



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

반응표면법을 이용한 셰일가스 생산 모델링

Shale Gas Production Modeling

Using Response Surface Method

2013년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

박 영 숙

## 초 록

세일가스는 유체투과율이 낮은 세일층에 부존하는 천연가스이다. 최근 수평시추 및 다단계 수압파쇄를 적용하여 경제적으로 회수가 가능해졌으나, 회수율이 5~15%로 낮고 개발 및 생산비용이 높다. 효율적인 수압파쇄 작업을 설계하기 위하여 생산예측을 기반으로 한 의사결정이 필요하다. 기존의 연구는 초기 생산자료를 이용하여 누적생산량을 예측하여 작업 전 의사결정에 활용되기 어렵거나 많은 입력자료를 필요로 한다는 한계점이 있었다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 저류층 혼합모델을 반응표면법에 적용하고 생산예측 모델을 도출하였다. 분리균열모델과 이중공극·이중유체투과율모델을 함께 적용한 혼합모델은 불균일한 균열저류층의 이방성을 반영하며 흡착, 확산, 비정상흐름 등 세일 저류층의 유동특성을 반영할 수 있다.

반응표면은 실험설계에 규칙성이 있어 최소한의 입력자료를 이용한다. 반응표면의 설명변수를 선별하기 위하여 저류층물성 및 수압파쇄 설계의 인자에 대한 민감도를 분석하였다. 수압파쇄 간격, 길이, 높이 등의 인자가 생산량에 미치는 영향이 컸으며 세 인자를 통해 생산을 예측하는 반응표면을 구축하였다. 반응표면법의 실험설계 중 3수준의 요인설계의  $R^2$  값이 0.9828으로 높고 오차가 1.34%로 적으므로 이를 기반으로 한 신뢰도 높은 예측 기법을 개발하였다.

**주요어:** 세일가스, 민감도분석, 분리균열모델, 이중공극모델, 반응표면법

**학 번:** 2011-21096

# 목 차

초 록 .....	i
List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
1. 서 론 .....	1
2. 이론적 배경 .....	7
2.1 셰일가스 저류층 모사 기법 .....	7
2.2.1 분리균열모델 .....	10
2.2.2 이중공극·이중유체투과율모델 .....	13
2.2 반응표면법 .....	19
3. 반응표면을 이용한 셰일가스 생산예측기법 개발 .....	27
3.1 셰일가스 생산예측 기법 개발과정 .....	27
3.2 셰일가스 저류층 모델링 .....	29
4. 연구 결과 .....	34
4.1 반응표면 모델 입력자료 분석 .....	34

4.2 반응표면 모델의 성능평가 .....	41
4.3 반응표면 모델을 이용한 생산예측 .....	47
4. 결 론 .....	48
참고문헌 .....	50
ABSTRACT .....	54

## **List of Tables**

Table 2.1 Measure for fracture intensity .....	11
Table 3.1 Input properties of the base synthetic reservoir .....	32
Table 3.2 Natural fracture properties of the base synthetic reservoir .....	33
Table 4.1 Range of candidate input variables used during screening process ...	36
Table 4.2 Range of explanatory variables .....	44
Table 4.3 Design of experiment for factorial design .....	47

## List of Figures

Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoir ...	2
Figure 2.1 Flow diagram for shale gas reservoir modeling .....	8
Figure 2.2 Schematic diagram of dual porosity .....	14
Figure 2.3 Idealization of a fractured system .....	14
Figure 2.4 New Albany shale Isotherms as a function of TOC .....	16
Figure 2.5 The concept of response surface method .....	20
Figure 2.6 Response surface design for two factors .....	24
Figure 2.7 Response surface design for three factors .....	24
Figure 3.1 Flow diagram to develop shale gas production modeling using response surface method .....	28
Figure 3.2 Schematic diagram of the synthetic reservoir .....	31
Figure 4.2 Cumulative production for 20 years of stochastically generated reservoirs with variation on input parameters .....	37
Figure 4.3 Cumulative production for 20 years of stochastically generated reservoirs with variation on input parameters .....	38
Figure 4.4 Effect of all parameters on shale gas cumulative production .....	39
Figure 4.5 Validation of prediction model using R2 value .....	44
Figure 4.6 Validation of prediction model using error .....	44
Figure 4.7 Three-level factorial design for RSM .....	45
Figure 4.8 Cross plot of simulation result vs. RSM result .....	47

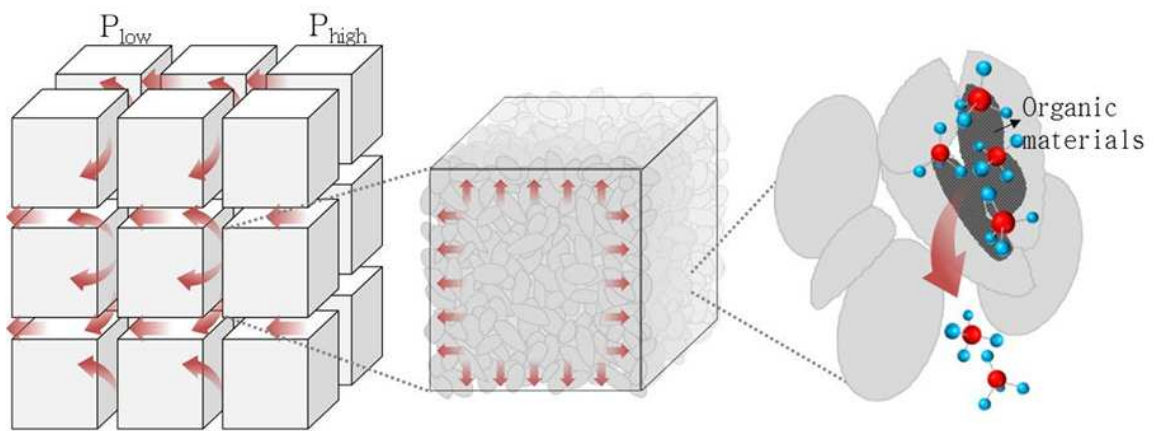
## 1. 서론

개발이 용이한 석유자원이 고갈되면서 셰일가스, 셰일오일, 오일샌드, 가스 하이드레이트와 같은 신석유자원의 개발과 관련 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 셰일가스는 기존의 석유자원보다 지역적 편재성이 약하며 전 세계적으로 6,622 Tcf의 가채자원량이 분포하고 있다. 또한 2010년 미국 천연가스 생산량의 23%를 차지하였으며 2035년 49%까지 증가할 것으로 예측되는 유망한 자원이다(EIA, 2012).

셰일가스는 치밀한 저류층에 탄화수소가 광역적으로 분포하여 생산이 불가능하였으나 최근 수평시추와 다단계 수압파쇄기법이 적용되어 상업적으로 생산되고 있다. 다단계 수압파쇄는 셰일가스 생산을 위한 가장 효과적인 공법이다. 수직시추 이후 수직방향에서 떨어진 목표지점에 도달하기 위해 설계된 방향 및 각도에 따른 경로로 수평시추를 시행한다. 이 유정에 프로판트(proppant), 파쇄수, 화학물질을 혼합하여 지하에 고압으로 투입하여 지층에 균열을 일으키는 수압파쇄를 단계적으로 시행한다. 저류암으로 주입된 프로판트는 균열이 일어나기 전의 상태로 돌아가려는 응력에 저항하여 균열을 열림 상태로 지속시키며 높은 전도도(hydraulic conductivity)의 유동채널을 제공한다.

다단계 수압파쇄를 이용한 생산이 효과적인 유체유동이 뛰어난 수압파쇄대와 자연균열의 연결성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 최대의 파쇄길이 및 SRV(stimulated reservoir volume)을 확보하기 위하여 수평정의 경로는 최대응력에 수직인 방향으로, 수압파쇄는 최대응력에 평행인 방향으로 이루어진다.





**Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoirs**

Fig 1.1은 셰일가스 저류층에서 유체의 생산 메커니즘을 나타낸다. 유동 양상은 흡착가스의 탈착 및 확산, 매질 내 자유가스의 확산, 균열 내 유동의 세 가지로 나뉠 수 있다. 흡착가스는 셰일 매질 내 유기물질의 표면에 들러 붙어 저장되며 압력강하가 발생함에 따라 매질 내로 탈착된다. 탈착된 가스 와 자유가스는 셰일층 내에서 미세한 공극(micro-pore)을 따라 균열면에 도달 할 때까지 확산을 통하여 움직이게 된다. 균열시스템으로 도달한 가스는 압 력이 상대적으로 낮은 유정으로 유동한다.

암체 매질의 유체투과도가  $10^{-6} \sim 10^{-9}D$  범위로 낮을 경우 매질을 통한 가 스분자의 확산속도는  $1.5 \sim 10ft/year$ 이다(Chunlou, 2009). 이 때문에 셰일가스의 초기 생산은 균열 내 혹은 균열에 근접한 매질에 저장된 가스의 생산으로 이 루어지며, 생산이 시작됨에 따라 생산량이 급감하는 양상을 보인다. 같은 맥 락에서 석유자원으로 분류되는 가스 저류층의 경우 회수율이 대략 80~90%인 반면 신석유자원으로 분류되는 셰일가스 저류층은 셰일 암체의 낮은 유체투 과율 때문에 회수율이 5~15%로 낮다(Cornelson, 1974; Cipolla and Lolon, 2010). 기존의 저류층에서 탐사비용이 높았던 것과 달리 셰일가스 저류층은 수평정 시추 및 다단계 수압파쇄기법으로 인하여 개발 및 생산설비의 비용이 더 높아 생산량 대비 투입비용이 상대적으로 비싸기 때문에 다수의 생산예측 을 시행하여 의사결정에 반영하는 것이 필수적이다.

저류층의 거동을 모사하기 위해서 많이 사용하는 소프트웨어는 Schlumber 사의 ECLIPSE, Gold Associates 사의 FRACMAN 등이 있다. 셰일가 스 저류층은 유동에 지배적인 영향을 미치는 자연균열, 탈착 및 확산과 같은 유체거동, 다단계 수압파쇄 등 복잡한 시스템을 이룬다. 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서 다수의 저류층 모사 단계를 거쳐야 한다. 복잡한 셰일가스 저류층에서 유체의 생산을 효과적으로 예측하기 위한 최근의 연구는 다음과 같다.

Siripatrachai 등(2012)은 이차원의 균질하고 등방성인 저류층을 대상으로 인공신경망을 적용하여 누적생산량을 도출하였다. 격자크기를 불균일하게 설정하여 다단계 수압파쇄를 설정하였으며 파쇄가 많이 된 지역을 타원형의 'crushed zone'으로 가정하였다. 600개 자료로 학습한 후 520개 자료로 검증하였으며, 23개 입력변수와 13개 출력변수가 6개의 은닉층(hidden layer)을 포함한 인공신경망을 형성하였다. 복잡한 관계를 파악하지 않고 결과를 예측할 수 있지만 50년간 누적생산량의 오차가  $\pm 15\%$ 이하로 높은 편이다. 학습 및 검증에 많은 자료가 필요하며 입력변수 사이에 혹은 입력변수와 결과 간의 상호작용을 해석하기 어려운 단점이 있다.

Biswas(2011)은 물질평형방정식과 deliverability equation를 이용하여 히스토리 매칭과 셰일가스 생산을 예측하는 SGPM(shale gas predictive model)을 개발하였다. 일반적으로 전체 저류층을 FDM(finite difference method)으로 모사하는 반면에 Biswas는 유정 주변에서 유체의 거동에 집중하여 생산 초기의 자료를 통해 향후 생산량을 예측하였다. 유체의 포화도, 압축률, 온도, 압력, z-인자, 생산반경, 용적계수로 생산을 예측하므로 적은 수의 입력인자를 사용하여 빠르게 예측한다. 그러나 셰일가스 생산에 영향을 미치는 자연균열, 매질 유체투과율 등 주요 물성을 반영하지 않았다. 실제 생산자료를 이용한 생산예측을 수행하므로 작업이 시작하기 전 예측하기 어렵다는 한계도 있다.

Mattar 등(2008)은 다단계 수압파쇄법이 적용된 수평정을 대상으로 생산량 감퇴곡선 분석 및 생산량 예측을 시행하였다. 단일공극 저류층에 단상의 유체가 거동한다는 가정 하에 멱함수지수를 이용한 생산량 감퇴곡선 분석을 실시하였다. 그러나 감퇴곡선을 이용한 누적생산량 예측은 셰일가스의 유동 특성인 비정상흐름을 반영하기 어려우며, 초기 생산량자료가 필요하므로 수압파쇄 작업 전 다수의 모사를 바탕으로 한 의사결정에 활용되기 어렵다.

Cipolla 등(2009)은 비석유 가스자원에 수평정을 시추하였을 때 생산성 향

상을 위해 고려해야 할 인자로써 파쇄전도도, 파쇄간격, 파쇄길이 등을 제시하였다. 초기 전도도가 낮은 저류층에서 파쇄간격을 줄여 파쇄망의 복잡성과 SRV를 증가시킬 경우 생산성 및 회수율이 크게 향상될 것으로 예측하였다. 그러나 세일가스 저류층의 균열에 따른 이방성과 비균질성을 고려하지 않았다.

본 연구에서 생산예측을 위하여 활용한 반응표면법(response surface method, RSM)은 Box와 Wilson(1951)이 설계실험의 최적반응을 도출한다는 목적으로 중심합성계획(central composite design)을 적용하여 이차원 다항모델로 반응표면을 형성한 것이 최초의 적용 사례이다. 이후 공학 및 자연과학에 많이 활용되었으며 석유공학에 적용되었던 대표적인 사례는 다음과 같다.

Ghomian 등(2008)은 이산화탄소 주입 시 온도와 저류층 유체의 성분에 따른 MMP(miscible minimum pressure)를 예측하는 기법으로 반응표면법을 사용하였다. 저류층의 온도가 90, 150, 180, 220°F일 때, 가벼운 석유와 무거운 석유의 온도 감소량과 acentric factor를 네 가지 무차원의 입력변수로 설정하고 slim tube 모사를 통한 MMP를 반응변수로 하여 회귀 다항모델의 반응표면을 도출하였다. Slim tube 모사와 반응표면의 결과를 비교한 결과 기존에 MMP를 예측하는 기법보다 낮은 오차의 평균을 보였다.

Prada와 Cunha(2008)은 SAGD(steam assisted gravity drainage)를 적용한 Alberta 오일샌드 저류층의 NPV(net present value)를 예측하고 불확실성을 평가하였다. 저류압 및 유체의 물성, 증기 주입률, 유정의 간격 등 영향력이 높은 입력인자를 선별하고 중심합성계획을 반영하여 반응표면법을 적용하였다. 열을 고려한 다상유체의 거동모사는 계산시간이 길기 때문에 이를 단축할 수 있는 의의가 있다.

Yeten 등(2005)은 현장자료를 반영한 저류층과 인위적으로 생성된 저류층에의 불확실성을 수량화하는 방법으로 반응표면법을 적용하였다. 인자의 범위를 최적화하기 위하여 Plackett-Burman design, D-optimal design, 충전설계

(filling design) 등 반응표면법의 여러 실험설계를 비교하였다. 충전설계로 자료를 취득하였을 때 크리깅(kriging), 스플라인(splines), 이차 다항 회귀(quadratic polynomial)을 이용한 반응표면이 정확한 예측을 한다. 복잡한 응답 표면과 다항 회귀 응답표면에서 도출하는 인자의 영향 정도는 매우 비슷한 것으로 나타났다.

세일가스 저류층에서 시행한 연구에는 다음과 같은 문제점이 있다. 초기 생산량을 근거로 감퇴곡선법을 적용하거나 히스토리 매칭을 수행하여 향후의 생산을 예측하는 경우(Biswas, 2011; Mattar et al., 2008), 다단계수압파쇄 작업을 시작하기 전에 저류층 물성 및 파쇄인자를 고려한 설계를 하는 데 어려움이 있다. 인공지능망 등을 최적화 및 예측에 사용할 경우(Siripatrachai, 2012), 학습 및 검증에 필요한 자료가 방대하며 오차 또한 작지 않다는 문제점이 있다. 세일 저류층의 불균질성과 유동특성을 고려하지 않은 경우(Cipolla, 2009) 신뢰성 있는 생산예측을 하기 어렵다. 세일가스의 생산을 모사하기 위해서 균열저류층을 생성하고 유체유동특성을 모사하는 것은 많은 비용을 요구하므로 중요한 특정 입력변수를 위주로 생산예측기법을 개발하는 것이 효율적이다. 본 연구에서는 이를 위한 기법으로 반응표면법을 도입하였다.

이 연구에서는 세일 저류층의 물성 및 다단계 수압파쇄의 설계가 생산에 미치는 영향을 분석하였으며 영향도가 큰 인자를 이용하여 생산을 효율적으로 예측하는 방법에 대하여 연구를 진행하였다. 다수의 생산 시나리오를 평가하기 위해서 반응표면법을 이용하여 수압파쇄의 설계인자 및 저류층 물성에 따른 생산예측을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

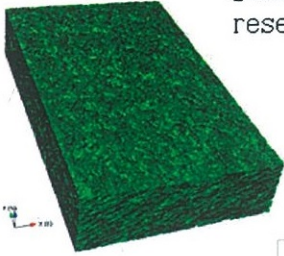
### 2.1 셰일가스 저류층 모사 기법

전통적인 석유자원 저류층에서는 매질의 공극에 가스가 압축되어 저장되며 유동성이 높다. 그러나 셰일가스 저류층은 유체의 저장 및 유동특성이 크게 세 가지로 나뉜다. 우선 암체에 흡착되어 저장되는 가스는 압력이 낮아지면 탈착되는 메커니즘을 보인다. 이 때 가스는 암체의 유기물질에 흡착되므로 TOC(total organic content)의 값이 높아질수록 흡착하는 가스의 양이 많아진다. 탈착된 가스와 암체 내에 저장된 가스는 확산 메커니즘을 통하여 균열면까지 이동한다. 자연균열은 균열 내부에 가스를 저장하며 생산 시 주요 유동통로의 역할을 한다. 셰일가스 저류층과 같이 매질의 유체투과율이  $10^{-3}$ md 이하로 암체에서 유동성이 낮으므로 균열은 지배적인 유동채널이 된다. 이 때문에 생산 가스의 대부분은 수압파쇄대의 성장과 자연균열과의 연결이 향상되어 생성된 SRV에서 기인한다.

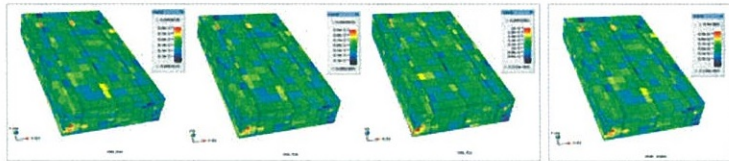
본 논문에서는 복잡한 셰일가스 저류층을 모사하기 위하여 분리균열(discrete fracture network, DFN)모델과 등가연속체모델의 이중공극 · 이중유체 투과율(dual porosity · dual permeability, DPDK)모델을 함께 적용하는 혼성모델(hybrid model)을 사용한다. 혼성모델은 분리균열모델에서 생성하는 사실적인 자연균열과 등가연속체모델에서 모사하는 유체의 복잡한 거동을 함께 고려할 수 있다는 장점이 있다. Fig 2.2는 혼성모델을 이용한 셰일가스 저류층 모사과정을 나타낸다. 우선 분리균열모델을 통하여 자연균열의 분포, 크기, 방향, 체적밀도 등을 반영한 균열저류층을 생성한다. 분리균열모델에서 생성된 균열저류층을 Oda 방법(Oda, 1985)으로 업스케일링하여 등가연속체모델에

DFN model

Stochastically  
generates fractured  
reservoirs

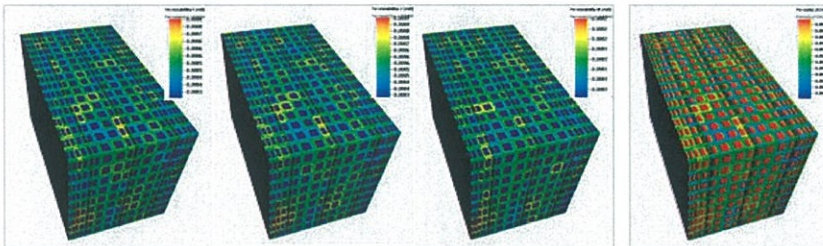


Upscaling Transform fracture information



Fracture permeability in x,y,z direction Fracture porosity

DKDP model Simulate fluid flow in matrix and fracture



Fracture permeability in x,y,z direction Fracture porosity

Figure 2.1 Flow diagram for shale gas reservoir modeling

적용한다. 균열의 정보는  $x, y, z$  방향의 유체투과율과 균열공극률로 반영된다. 균열 특성이 적용된 이중공극 · 이중유체투과율모델로 암체 매질 내 비정상흐름, 암체와 균열 사이의 유동, 높은 전도도의 균열에서 유동을 모사한다. Langmuir 등온선(Langmuir isotherm)을 적용하여 압력과 온도에 따라 유기물에서 흡착 및 탈착되는 가스의 거동을 반영할 수 있다. 수압과쇄대에는 격자의 크기가 대수적으로 변하는 LGR(local grid refinement)이 적용되므로 파쇄를 모방한다.



### 2.2.1 분리균열모델

분리균열모델은 ‘다양한 스케일의 균열을 서로 다른 기하학적 분포로 암반에 불연속적으로 생성하는 모델’이다(정승필, 2008). 코어분석, 물리검층, 노두조사, 탄성과 탐사자료, FMI(formation micro imager) 등 실측자료를 바탕으로 하여 균열을 생성하며, 추계학적 방법을 이용하므로 단일 해를 도출하지 않는다. 위치, 방향, 크기 등 실제 균열의 특성을 반영한 균열저류층을 생성하므로 균열의 연결성을 고려한 유체유동을 사실적으로 모사할 수 있다.

특히 셰일가스 저류층에서 자연균열은 수압파쇄대의 성장 및 연결성에 영향을 미치므로 자연균열의 특성은 수압파쇄 작업계획과 밀접한 연관성을 지닌다. 암체와 균열 간의 유동 및 흡착가스의 유동을 모사하는 데 제약이 있으므로 혼합모델을 통하여 이를 보완하였다. 혼합모델로 전환될 3차원의 분리균열모델을 구축하기 위해서 필요한 자연균열의 주요 정보는 체적밀도(intensity), 방향이며 이외 크기, 간격, 모양, 균열간의 연결성 등이 있다.

균열의 밀도는 선, 면, 부피에 대한 균열의 양을 나타내는 것이다. Table 2.1과 같이 균열밀도, 균열강도, 균열공극률로 구분할 수 있다. 균열을 측정하는 단위의 차원을 a라 하고 표본 암체의 차원을 b라 하고 할 때,  $P_{ab}$ 로 표기한다.

균열방향은 지층면의 주향(strike)과 경사(dip)으로 표시된다. 주향은 지층면과 수평면과의 교선, 경사는 수평면을 기준으로 한 기울어진 각도이다. 균열의 축이 가리키는 방향인 pole을 기준으로 할 경우 trend와 plunge로 표시된다. trend는 pole이 수평면이 만든 정사영과 북쪽(y) 방향이 만드는 각도이며 plunge는 pole이 수평면과 만드는 각도이다.

**Table 2.1 Measure for fracture intensity (Dershowitz, 1992)**

		Dimension of features			
		0	1	2	3
Dimension of sampling region	0 (point)	P <sub>00</sub> : Number of fracture samples per point sample rock mass [-]			
		porosity			
	1 (linear)	P <sub>10</sub> : Number of fractures per unit length of scanline or borehole [L <sup>-1</sup> ]	P <sub>11</sub> : Length of intersects fractures per unit length of scan line[-]		
		intensity	porosity		
	2 (areal)	P <sub>20</sub> : Number of trace centers per unit sampling area [L <sup>-2</sup> ]	P <sub>21</sub> : Length of fracture traces per unit sampling area [L <sup>-1</sup> ]	P <sub>22</sub> : Area of fractures per unit sampling area[-]	
		density	intensity	porosity	
	3 (volumetric)	P <sub>30</sub> : Number of fracture centers per unit rock volume [L <sup>-3</sup> ]		P <sub>33</sub> : Area of fractures per unit volume of rock mass [L <sup>-1</sup> ]	P <sub>33</sub> : Volume of fractures per unit volume of rock mass [-]
		density		intensity	porosity

균열방향을 나타내는 용어는 식 (2.1), 식 (2.2)와 같은 관계를 가진다.

$$trend = strike - 90^\circ = dip\ azimuth - 180^\circ \quad (2.1)$$

$$plunge = 90^\circ - dip \quad (2.2)$$

분리균열모델에서 균열방향은 분포함수로 생성된다. 대표적으로 Fisher 분포는 균열의 집단이 특정한 방향을 향해 분포한다는 가정 하에, 주향의 방향은 무작위로 분포하고 경사방향이 분포인자(dispersion parameter)  $\kappa$  와 평균경사(혹은 실측경사)  $\theta$  를 따르는 식 (2.3)의 확률밀도함수로 표현된다(Fisher, 1953). Fisher 분포는 자연균열방향의 분포를 생성하는데 가장 많이 쓰이는 방법이다(Wang, 2005). 분포인자는 대체로 5~50 범위에 속하며, 0일 때 균열이 전 방향으로 임의의 분포를 보이거나 값이 양수로 커질수록 같은 방향으로 분포한다.

$$f(\theta) = \frac{\kappa \sin\theta e^{\kappa \cos\theta}}{e^\kappa - e^{-\kappa}}, 0 < \theta < \frac{\pi}{2}, 0 < \kappa \quad (2.3)$$

## 2.2.2 이중공극 · 이중유체투과율모델

균열이 있는 암체에서 공극률 및 유체투과율은 Fig 2.2와 같이 나타난다. 전체 공극률( $\phi_t$ )은 전체 암석의 부피에 대한 매질공극의 부피인 일차공극률( $\phi_1$ )과 전체 암석의 부피에 대한 균열공극의 부피인 이차공극률( $\phi_2$ )의 합이다. 매질공극률(matrix porosity,  $\phi_m$ )은 전체 매질에 대한 매질공극의 부피이며, 균열공극률(fracture porosity,  $\phi_f$ )은 이차공극과 값이 거의 같다. 공극률 간의 관계는 식 (2.4), 식 (2.5), 식 (2.6)과 같다.

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2 \quad (2.4)$$

$$\phi_1 = (1 - \phi_2)\phi_m \quad (2.5)$$

$$\phi_{1,eff} = (1 - \phi_2)\phi_m (1 - S_{wi})$$

$$\phi_2 \approx \phi_f \quad (2.6)$$

유체투과율은 다공성매질에서 유체가 흐르는 정도를  $[L^2]$  단위로 표현한 것이다. 매질과 균열이 있는 시스템에서 유체투과율( $k_{mf}$ )은 매질 유체투과율( $k_m$ )과 암체와 연관된 균열의 유체투과율( $k_{eff}$ )의 합이다. 이 때  $k_{eff}$ 는 매질에 있는 전체 균열과 그 연결성에 의한 유체투과율을 나타내는 것이며, 매질과 독립적인 단일 균열의 유체투과율( $k_{ff}$ )은 단일 균열의 두께( $w_f$ )와 함께 아래 식 (2.7)와 같이 나타낸다.

$$k_{ff} = \frac{w_f^2}{12} \quad (2.7)$$

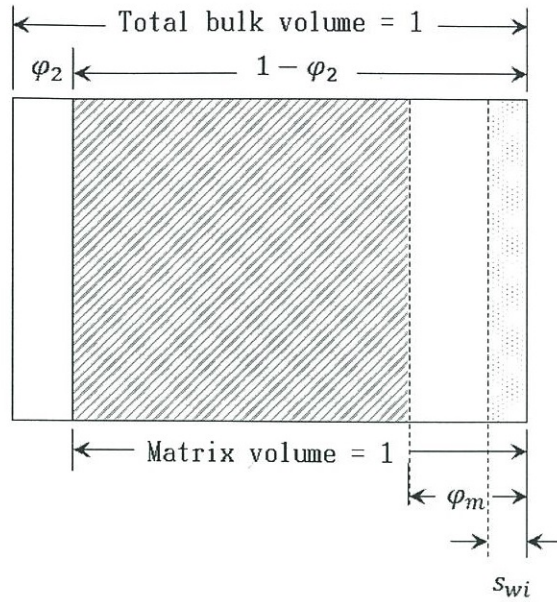


Figure 2.2 Schematic diagram of dual porosity (Golf-Racht, 1982)

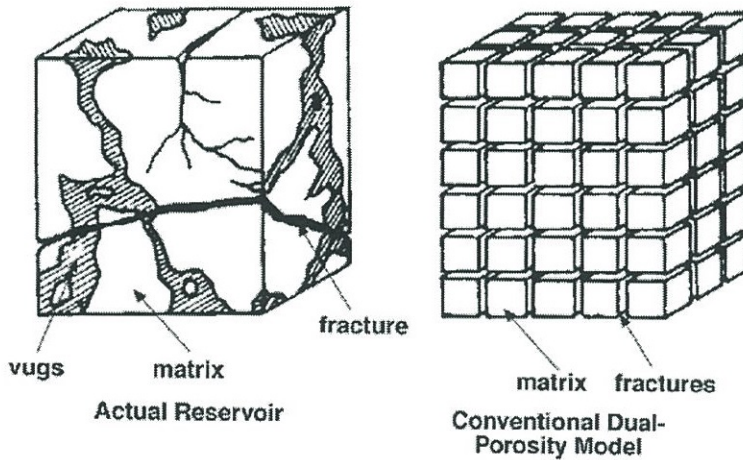


Figure 2.3 Idealization of a fractured system (Warren and Root, 1963)

본 연구에서는 균열의 유체투과율을 암체와 연관된 균열의 유체투과율로 한정하며 분리균열에서 생성된 자연균열 저류층을 이중공극의 균열 연속체로 변환하여 사용한다. 이중공극 모델은 매질과 균열의 두 연속체가 중첩되어 있다고 가정한 등가연속체 모델이다(Warren and Root, 1963). Fig 2.3과 같이 매질, 균열, 암석 내 공동 등이 분포하는 비균질성 및 이방성의 암체를 균질한 연속체로 변환한다. 개념적 이해와 계산이 용이하지만, 국지적으로 분포하는 균열이 격자 내에서 평균값으로 입력되므로 균열의 정보가 손실될 수 있다.

이중공극 모델에서 매질은 유체를 저장하며 연결성이 뛰어난 균열은 유체의 통로 역할을 한다. 본 연구에서 이용한 이중공극 · 이중유체투과율모델은 매질이 유체의 저장뿐만 아니라 물질 전달에도 관여를 한다고 가정한다. 분리균열모델에서 변환된 균열 유체투과율에 방향성을 고려할 수 있으므로 기존의 연속체 모델보다 균열정보의 손실정도가 적다.

이중공극 · 이중유체투과율모델은 매질 내, 균열과 매질 간, 균열 내의 유동을 모사할 수 있다. 균열 내 유체유동은 Darcy방정식을 지배방정식으로 한다. 암체 내 유기물질에 흡착된 가스는 Langmuir가 제안한 식 (2.8)을 따른다. Langmuir 등온선은 특정 온도에서 가스의 압력 또는 농도에 따른 매질의 흡착정도를 나타내는 식이다.  $\alpha$ (상수)와  $P$ (가스의 압력 또는 농도)에 의하여  $\theta$  (fractional coverage)가 결정된다. Fig 2.4와 같이 높은 TOC에서는 동일한 압력에서도 더 많은 양의 가스가 흡착됨을 볼 수 있다.

$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + \alpha \cdot P} \quad (2.8)$$

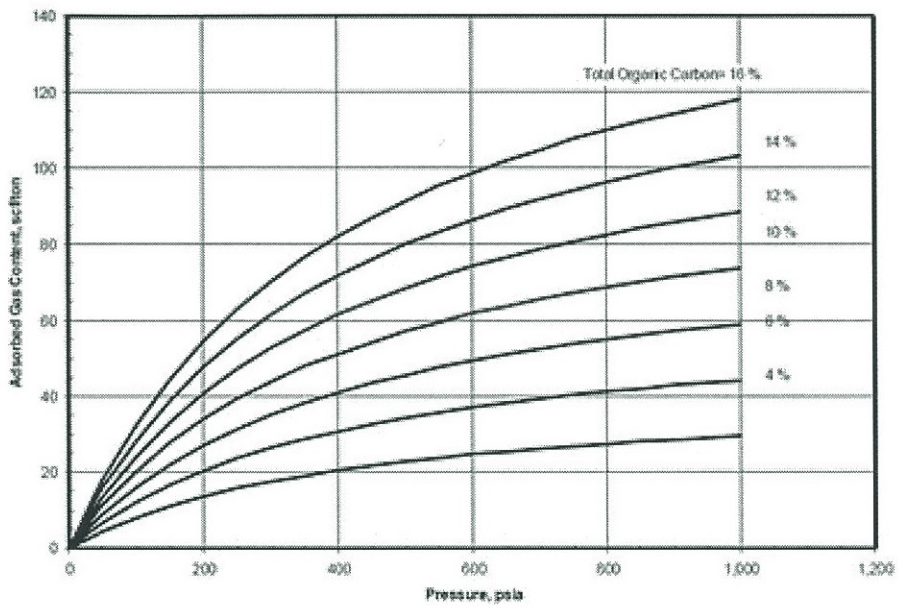


Figure 2.4 New Albany shale isotherms as a function of TOC (Zuber, 2002)

매질 내 가스는 균열로 유체가 확산되면서 생산될 수 있으나, 낮은 유체 투과율로 인해 확산정도가 적다. 확산은 매질 내 유동으로 단일 분자의 열운동(브라운운동)으로 발생하는 전달과정이다. 열운동은 유체 내 분자의 위치가 영구적으로 재배치시키며 고체분자의 경우 느린 속도로 진행된다. 유체 내 분자가 확산 전달되는 속도는 식 (2.9)와 같이 Fick's 첫 번째 확산법칙에서 화합물의 농도변화도로 정의된다(Poling, 1987). 유체투과율 0.1md, 공극률 2%의 Devonian 셰일가스 저류층에서 확산계수가 0.09299 ft<sup>2</sup>/day (10<sup>-10</sup> cm<sup>2</sup>/sec)임이 알려져 있다(Kucuk, 1979).

$$J_i = -cD_i \frac{\partial x_i}{\partial d} \quad (2.9)$$

여기서,  $J_i$ : the molar flux of component  $i$  per unit area

$c$ : the total molar concentration given by  $c = \frac{1}{v_m}$

$v_m$ : the molar volume of mixture

$D_i$ : the diffusion coefficient of component  $i$

$x_i$ : the mole fraction of component  $i$

$\frac{\partial}{\partial d}$ : the gradient in the direction of flow

매질 내 유동을 모사할 때 세분된 모델(discretized matrix model)을 적용하여 매질 내부의 격자가 부격자(sub grid)로 나뉘어져 있다고 가정하면 셰일가스 저류층의 유동특성인 비정상흐름의 유동도 모사할 수 있다(Cipolla, 2009). 매질과 균열 간의 유동은 매질-균열 연결인자(matrix-fracture coupling factor)에 영향을 받으며, 이는 매질과 균열 간의 전도도를 나타내기 위해 사용된다(Kazemi et al., 1975). 인자의 값은 식 (2.10)과 같이 격자  $x, y, z$  방향의 일반



적인 길이에 의해 결정된다.

$$\sigma = 4 \left( \frac{1}{I_x^2} + \frac{1}{I_y^2} + \frac{1}{I_z^2} \right) \quad (2.10)$$

## 2.2 반응표면법

반응표면법(response surface method, RSM)은 Fig 2.4와 같이 다수의 독립적인 설명변수(explanatory variables)가 상호작용으로 단일의 혹은 다수의 반응변수(response variables)에 영향을 미칠 때 변수 간의 관계를 전달함수(transfer function)인 반응표면으로 나타내는 것이다. 관심을 갖고 있는 확률변수가 설정한 범위 내에서 변화할 때 선형적 혹은 비선형적인 함수를 가지며 이를 명확한 근사식(explicit estimation)인 다항식으로 표현한다. 특정 설명변수에서의 반응결과의 예측하거나 최적화, 최대값, 최소값 등을 도출하는 데 활용한다.

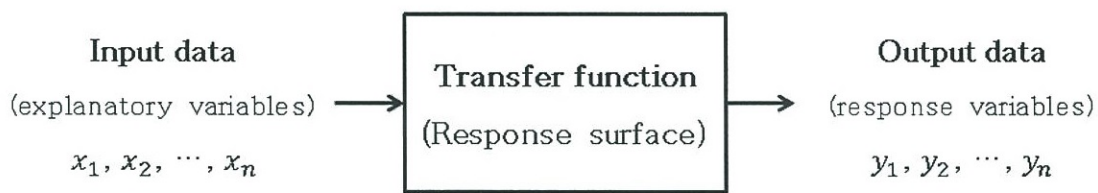
반응표면법은 통계적 분석기법의 하나로 실험계획 시 회귀분석 및 분석해석의 개념을 사용하여 정성적 혹은 정량적 인자의 상관관계를 근사식으로 나타낸다. 1951년 설계실험의 최적반응을 도출하기 위하여 반응표면법의 이차원 다항모델이 최초로 이용되었으며(Box and Wilson, 1951) 이후 공학과 자연과학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

반응표면법의 사용에는 여러 장점이 있다. 첫째, 다차원의 선형 혹은 비선형인 함수를 모사할 수 있다. 둘째, 입력변수의 범위를 자유롭게 설정하여 추계학적인 현상을 모사할 수 있다. 셋째, 관심의 대상인 결과 값을 도출하기 위한 입력변수의 수가 인공신경망보다 매우 적다(Cundy, 2003).

특정한 시스템에서 설명변수 벡터와 반응변수의 관계는 식 (2.12)과 같다. 반응변수의 참 값을  $y$ 라고 할 때, 설명변수 벡터  $X$ 는 식 (2.13)로 정의한다.

$$y = f(X) \quad (2.11)$$

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.12)$$



**Figure 2.5 The concept of response surface method**

반응표면법의 입력인자는 단위 및 범위가 상이하므로 값이 -1에서 1까지 분포하도록 선형변환한다. 독립변수 X의 선형변환은 각 요소를 평균값만큼 빼준 다음 상수로 나누는 선형변환이며 식 (2.13)과 같다.

$$x_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{C_i} = \frac{x_i - (\text{high level} + \text{low level})/2}{(\text{high level} + \text{low level})/2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

선형변환을 통하여 새로이 정의되는 독립변수 X의 중점은 식 (2.14)로 위치한다.

$$\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n) = (0, 0, 0, \dots, 0) \quad (2.14)$$

반응표면법은 일차 다항 회귀모형, 이차 다항 회귀모형, 삼차 다항 회귀모형 등으로 표현할 수 있다. 일반적으로 비선형적 함수를 표현할 수 있는 이차 다항 회귀모형을 사용한다. 첫째, 이차 다항 회귀모형은 이차원의 함수이므로 비선형적 해를 근사할 수 있다. 둘째, 최소자승법(ordinary least squares)을 이용하여 근사식의 계수를 예측할 수 있다(Carley, 2004). 셋째, 실질적인 경험에 근거하여 이차 다항 회귀모형이 반응표면의 해를 높은 신뢰도로 도출할 수 있다(Carley, 2004). n개의 입력변수에 대한 이차 다항 회귀모형은 식 (2.15)와 같다.

$$f(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.15)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

그러나 시스템이 복잡할 경우 변수 간의 관계를 정확한 함수로 표현하기 어렵다. 실증적인 방식으로 접근하여 근사식으로 변수 간의 관계를 표현할 경우 시간 및 비용을 절약할 수 있다. 식 (2.11)를 근사식으로 식 (2.16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{y} = \hat{f}(X) = \eta(X) \quad (2.16)$$

n개의 입력변수에 대한 이차 다항 회귀모형의 근사식은 식 (2.17)과 같다.

$$\eta(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.17)$$

식 (2.17)을 행렬식으로 바꾸면 식 (2.18) 또는 식 (2.19)으로 표현할 수 있으며 식 (2.18)의 관련 계수 및 변수는 식 (2.20), 식 (2.21)으로 나타낸다. 식 (2.19)의 관련 계수 및 변수는 식 (2.22), 식 (2.23)과 같다. 이차 다항 회귀모형의 계수는 최소자승법에 의하여 예측될 수 있다.

$$\eta(X) = \beta_0 + X\beta^T + X\hat{B}X^T \quad (2.18)$$

$$\eta(X) = X_f \beta_f^T \quad (2.19)$$

$$\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n)^T \quad (2.20)$$

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \frac{1}{2}\beta_{12} & \frac{1}{2}\beta_{13} & \cdots & \frac{1}{2}\beta_{1n} \\ \frac{1}{2}\beta_{21} & \beta_{22} & \frac{1}{2}\beta_{23} & \cdots & \frac{1}{2}\beta_{2n} \\ \frac{1}{2}\beta_{31} & \frac{1}{2}\beta_{32} & \beta_{33} & \cdots & \frac{1}{2}\beta_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{2}\beta_{n1} & \frac{1}{2}\beta_{n2} & \frac{1}{2}\beta_{n3} & \cdots & \beta_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

$$X_f = (1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2, x_1x_2, \dots, x_{n-1}x_n) \quad (2.22)$$

$$\beta_f = (1, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, \beta_1^2, \beta_2^2, \dots, \beta_n^2, \beta_1\beta_2, \dots, \beta_{n-1}\beta_n) \quad (2.23)$$

계수  $\beta_f$ 를 도출하는 방법은 식 (2.26)과 같다.

$$y_k = \eta(x_k) + \epsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2.24)$$

$$Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n) \quad (2.25)$$

$$\beta_f = (XX^T)^{-1}XY^T \quad (2.26)$$

실험을 통하여 얻는 자료의 수가 많을수록 더 정확한 예측모델을 도출할 수 있다. 그러나 공학에서는 관심 있는 범위에서 최소의 자료를 이용하여 정확도가 높은 예측모델을 도출하는 것이 중요하다. 반응표면법을 효율적으로 이용하기 위한 실험설계 방법으로는 Fig 2.6과 Fig 2.7과 같이 중심합성계획, 요인설계, face-centered central composite design, Box-Behnken 설계 등이 있다.

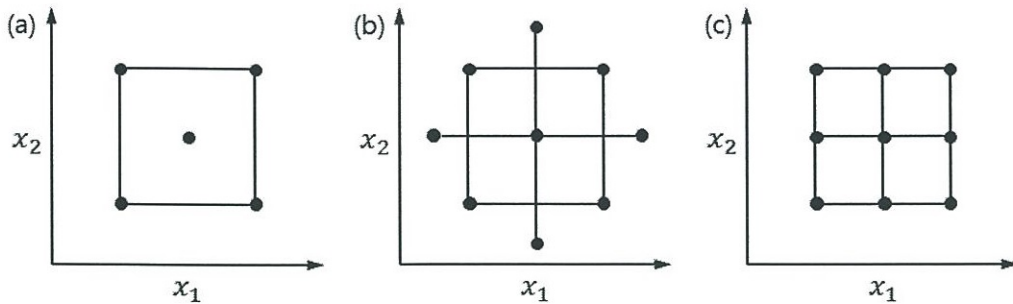


Figure 2.6 Response surface design of experiment for two factors:

(a) two-level factorial design with center point

(b) central composite design with  $\alpha = \sqrt{2}$

(c) central composite design with  $\alpha = 1$  or two-level full factorial design

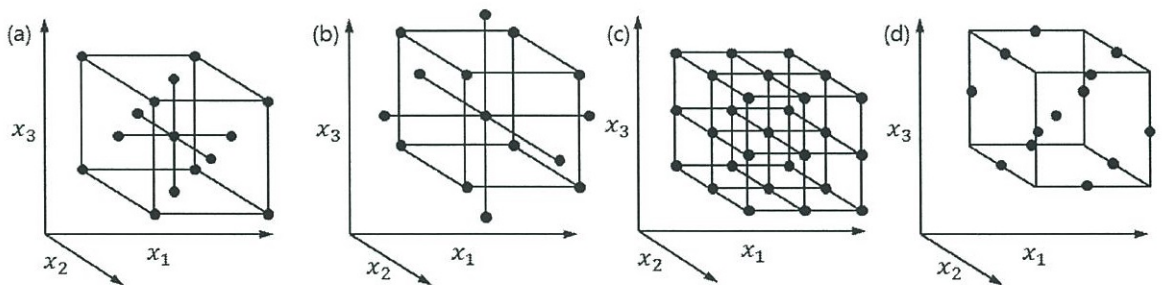


Figure 2.7 Response surface design of experiment for three factors:

(a) face-centered central composite design

(b) central composite design with  $\alpha = \sqrt{2}$  or Box-Wilson central composite design

(c) three-level full factorial design

(d) Box-Behnken design

두 개의 입력변수에 대한 반응표면법의 실험설계는 Fig 2.6과 같다. Fig 2.6a는 입력변수의 자료취득 지점을 2 수준과 중심점으로 하는 것이며, Fig 2.6b는 중심에서 축 점까지의 상대거리를 나타내는  $a$ 가  $\sqrt{2}$ 일 때 중심합성계획이다. Fig 2.6c는  $a$ 가 1일 때 중심합성계획 혹은 2수준의 요인설계이다. 세 개의 입력변수에 대한 반응표면법의 실험설계는 Fig 2.7와 같다. Fig 2.7a는  $a$ 가 1일 때 중심합성계획으로 face-centered central composite 설계이며, Fig 2.7b는  $a$ 가  $\sqrt{2}$ 일 때 중심합성계획이다. Fig 2.7c는 3 수준의 요인설계이며, Fig 2.7d는 Box-Behnken 설계이다.

본 논문에서는 요인설계를 반응표면법의 실험방법으로 채택하였다. 요인설계는 독립변인인 입력변수의 모든 수준에서 발생하는 실험설계이다. 수준은 일반적으로 인자가 변화하는 허용범위의 최소, 평균, 최대를 정하여 세 수준으로 설계하며 경우에 따라 두 수준 혹은 네 수준으로 설계하기도 한다.

요인설계는 다음과 같은 특징을 지니고 있다. 첫째, 요인설계는 각 입력변수의 최소, 평균, 최대를 사용하므로 사용할 수 있는 모든 자원을 반영할 수 있다. 이를 바탕으로 회귀모형의 근사해를 높은 정확도로 예측할 수 있다 (Mee, 2009). 둘째, 수준에 따른 각 인자의 영향 및 입력인자 간의 상관관계를 파악하기에 용이하다. 셋째, 다른 실험방법 보다 사용하는 자료의 수가 많기 때문에 더 넓은 범위에서 반응표면을 이용한 예측을 시도할 수 있다. 본 논문에서는 세일가스 저류층의 물성 및 수압과쇄 조건을 입력인자로 사용하며, 변화범위가 넓은 입력인자들의 상관성을 파악하고 정확한 예측모델을 도출하고자 하므로 요인설계를 채택하였다.

요인설계에서는 수준의 수(L)와 입력변수(I)의 수에 따라 식 (2.27)과 같이 실험의 수(E)가 결정된다.



$$E = L^I \quad (2.27)$$

두 가지 인자가 각각 세 수준을 가지게 될 경우 9개의 실험이 필요하며 세 가지 인자가 각각 세 수준을 가지게 될 경우 27개의 실험이 필요하다. 이 같이 요인설계에서 실험의 수는 입력인자의 수에 따라서 지수의 증가를 보이므로 영향을 가장 많이 미치는 중요인자를 선별하여 반응표면법을 효율적으로 시행하여야 한다.

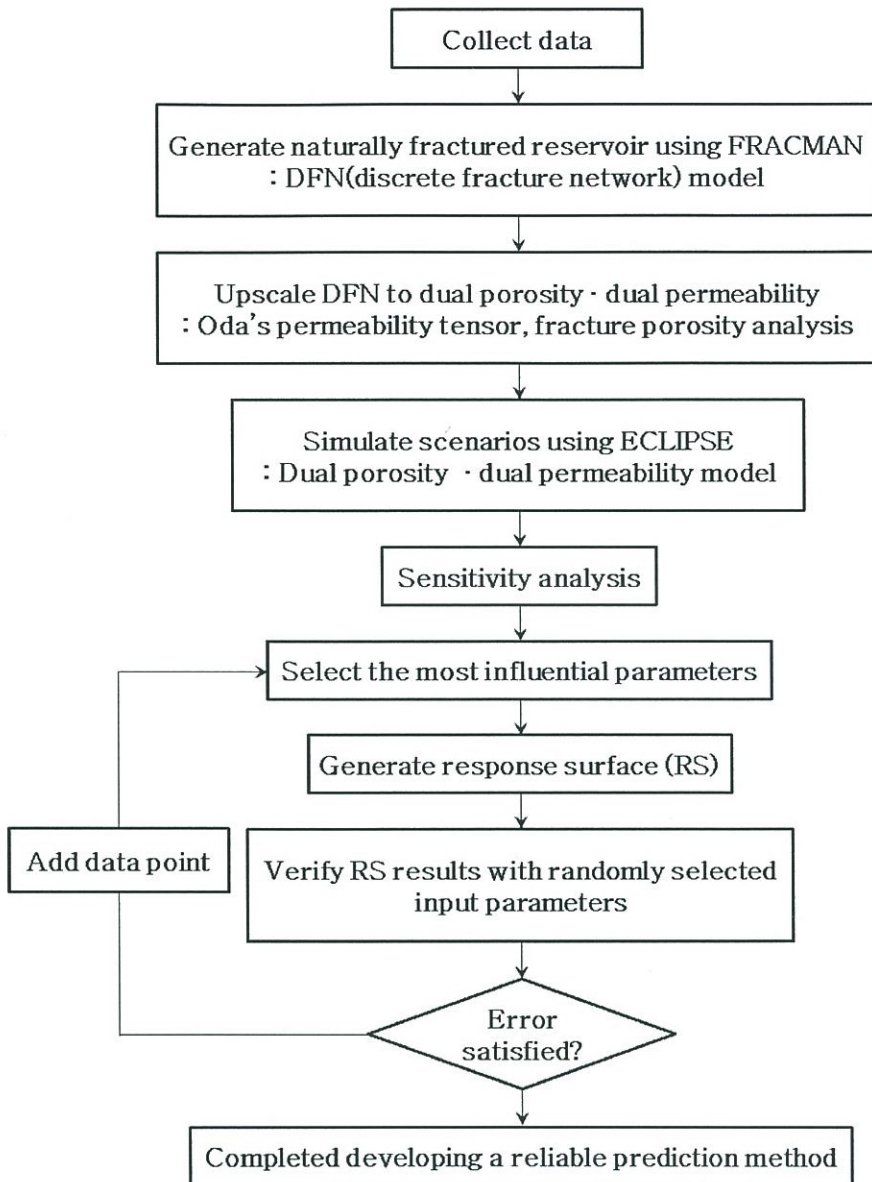
### 3. 반응표면을 이용한 셰일가스 생산예측기법 개발

#### 3.1 셰일가스 생산예측 기법 개발과정

자연균열로 인한 이방성의 저류층 물성이 반영된 이중공극 모델의 셰일가스 저류층에 다단계 수압파쇄를 적용하고 반응표면법을 이용하여 생산을 예측하는 기법을 개발하였다. Fig 3.1은 반응표면법을 이용한 셰일가스의 생산을 예측하는 과정을 나타낸 순서도이다. 우선 셰일가스 저류층을 생성하기 위하여 저류층 물성 및 수압파쇄의 자료를 수집하고, DFN 모델을 업스케일링하여 이중공극에 적용하여 기본 저류층 모델을 생성한다.

생산에 영향을 미치는 인자를 찾기 위하여 기본 저류층 모델을 중심으로 후보 입력인자들의 값을 변화시켜 민감도분석을 시행한다. 인자의 변화 범위 내에서 누적 생산량에 미치는 영향이 클 경우 반응표면의 입력인자로 선정한다. 중심합성의 실험설계를 통하여 입력인자의 각 지점에서 생산량을 도출하고 다항회귀모델의 계수를 계산하여 반응표면을 생성한다.

특정 범위로 한정된 입력인자를 무작위로 선정하여 시뮬레이션 결과와 반응표면법을 적용하였을 때의 결과를 비교하여 오차를 분석한다. 반응표면의 결과가 시뮬레이션 결과에 비해 충분한 예측성능을 보이지 못하는 경우 입력인자의 지점을 추가하여 예측성능이 수렴할 때까지 이 과정을 반복한다. 반응표면의 결과에 오차가 감소하여 예측성능을 충분히 확보하면 셰일가스의 생산을 예측하는 기법으로 활용될 수 있다.



**Fig 3.1 Flow diagram to develop shale gas production modeling using response surface method**

### 3.2 셰일가스 저류층 모델링

셰일가스 저류층에서 수압파쇄 인자와 저류층 물성이 생산에 미치는 영향을 분석하기 위하여 저류층 시뮬레이션을 수행하였다. 전산모델은 Gold Associates 사의 FRACMAN과 Schlumberger 사의 ECLIPSE를 사용하였다.

대상 저류층은 크기가 Fig 3.2와 같이 900ft×1600ft×200ft인 31×16×9 사각 격자시스템이며 세 단계의 수압파쇄 작업이 시행된 셰일지층이다. 대상 저류층의 물성은 Table 3.1과 같다. New Albany shale의 Mclean county 지역의 현장자료를 바탕으로 자연균열방향, 압력, 온도, TOC, 저류층 두께, 공극률, 지층의 밀도, 저류층 두께를 설정하였다. 매질 유체투과율을  $10^{-5}$ md, 균열밀도를  $0.5\text{ft}^{-1}$ 로 하였다. 수압파쇄의 길이는 800ft, 간격은 300ft이며, 저류층 두께 전체를 파쇄한다고 가정하였으므로 수압파쇄의 높이는 200ft이다.

Table 3.2는 분리균열모델의 형성을 위해 사용된 균열정보이다. 전체 균열밀도가  $0.5\text{ft}^{-1}$ 으로 주방향인 N60°E와 부방향인 N38°E의 균열밀도를 각각  $0.35\text{ft}^{-1}$ ,  $0.15\text{ft}^{-1}$ 으로 설정하였다. 최대 응력의 방향과 수압파쇄의 방향이 일치한다고 가정하였다.

격자시스템에서 하나의 격자는 4개의 내부격자를 추가적으로 포함하고 있으며, 내부격자의 적용으로 셰일가스 저류층의 유동특성인 비균질흐름을 모사할 수 있다(Zhang, 2009). 수압파쇄대를 모사하기 위하여 LGR를 적용하였다. 파쇄에 수직으로 형성된 부수적인 파쇄의 길이나 전도도를 추측하기 어려우므로 (Warpinski, 2008) 0.1ft의 높은 유체투과율(전도도)의 격자를 중심으로 대수적으로 크기가 커지는 1ft, 10ft의 격자를 양쪽으로 설정하였다.

Fig. 3.3은 세 번의 수압파쇄가 적용된 셰일가스 저류층에서 20년 동안 생산을 나타내는 그래프이다. 추계학적인 균열생성으로 단일해를 도출하지

않는 분리균열모델을 기반으로 자연균열을 모사하므로 생산 해의 범위를 나타내었다.

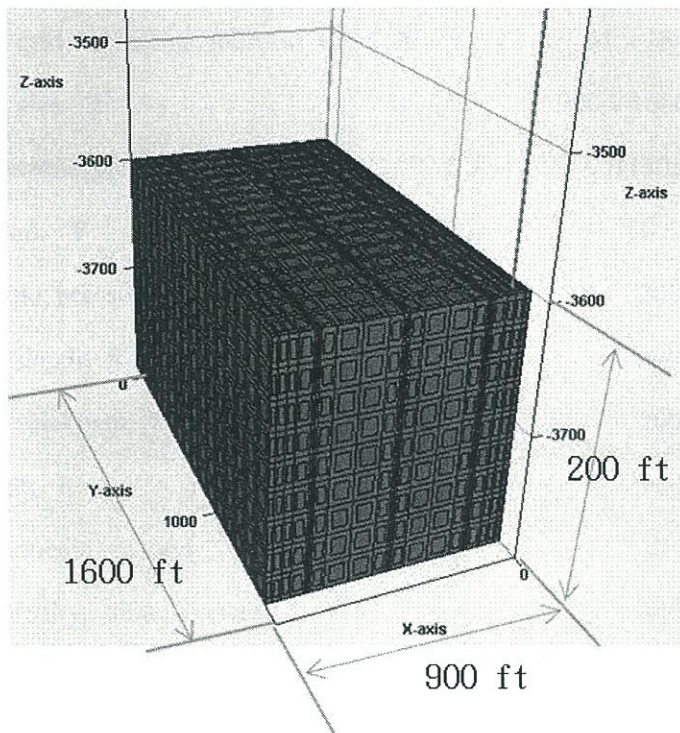


Figure 3.2 Schematic diagram of the synthetic reservoir

**Table 3.1 Input properties of the base synthetic reservoir**

<b>Reservoir Property</b>	<b>Value</b>
Reservoir grid, $X \times Y \times Z$	$31 \times 16 \times 9$
Reservoir grid including sub-grid cells, $X \times Y \times Z$	$31 \times 16 \times 45$
Reservoir size, $\text{ft}^3$	$900 \times 1600 \times 200$
Initial reservoir pressure, psia	1130.49
Temperature, $^{\circ}\text{F}$	96.52
Bottom hole pressure, psia	300
Reservoir depth, ft	3600
Reservoir thickness, ft	200
Well length, ft	900
Matrix permeability, md	$10^{-5}$
Matrix porosity, dimensionless	0.05
Rock density, $\text{lb}/\text{ft}^3$	63
Diffusivity coefficient, $\text{ft}^2/\text{day}$	0.09
Total organic content, dimensionless	0.08
Matrix-fracture coupling coefficient, $\text{ft}^2$	0.01
Hydraulic fracture conductivity, md-ft	5
Hydraulic fracture width, ft	0.1
Hydraulic fracture half-length, ft	800
Hydraulic fracture height, ft	200
Hydraulic fracture spacing, ft	300

**Table 3.2 Natural fracture properties of the base synthetic reservoir**

	N60°E	N38°E
Model	Enhanced Baecher	Enhanced Baecher
Fracture intensity, $\text{ft}^{-1}$	0.35	0.15
Trend, degree	0	338
Plunge, degree	70	70
Fisher constant, dimensionless	25	15
Fracture size, ft	Lognormal(30, 15)	Lognormal(30, 15)



## 4. 연구 결과

### 4.1 반응표면 모델 입력자료 분석

반응표면 모델을 도출하기 위하여 사용한 저류층 물성 및 수압파쇄 설계 등 입력인자의 후보는 저류층 물성인 매질공극률, 매질 유체투과율, 자연균열의 강도, TOC, 공저압, 매질-균열 연결인자, 저류층의 두께이다. 수압파쇄 설계로는 파쇄 전도도, 수압파쇄대의 두께 및 높이, 반길이, 간격 등이다.

Table 3.1을 기본모델로 하여 후보 입력인자의 값이 달라짐에 따라 생산량에 미치는 영향을 정량화하였다. 이는 반응표면법의 요인설계가 입력인자의 수에 따라서 실험의 횟수가 지수적으로 증가하기 때문에 사전검사를 통하여 영향도가 큰 인자를 대상으로 반응표면을 도출하기 위함이다.

Table 4.1은 기준모델을 중심으로 한 후보 입력인자의 최소 및 최대 설정을 나타낸다. 인자의 단위 및 범위 차이에 의한 영향을 없애고 수치적인 안정성을 확보하기 위하여 값의 최솟값과 최대값을 기준으로 -1, 1 사이의 값으로 정규화 하였다. 입력인자의 범위는 New Albany shale의 Mclean county의 현장자료 및 작업설계, NSIA(Netherland, Sewell and Associates, Inc.)에서 발표한 셰일가스 저류층의 평가기준을 참고하여 설정하였다.

Fig 4.2와 Fig 4.3은 각 인자의 변화에 따라 20년간 생산한 가스의 양을 나타낸다. 본 연구에서는 추계학적으로 생성된 균열저류층을 기반으로 하기 때문에 10개 균열 저류층을 대상으로 동일한 모사를 시행하고 인자의 영향도를 분석하였다. Fig 4.4에서 전체 인자의 영향도를 인자의 변화율 대비 생산량 차이로 도시하였으며 매질의 공극률, 매질의 유체투과율, 매질-균열 연결인자, TOC와 같은 저류층 물성의 변화는 생산량에 미치는 영향이 상대적으

로 적은 것으로 나타났다. 반면 수압파쇄의 설계인자인 파쇄 간격, 반길이, 높이(저류층 두께) 등은 영향도가 높은 것으로 나타났다.

**Table 4.1 Range of candidate input variables used during screening process**

<b>Reservoir Property</b>	<b>Minimum</b>	<b>-</b>	<b>Maximum</b>
Matrix permeability, md	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
Matrix porosity, dimensionless	0.03	0.05	0.07
Fracture intensity, $\text{ft}^{-1}$	0.1	0.5	1
Total organic content, dimensionless	0.04	0.08	0.10
Bottomhole pressure, psi	225	300	400
Matrix-fracture coupling coefficient, $\text{ft}^{-2}$	0.005	0.01	0.015
Hydraulic fracture conductivity, md-ft	0.5	5	50
Hydraulic fracture width, ft	0.05	0.1	0.15
Hydraulic fracture half-length, ft	400	800	1200
Hydraulic fracture height (Reservoir thickness), ft	50	200	350
Hydraulic fracture spacing, ft	225	300	450

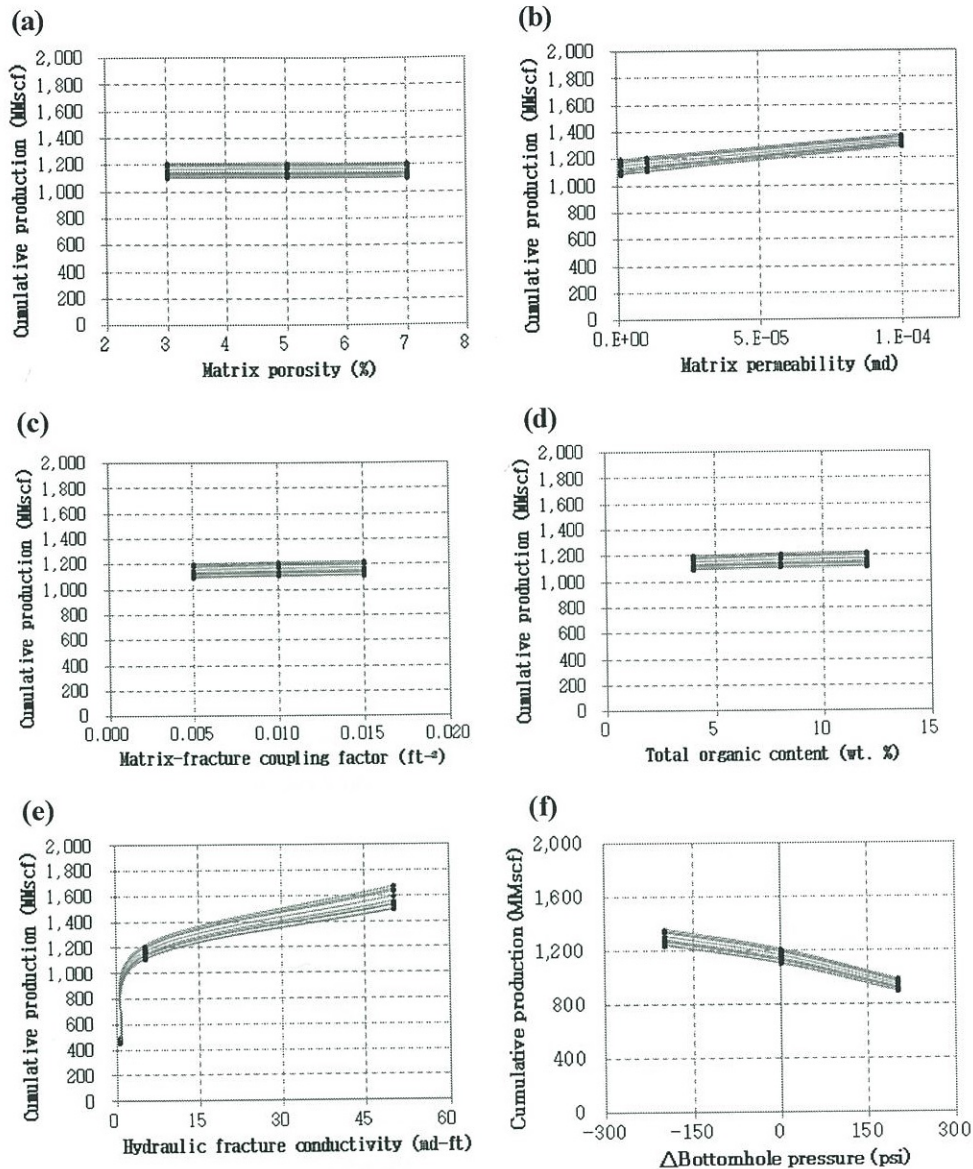


Figure 4.2 Cumulative production for 20 years of stochastically generated reservoirs with variation on input parameters: (a) Matrix porosity, (b) Matrix permeability, (c) Matrix-fracture coupling factor, (d) TOC, (e) Hydraulic fracture conductivity, (f)  $\Delta$ Bottomhole pressure

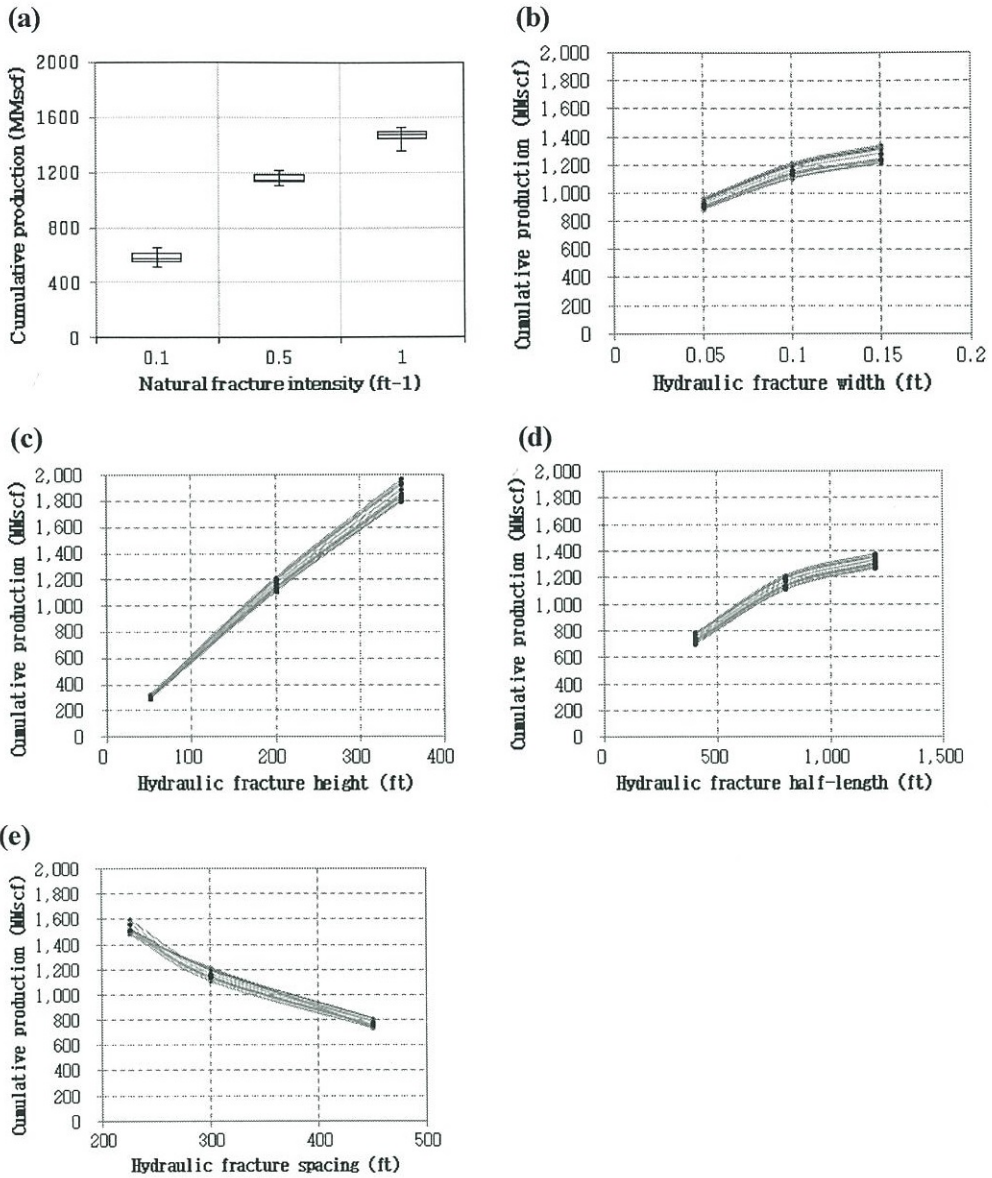
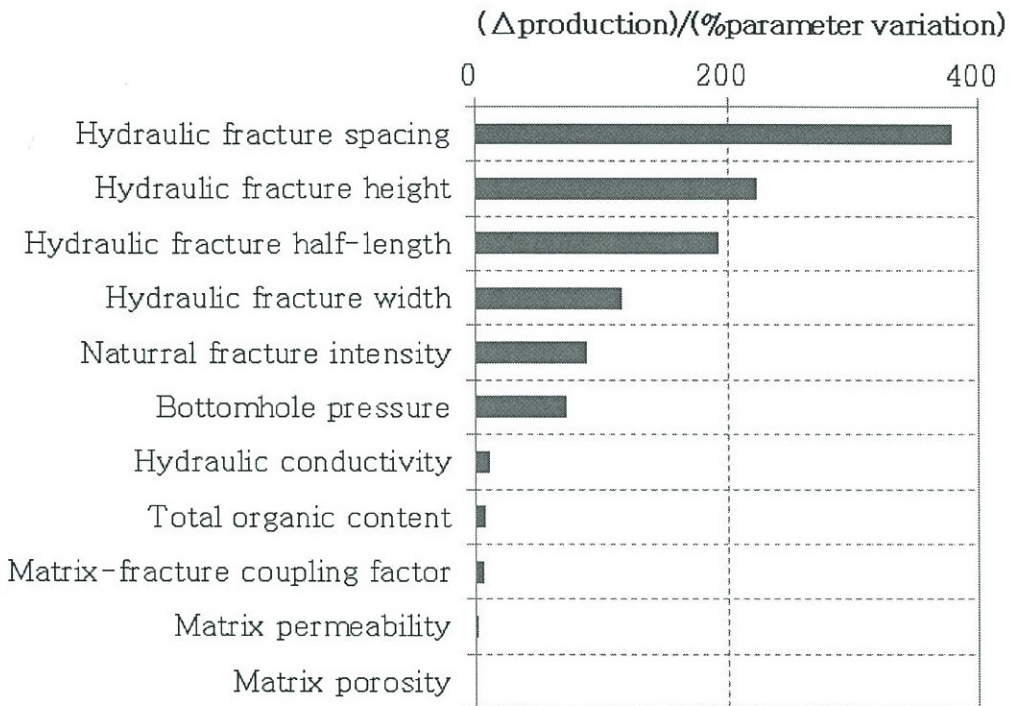


Figure 4.3 Cumulative production for 20 years of stochastically generated reservoirs with variation on input parameters: (a) Natural fracture intensity, (b) Hydraulic fracture width, (c) Hydraulic fracture height, (d) Hydraulic fracture half-length, (e) Hydraulic fracture spacing



**Figure 4.4 Sensitivity of all parameters on shale gas cumulative production**

수압파쇄의 설계와 관련된 인자가 저류층 물성보다 더 영향도가 높은 이유는 다음과 같다.

- 자연균열과 수압파쇄대의 연결성이 확보되어 SRV를 증가시키는 것이 생산량 향상에 기여한다. 셰일가스 저류층의 낮은 유체투과도로 인하여 암체 내 가스분자의 확산에 의한 생산은 자연균열 내 저장된 가스의 생산보다 매우 느리다. 암체의 유체투과도가  $10^{-6} \sim 10^{-9}$ md 이면 가스분자의 확산속도는 1.5~10ft/year(Chunlou, 2009)이므로 수압파쇄대를 크게 형성하여 자연균열과의 접점을 확보하는 것이 생산에 큰 영향을 미친다.
- 수압파쇄의 간격, 높이, 길이 순으로 유효단면적을 증가시키는 데 용이하다. 수압파쇄의 간격이 줄어들면 단위길이 당 파쇄횟수가 증가하므로 새로운 SRV를 형성할 수 있다.
- 수압파쇄길이의 경우, 수압파쇄 작업의 방향은 최대응력에 평행인 방향으로 이루어지기 때문에 지상에서 전달되는 주입압으로 균열대를 형성할 때 길이 신장에 이점이 있다.
- 수압파쇄 높이는 생산 가능한 저류층의 두께와 일치하는 경향성이 있다. 셰일가스 저류층의 두께는 지역적인 편차가 있으나 대체로 50~350ft 범위에 속하며 현장의 수압파쇄 작업은 대상 저류층의 생산 가능한 범위를 최대한 포함하기 위한 설계를 하기 때문이다. 본 분석에서는 수압파쇄의 높이와 대상 저류층의 두께가 같다고 가정하였으므로 두 인자의 영향도가 같다.

위와 같은 입력인자의 영향도 분석을 바탕으로 수압파쇄의 설계인자인 파쇄간격, 파쇄길이, 파쇄두께(저류층 두께)를 반응표면을 위한 입력인자로 선정하고 예측기법을 개발하였다.

## 4.2 반응표면 모델의 성능평가

입력인자로 선정된 수압파쇄 간격, 길이, 높이의 세 인자에 대해서 입력 인자의 범위 및 조건을 선정하고 다수의 실험설계를 통하여 반응표면 모델의 성능을 평가한다. 세 인자의 자료취득 지점에 따른 실험설계로는 3수준의 요인설계, Box-Behnken design, face-centered composite 설계가 일반적으로 사용된다. 다항 회귀모형에는 일차 다항 회귀모형, 연관인자를 포함한 일차 다항 회귀모형, 이차 다항 회귀모형, 연관인자를 포함한 이차 다항 회귀모형, 삼차 다항 회귀모형이 주로 쓰인다.

자료취득에 따른 실험설계와 회귀모형을 고려하여 15개의 경우에 따른 반응표면 모델의 성능평가를 실시하였다. 3개 인자의 최솟값, 중간값, 최대값에 대한 모사결과를 27개 생성하고 이를 토대로 다항 회귀함수를 도출하였다. 입력인자의 각 값은 최소를 -1, 최대를 +1로 선형변환 되었다. 각 조건에 따른 20년간 누적생산량을 도출하고 이를 여러 다항 회귀함수에 적용하였다.  $x_1$ 을 파쇄 간격,  $x_2$ 를 파쇄길이,  $x_3$ 를 파쇄 높이라고 할 때 다항 회귀함수를 도출하였다. Table 4.2, Fig 4.5, Fig 4.6는  $R^2$  값과 오차를 나타낸다. 성능을 비교할 때에는 실험설계의 각 경우에 해당하는 참값과 반응표면을 통하여 얻은 예측치를 비교하였다.

3수준의 요인설계의 경우 다항 회귀함수를 일차인 변수로 나타내었을 때 상수항을 포함한 계수의 수가 4개였고, 평균 절대오차가 34.05%인 등 예측성능이 좋지 않다. 반응표면 모델을 일차인 변수와 두 변수의 곱인 연관 변수로 나타낸 경우 계수의 수가 7개로 늘어났으며, 평균 절대오차가 8.25%로 향상되었다. 연관 변수 없이 일차와 이차인 변수로 나타낸 경우 계수의 수가 7개이며 평균 절대오차가 33.98%이다. 일차 변수, 연관 변수, 이차 변수를 사



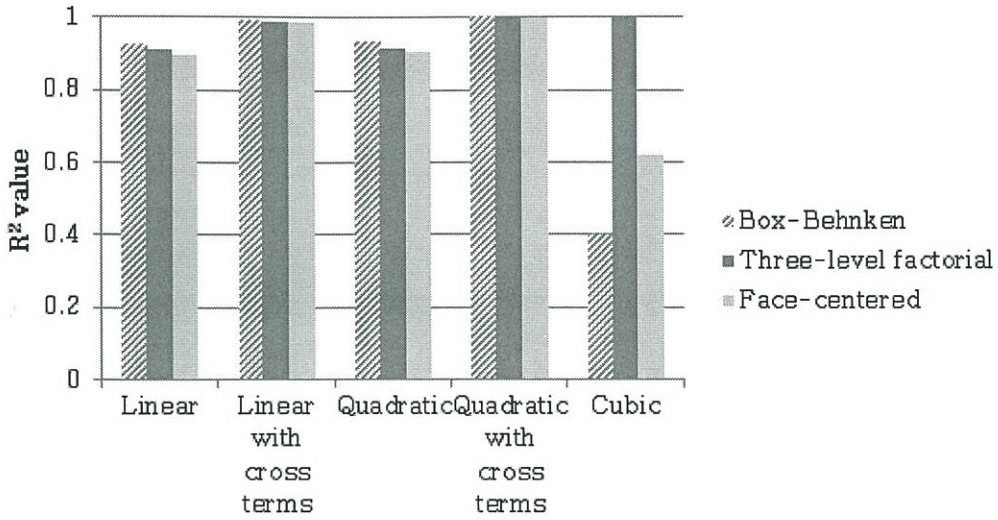
용하였을 경우 10개의 계수가 도출되며 평균 절대오차가 6.9%로 제일 낮았다. 본 연구에서는  $R^2$  값이 높으며 오차가 적어 예측성능이 뛰어난 3수준의 요인설계의 연관 변수를 포함한 이차 다항회귀모델을 사용하였으며 식 (4.1)과 같다. 해당 설계는 Fig 4.7과 같이 나타낼 수 있으며 Table 4.3의 자료 취득을 통해 반응표면을 도출하였다.

$$\hat{y} = 1471 - 169x_1 + 260x_2 - 221x_3 + 363x_1x_2 + 1096x_2x_3 + 557x_3x_1 + 40x_1^2 - 442x_2^2 - 141x_3^2$$

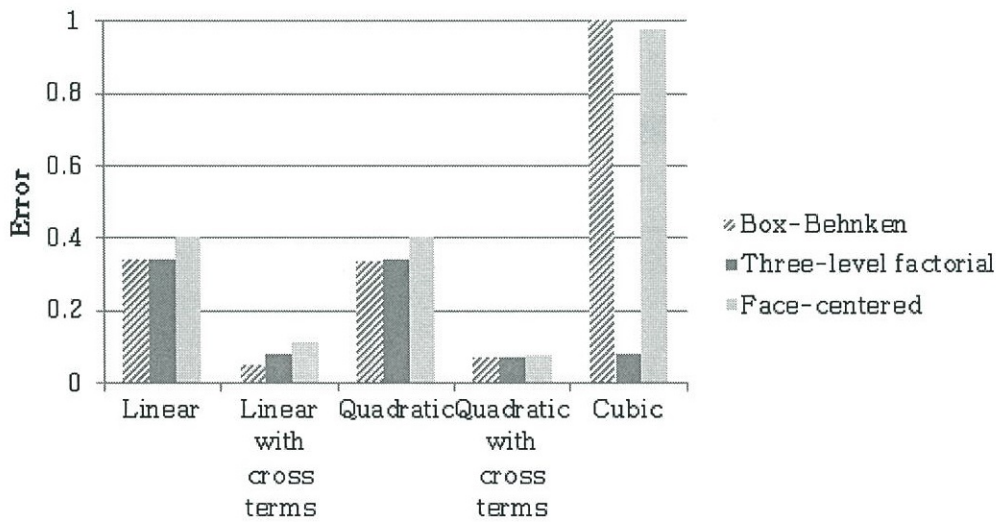
(4.1)

**Table 4.2 Range of explanatory variables**

<b>Design of experiment (# of input data)</b>	<b>Polynomial model</b>	<b># of coefficient</b>	<b>R<sup>2</sup> value</b>	<b>Error</b>
Three-level factorial (27)	Linear	4	0.9089	0.3405
	Linear with cross terms	7	0.9883	0.0825
	Quadratic	7	0.9168	0.3398
	Quadratic with cross terms	10	0.9962	0.0690
	Cubic	13	0.9957	0.0785
Box-Behnken (13)	Linear	4	0.9233	0.3434
	Linear with cross terms	7	0.9911	0.0505
	Quadratic	7	0.9297	0.3391
	Quadratic with cross terms	10	0.9975	0.0716
	Cubic	13	0.3980	289.4
Face-centered composite (15)	Linear	4	0.8919	0.4015
	Linear with cross terms	7	0.9854	0.1128
	Quadratic	7	0.9031	0.4013
	Quadratic with cross terms	10	0.9966	0.0748
	Cubic	13	0.6150	0.9774



**Figure 4.5** Validation of prediction model using  $R^2$  value



**Figure 4.6** Validation of prediction model using error

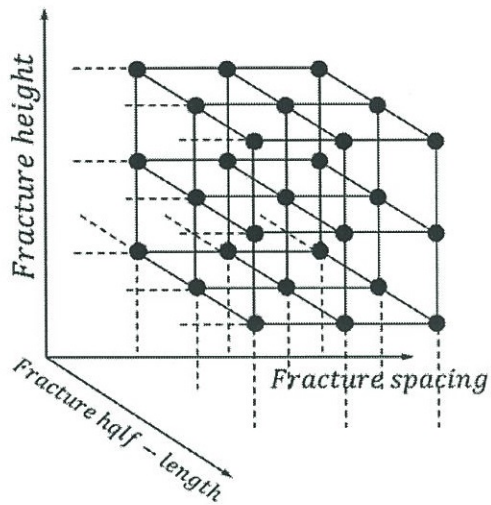


Figure 4.7 Three-level factorial design for RSM

**Table 4.3 Design of experiment for three-level factorial design**

Hydraulic fracture spacing (ft)	Hydraulic fracture half-length (ft)	Hydraulic fracture height (ft)	Hydraulic fracture spacing	Hydraulic fracture half-length	Hydraulic fracture height
225	1200	350	1	1	1
225	1200	50	1	1	-1
225	1200	200	1	1	0
225	800	350	1	0	1
225	800	50	1	0	-1
225	800	200	1	0	0
225	400	350	1	-1	1
225	400	50	1	-1	-1
225	400	200	1	-1	0
300	1200	350	0	1	1
300	1200	50	0	1	-1
300	1200	200	0	1	0
300	800	350	0	0	1
300	800	50	0	0	-1
300	800	200	0	0	0
300	400	350	0	-1	1
300	400	50	0	-1	-1
300	400	200	0	-1	0
450	1200	350	-1	1	1
450	1200	50	-1	1	-1
450	1200	200	-1	1	0
450	800	350	-1	0	1
450	800	50	-1	0	-1
450	800	200	-1	0	0
450	400	350	-1	-1	1
450	400	50	-1	-1	-1
450	400	200	-1	-1	0

### 4.3 반응표면 모델을 이용한 셰일가스 생산예측

예측성능이 뛰어난 이차 다항회귀모델을 이용하여 실제 생산을 예측하였다. 도출된 반응표면의 예측성능평가를 위하여 임의로 선정된 입력인자를 대상으로 저류층 전산모델과 반응표면 모델을 통한 누적생산량을 각각 도출한다. Fig 4.8은 저류층 전산모델과 반응표면 모델의 총 누적생산량 예측치를 비교한 대비도표이다. 자료들의 선형성을 의미하는 결정계수의 경우 0.98의 높은 값을 나타내었으며 두 자료의 오차범위는 -7.02~15.24%이지만 오차의 평균이 1.34%로 정확도가 매우 높은 것으로 나타났다.

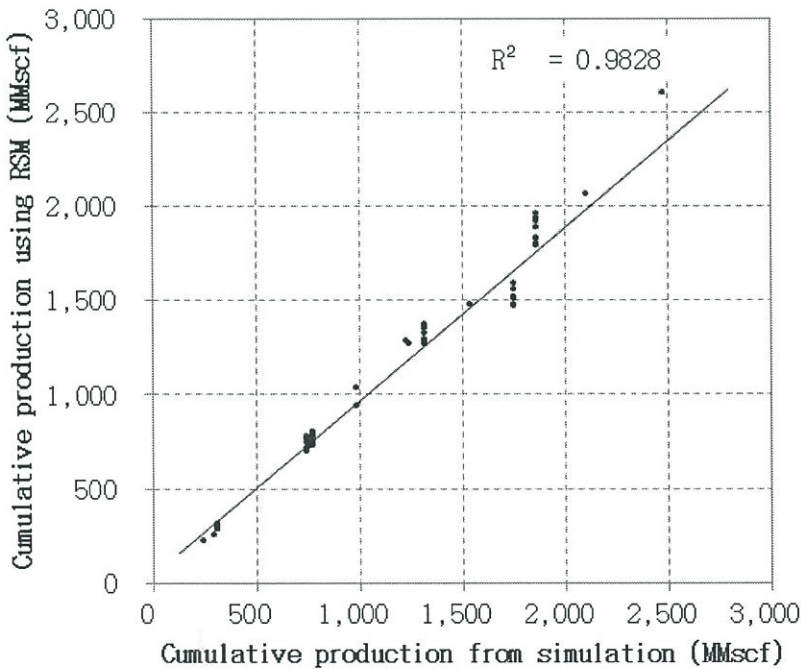


Figure 4.8 Cross plot of simulation results vs. RSM results

## 5. 결론

이 연구에서는 균열이 있는 셰일가스 저류층에 적용된 다단계 수압파쇄를 모사하기 위하여 분리균열모델과 이중공극·이중유체투과율모델을 함께 사용하는 혼합모델을 적용하여 모사하고, 반응표면을 이용하여 생산을 예측하는 기법을 개발하였다. 연구 결과를 토대로 아래의 결론을 도출하였다.

(1) 셰일가스 저류층의 자연균열을 분리균열모델을 이용하여 모사하였고 유기물질로부터 탈착, 암체 내 확산, 균열을 통한 유동을 모사하기 위하여 이중공극·이중유체투과율을 적용하였다. 균질하고 등방성의 저류층 혹은 단일공극의 저류층을 가정한 기존 연구보다 신뢰도가 높은 생산예측을 할 수 있다.

(2) 셰일가스 저류층의 물성 및 다단계 수압파쇄 설계를 반응표면법을 위한 후보 입력인자로 선정하고 인자 값의 최소와 최대에서 도출되는 생산량의 차이를 통하여 인자의 영향도를 분석하였다. 수압파쇄 시 설계인자에 해당하는 파쇄간격, 파쇄길이, 파쇄두께(저류층 두께)가 생산량에 미치는 영향도가 크며 자연균열과의 연결성 향상을 통한 SRV 증가가 높은 영향도의 주요 요인이다.

(3) 생산량에 영향도가 높은 인자를 대상으로 반응표면을 적용한 생산예측 기법을 제안하였다. 실험설계 시 3수준의 요인설계의 이차 다항 회귀모형을 사용하였을 때 예측성능이 뛰어난 것으로 나타났다. 개발한 반응표면은 저류층 시뮬레이터에 비해 신속한 연산속도를 가지므로 다양한 수압파쇄설계에 대한 생산예측에 소요되는 시간을 크게 단축하였다. 가상 저류층의 경우

상관계수 0.9828, 평균 예측오차 1.34%의 신뢰할만한 예측성능을 보였다.



## 참고문헌

박창협, 정승필. 2012. 3차원 분리균열모델 기반의 유동모델링 연구동향. *한국 지구시스템공학회지* 49 (2): 186-194.

이영수, 박정균, 서준우, 김기홍, 성원모. 2009. 이차원 수평균열자료와 1차원 FMI 공검층 수직균열자료를 통합 적용한 3차원 개별균열망 모델 연구. *한국 지구시스템공학회지* 46 (6): 711-720.

정승필, 2008. 앙상블칼만필터를 이용한 균열저류층 특성화. 서울대학교 공학 박사학위논문.

Box, G. E. P. and Wilson, K. B. 1951. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society series B* 13: 1-45.

Cheng, Y. 2010. Impacts of the Number of Perforation Clusters and Cluster Spacing on Production Performance of Horizontal Shale Gas Wells. paper SPE 138843 presented at Eastern Regional Meeting, Morgantown, Western Virginia, 12-14 October.

Cipolla, C. L., Lolon, E. P., Mayerhofer, M. J. and Warpinski, N. R. 2009. Fracture Design Considerations in Horizontal Wells Drilled in Unconventional Gas Reservoirs. paper SPE 119366 presented at the 2009 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, 19-21 January.

Cipolla, C. L. and Lolon, E. P. 2010. Reservoir Modeling in Shale-Gas

Reservoirs. paper SPE 125530 presented at the SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, West Virginia, 23-25 September.

Cornelson, D. W. 1974. Analytical Prediction of Natural Gas Reservoir Recovery Factors, The Journal of Canadian Petroleum presented at the Technology, Montreal, Canada, October-December.

Dershowitz, B., LaPointe, P., Eiben, T. and Wei L. 1988. Integration of Discrete Feature Network Methods with Conventional Simulator Approaches. paper SPE 49069 presented at the SPE ATEC, New Orleans, Louisiana, 27-30 September.

Dershowitz, W. S. and Herda, H. H. 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity. proceedings of the 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, Ohio, 3-5 June.

EIA. 2012. Annual Energy Outlook. Report No. DOE/EIA-0383(2012), U.S. Energy Information Administration, Washington, USA (June 2012).

Fisher, M. K., Heinze, J. R., Harris, C. D., Davidson, B. M., Wright, C. A. and Dunn, K. P. 2004. Optimizing Horizontal Completion Techniques in the Barnett Shale using Microseismic Fracture Mapping. paper SPE 90051 presented at the 2004 SPE ATEC, Houston, Texas, 26-29 September.

Ghomian, Y. P., Gary A. and Sepehrnoori, K. 2008. Development of a Response Surface Based Model for Minimum Miscible Pressure (MMP) Correlation of CO<sub>2</sub> Flooding. paper SPE 116719 presented at the 2008 SPE ATCE, Denver, Colorado, 21-24 September.

Golf-Racht, T. D. 1982. *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*, Elsevier, Amsterdam: Elsevier/North-Holland Inc.

Jacot, R. H. 2010. Technology Integration—a Methodology to Enhance Production and Maximize Economics in Horizontal Marcellus Shale Wells. paper SPE 135262 presented at the 2010 SPE ATCE, Florence, Italy, 19-22 September.

Kazemi, H., Merrill JR. L. S., Porterfield, K. L. and Zeman, P. R. 1976. Numerical Simulation of Water-oil Flow in Naturally Fractured Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal* **16**(6): 317-326. SPE 5719.

Lewis, A. M. and Hughes, R. G. 2008. Production Data Analysis of Shale Gas Reservoirs, paper SPE 116688 presented at the 2008 SPE ATEC, Denver, 21-24 September.

Mattar, L., Morad, K., Clarkson, C. R., Freeman, C. M., Ilk, D. and Blasingame, T. A. 2008. Production Analysis and Forecasting of Shale Gas Reservoirs: Case History-Based Approach. paper SPE 119897 presented at the 2008 SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, 16-18 November.

Michael, D. 2002. A Comprehensive Reservoir Evaluation of a Shale Reservoir – the New Albany Shale. paper SPE 77469 presented at the 2002 SPE ATCE, Texas, 29–2 September.

Oda, M. 1985. Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses, *Geotechnique*, **35**: 483.

Prada, J. W. and Cunha, L. B. 2008. Prediction of SAGD Performance using Response Surface Correlation developed by Experimental Design Techniques, *JCPT* 47(9): 68-64.

Siripatrachai, N. and Ertekin, T. 2012. Alternate Representations in Numerical Modeling of Multistage Hydraulically Fractured Horizontal Wells in Shale Gas Reservoirs. paper SPE 153813 presented at the SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 19-23 March.

Warren, J. E. and Root, P. P. 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoir. paper SPE 426 presented at the Transaction AIME.

Zhang, X. 2009. Sensitivity Studies of Horizontal Wells with Hydraulic Fractures in Shale Gas Reservoirs. paper IPTC 13338 presented at 2009 International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, 7-9 December.

## Abstract

Shale gas is natural gas stored in low permeability shale formation. Even though technological enhancement of horizontal drilling and multi-stage hydraulic fracturing has made economic feasibility, it is expensive to produce shale gas because of high cost of production and low ultimate recovery of 5~15%. For this reason, there is growing need of decision making based on production prediction for effectively designed multi-stage hydraulic fracturing. Earlier studies on shale gas production modeling use initial production rate to predict ultimate cumulative production, which is hard to be practically utilized ahead of hydraulic fracturing operations. Other studies need a huge amount of input data.

In this study, hybrid model is applied to response surface method(RSM) and a new production modeling is developed to predict shale gas cumulative production. Hybrid model is a numerical model which combines discrete fracture model and dual porosity · dual permeability model. This reflects the production mechanism of shale gas reservoir such as desorption, diffusion, and transient flow, and anisotropy of fractured reservoir.

Regulation on RSM design of experiment helps to test less number of data than other modeling method such as artificial neural network. For the purpose of selecting the most impactful parameters on shale gas production, sensitivity analysis is conducted for parameters such as reservoir properties and multi-stage hydraulic fracturing design factors. Hydraulic fracture spacing, height, and half-length are in order of importance. RSM is developed using the three effective parameters. For the design of experiment used for RSM, three-level factorial design and quadratic polynomial model with cross terms are the most

reliable as its  $R^2$  value is higher and error is lower than other models. The production modeling using response surface appears to be credible since its  $R^2$  value is 0.9828 and average error is 1.34%.