
- Cinar, Y., Jessen, K., Berenblyum, R., Juanes, R. and Orr Jr, F.M., 2006, "An Experimental and Numerical Investigation of Crossflow Effects in Two-Phase Displacements," paper SPE 90568 presented at *the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, September 26-29.
- Dindoruk, B. and Firoozabadi, A., 1996, "Crossflow in Fractured/Layered Media Incorporating Gravity, Viscous, And Phase Behavior Effects," paper SPE 35457 presented at *the SPE/DOE 10th Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, OK, USA, April 21-24.
- Economides, C.A. and Joseph, J., 1987, "A New Test for Determination of Individual Layer Properties in a Multilayered Reservoir," *SPE Formation Evaluation*, Vol. 2, No. 3, pp. 261-283.
- Gao, C., 1984, "Single-Phase Fluid Flow in a Stratified Porous Medium With Crossflow," *SPE Journal*, Vol. 24, No. 1, pp. 97-106.
- Gomes, E. and Ambastha, A.K., 1993, "An Analytical Pressure-Transient Model for Multilayered, Composite Reservoirs With Pseudosteady-State Formation Crossflow," paper SPE 26049 presented at *the SPE Western Regional Meeting*, Anchorage, Alaska, USA, May 26-28.
- Guo, B., Gao, D. and Wang, Q., 2011, "The Role of Formation Damage in Hydraulic Fracturing Shale Gas Wells," 2011, paper SPE 148778 presented at *the SPE Eastern Regional Meeting*, Columbus, Ohio, USA, August 17-19.
- Haq, S. and Reis, J.C., 1993, "Predicting Capillary Crossflow in Layered Reservoirs," paper SPE 26651 presented at *the 68th Annual Technical Conference and Exhibition*, Huston, Texas, USA, October 3-6.
- Khattab, H.A., Yeh, N-S. and Agarwal, R.G., 1991, "Pressure Transient Behavior of Slanted Wells in Single- and Multiple-Layered Systems," paper SPE 22730 presented at *the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers*, Dallas, TX, USA, October 6-9.
- Kuchuk, F.J. and Habashy, T., 1996, "Pressure Behavior of Horizontal Wells in Multilayer Reservoirs with Crossflow," *SPE Formation Evaluation*, Vol. 11, No. 1, pp. 55-64.
- Kuhl, E.J., 2003, Optimization of Recovery from Two-layer Reservoirs with Crossflow, MS Thesis, Pennsylvania State University, USA.
- Lee, Y.S., Kim, K.H., Kwon, S.I., Hwang, S.H., Seo, J.W., Lee, T.H., Seoul, C.H. and Sung, W.M., 2009, "The Study on the Allocation of Production Rate in Commingled Reservoir," *J. of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 46, No. 4, pp. 482-489.
- Lefkovits, H.C., Hazebroek, P., Allen, E.E. and Matthews, C.S., 1961, "A study of the Behavior of Bounded Reservoir Composed of Stratified Layers," *SPE Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 43-58.
- Lu, P., 1997, Horizontal and Slanted Wells in Layered Reservoirs with Crossflow, MS Thesis, Stanford University, USA.
- Nikjoo, E. and Hashemi, A., 2012, "Pressure Transient Analysis in Multiphase Multi Layer Reservoirs with Inter Layer Communication," paper SPE 152838 presented at *the EAGE Annual Conference and Exhibition incorporating SPE Europec*, Copenhagen, Denmark, June 4-7.
- Park, J.H., Son, D.G. and Sung, W.M., 2002, "Analysis of Characteristics of Flow Regime for Horizontal Well Testing Data in Multi-layer Reservoirs," *J. of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 39, No. 3, pp. 165-172.
- Pederson, J.M., Moon, M.S. and Al-Ajeel, H.Y., 1998, "Data Validation: Key to Development of an Integrated Reservoir Model for the Wara Formation, Greater Burgan Field," *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 338-347.
- Petricola, M.F.J. and Watfa, M., 1993, "Multiwell Application of Downhole Temperature Profiles for Crossflow Analysis," paper SPE 25630 presented at *the SPE Middle East Oil Technical Conference & Exhibition*, Bahrain, April 3-6.
- Rotramel, J., 2011, "A Pilot Test of Continuous Bottom Hole Pressure Monitoring for Production Optimization of Coalbed Methane in the Raton Basin," paper SPE 142318 presented at *the SPE Production and Operations Symposium*, Oklahoma city, Oklahoma, USA, March 27-29.
- Russell, D.G. and Prats, M., 1962, "The Practical Aspects of Interlayer Crossflow," *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 589-594.
- Ryou, S., Frants Jr, J.H. and Lee, W.J., 1994, "New, Simplified Methods for Modelling Multilayer Reservoirs Performing at Pseudo-Steady State," paper SPE 28631 presented at *the SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, LA, USA, September 25-28.
- Ryou, S.S., 2000, "Simplified Methods of Modeling Multilayer Reservoirs during Transient Flow," *J. of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 37, No. 2,

- pp. 138-147.
- Scholz, J., Sorensen, F. and Hamp, T., 2008, "Evaluating Crossflow Migration Drainage," paper SPE 114969 presented at *the CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference*, Calgary, Alberta, Canada, June 16-19.
- Sharma, R., Nghiem, L.X., Siu, D.A., Collins, D.A. and Mourits, F.M., 1996, "Efficient Modelling Of Wellbore Backflow," *J. of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 35, No. 6, pp. 34-41.
- Sommerauer, G. and Zerbst, C., 2006, "Rapid Pressure Support for Champion SE Reservoirs by Multi-Layer Fractured Water Injection," paper SPE 101017 presented at *the 2006 Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, Adelaide, Australia, September 11-13.
- Son, D.G., 2001, Study for Pressure Behavior of Horizontal Well in Multilayer Reservoirs with Crossflow, MS Thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.
- Song, J.H., 2012, Production Performance Prediction of a Commingled Well from a Multi-layered Tight Gas Reservoir Using a New Decline Curve Analysis, MS Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Spivey, J.P., 2006, "Estimating Layer Properties for Wells in Multilayer Low-Permeability Gas Reservoir by Automatic History-Matching Production and Production Log Data," paper SPE 100509 presented at *the 2006 SPE Gas Technology Symposium*, Calgary, Alberta, Canada, May 15-17.
- Sun, H., Gao, C., Qian, H. and Zhou, F., 2002, "Gas Flow in a Stratified Porous Medium with Crossflow," *J. of Thermal Science*, Vol. 11, No. 1, pp. 35-40.
- Sun, H., Liu, L., Zhou, F. and Gao, C., 2003, "Exact Solution of Two Layer Reservoir with Crossflow under," paper SPE 81043 presented at *the SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Port-of-Spain, Trinidad, West Indies, April 27-30.
- Sung, W.M., Park, J.H. and Son, D.G., 2002, *The Study of Horizontal Well Test Analysis In Multi-layered Gas Reservoir*, Ministry of Commerce, Industry & Energy, Gwacheon, Gyeonggi, Korea.
- Sydansk, R.D. and Romero-Zeron, L., 2011, *Reservoir Conformance Improvement*, Society of Petroleum Engineers, USA, pp. 21-40.
- Wong, F.Y. and Fong, D.K., 1997, "Developing a Field Strategy to Eliminate Crossflow Along a Horizontal Well," *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 36, No. 9, pp. 26-35.
- Yudin, E. and Lubnin, A., 2011, "Simulation of Multilayer Wells Operating," paper SPE 149924 presented at *the SPE Arctic and Extream Environment Conference & Exhibition*, Moscow, Russia, October 18-20.
- Zhu, D., Hill, D. and Landrum, W.R., 2002, "Evaluation of Crossflow Effects in Multilateral Wells," paper SPE 75250 presented at *the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, USA, April 13-17.

남 상 구

현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 석사과정
(本學會誌 第49卷 第2号 参照)

박 창 협

현재 강원대학교 공과대학 에너지·자원공학과 교수
(本學會誌 第49卷 第2号 参照)

정 승 필

현재 한국석유공사 생산기술처
(本學會誌 第49卷 第2号 参照)
