creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

dCollection

공학석사학위논문

모델 선정법을 이용한 셰일가스 저류층 균열 특성화

Characterization of Fractures in Shale Gas Reservoirs by a Model Selection Approach

2016년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

임 지 훈

초 록

셰일가스 저류층에서 생산량에 영향을 주는 가장 큰 요소는 인공균열과 자연균열의 연결성이다. 인공균열과 자연균열은 독립된 균열의 특성인 개체특성과 균열들의 분포를 나타내는 공간분포특성으로 표현한다. 인공균열과 자연균열의 특성에 따라 나타나는 균열 연결성의 변화는 저류층 내 유체의 유동반경과 유동량에 영향을 준다. 셰일가스 저류층의 생산량은 균열 연결성에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 주어진 자료 내에서 각각의 인자들을 정량화할 필요가 있다.

기존의 연구방법은 인공균열과 자연균열을 동시에 고려하지 않거나 균열의 개체특성 또는 공간분포특성을 가정하여 분석의 대상을 제한하는 방법으로 균열들의 특성화를 진행하였다. 이러한 제한된 특성화는 형성되는 인공균열과 자연균열의 연결성을 충분히 반영하지 못하기 때문에 불안정한 예측성능을 보였다.

이 연구에서는 셰일가스 저류층의 인공균열과 자연균열 연결성, 모두를 고려하여 각 균열의 인자를 정량화하는 균열 특성화 방법을 개발하였다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우로 나누어 거리기반 일반 민감도 분석기법으로 각각의 민감도를 분석하여, 민감도 수치가 높은 균열 특성만을 고려하였다. 또한 각 경우에 대해 모델 생성 방식을 달리한 모델 선정법으로 인공균열과 자연균열의 인자를 정량화하였다. 제안한 방법은 모델 수를 최소화하고 참값에 대한 정량적인 정확도를 높일 수 있었다.

주요어: 자연균열, 인공균열, 균열 집중성, 거리기반 일반 민감도 분석, 모델 선정법

학 번: 2014-20527

목 차

초 록 ····· i
List of Tables ····· iii
List of Figures ····· v

1. 서 론 ····· 1

2. 이론적 배경 ····· 8
2.1 균열 특성 ····· 8
2.2 균열 모델 ····· 16
2.3 거리기반 일반 민감도 분석 ····· 24
2.4 모델 선정법 ····· 28

3. 민감도 기반 균열 모델 선정법 개발 ····· 35

4. 연구 결과 ····· 37
4.1 유동모사를 통한 균열 연결성 평가 ····· 37
4.2 자연균열 집중성에 다른 생산량 민감도 평가 ····· 59
4.3 공간적 균열분포에 따른 모델 선정법 효과 분석 ····· 63

5. 결론 ····· 87

참고 문헌 ····· 90
ABSTRACT ····· 95

List of Tables

Table 2.1 Measure for fracture intensity (Dershowitz and Herda, 1992) ····· 13
Table 4.1 Reservoir data of the reference field ····· 38
Table 4.2 Fracture data of the reference field ····· 39
Table 4.3 Initial gas production rate as sum of half-length of artificial fractures ····· 43
Table 4.4 Initial gas production rate as same half-length of artificial fractures and different natural fracture locations ····· 50
Table 4.5 30 cases: Initial gas production rate as same sum of half-length of artificial fractures and different natural fracture locations ····· 55
Table 4.6 Ranges of fracture parameters for DGSA at high natural fracture intensity ····· 61
Table 4.7 Ranges of fracture parameters for DGSA at low natural fracture intensity ····· 61
Table 4.8 Ranges of fracture parameters for model selection at high natural fracture intensity ····· 65
Table 4.9 Values of fracture parameters for reference at high natural fracture intensity ····· 65
Table 4.10 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 69
Table 4.11 Ranges of fracture parameters for model selection at low natural fracture intensity ····· 73
Table 4.12 Values of fracture parameters for reference2 at low na

tural fracture intensity ····· 73
Table 4.13 Values of fracture parameters of selected models (1: I ntensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 77
Table 4.14 Values of fracture parameters for reference3 at low na tural fracture intensity ····· 82
Table 4.15 Values of fracture parameters of selected models (1: I ntensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 84

List of Figures

Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoirs (박영숙, 2013) ····· 5
Figure 2.1 Cumulative gas production on various trends ····· 11
Figure 2.2 Cumulative gas production on various intensities ····· 14
Figure 2.3 Classification of continuum models in a fractured reservoir (Al-Huthali and Datta-Gupta, 2004) ····· 20
Figure 2.4 Schematic diagram of dual porosity (Golf-Racth, 1982) ····· 20
Figure 2.5 Idealization of a fractured system (Warren and Root, 1963) ····· 23
Figure 2.6 Distance map of DGSA for 3 clusters ····· 26
Figure 2.7 Sensitivity for input parameters at each cluster ····· 26
Figure 2.8 Parameter x probability distribution function at each cluster ····· 27
Figure 2.9 Distance-based generalized sensitivity of parameter x, y, and z ····· 27
Figure 2.10 Effectiveness of clustering: a) actual data points used for the demonstration, and there are clearly 4 clusters points in this case, b) plot of effectiveness of clustering versus the number of clusters shows a kink at 4 which is the correct number of clusters (Bhowmik, 2014) ····· 31
Figure 2.11 Uncertainty envelopes around reference data. The Production data of on reservoir model falls within the 66% probability envelope (Mantilla, 2010) ····· 34
Figure 3.1 Flow chart of the proposed method ····· 36

Figure 4.1 5 types of natural fracture location ····· 42
Figure 4.2 Artificial fractures at Figure 4.1 (a) natural fracture distr ibution ····· 42
Figure 4.3 Initial gas production rate at 6 cases of Table 4.3 ···· 45
Figure 4.4 Discrete fracture network models: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3 ····· 45
Figure 4.5 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3 ····· 46
Figure 4.6 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 year s, and (d) 10 years of Case 1 of Table 4.3 ····· 47
Figure 4.7 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 year s, and (d) 10 years of Case 6 of Table 4.3 ····· 48
Figure 4.8 Initial gas production rate at 5 cases of Table 4.4 ···· 51
Figure 4.9 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4 ···· ····· 52
Figure 4.10 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1, (b) Cas e 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4 ····· 53
Figure 4.11 Initial gas production rate of Case 1 and Case 18 of Table 4.5 ····· 57
Figure 4.12 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5 ····· 58
Figure 4.13 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5 ····· 58
Figure 4.14 Sensitivity by DGSA at high natural fracture intensity ····· 62
Figure 4.15 Sensitivity by DGSA at low natural fracture intensity

····· 62
Figure 4.16 Gas production rate record of reference1 ····· 66
Figure 4.17 Gas production rate of initial models and reference1 ····· 68
Figure 4.18 Gas production rate of selected models and reference 1 ····· 68
Figure 4.19 Cumulative gas production of selected models and ref erence1 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 70
Figure 4.20 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference1 EUR) ····· 71
Figure 4.21 Gas production rate record of reference2 ····· 74
Figure 4.22 Gas production rate of initial models and reference2 ····· 76
Figure 4.23 Gas production rate of selected models and reference 2 ····· 76
Figure 4.24 Cumulative gas production of selected models and ref erence2 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 78
Figure 4.25 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference2 EUR) ····· 79
Figure 4.26 Gas production rate record of reference3 ····· 82
Figure 4.27 Gas production rate of initial models and reference3 ····· 83
Figure 4.28 Gas production rate of selected models and reference 3 ····· 78
Figure 4.29 Cumulative gas production of selected models and ref

erence3 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 85
Figure 4.30 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference3 EUR) ····· 86

1. 서 론

지속적인 에너지 수요의 증가와 전통적인 석유자원의 고갈로 셰일가스, 셰일오일, 오일샌드, 가스 하이드레이트 등의 비전통 석유자원의 개발과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 셰일가스는 세계적으로 풍부한 가채매장량과 비편재된 분포로 향후 중요 에너지 자원으로 인식되고 있다. 셰일가스는 유기물과 함께 퇴적된 셰일층에 존재하는 천연가스이다. 셰일층의 낮은 유체투과도는 생성된 천연가스의 확산을 지연시킨다.

셰일층은 공극률과 유체투과도가 매우 낮아 자연 상태에서 유체 유동이 거의 일어나지 않는다. 일반적인 천연가스 회수 방법은 적용이 어렵기 때문에 수평시추와 다단계 수압파쇄기법을 적용하여 생산한다. 다단계 수압파쇄기법은 셰일가스 생산을 위해 셰일층에 고압의 파쇄수로 인공균열을 만드는 방법이다. 파쇄수는 프로판트(proppant), 화학 물질 등과 함께 지층에 단계적으로 인공균열을 생성한다. 생성된 인공균열은 셰일층 내의 자연균열과 연결되어 균열망(fracture network)을 만든다. 주입된 프로판트는 파쇄 이후 생긴 균열의 유지를 위해 사용된다.

셰일가스 생산은 전통 가스 저류층의 회수율인 80-90%에 비해 비교적 낮은 5-15%의 회수율을 가진다(Cipolla와 Lolon, 2010). 셰일가스 저류층은 수평정 시추 및 다단계 수압파쇄기법으로 인하여 개발 및 생산설비의 비용이 높다. 셰일층은 높은 취성도로 수압파쇄에 유리한 조건을 가지고 있지만 인공균열 및 자연균열과의 균열망 형성 예측이 어렵다. 개발의 과정에서

인공균열과 자연균열의 특성화를 통해 연결성을 파악하는 것은 향후 생산거동 예측과 의사결정에서 필수적이다.

셰일가스 저류층 내의 유동양상은 흡착가스의 탈착 및 확산, 매질 내 자유가스의 확산, 균열 내 유동으로 나타난다. 흡착가스는 압력이 강하될 때, 셰일 매질 내 유기물질의 표면에서 가스가 탈착되며 생긴다. 탈착된 가스와 자유가스는 Figure 1.1과 같이 매질에서 공극을 따라 균열면에 도달할 때까지 확산을 통해 이동한다. 균열에 도달한 가스는 압력이 상대적으로 낮은 유정으로 이동되어 생산이 이루어진다.

셰일가스 저류층 내의 유체유동은 대부분 균열을 통한다. 생산거동을 예측하기 위해 정확한 균열망의 분포와 균열의 속성 값을 알아내야 한다. 탄성파자료나 시추자료를 통한 균열 정보와 노두조사 자료는 한정적이지만 자연균열의 개체특성인 자연균열 방향성, 간극, 길이 등을 일정범위 내에서 한정할 수 있다. 수압파쇄 과정에서 얻는 미소지진(microseismic) 자료는 생산자료 없이 균열분포를 유추할 수 있다. 하지만 저류층 내의 균열망의 세부 속성 값을 파악하는 것이 어렵고, 불확실성이 크다. 신뢰성 있는 균열속성을 예측하고 생산거동의 불확실성을 감소시키기 적합한 균열 모델을 찾아야 한다.

Ouenes 등(1995)는 인공신경망을 이용하여 자연균열의 집중성을 특성화하는 것으로 셰일가스 저류층의 유동성을 파악했다. Suzuki 등(2005)은 확률변화법(Probability-Petrurbation method)로 자연균열의 집중성과 방향성을 특성화하고 저류층에서의 가스 유동을 설명했다. Hu와 Jenni (2005)는 참거짓 시뮬레이션(Boolean simulation)을 이용한 점진적 변형법(Gradual Deformation

method)으로 자연균열의 위치와 집중성을 전통 석유자원 저류층에 적용하여 특성화했다. Cui와 Kelkar (2005)는 코어 자료, 로깅 자료, 탐사를 통한 유전 전체 정보, 구조적 지질학적 정보 등을 이용하여 자연균열 집중성을 파악하고 이를 통해 균열의 유체투과율과 균열-매질 연결인자를 계산했다. Mattar 등(2008)은 다단계 수압파쇄법이 적용된 수평정을 대상으로 생산량 감퇴곡선 분석 및 생산량 예측을 시행했다. 단일공극 저류층에 단상의 유체가 거동한다는 가정 하에 멱함수지수를 이용한 생산량 감퇴곡선 분석을 실시했다. Cipolla 등(2009)은 수평정을 시추했을 때, 생산성 향상을 위해 고려해야 할 인자로써 파쇄전도도, 파쇄간격, 파쇄길이 등을 제시했다. 초기 전도도가 낮은 저류층에서 수압파쇄 간격을 줄여 균열망의 복잡성과 유정자극범위(Stmulated Reservoir Volume, SRV)를 증가시킬 경우 생산성 및 회수율이 크게 향상될 것으로 예측했다. 그러나 셰일가스 저류층의 자연균열에 따른 이방성과 비균질성을 고려하지 않았다. Bello (2009)는 천이유동분석(Rate Transient Analysis, RTA)를 이용하여 셰일가스 저류층에서의 인공균열 반길이, 균열-매질 접촉 면적 등의 인자를 특성화했다. Kalantari-Dahaghi (2010)는 셰일가스 저류층 가스 회수율 증가를 위한 이산화탄소 주입 최적화에서 균열 특성에 대한 민감도 분석을 수행했다. 미소지진파 자료는 수압파쇄 작업에 의해 균열이 생성될 때 발생하는 지진파를 수집하여 얻는다. 이를 역산하여 균열의 위치와 길이 등의 속성 값을 추정한다. Zimmer (2011)는 미소지진파 자료를 이용하여 유정자극범위를 계산하는 방법을 제안했다. Ghods와 Zhang (2012)는 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter, EnKF)를 사용해 치밀가스 및 셰일가스 저류층의

균열특성화를 수행했다. 이중공극·이중유체투과도(dual porosity·dual permeability, DPDP)모델 기반의 저류층을 구성하고 인공균열대를 각각 독립적인 개체로 가정하여 서로간의 영향을 배제했다. 4개월의 물과 가스 생산 자료를 사용해 히스토리 매칭을 수행했다. Morales-German 등(2012)은 통계분석과 시뮬레이션을 통해 셰일가스 저류층의 생산거동 예측을 수행하였고, 균열 인자에 대한 민감도 분석을 수행했다. 인공균열 반길이와 자연균열 유체투과도, 공저압력, 유정 길이 순으로 높은 민감도를 가졌으며, 자연균열의 특성보다 인위적으로 형성된 특성에 대한 고려를 통한 분석을 했다. Cherpeau 등(2012)은 유체 생산 정보를 통해 추계학적 역산 모델링을 수행하고 이를 몬테카를로 마르코프 체인(Monte Carlo Marcov Chain, MCMC)로 단층의 방향성, 위치, 크기, 곡률 등을 특성화하고 단층간 연결성을 분석했다. Nejadi 등(2012)은 앙상블칼만필터를 이용하여 치민가스 저류층의 자연균열 특성화를 수행했다. Nejadi 등(2015)는 미소지진파 자료를 활용한 앙상블칼만필터 히스토리 매칭을 했다. 균열의 특성을 다양하게 고려하는 시도가 있었지만, 많은 부분에서 가정을 적용했고, 자연균열 위치에 따른 인공균열과의 연결성에 대한 고려가 부족하여 특성화와 향후생산거동 예측에서 불안정한 결과가 나타나는 한계가 있었다.

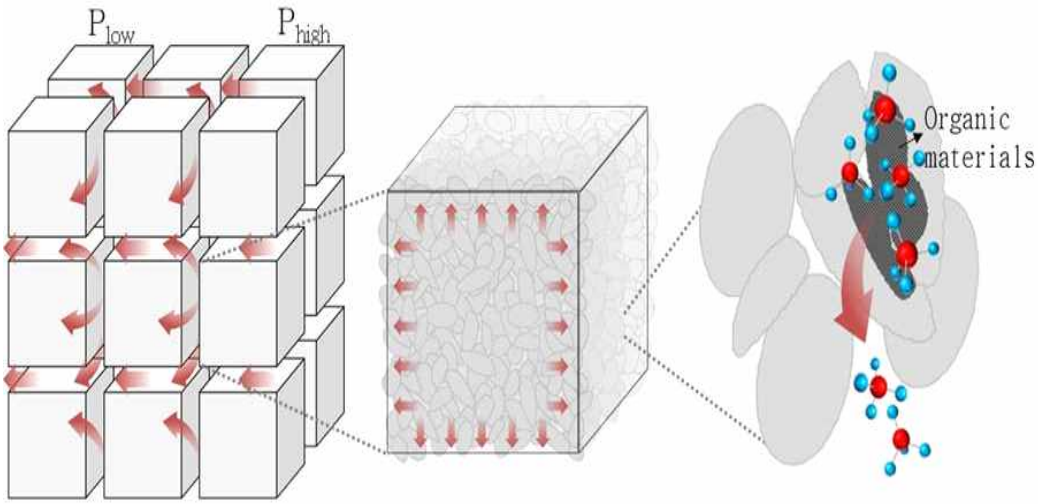


Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoirs (박영숙, 2013).

기존 연구의 한계점은 다음과 같다.

1) 자연균열과 인공균열의 연결성에 대한 고려가 부족했다. 셰일가스 생산에서 저류층 내의 유체 유동통로로 사용되는 균열은 서로간의 연결성이 극대화 되었을 때 최대의 생산량을 보일 수 있다. 균열들의 공간분포특성이 반영되지 않아 연결성과 이에 따른 유동반경과 유동성의 차이가 균열 특성화에서 나타나지 않을 경우, 실제 균열 인자들의 값을 불안정하게 정량화하고, 향후 생산거동 예측 성능도 감소하게 된다.

2) 자연균열 집중성에 따른 균열 특성의 민감도 분석이 이루어지지 않았다. 자연균열 집중성이 높은 경우 균열간의 연결이 이미 진행되어 있기 때문에 자연균열의 위치에 대한 고려가 충분하지 않아도 다른 균열 특성이 강조된 특성화를 수행할 수 있다. 하지만 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열의 공간분포 특성의 중요성은 높아지며 이에 따른 연결성과 유체 유동성의 변화를 고려해야 한다.

3) 기존의 균열 특성화와 생산거동 예측은 균열 특성의 민감도를 고려하지 않았다. 균열을 구성하는 특성의 수가 많아질수록 고려해야 하는 인자가 많아지기 때문에 특성화를 진행할 때 초기 모델의 수가 많아지게 된다. 초기 모델의 수가 과도하게 많아지면, 연산 시간이 오래 걸리고 지역 최소화(local minimum)로 인해 특성화 성능이 감소한다. 따라서 각 인자들의 민감도를 고려한 가중치 부여 형식의 특성화가 필요하다.

셰일가스 저류층의 인공균열과 자연균열이 이루는 균열망의

속성은 향후 생산거동을 예측하는데 중요한 요소로 작용한다.

모델 선정법은 가능한 속성 인자의 변화에 따른 모델을 다수 만들어 가장 실제 생산거동에 가까운 모델을 선정하는 방법이다. 이 연구에서는 자연균열과 인공균열의 개체특성과 공간분포특성을 균열망의 속성 인자로 하여 다수의 모델을 만들었다. 민감도에 따라 생성되는 모델들은 균열 특성에 따라 클러스터링 되어 분류된다. 각 클러스터의 대표모델을 시뮬레이션한 결과와 가상의 참조 셰일 저류층 생산 자료를 비교하여 거동이 유사한 대표모델이 속한 클러스터를 선택하는 방식으로 모델 선정법을 진행한다.

반복적인 클러스터 선정을 통해 가상의 참조 셰일 저류층의 가스 생산 거동과 유사한 모델들로 균열을 특성화한다. 선정된 모델들을 이용하여 향후 생산 거동 예측을 수행한다.

2. 이론적 배경

2.1 균열 특성

셰일가스 저류층에서 균열 특성은 개체특성(individual characteristic)과 공간분포특성(spatial distribution characteristic)으로 나눌 수 있다. 균열 개체특성은 단일 균열을 정의할 수 있는 속성으로 자연균열 간극, 길이, 방향성을 포함한다. 균열 공간분포특성은 저류층 내의 다수의 균열이 형성하는 특성으로 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이를 의미한다. 여기서 인공균열 반길이가 자연균열 길이와 다르게 공간분포특성에 포함되는 이유는 인공균열은 인위적으로 자연균열과의 공간적 연결성을 위해 형성하는 것이기 때문이다. 각각의 특성은 수압파쇄대의 성장 및 연결성과 관련이 있으며, 이러한 연결성은 셰일가스 저류층의 생산거동에 큰 영향을 미친다.

2.1.1 균열 개체특성

균열 개체특성은 자연균열의 간극, 길이, 방향성 등의 단일한 균열의 특성을 의미한다.

자연균열의 방향성은 지층면에 대한 주향(strike)과 경사(dip)로 분류한다. 주향은 지층면과 수평면이 만나 이루는 선의 방향성을 진북을 기준으로 측정한 각이다. 지층에서 경사의 방향성은 주향과 직각이 되며, 관측 지점에서 측정한 수직각을 경사각이라고 한다.

분리균열모델에서 균열의 방향성은 선주향(trend)과 선경사(plunge)로 표시된다. 균열의 축이 가리키는 방향을 pole로 지정한다. pole의 수평면에 대한 정사영과 북쪽 방향성이 만드는 각도를 선주향이라 한다. 선경사는 pole이 수평면과 만드는 각도이다. 방향성을 나타내는 각 용어들의 관계는 식 (2.1), (2.2)와 같다.

$$trend = strike - 90^\circ = dip\ azimuth - 180^\circ \tag{2.1}$$

$$plunge = 90^\circ - dip \tag{2.2}$$

균열의 방향성은 대표적으로 Fisher 분포를 이루는 것으로 가정한다. Fisher 분포는 식 (2.3)의 확률밀도함수로 표현된다(Fisher, 1953). 균열의 방향성이 분포인자 κ와 평균 경사 θ를 따른다. Fisher 분포는 자연균열방향성의 분포를 생성하는데 가장 많이 쓰인다. 분포인자는 5-50 범위로 쓰인다. 0일 때 균열이 전 방향성으로 임의의 분포를 보이고, 값이 양수로 커질수록 같은 방향성으로 분포한다.

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

다른 균열 특성 값은 고정하고, Fisher 분포에서 선주향을 변화시키며 셰일가스 저류층의 10년 기간의 누적 가스 생산량은 Figure 2.1과 같다. 균열방향성의 범위는 0-180°로 10°의 간격을 가진다. 인공균열의 선주향은 90°이다. 자연균열의 방향성과

관련하여, 인공균열과 직각을 이루는 0°(=180°)에서 누적 가스 생산량이 최대로 나타나고, 인공균열과 같은 방향성의 선주향 90°에 가까울수록 누적 가스 생산량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 인공균열과 수직일수록 더 많은 수의 자연균열과 균열망을 이룰 수 있기 때문에 생산 가스량도 증가하는 것으로 볼 수 있다.

균열 간극은 하나의 균열을 일종의 틈으로 보고, 해당하는 틈의 길이를 의미한다. 간극이 클수록 유체의 유동채널이 넓어짐을 의미하고, 이는 유체투과도의 증가로 이어진다. 균열의 개체특성으로써 단일 균열에 대한 유동성과 균열 간극은 비례한다고 볼 수 있다.

균열의 길이는 유체의 유동 채널의 길이를 의미하는 것으로 균열 간극에서 설명한 틈의 수직적인 의미로 볼 수 있다. 균열의 길이가 긴 것과 저류층 내의 가스 유동성이 비례하지는 않는다. 하지만 매질로부터 연결되는 범위가 균열의 길이만큼 확장되기 때문에 유동량을 증가시키는 역할을 하고, 공간적으로는 다른 균열과의 연결 확률을 높이기 때문에 균열의 길이는 일반적으로 세일가스 저류층에서 가스 생산량을 증가시키는 요소로 작용한다.

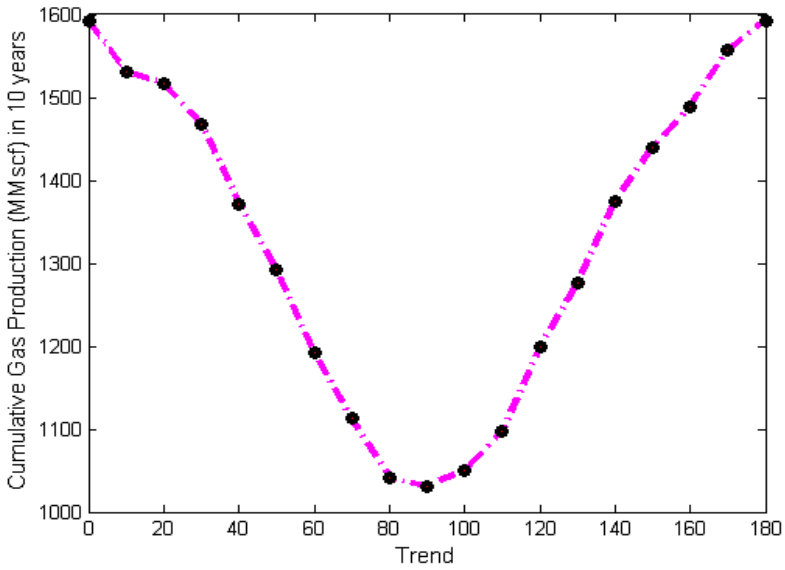


Figure 2.1 Cumulative gas production on various trends.

2.1.2 균열 공간분포특성

균열 공간분포특성은 다수의 균열들이 집합적으로 공간 내에서 이루는 특성으로 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이다.

균열의 집중성은 균열과 매질간의 선, 면, 부피의 비율로 특정지을 수 있다. Table 2.1은 매질 대비 균열의 양 또는 비율을 결정하는 기준을 분류한다. 매질을 측정하는 차원을 a, 균열의 차원을 b라고 할 때, P_{ab}로 표기한다(Dershowitz와 Herda, 1992).

균열 저류층 시뮬레이션에서 주로 P_{10}, P_{32}, P_{33}을 균열 기준으로 사용한다. P_{10}은 임의의 측정선과 교차하는 균열의 빈도를 의미하며, 선형균열 강도라고 한다. P_{32}는 단위부피 내에 존재하는 균열의 면적을 의미하며, 면적균열밀도라고 한다. P_{33}은 부피균열밀도로, 단위부피 내에 존재하는 균열 부피를 의미한다.

균열망의 크기는 유정자극범위와 비례하며, 이는 가스 생산량과 비례한다. 자연균열의 집중성이 커질수록 유정자극범위가 늘어나 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 생산량 평가에 영향을 주는 자연균열의 요소로서 균열의 집중성을 중요한 속성으로 설정해야 한다.

다른 균열 특성 값은 고정하고, P_{32} 기준 지표의 집중성을 변화시켜 셰일가스 저류층의 10년 기간 누적 가스 생산량을 비교한 결과는 Figure 2.2와 같다. 집중성의 범위는 0.01-0.09로 0.01 간격이다. 집중성이 증가할수록 누적 가스 생산량이 증가한다.

Table 2.1 Measure for fracture intensity (Dershowitz and Herda, 1992)

		Dimension of features			
		0	1	2	3
Dimension of sampling region	0 (point)	P_{00}: Number of fracture samples per point sample rock mass [-]			
	1 (linear)	P_{10}: Number of fractures per unit length of scanline or borehole [L^{-1}]	P_{11}: Length of intersects fractures per unit length of scan line[-]		
	2 (areal)	P_{20}: Number of trace centers per unit sampling area [L^{-2}]	P_{21}: Length of fracture traces per unit sampling area [L^{-1}]	P_{22}: Area of fractures per unit sampling area[-]	
	3 (volumetric)	P_{30}: Number of fracture centers per unit rock volume [L^{-3}]		P_{32}: Area of fractures per unit volume of rock mass [L^{-1}]	P_{33}: Volume of fractures per unit volume of rock mass [-]

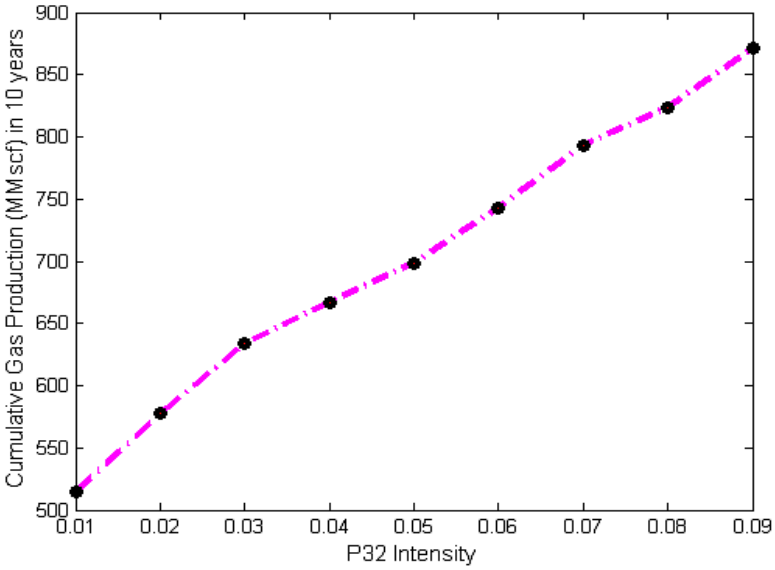


Figure 2.2 Cumulative gas production on various intensities.

균열 공간분포특성은 균열간의 연결성에 대해 큰 영향을 주는 인자로, 자연균열 집중성은 연결성에 비례하게 나타나지만, 자연균열 위치와 인공균열 반길이는 완전한 비례관계라고 할 수 없다. 자연균열 집중성과 다른 개체특성이 모두 동일한 값을 가져도 자연균열 위치와 여러 단계의 인공균열 반길이의 분포는 공간의 특성으로써 해당 인자의 수치와 연결하여 가스 생산량을 예측할 수 없으며, 이는 연결성을 구성하는 중요한 요소로 작용하지만 특성화하기 어려운 요소이다. 4장에서 이러한 공간분포특성과 저류층내 유체의 유동성에 관한 분석과 모델 선정법을 이용해 다수의 모델로서 해당 특성을 정량화하는 시도를 나타낼 것이다.

2.2 균열 모델

셰일가스 저류층은 매질과 매질 사이의 균열을 통한 가스의 탈착과 유동으로 가스의 생산이 이루어진다. 매질에 흡착되어 저장되는 가스는 압력이 낮아지면 탈착된다. 이 때 가스는 매질의 유기물질에 흡착되므로 유기물질의 함량이 높을수록 흡착하는 가스의 양이 많아진다. 탈착된 가스와 매질 내에 저장되어 있던 가스는 확산을 통해 균열면으로 이동한다. 자연균열은 균열 내부에 가스를 저장하고, 생산시 가스 유동의 통로가 된다. 셰일가스 저류층은 매질의 유체투과도가 매우 작기 때문에 매질간 유동성이 낮다. 생산 가스의 대부분은 수압파쇄대의 성장과 자연균열과의 연결성으로 형성된 균열망에 큰 영향을 받는다.

이번 연구에서는 셰일가스 저류층의 연결성을 모사하기 위해 분리균열(discrete fracture network, DFN)모델과 등가연속체모델의 DPDP모델을 함께 적용하는 혼성모델을 사용했다. 혼성모델은 분리균열모델의 사실적인 자연균열 모사와 DPDP모델의 유체거동 모사를 동시에 고려한다. 분리균열모델을 통해 자연균열의 방향성, 간극, 길이, 집중성, 균열간 간격 및 위치를 반영한 저류층을 생성한다. 분리균열모델에서 생성된 균열 저류층을 Oda 방법(Oda, 1985)으로 업스케일링한다. 각 격자의 x, y, z 방향의 균열 유체투과도와 해당 격자의 균열 공극률이 DPDP모델에 적용된다. 매질 내 비정상흐름, 매질과 균열 사이의 유동, 균열 내에서의 유체 유동을 모사한다. Langmuir 등온선을 적용하여 압력과 온도에 따른 유기물에서 흡착 및 탈착되는 가스의 거동을 반영한다.

2.2.1 분리균열모델

분리균열모델은 다양한 스케일의 균열을 서로 다른 기하학적 분포로 암반에 불연속적으로 생성하는 모델이다(정승필, 2008). 코어분석, 물리검층, 노두조사, 탄성파 탐사자료 등 실측자료를 바탕으로 균열을 생성하며 추계학적 방법을 이용하므로 단일 해를 도출하지 않는다. 위치, 방향성, 크기 등 실제 균열의 특성을 반영한 균열 저류층을 생성한다.

분리균열모델의 개념모델은 Enhanced-Baecher, Levy-Lee, Nearest Neighbor가 있다. Baecher 모델은 균열 중심을 저류층 시스템 내에 포아송 분포로 위치시키고, 균열의 모양을 원형판 또는 타원형으로 나타낸다. Enhanced-Baecher 모델은 균열을 다각형 형태로 모사하고, 중심위치, 방향성, 길이 등의 입력 자료로 균열을 생성한다. Levy-Lee 모델은 프랙탈 형태의 Levy flight 과정으로 균열을 생성한다. Levy-Lee 모델을 통해 자연균열의 간격을 조정함으로써 균열의 위치를 정량화할 수 있다. Nearest Neighbor 모델은 주요 균열들을 선정하고 이에 대해 거리가 멀어질수록 균열집중성이 지수함수적으로 줄어드는 방식으로 균열을 생성한다. 저류층 시스템 내에서 각 지점이 균열생성 지점이 될 확률을 가지게 된다.

이번 연구에서는 Levy-Lee 모델을 사용했다. 자연균열의 개체특성과 공간분포특성을 정량화하여 나타낼 수 있는 모델이기 때문에 자연균열이 가지는 현실적인 특성을 구현할 수 있다. 특히 저류층 내 자연균열들의 불균질성을 Levy-Lee 모델의 인자중 하나인 차원(dimension)으로 나타낼 수 있다.

2.2.2 이중공극·이중유체투과도모델

등가연속체모델은 균열 저류층의 유체유동을 해석하기 위해서 하나의 격자의 균열의 공극률, 유체투과도와 매질의 공극률, 유체투과도를 따로 할당하는 것이다(Warren과 Root, 1963). 이때 균열과 매질 사이에 유체유동 유무에 따라 세 가지 방식으로 분류한다. 단일공극·단일유체투과도(single porosity·single permeability, SPSP)모델은 유체가 균열에만 존재하여 균열을 통해서만 이동한다고 가정한다. 이중공극·단일유체투과도(dual porosity·single permeability, DPSP)모델은 균열을 통해서만 유체유동이 일어나지만, 매질과 균열이 유체의 저장 공간의 근원이 되는 것으로 가정한다. 이중공극·이중유체투과도(dual porosity·dual permeability, DPDP)모델은 유체유동이 균열뿐만 아니라 매질 사이에서도 이루어지고 균열과 매질 간에 물질 전달이 일어나는 것으로 가정한다. 등가연속체모델의 세 가지 분류는 Figure 2.3에 나타냈다.

DPDP모델에서 매질과 균열의 공극률은 Figure 2.4와 같이 나타난다. 전체 공극률(ϕ_t)은 전체 암석의 부피에 대한 매질공극의 부피인 일차공극률(ϕ_1)과 전체 암석의 부피에 대한 균열공극의 부피인 이차공극률(ϕ_2)의 합이다(식 2.4). 매질공극률(ϕ_m)은 전체 매질에 대한 매질공극의 부피이다(식 2.5), 균열공극률(ϕ_f)은 이차공극과 값을 동일하게 한다(식 2.6).

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2 \tag{2.4}$$

$$\phi_1 = (1-\phi_2)\phi_m \tag{2.5}$$

$$\phi_2 \approx \phi_f \tag{2.6}$$

매질과 균열이 있는 시스템에서 유체투과도(k_{mf})은 매질 유체투과도(k_m)과 매질과 연관된 균열의 유체투과도(k_{eff})의 합이다. 이 때 k_{eff}는 매질에 있는 전체 균열과 그 연결성에 의한 유체투과도를 나타낸다.

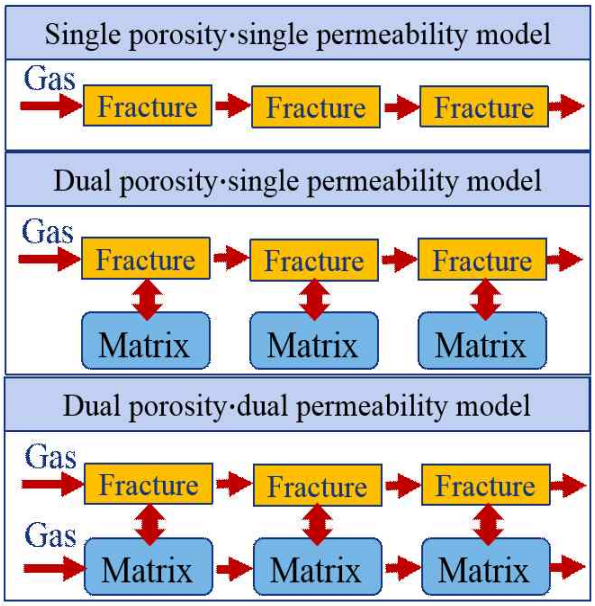


Figure 2.3 Classification of continuum models in a fractured reservoir (Al-Huthali and Datta-Gupta, 2004).

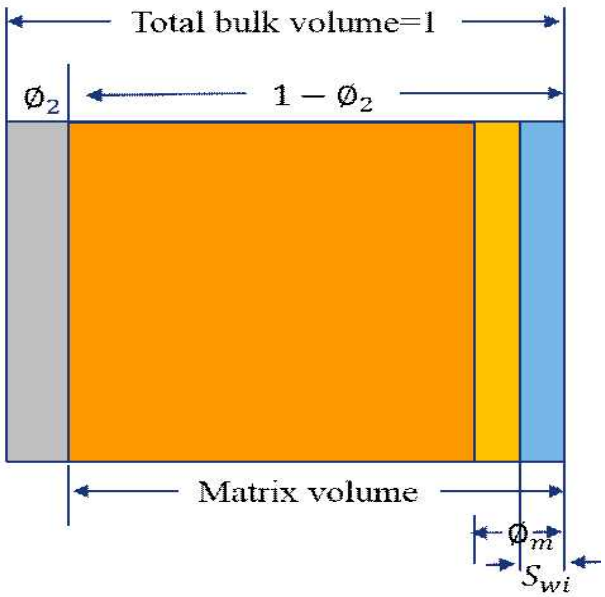


Figure 2.4 Schematic diagram of dual porosity (Golf-Racth, 1982).

2.2.3 혼합 모델

이번 연구에서는 균열의 유체투과도를 매질과 연관된 균열의 유체투과도로 한정한다. 분리균열모델에서 생성된 자연균열 저류층을 DPDP모델로 전환한다. 분리균열모델과 DPDP모델의 형태는 Figure 2.5와 같다.

Oda는 임의의 균열망을 유체투과도 텐서로 계산하는 해석적인 방법을 제시했다(Oda, 1985). 식 (2.7)은 Oda 방법에서 격자 내에서 균열들의 방향성을 단위법선벡터로 고려하여 균열의 법선벡터들의 관성모멘트를 구하는 식이다. N은 균열의 개수, n_i, n_j는 균열 n의 단위법선벡터, $E(n)$은 단위법선벡터 n을 가지는 균열의 수를 나타내는 확률밀도함수이다. Ω는 단위구면에서 평면이 상응하는 각이다.

$$N = \int_{\frac{\Omega}{2}} n_i n_j E(n) d\Omega \tag{2.7}$$

식 (2.8)을 이용하여 각 방향성의 균열텐서는 균열면적과 균열의 투수계수의 부피가중평균으로 계산한다.

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N} A_k T_k n_{ik} n_{jk} \tag{2.8}$$

T는 균열의 투수계수, A는 균열의 단면적, n_{ij}는 균열의 단위법선벡터를 나타낸다. 단일균열의 투수계수는 균열간극 b의

세제곱에 비례하며 식 (2.9)와 같다.

$$T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \tag{2.9}$$

유체투과도 텐서는 균열텐서 F_{ij}로 식 (2.10)과 같이 표현된다. k_{ij}는 유체투과도 텐서, δ_{ij}는 Kronecker 델타이다.

$$k_{ij} = \frac{1}{12}(F_{kk}\delta_{ij} - F_{ij}) \tag{2.10}$$

이 때 매질-균열연결인자(matrix-fracture coupling factor, σ)는 매질부피와 균열면 넓이의 비가 균열과 매질 사이의 물질전달에 미치는 영향의 척도이며 식 (2.11)로 계산된다. l_x, l_y, l_z는 분리균열모델의 각 격자에서 x, y, z방향성으로의 평균 선균열 집중성 거리를 의미한다.

$$\sigma = 4(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2}) \tag{2.11}$$

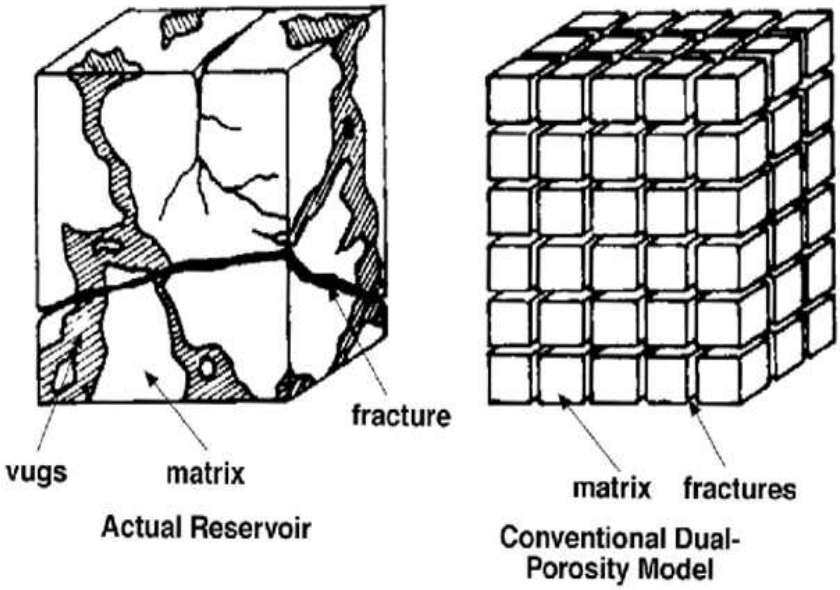


Figure 2.5 Idealization of a fractured system (Warren and Root, 1963).

2.3 거리기반 일반 민감도 분석

거리기반 일반 민감도 분석(Distance-based Generalized Sensitivity Analysis, DGSA) 기법은 균열 인자들의 상호적인 관계에 대한 고려를 반영하는 민감도 분석 기법으로 이번 연구에서 제안한 방법인 균열간 연결성을 고려한 민감도 기반 모델 선정법에서 주요하게 사용된다. 자연균열과 인공균열의 특성은 2.2장에서 밝힌 것과 같이 개체특성에서 자연균열 방향성, 간극, 길이가 있고, 공간분포특성에서 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이로 총 6 가지의 인자로 정의된다. 또한 인공균열의 단계가 많아질수록 고려할 인자의 수가 많아지고, 이러한 인자의 다양성은 인자들 값의 다양한 조합을 가지게 한다. 다양한 조합 속에서 상호적인 관계와 이로 인한 유동성을 분석하기 위해서는 기존의 단일 인자 민감도 분석 기법이 아닌 상호성을 고려할 수 있는 민감도 분석 기법이 필요하다. 따라서 거리기반 일반 민감도 분석 기법은 이에 대한 단계적 장치로 활용될 수 있다.

거리기반 일반 민감도 분석 기법은 기존의 민감도 분석 기법과 마찬가지로 입력 변수와 반응 변수를 가지고 있다. 입력 변수에 의해 변하는 자료량인 반응 변수를 산정하고, 반응 변수의 차이를 통해 입력 변수에 따른 민감도를 계산할 수 있다.

Figure 2.6은 세 가지 입력변수인 x, y, z를 0과 1 사이의 범위에서 균등하게 200개의 표본을 만들고 반응 변수인 x, y, z의 조합으로 계산된 반응 변수 d의 거리지도(distance map)이다. 해당 거리 지도는 k-medoid 방식으로 클러스터를 나누며, Figure

2.6에서는 세 개의 클러스터를 사용하여 각 표본들을 분류했다. k-medoid 방식의 군집화는 2.4장 모델 선정법에서 다시 한 번 다룬다. 각 클러스터의 대표 표본은 자신의 클러스터에 있는 다른 표본들과의 기하학적인 거리가 가장 가깝게 되는 것으로 선정된다(Fenwick 등, 2014). 나누어진 클러스터들은 서로 반응 변수 d에 대해 유사성을 가지고 있으며, 이러한 반응 변수의 유사성과 각 표본이 가지고 있는 입력 변수의 값을 이용하여 다른 클러스터들의 표본과 비교했을 때 나타나는 입력변수의 차이와 비교된다. 하나의 표본이 자신의 클러스터 내의 입력 변수와 유사성을 가지면서 다른 클러스터의 입력 변수와 큰 차이를 가진다면, 이는 반응 변수에 대해 큰 민감도를 가진 것으로 판단된다. 각 입력 변수에 대한 클러스터의 민감도는 Figure 2.7과 같다. 하나의 표본은 세 가지 입력 변수를 가지고 있고, 200개의 표본들은 다양한 조합으로 입력 변수를 형성하기 때문에 계산된 민감도는 세 가지 입력 변수의 상호적인 결과로 볼 수 있다. Figure 2.8은 균등한 범위를 가진 입력 변수 x가 각 클러스터에서 어떠한 확률 분포로 나타나는지 보여주며, 이러한 클러스터들 간의 확률분포를 거리로 측정하여 민감도로 계산한다. Figure 2.9는 계산된 민감도의 순서대로 인자를 배열한 것이다.

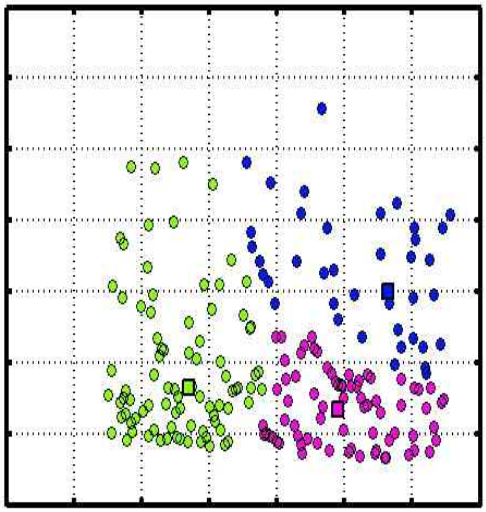


Figure 2.6 Distance map of DGSA for 3 clusters.

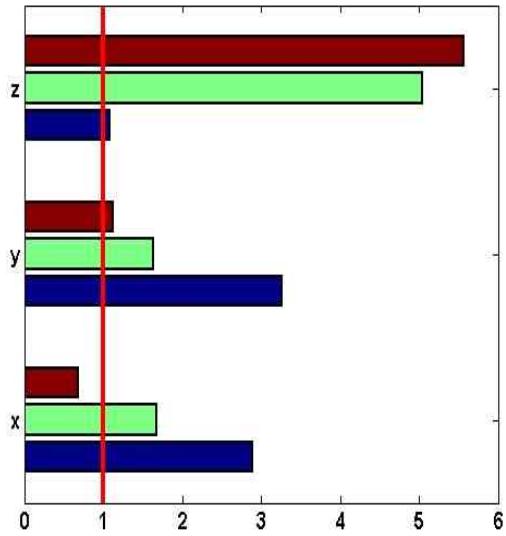


Figure 2.7 Sensitivity for input parameters at each cluster.

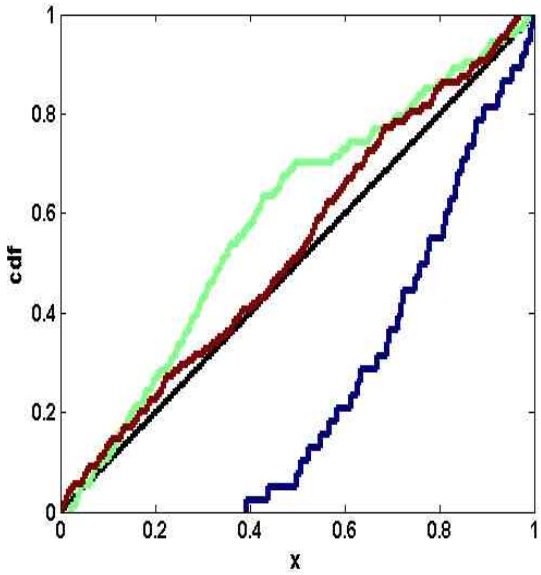


Figure 2.8 Parameter x probability distribution function at each cluster.

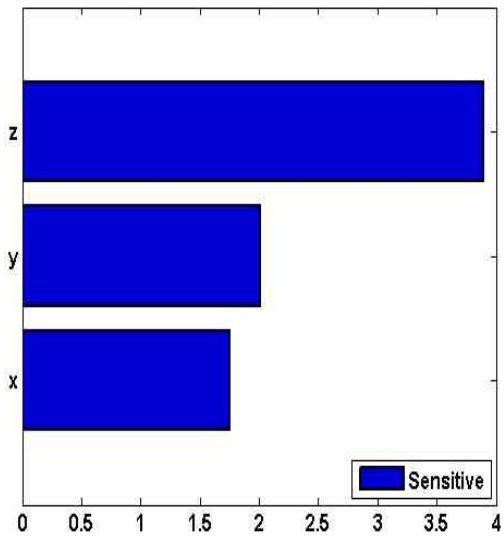


Figure 2.9 Distance-based generalized sensitivity of parameter x, y, and z.

2.4 모델 선정법

모델 선정법은 참값을 포함한다고 가정하는 범위 내에서 다수의 모델을 만들고 클러스터링을 통해 유사한 결과를 보여주는 대표 모델을 가진 클러스터를 선정하는 방식으로 참조 모델의 속성 특성화와 결과 자료 불확실성 감소 및 예측을 가능하게 하는 방법이다. 클러스터링의 방법은 목적에 따라 다양하며 모델 선정법에서 모델을 선정하는 기준도 다양하다. 이번 연구에서는 k-medoid 클러스터링과 우도함수를 이용한 클러스터 선정방식으로 모델 선정법을 수행했다.

2.4.1 K-medoid 클러스터링

클러스터 분석은 다수의 모델을 시뮬레이션 등의 방법으로 직접 확인하지 않고 각각 클러스터의 대표 모델을 확인해 전체 모델의 특성을 파악하는 기법이다.

클러스터 분석 기법중 대표적으로 k-means 클러스터링, k-medoid 클러스터링 등이 있다. k-means 클러스터링은 주어진 모델의 자료 값을 구간으로 나눈 후, 클러스터 내 각 모델들의 거리를 계산하여 클러스터의 평균값을 가진 중심점(centroid)을 찾는다. 선정된 중심점을 기준으로 다시 구간을 나누고 새로운 중심점을 찾는 것을 반복한다. 연산 속도가 빠르지만, 지역 최솟값(local minimum)이 나타날 수 있고, 이상점(outlier)에 취약한 단점이 있다. k-medoid 클러스터링은 k-means 클러스터링이 가지는

이상점에 약한 단점을 보완하기 위해 중간점(medoid)을 사용한다. 자료의 평균 대신 클러스터에서 가장 거리적으로 중심에 위치한 객체를 중간점으로 선정함으로써 클러스터 내에 다른 모델들의 유사성을 대표적으로 반영한다.

이번 연구에서는 주어진 모델이 가진 자연균열과 인공균열 속성의 이상점까지 클러스터링하기 위해 k-medoid 클러스터링을 수행했다. k-medoid 클러스터링의 순서는 다음과 같다(Berkhin, 2006).

1) 모델 집합에서 임의의 k개의 모델을 선택하여 중간점으로 설정한다. k는 미리 지정한 클러스터의 개수이다.

2) 선택된 중간점들이 바뀌지 않을 때까지 다음의 단계를 반복한다.

2-1) 선택되지 않은 모델들을 가장 가까운 중간점과 묶는다. 이때 유클리드 거리 등의 거리 함수를 사용한다.

2-2) 선택되지 않은 각 모델들에 대해, 해당 모델을 자신이 포함된 집합의 새로운 중간점으로 가정하여 거리를 계산한다.

2-3) 기존의 중간점들에 대한 거리와 새로 제안된 중간점들에 대한 거리 값을 비교하여, 새로운 중간점의 거리 값이 작을 경우 중간점을 교체한다.

클러스터의 개수를 정하기 위해 Bhowmik의 방법을 사용하여 클러스터링을 수행했다(Bhowmik 등, 2010). Bhowmik 방법은 식 (2.12)와 같다. η_k는 클러스터의 개수가 k개일 때의 유효성이다. k는

클러스터의 개수, m은 특정 클러스터 내의 모델의 개수, i와 l은 클러스터 중간점의 번호, j는 특정 클러스터 내의 모델의 번호이다. 식 (2.12)에서 분자항은 특정 클러스터 내의 중간점에 대한 각 모델들의 거리 합이고, 분모항은 중간점들끼리의 거리 합이다.

$$\eta_k = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1,\, j \in i}^{m} d_{ij}^2 / \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=1,\, l \neq i}^{k} d_{il^2} \tag{2.12}$$

클러스터링의 효과를 극대화하기 위해 클러스터 유효성을 최소화하는 것이 필요하다. 낮은 값의 유효성은 클러스터링의 우수성을 의미한다. Figure 2.10은 Bhowmik (2014)에서 나타난 클러스터링 유효성에 대한 분석을 보여준다. 일반적으로 클러스터의 개수가 많을수록 유효성이 증가한다. 하지만 유효성의 큰 변화 없이 클러스터 개수가 증가하는 것은 결과의 신속성과 정확성 측면에서 비효율적이다. 이 연구에서는 유효성이 일정 범위 이내로 낮아지게 되는 최소 클러스터 개수를 선정하여 모델 선정법을 진행했다.

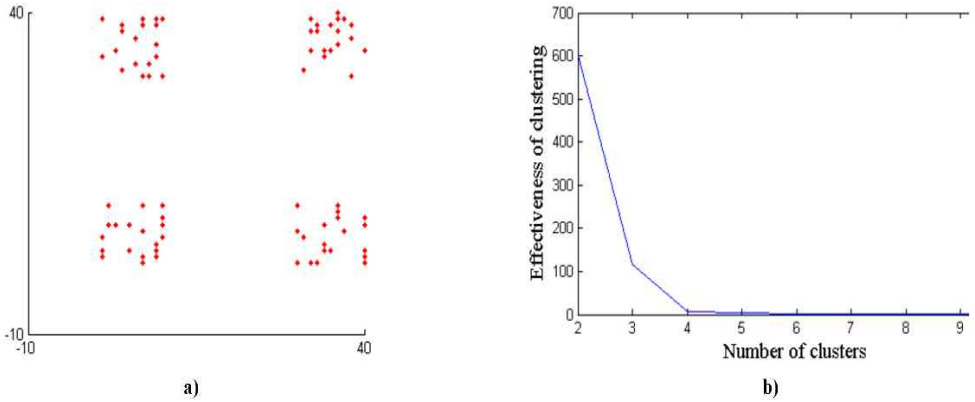


Figure 2.10 Effectiveness of clustering: a) actual data points used for the demonstration, and there are clearly 4 clusters points in this case, b) plot of effectiveness of clustering versus the number of clusters shows a kink at 4 which is the correct number of clusters (Bhowmik, 2014).

2.4.2 우도함수 기반 모델 선정법 알고리듬

우도함수(likelihood function) 기반 모델 선정법은 클러스터링을 통해 선정된 대표 모델들의 생산 거동과 실제 참조 모델의 생산 거동 자료를 비교하여 가장 유사한 대표 모델을 가진 클러스터를 선정하는 방법이다. 참조 모델의 생산 자료와 각 클러스터 대표 모델의 생산 자료를 비교하기 위해 우도함수 값을 계산한다.

모델 선정법에서 사전확률은 클러스터링 이후 각 클러스터가 참조 모델을 포함할 확률을 의미한다. 식 (2.13)은 사전확률의 계산식이다. 참값에 대한 정보는 배제하고 각 클러스터들이 가지는 확률은 전체 모델 수와 각 클러스터 내의 모델 수의 비율이다.

$$P(z^m(u)) = \text{m번 클러스터의 모델 수 / 전체 모델 수} \quad (2.13)$$

각 클러스터의 우도함수는 각 클러스터들이 먼저 존재한다는 전제 하에 해당 클러스터 내에 참조 모델이 존재할 확률이다. 우도함수는 식 (2.14)와 같이 표현된다.

$$P(RF_{ref}|z^m(u)) \quad (2.14)$$

각 클러스터의 대표 모델의 생산 자료의 우도함수 측정 시점을 p로 명명한다. p 시점의 모델 생산 자료 값을 RF_p, 참조 모델의 생산 자료를 RF_{ref}라고 할 때, 식 (2.15)와 같이 대표모델의 최대

분산 값(σ^2)을 구할 수 있다.

$$\sigma_p^2 = |RF_{ref} - RF_p|^2 \quad (2.15)$$

해당 분산 값과 참조 모델의 생산 자료 값을 이용하여 $N(RF_{ref}, \sigma_p^2)$의 정규분포의 범위로 확률 경계를 갖게 된다. Figure 2.11 예시에서는 모델의 우도함수 값이 0.66 값을 갖게 된다. 우도함수 값은 각 시점에 대해 편향될 가능성이 있기 때문에 모든 시점에 대한 우도함수 값을 구하고, 이를 평균 내어 관찰 범위 내의 모든 시점의 참조 모델과의 유사성을 계산할 수 있다. 우도함수 값의 평균이 클수록 참조 모델과 유사한 모델이라고 할 수 있다. 이번 연구에서는 대표 모델을 통해 클러스터를 선정할 때 우도함수 값의 평균이 높은 클러스터를 선정하는 방식으로 모델 선정법을 진행했다.

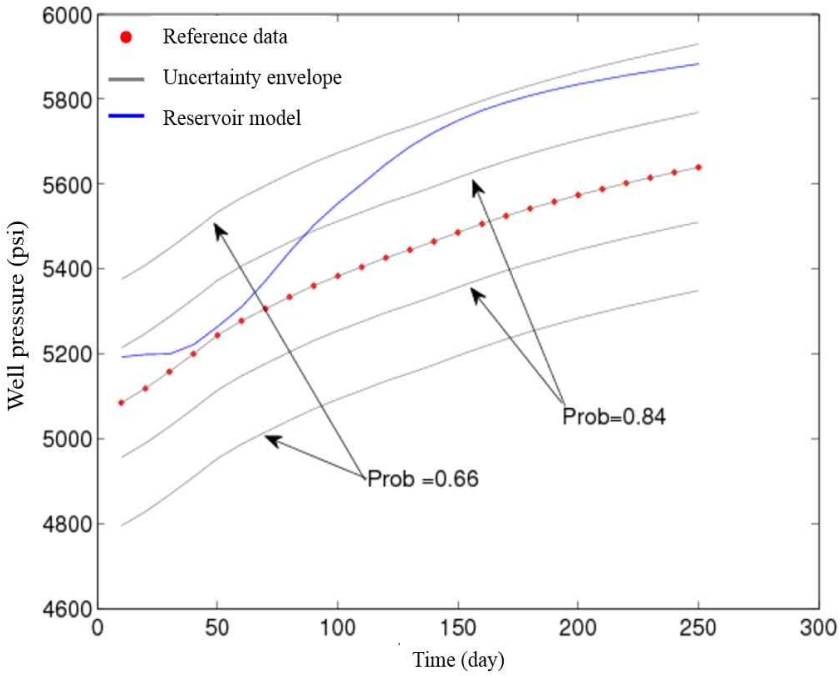


Figure 2.11 Uncertainty envelopes around reference data. The Production data of on reservoir model falls within the 66% probability envelope (Mantilla, 2010).

3. 민감도 기반 균열 모델 선정법 개발

제안한 방법인 연결성을 고려한 민감도 기반 균열 모델 선정법은 자연균열과 인공균열의 공간분포특성에 대한 유동성 변화를 분석하는 것으로 시작한다. 자연균열의 균열간 간격 및 위치와 인공균열의 반길이의 조합에서 나타나는 셰일가스 생산량의 변화와 저류층의 압력 변화를 통해 균열 공간분포 특성으로 인한 연결성과 유동성의 차이를 분석한다.

두 번째 단계로 거리기반 일반 민감도 분석 기법을 통해 저류층의 균열 특성에 대한 민감도를 계산한다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 따라 균열 공간분포특성의 민감도가 다른 양상을 보인다. 따라서 모델 선정법의 적용에서 이러한 민감도의 크기가 반영되어야 한다. 제안한 방법에서 사용하는 모델 선정법은 민감도의 크기를 기반으로 모델을 생성한다. 자연균열 집중성에 따라 다르게 산정된 균열 특성들의 민감도에 따라 민감도가 크게 나타나는 균열 특성들에 대해 해당 특성의 범위 내의 구간을 세분화하여 적용한다. 민감도의 크기 순서대로 세분화하는 구간 수를 다르게 하여 모델을 생성한다. 두 가지 특성에 대한 모델을 생성할 때 민감도가 높은 특성의 구간 수를 5개로 하면, 두 번째 순위의 민감도를 가진 특성의 구간 수는 4개로 하는 방식으로 구간 수를 설정한다. 총 20개의 모델을 만들게 되는 것이다. 이러한 방식은 각 인자들의 구간을 동등하게 나누어 모델을 선정하는 기존의 모델 선정법에 비해 생성하는 모델 수를 최소화할 수 있고, 인자들을 정량화에 있어서 정확도를 높일 수 있다.

민감도 기반 균열 모델 선정법은 Figure 3.1과 같은 순서로

나타난다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 적용하여 자연균열과 인공균열을 정량적으로 특성화한다. 또한 선정된 모델들을 이용해 향후 생산거동 예측을 수행한다.

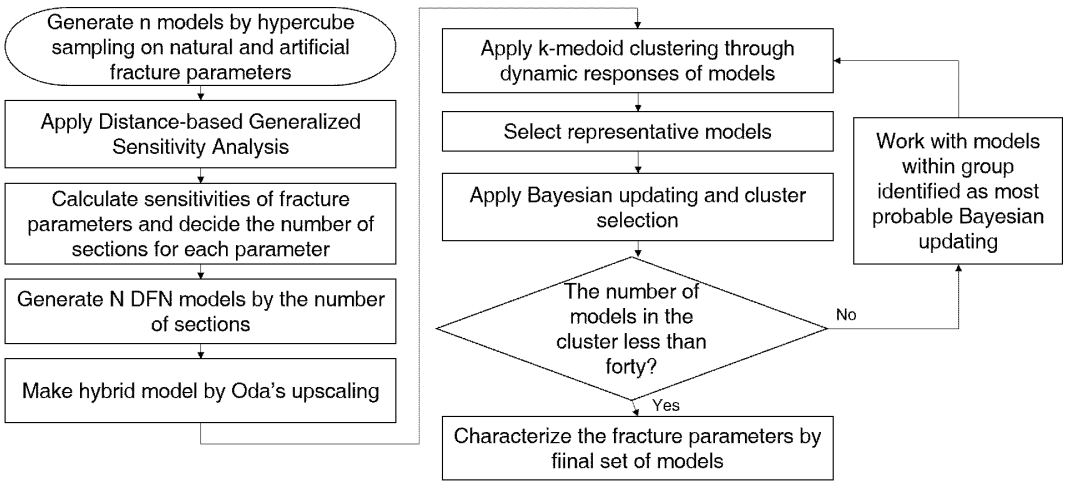


Figure 3.1 Flow chart of the proposed method.

4. 연구결과

4.1 유동모사를 통한 균열 연결성 평가

자연균열의 집중성, 방향성, 간극, 길이, 균열간 간격 및 위치, 인공균열의 균열 반길이를 분리균열모델을 통해 나타낸다. 각각의 특성은 개별적인 크기도 균열들의 연결성에 영향을 주지만, 상호적인 작용에 의한 영향이 크게 나타난다. 노두조사 등을 통해 값의 범위를 특정 지을 수 있는 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이와 달리 공간분포특성인 자연균열의 위치, 인공균열 반길이는 예측이 어렵다. 또한 같은 조건에서도 자연균열 위치에 따라 효과적인 인공균열 반길이가 달라지고 큰 차이를 보이기 때문에 유동모사를 통한 균열 연결성이 평가되어야 한다.

균열 연결성 평가를 시행할 저류층의 초기 조건은 Table 4.1과 같으며, 균열 조건은 Table 4.2와 같다. Table 4.2에서 나타낸 것과 같이 균열 특성은 자연균열 위치와 인공균열 길이를 제외하고 동일하게 적용된다. 자연균열 위치는 Levy-Lee 모델방식으로 생성되어 자연균열간 간격을 10 ft 단위의 10-50 ft 범위에서 변화를 주어 다르게 나타냈다. 두 단계(stage)의 인공균열 반길이는 140-240 ft의 범위에서 20 ft 단위로 바꾸어 연결성을 평가했다.

Table 4.1 Reservoir data of the reference field

Reservoir properties	Value
Size of reserovir, ft^3	600×600×100
The number of reservoir grid, x×y×z	30×30×5, 4,500
△x=△y=△z, ft	20
Matrix permeability, md	8E-6
Matrix porosity, fraction	0.08
Reservoir depth, ft	5,000
Initial pressure, psi (reference depth, ft)	4,500 (5,000)
Reservoir temperature, ℉	200
Rock compressibility, 1/psi	1E-6
Rock density, lbm/ft3	120
Langmuir adsorption constant, 1/psi	0.002
Bottomhole pressure, psi	100

Table 4.2 Fracture data of the reference field

Artificial Fracture	
Fracture properties	Value
The number of stages, unitless	2
Spacing of stages, ft	200
Half Length, ft	140-240
Intrinsic permeability, md	10,000
Effective permeability, md	5
Natural Fracture	
Fracture properties	Value
Model	Levy-Lee
Levy-Lee model fracture interval, ft	10-50
Levy-Lee model fracture dimension, unitless	1.5
Intensity, P32, unitless	0.0125
Orientation, Fisher, (°, unitless, unitless)	(45, 0, 10)
Aperture, ft	
Length, ft	135
Intrinsic permeability, md	1,000

유동모사를 통한 균열 연결성 평가는 세 가지 방식으로 이루어진다. 첫 번째 방식은 자연균열의 위치가 동일한 상태에서 두 단계의 인공균열 반길이의 분포의 변화에 따른 유동성 차이를 통해 연결성을 평가한다. 두 번째는 동일한 인공균열 반길이에서 자연균열의 위치가 다를 때의 유동성 차이를 본다. 세 번째는 두 단계의 인공균열 반길이의 합이 같고, 자연균열의 위치가 다를 때의 종합적인 유동성의 차이를 본다.

4.1.1 인공균열 반길이 분포에 따른 유동성 평가

Figure 4.1은 자연균열의 집중성, 방향성, 간극, 길이는 동일하게 설정한 5 종류의 자연균열 분포이다. 두 단계의 인공균열은 Figure 4.2와 같은 위치에 생성하였으며, 각 단계의 인공균열 반길이는 다르지만 두 단계의 인공균열 반길이 합이 380 ft가 되는 조건으로 초기 가스 생산량을 나타낸 것이 Table 4.3이다.

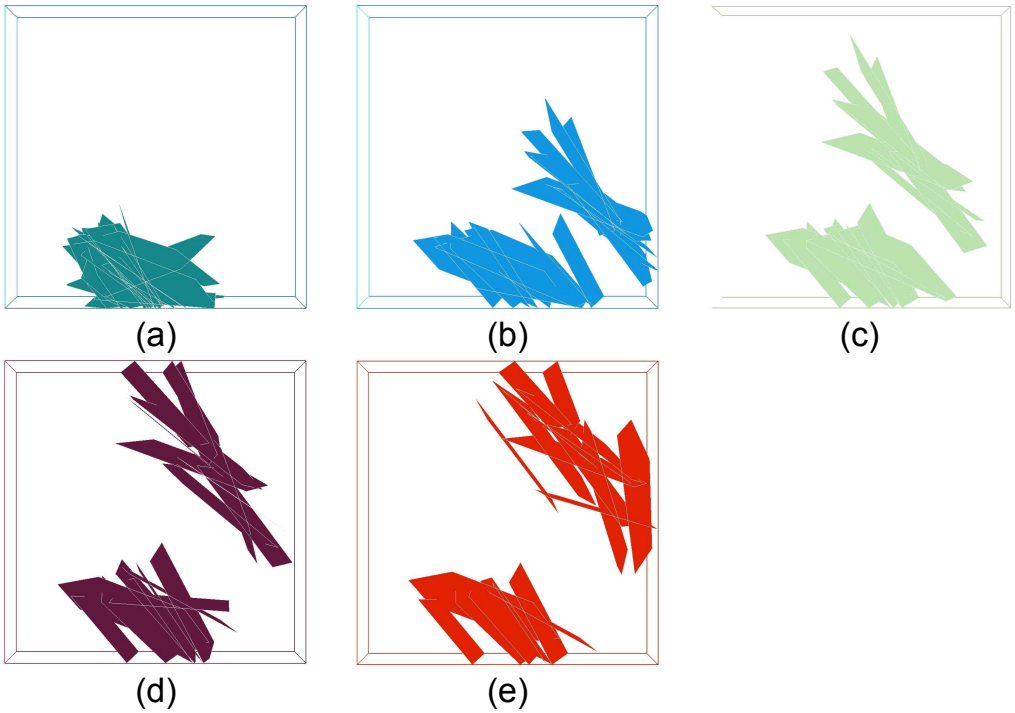


Figure 4.1 5 types of natural fracture location.

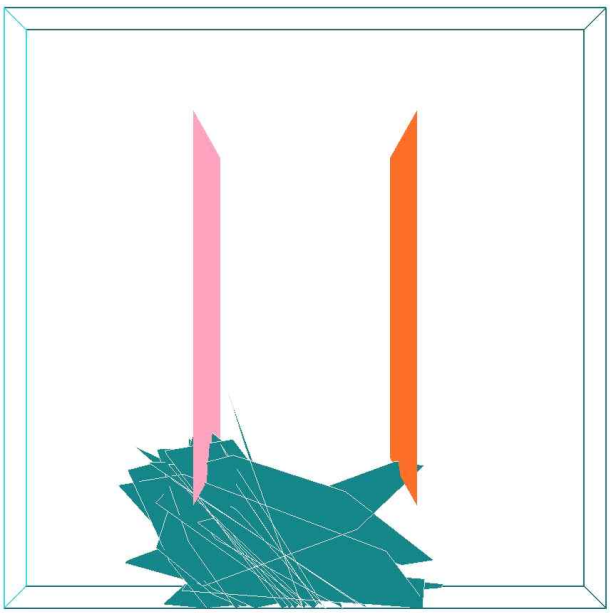


Figure 4.2 Artificial fractures at Figure 4.1 (a) natural fracture distribution.

Table 4.3 Initial gas production rate as sum of half-length of artificial fractures

Case	Artificial fracture half-length		Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	85.97	62.31	55.87	51.87
2	160	220	86.49	63.17	56.88	52.81
3	180	200	90.63	66.99	60.08	56.13
4	200	180	95.81	71.61	64.66	59.42
5	220	160	98.86	74.79	67.17	61.72
6	240	140	101.5	77.44	69.47	63.90

각 경우(case)에 대한 초기 가스 생산량은 Figure 4.3과 같이 나타났다.

Case 6이 가장 큰 초기 가스 생산량을 나타냈으며, Case 1이 가장 작은 초기 가스 생산량을 보였다. Case 1과 6은 인공균열 첫 번째 단계와 두 번째 단계의 반길이가 서로 맞바뀐 예이다. 자연균열의 위치와 인공균열의 길이의 연결성으로 인해 가스 생산량의 차이가 발생한 것으로 볼 수 있다. 균열의 연결성은 각 모델의 분리균열모델, 혼합모델, 시간에 따른 저류층 압력변화를 통해 볼 수 있다. Figure 4.4는 Case 1과 6의 분리균열모델이다. 분리균열 모델을 통해 Case 6에서 자연균열과 인공균열이 접하는 부분이 많은 것을 볼 수 있다.

Figure 4.5는 Figure 4.4의 분리균열모델을 혼합모델로 전환하여 유체투과율 분포로 나타낸 것이다. Case 6의 첫 번째 단계 인공균열이 자연균열 영역과 접하여 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. Case 1의 두 인공균열은 자연균열 근처까지만 균열이 뻗어 있어 자연균열과의 연결성이 좋지 않다.

생산기간동안의 압력 변화를 통해 Case 1과 Case 6의 균열간의 연결성을 비교할 수 있다. Figure 4.6과 Figure 4.7은 각각 Case 1과 Case 6의 10년 동안의 저류층 압력 변화를 보여준다. 초기, 3년째, 6년째, 10년째의 압력 변화를 나타내며, 인공균열과 자연균열이 연결성이 높을수록 압력 변화가 크게 나타난다. Case 6에서 자연균열이 있는 격자의 압력변화가 Case 1에 비해 더 큰 영역에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 압력의 감소와 가스 생산량이 비례하는 것을 의미한다.

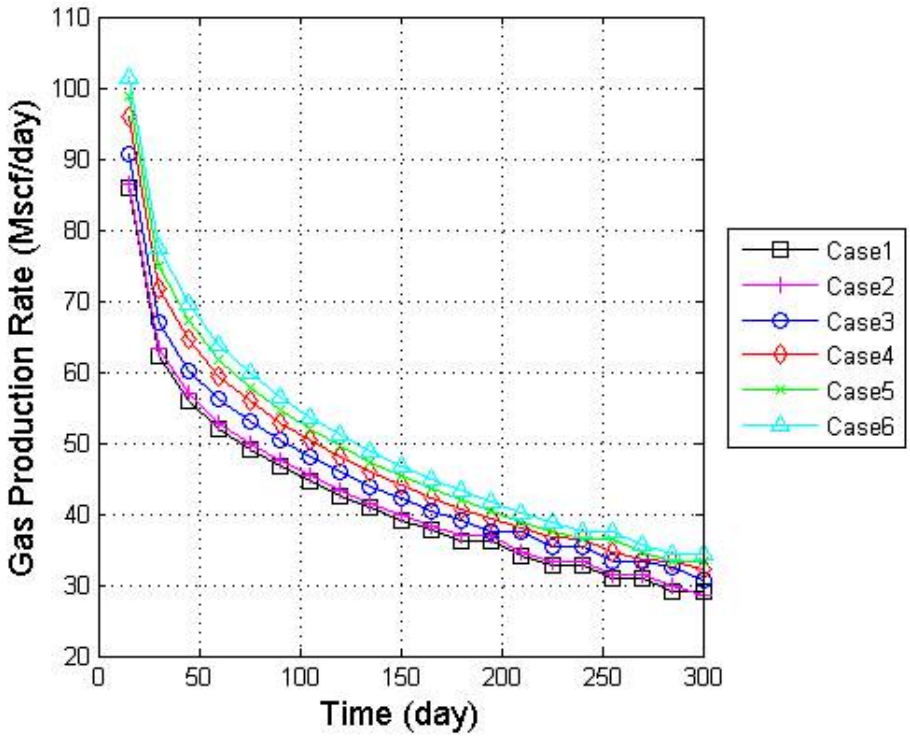
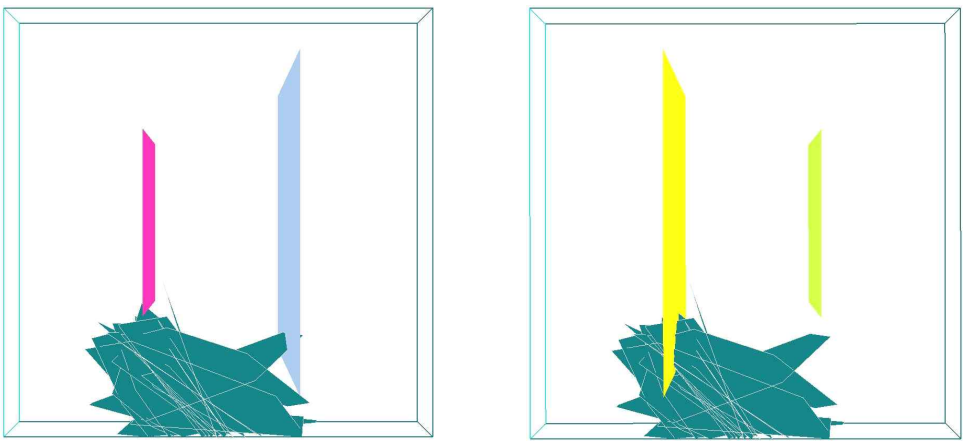


Figure 4.3 Initial gas production rate at 6 cases of Table 4.3.



(a) (b)

Figure 4.4 Discrete fracture network models: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3.

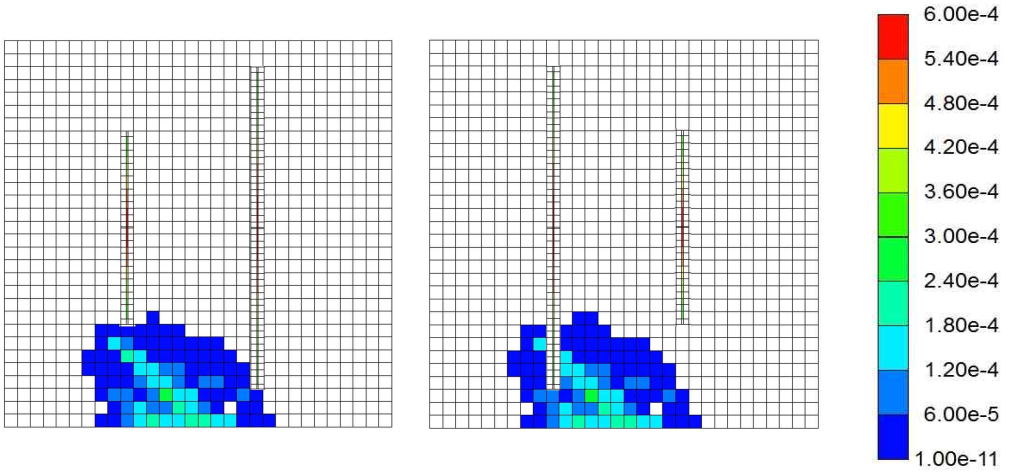


Figure 4.5 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3.

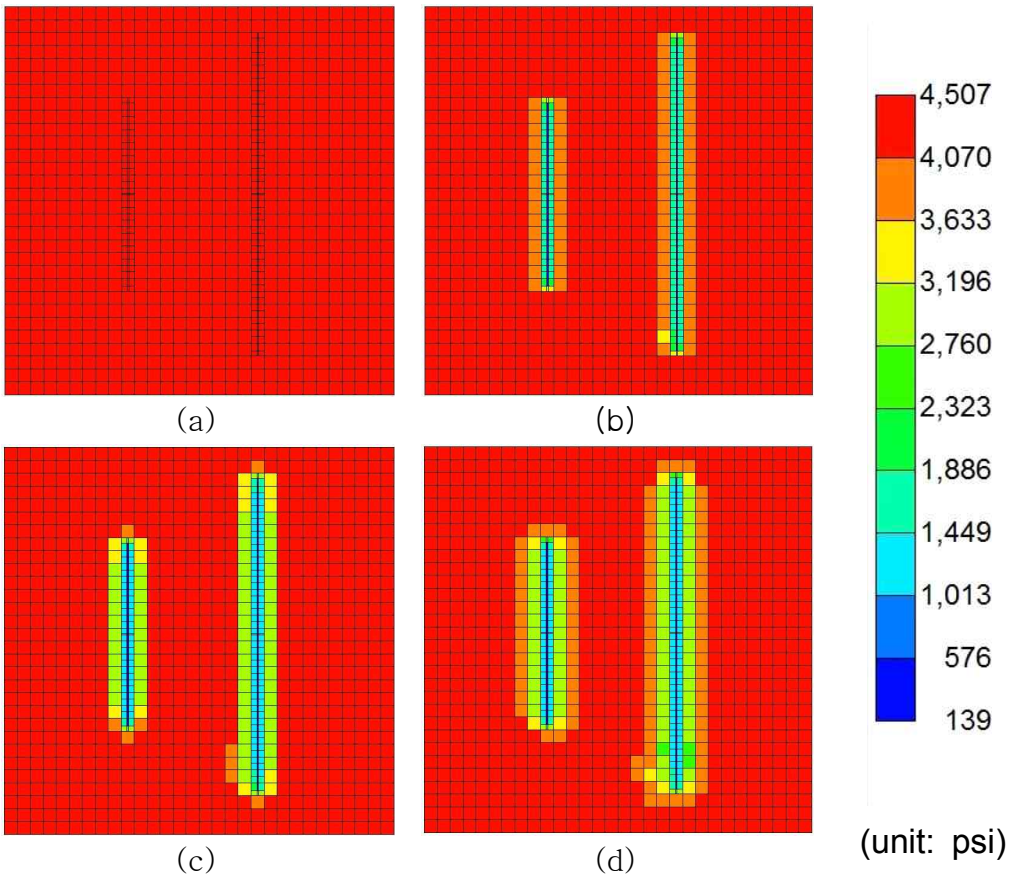


Figure 4.6 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 years, and (d) 10 years of Case 1 of Table 4.3.

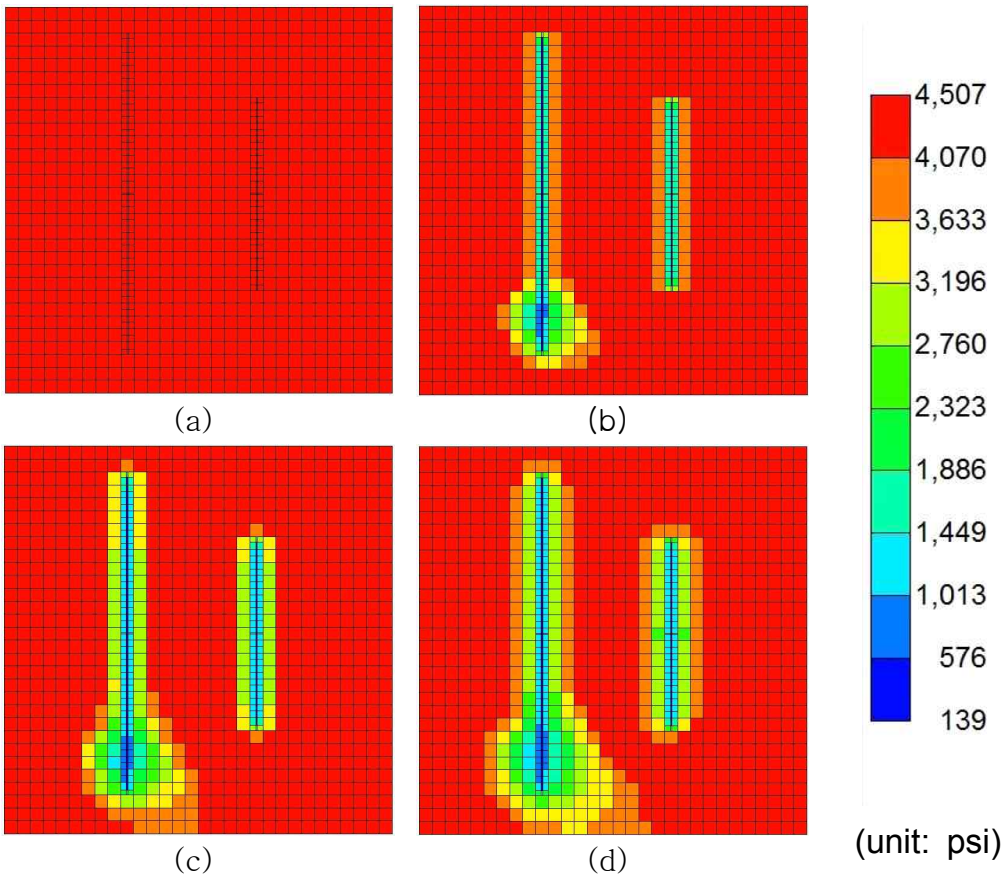


Figure 4.7 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 years, and (d) 10 years of Case 6 of Table 4.3.

4.1.2 자연균열 위치에 따른 유동성 평가

Table 4.3의 Case 1의 경우는 첫 번째 단계 인공균열 반길이는 140 ft, 두 번째 단계 인공균열 반길이는 240 ft였다. Case 6에 비해 낮은 가스 생산량을 보인 경우이다. 하지만 Case 1의 인공균열 반길이에 위치가 다른 자연균열이 분포하게 되면 유동성이 다르게 나타난다. Table 4.4는 Figure 4.1의 5 가지 자연균열 분포를 적용한 혼합모델의 초기 가스 생산량을 나타낸다.

Figure 4.8은 Table 4.4의 각 Case들의 초기 생산량을 나타낸다. Figure 4.9는 Table 4.4 Case들의 혼합모델 유체투과율 분포이다. Figure 4.9에서 (c), (d), (e)는 비슷한 수준의 인공균열과 자연균열의 연결성을 보이고 있다. Table 4.4에서 실제 초기 가스 생산량도 유사하게 나타난다.

Figure 4.10은 10년의 생산기간 이후의 압력 감소를 나타낸다. Figure 4.10 (c), (d), (e)를 비교하였을 때 연결되는 범위는 다르지만 유사한 부피로 압력 감소가 나타난 것을 볼 수 있다. 동일한 인공균열 반길이에서도 자연균열의 위치에 따라 연결성이 다르게 나타나고 압력의 변화와 생산량에서 차이가 생기는 것을 볼 수 있다.

Table 4.4 Initial gas production rate as same half-length of artificial fractures and different natural fracture locations

Case	Artificial fracture half-length		Natural fracture	Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	Figure 4.1 Case	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	(a)	85.9	62.3	55.8	51.8
2	140	240	(b)	97.3	73.6	67.7	61.6
3	140	240	(c)	104	79.8	71.7	66.0
4	140	240	(d)	103	80.5	74.1	67.4
5	140	240	(e)	101	77.5	70.0	64.6

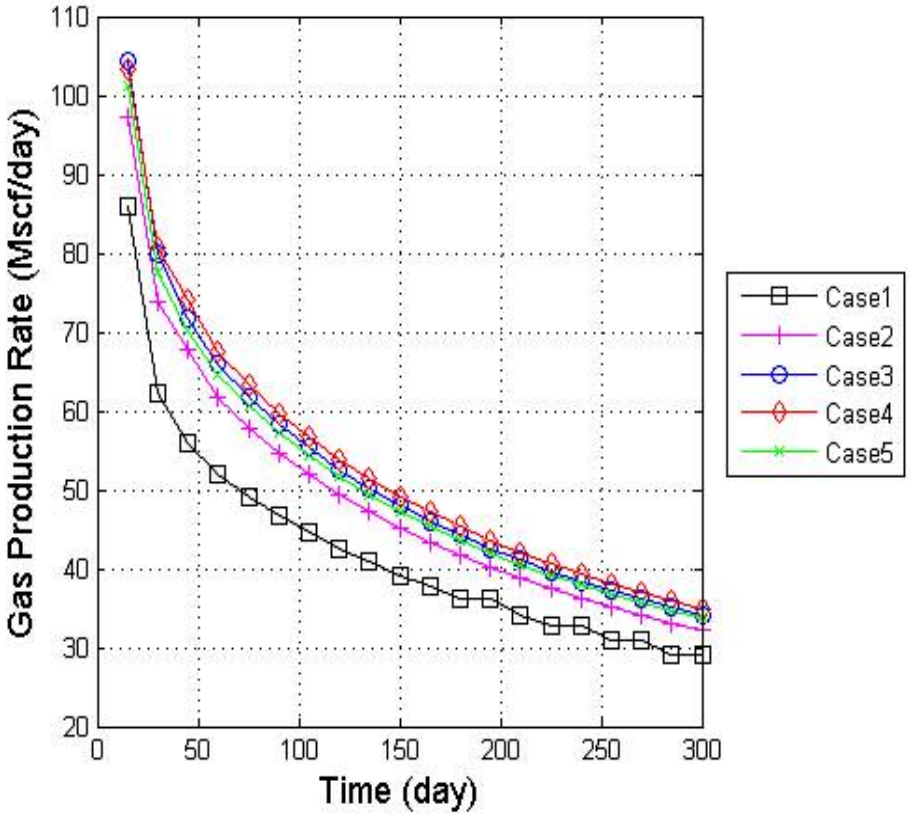


Figure 4.8 Initial gas production rate at 5 cases of Table 4.4.

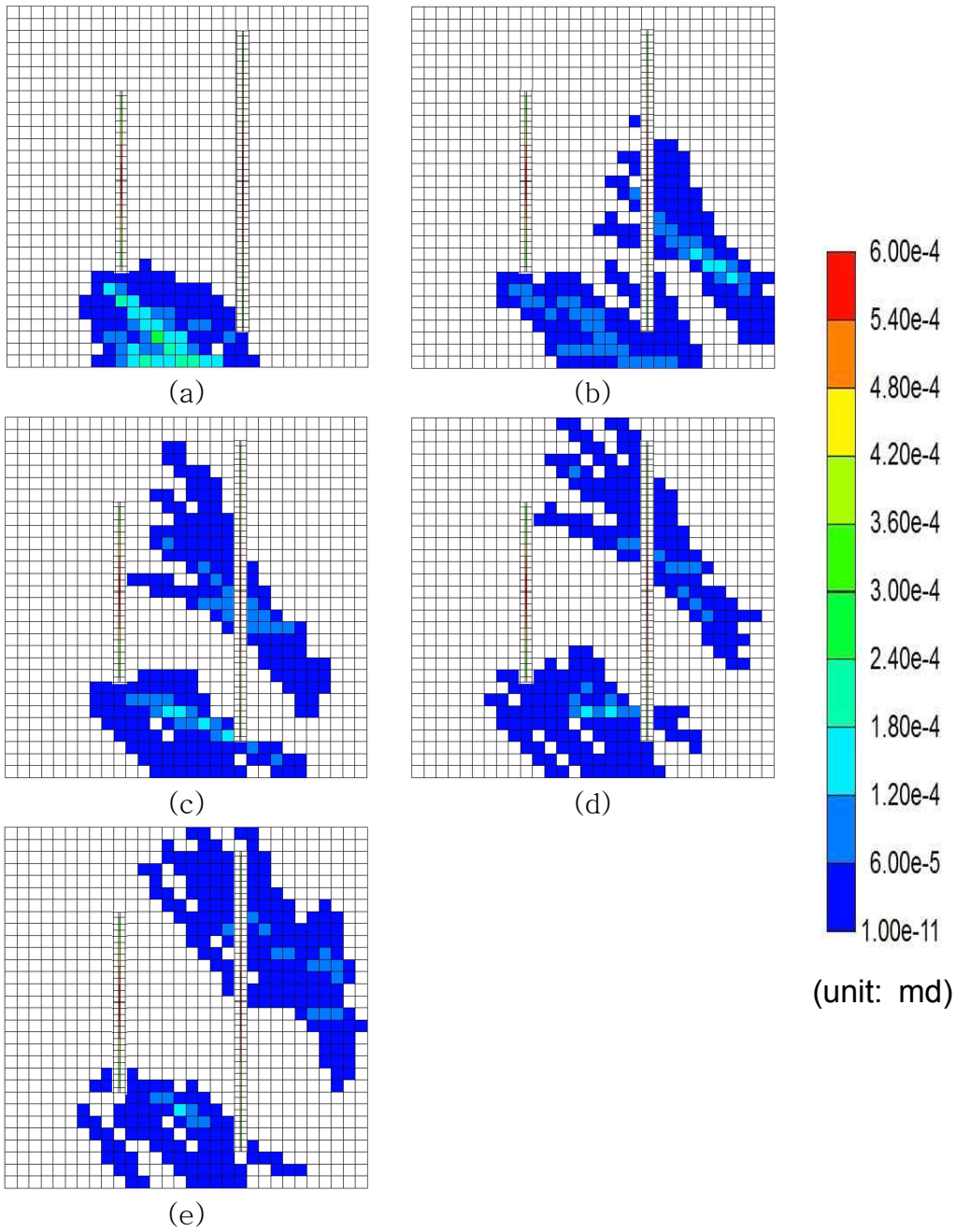


Figure 4.9 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4.

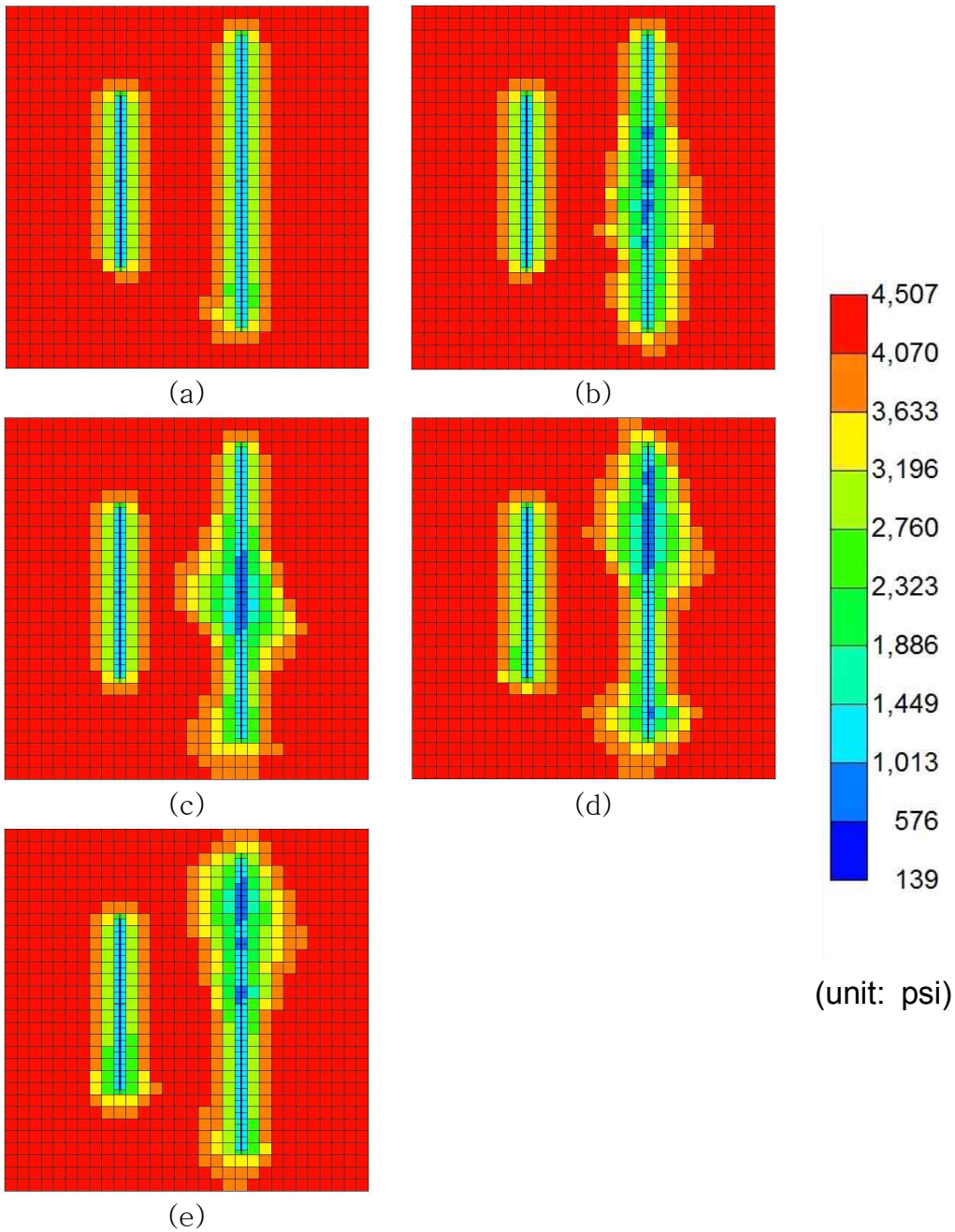


Figure 4.10 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4.

4.1.3 인공균열의 반길이의 분포와 자연균열의 위치에 따른 유동성 평가

4.1.1장의 내용을 통해 자연균열의 위치가 동일한 경우 인공균열 반길이의 분포에 따라 유동성이 다르게 나타난다는 것을 볼 수 있었다. 4.1.2장의 내용에서 인공균열의 반길이가 동일할 때 자연균열 위치에 따라 유동성이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 4.1.3장에서는 두 가지 조건을 조합하여 인공균열 반길이의 분포와 자연균열의 위치의 변화에 따라 유동성이 확대되는 경우와 감소되는 경우를 Case로 나누어 확인한다.

두 단계의 인공균열 반길이는 140-240 ft의 범위를 가진다. 20 ft 간격으로 총 6개의 길이 분포를 가지며, 두 단계이므로 36개의 조합이 나타난다. 합이 380 ft가 되는 경우는 Table 4.3과 같이 6 가지이다. 자연균열 분포는 Table 4.4와 같이 5 가지이므로 총 30개의 Case가 있다.

Table 4.5는 30개 Case의 인공균열 반길이와 자연균열 위치에 따른 초기 가스 생산량이다. 5 가지 자연균열 위치에 대한 초기 가스 생산량을 평균을 내어 비교하면 자연균열 위치 (a)가 가장 작은 값을 가지고, (c)가 가장 큰 값을 가진다.

30개 Case를 개별적으로 보았을 때, 가장 작은 초기 가스 생산량을 가지는 것은 Case 1이다. 가장 큰 값을 가지는 Case는 Case 18이다. Figure 4.11은 두 Case의 초기 가스 생산량 그래프이다. Figure 4.12는 두 Case의 혼합모델 유체투과율 분포, Figure 4.13은 두 Case의 10년 생산시기 이후의 압력 분포를 나타낸다. 동일 조건에서 인공균열 반길이의 분포와 자연균열 위치에 따라 연결성의 크기가 다르게 나타나고, 이는 가스 생산량과 압력 변화의 차이를 만들어내는 것을 볼 수 있다.

Table 4.5 30 cases: Initial gas production rate as same sum of half-length of artificial fractures and different natural fracture locations

Case	Artificial fracture half-length		Natural fracture	Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	Figure 4.1 Case	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	(a)	85.97	62.31	55.87	51.87
2	160	220	(a)	86.49	63.17	56.88	52.81
3	180	200	(a)	90.63	66.99	60.08	56.13
4	200	180	(a)	95.81	71.61	64.66	59.42
5	220	160	(a)	98.86	74.79	67.17	61.72
6	240	140	(a)	101.5	77.44	69.47	63.90
	Case (a) mean			93.21	69.39	62.35	57.64
7	140	240	(b)	97.32	73.68	67.71	61.67
8	160	220	(b)	96.37	72.88	65.89	60.92
9	180	200	(b)	97.62	73.68	66.35	61.44
10	200	180	(b)	99.75	75.97	68.42	63.33
11	220	160	(b)	100.7	77.20	69.52	64.91
12	240	140	(b)	105.4	77.66	70.29	64.73
	Case (b) mean			99.53	75.18	68.03	62.83
13	140	240	(c)	104.3	79.83	71.72	66.04
14	160	220	(c)	104.1	79.31	71.73	65.64
15	180	200	(c)	104.9	79.95	72.28	66.21
16	200	180	(c)	105.8	80.86	73.08	66.97
17	220	160	(c)	107.4	82.61	74.67	68.29
18	240	140	(c)	108.4	83.67	75.17	68.94
	Case (c) mean			105.8	81.04	73.11	67.01
19	140	240	(d)	103.3	80.59	74.1	67.49
20	160	220	(d)	103.5	80.44	73.13	67.48
21	180	200	(d)	103.3	79.59	71.70	66.73
22	200	180	(d)	101.6	77.92	70.86	65.26
23	220	160	(d)	101.2	77.93	70.59	65.19

24	240	140	(d)	101.3	77.85	70.38	65.03
	Case (d) mean			102.4	79.05	71.79	66.20
25	140	240	(e)	101.1	77.59	70.00	64.67
26	160	220	(e)	100.2	76.71	69.32	63.91
27	180	200	(e)	100.9	76.96	69.82	64.14
28	200	180	(e)	100.2	76.28	68.49	63.62
29	220	160	(e)	98.67	75.00	67.94	62.52
30	240	140	(e)	96.20	72.62	65.51	60.59
	Case (e) mean			99.55	75.86	68.51	63.24
Minimum gas production case					Case 1		
Maximum gas production case					Case 18		

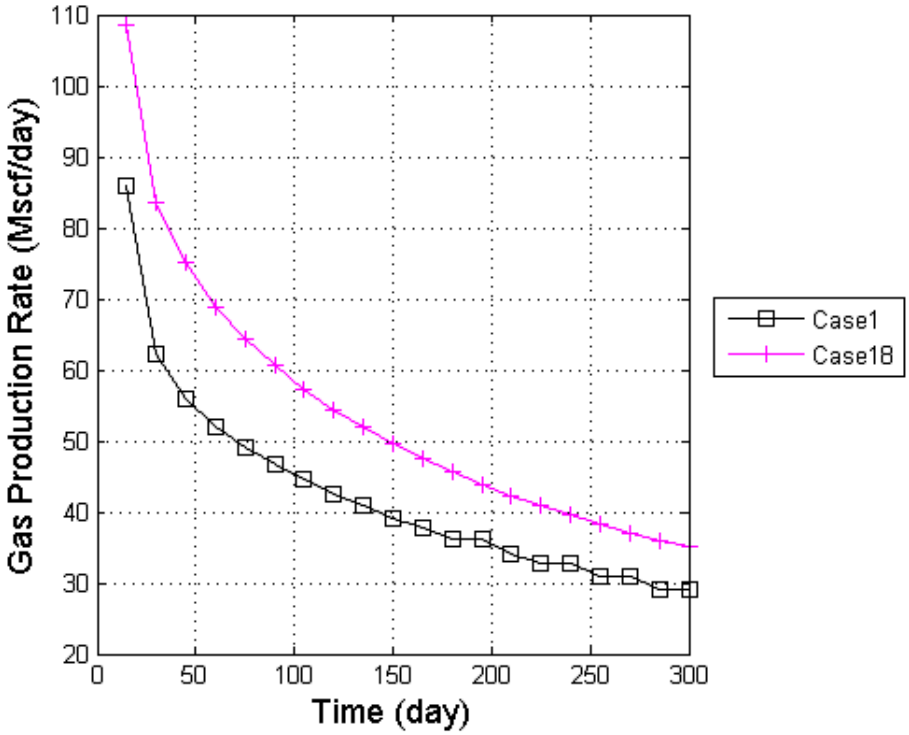


Figure 4.11 Initial gas production rate of Case 1 and Case 18 of Table 4.5.

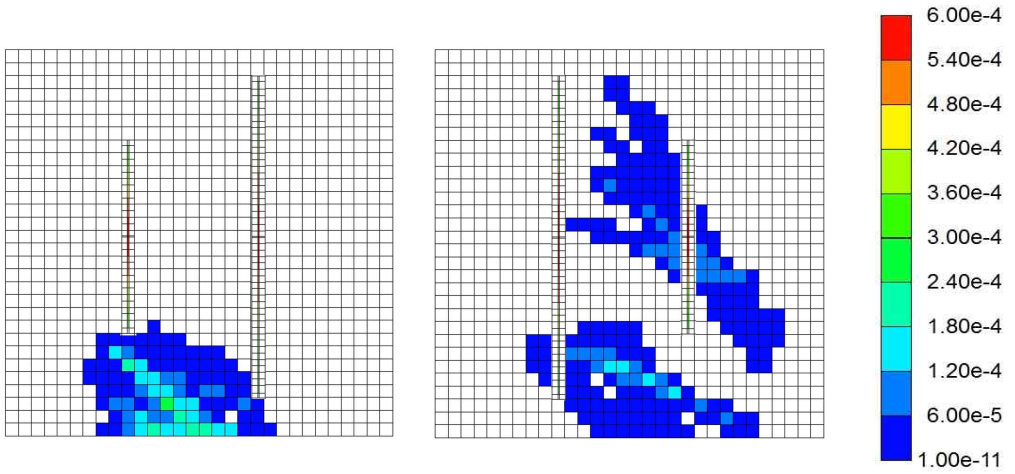


Figure 4.12 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5.

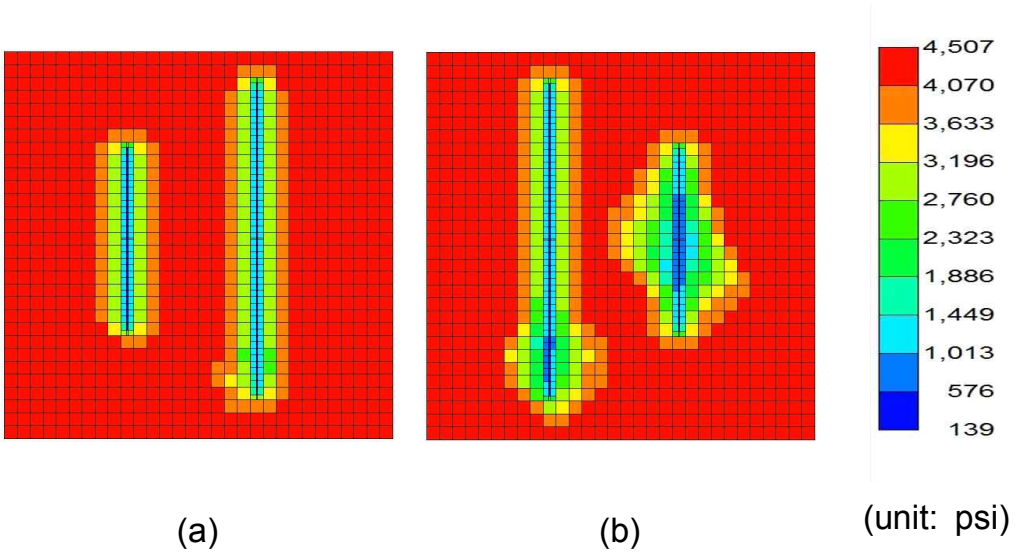


Figure 4.13 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5.

4.2 자연균열 집중성에 따른 생산량 민감도 평가

민감도 분석 기법은 각각의 입력 변수와 반응 변수와의 상관계수를 계산하여 민감도를 분석한다. 입력 변수와 반응 변수가 높은 상관관계를 가진다면 민감도 또한 높게 나타난다. 거리기반 일반 민감도 분석 기법은 입력변수간의 상호작용을 고려하여 민감도를 계산한다. 따라서 자연균열과 인공균열의 특성을 반영하는 인자를 입력변수로, 가스 생산량을 반응 변수로 채택하여, 각 인자들의 상호적, 독립적인 가스 생산량에 대한 상관관계를 유추할 수 있다. 4.1장의 결과에서 자연균열과 인공균열의 특성은 동일한 조건하에서도 연결성에 따라 가스 생산량이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 공간분포특성인 자연균열의 위치와 인공균열의 반길이 분포의 영향 정도를 거리기반 일반 민감도 분석으로 정량화하여 평가 할 수 있다.

이번 연구는 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우를 나누어 민감도를 분석했다. 자연균열 집중성이 높은 경우 저류층 전체에 걸쳐 자연균열이 나타나기 때문에 자연균열 집중성이 낮은 경우에 비해 균열의 공간분포특성보다 개체특성이 더 높을 것으로 예상되었다.

Table 4.6과 Table 4.7은 각각 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 민감도를 분석할 인자들의 범위를 나타낸다. 두 조건에서 자연균열 집중성 이외에는 모두 동일한 범위를 가진다. Table 4.1 조건의 가상 저류층으로 시뮬레이션 하였다.

두 경우에 대한 민감도 분석은 균열 인자들의 조합을 다양하게 한 800개의 표본으로 이루어졌으며, 인자들 값의 분포는 Low와 High 값 사이에서 표본의 수만큼 균등하게 생성되어 적용되었다.

Figure 4.14는 자연균열 집중성이 높은 경우에 대한 거리기반 일

반 민감도 분석 결과이며, Figure 4.15는 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 거리기반 일반 민감도 분석 결과이다.

자연균열 집중성이 높은 경우 Figure 4.14와 같이 균열의 개체특성인 자연균열 간극과 자연균열 방향성이 가장 높은 민감도를 가졌다. 두 번째 단계 인공균열 반길이, 첫 번째 단계 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 집중성, 자연균열 길이의 순으로 민감도가 높았다. 자연균열 집중성이 낮은 경우는 Figure 4.15와 같이 다른 민감도 순서가 나타났다. 첫 번째와 두 번째 단계 인공균열 반길이, 자연균열 위치가 가장 높은 민감도를 가졌고, 자연균열 간극, 집중성, 방향성이 그 뒤를 이었다.

자연균열 집중성을 제외하고 모두 동일한 조건에서 민감도를 계산한 것이지만 다른 결과를 보였다. 자연균열 집중성이 낮을 때, 균열의 공간분포특성의 값이 강조되었다. 이는 공간분포특성에 기인한 균열간 연결성이 자연균열 집중성이 낮을 때 더 높은 상관관계를 가짐을 볼 수 있다. 따라서 기존의 히스토리 매칭 또는 모델 선정법을 통한 셰일가스 저류층 특성화와 미래 생산 거동 예측 측면에서 자연균열과 인공균열의 공간분포특성을 고려하지 않을 때 나타나는 결과는 신뢰성이 낮다고 볼 수 있다. 4.1장의 결과에서도 균열 공간분포특성으로 인한 저류층 내 유체의 유동성의 차이와 가스 생산량의 차이를 볼 수 있기 때문에 균열간 연결성에 대한 고려는 필수적이라 생각할 수 있다. 자연균열 집중성이 높은 경우에도 균열의 공간분포특성이 높은 비중을 차지하지만, 균열의 개체특성 또한 높은 비중을 가지고 있으므로, 자연균열 집중성이 낮은 경우에 비해 해당 균열 특성화에서 높은 신뢰도를 가질 것으로 예상된다.

Table 4.6 Ranges of fracture parameters for DGSA at high natural fracture intensity

	Parameter	Value	
		Low	High
Natural fracture	**Intensity (NF intensity), P32, unitless**	**0.1**	**0.12**
	Trend (NF trend), °	30	60
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7
	Length (NF length), ft	100	170
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	150	250
	2nd half-length (2nd AF length), ft	150	250

Table 4.7 Ranges of fracture parameters for DGSA at low natural fracture intensity

	Parameter	Value	
		Low	High
Natural fracture	**Intensity (NF intensity), P32, unitless**	**0.01**	**0.015**
	Trend (NF trend), °	30	60
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7
	Length (NF length), ft	100	170
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	150	250
	2nd half-length (2nd AF length), ft	150	250

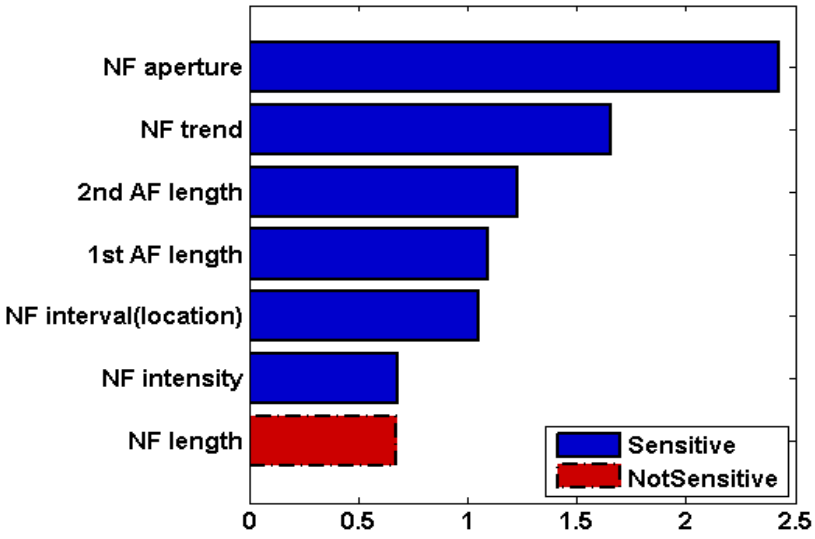


Figure 4.14 Sensitivity by DGSA at high natural fracture intensity.

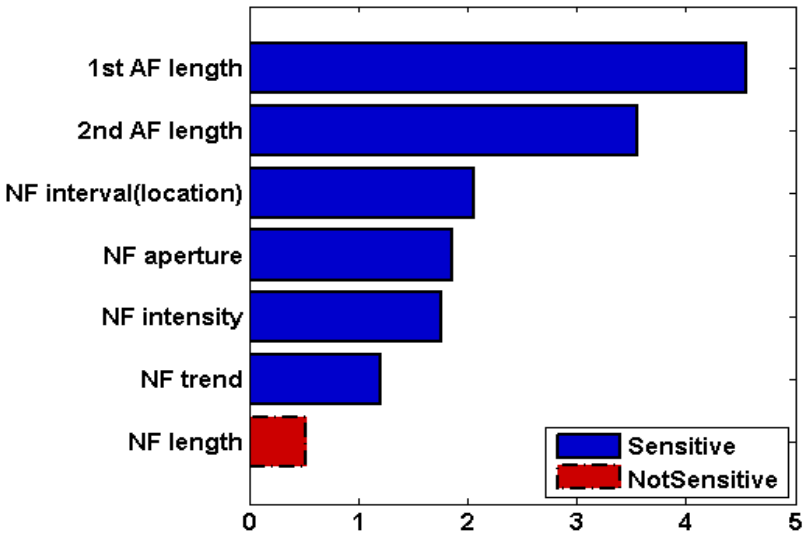


Figure 4.15 Sensitivity by DGSA at low natural fracture intensity.

4.3 공간적 균열분포에 따른 모델 선정법 효과 분석

이번 연구는 이러한 자연균열과 인공균열의 연결성을 고려한 모델 선정법의 개발에 의의가 있다. 자연균열 집중성이 높은 경우에 비해 상대적으로 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열간 연결성은 셰일가스 생산량에 높은 영향을 주기 때문에 해당 민감도 분석 결과를 기반으로 모델을 생성한 모델 선정법은 신뢰성 있는 균열 인자 특성화 및 미래 생산거동 예측을 가능하게 한다. 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 기존의 균열간 연결성을 고려하지 않은 방법과 제안한 방법인 균열간 연결성을 고려한 민감도 기반 모델 선정법을 비교하였다.

4.3.1장에서는 자연균열 집중성이 높은 경우에 대해 제안한 방법과 기존의 방법을 비교했다. 4.3.2장에서는 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대해 제안한 방법과 기존의 방법을 비교하였다.

4.3.1 자연균열 집중성이 높은 경우에 대한 모델 선정법

Table 4.8은 자연균열 집중성이 높은 경우에 대해 특성화할 균열 인자인 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이, 위치와 두 단계의 인공균열 반길이의 범위를 나타냈다. 각 인자들은 노두조사와 지질학적 조사를 통해 범위를 산정한 것으로 가정하였다. 모델 선정법에서 저류층 조건은 Table 4.1과 Table 4.2의 정보를 따르며 균열 특성은 Table 4.8을 따른다.

4.2장의 결과에 따라 균열 인자들의 민감도가 자연균열 간극, 자연균열 방향성, 두 단계의 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 집중성, 자연균열 길이의 순으로 나온 것을 기반으로 균열 인자 값에 대한 모델 생성에 대한 구간의 수를 설정했다. 자연균열 간극의 구간 수를 5개, 자연균열 방향성의 구간 수 4개 인공균열 반길이의 구간 수를 4개, 자연균열 위치 구간 수를 3개, 자연균열 집중성 구간 수를 3개로 하여 총 2,880개의 모델을 생성했다. 2,880개의 모델들은 군집화와 대표모델 선정 후 모델 선택을 반복적으로 진행하여 40개 이하의 수만큼 모델을 선정하는 것으로 모델 선정법이 진행된다. 군집화 이후 각 군집의 대표모델들 중 참조 모델1의 생산이력과 가장 유사한 대표모델이 선정되고 해당 군집이 다음 모델 선정법의 대상이 된다. 참조 모델1의 생산이력은 15일 간격의 360일 동안의 가스 생산량이다. 선정된 모델들은 균열의 특성들을 정량화하고, 향후 10년 동안의 가스 생산량을 예측할 수 있는 표본으로 활용된다.

Table 4.9는 참조 모델1의 균열 특성이며, Figure 4.16은 참조 모델1의 생산이력이다.

Table 4.8 Ranges of fracture parameters for model selection at high natural fracture intensity

Parameter		Value		# of sections in range
		Low	High	
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.1	0.12	3
	Trend (NF trend), °	30	60	4
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7	5
	Length (NF length), ft	100	170	1
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40	3
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	140	240	4
	2nd half-length (2nd AF length), ft	140	240	4

Table 4.9 Values of fracture parameters for reference at high natural fracture intensity

Parameter		Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.113
	Trend (NF trend), °	31
	Aperture (NF aperture), ft	1.10E-6
	Length (NF length), ft	136
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	20.38
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	160.1
	2nd half-length (2nd AF length), ft	240.8

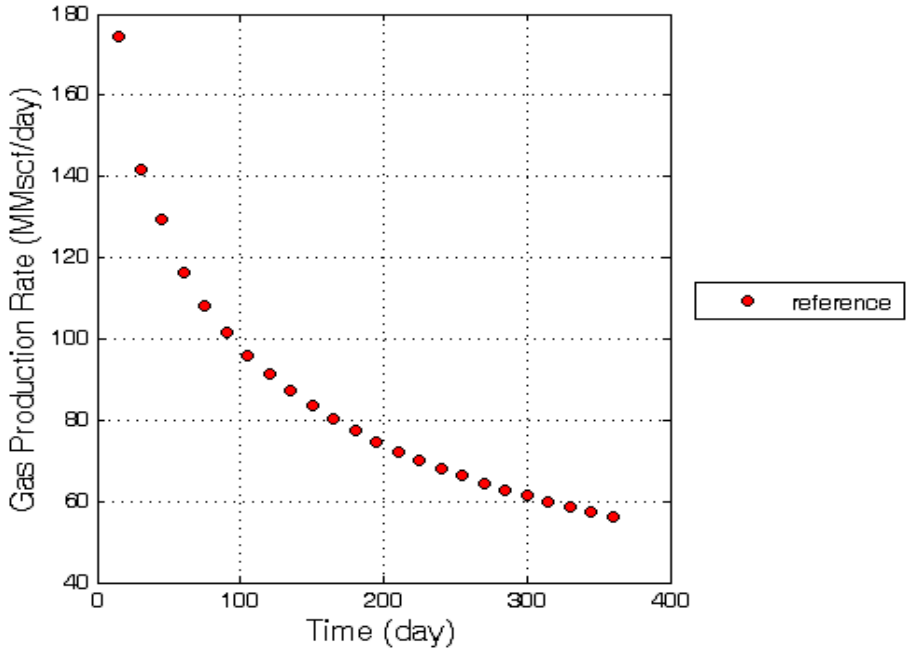


Figure 4.16 Gas production rate record of reference1.

2,880개의 모델을 참조 모델1의 생산이력과의 유사성으로 18개의 모델을 선정했다. Figure 4.17은 초기 모델 전체와 참조 모델1의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.18은 선정된 모델과 참조 모델1의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.10과 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델1과 유사성을 가진다. 18개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델1의 인자 값의 오차는 Table 4.10의 Error와 같다. Figure 4.19 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.20는 궁극가채량(Estimated Ultimate Reserve, EUR)을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림(box plot)으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델1의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 1.71%, 기존 방법은 2.81%로 나타났다. 제안한 방법이 기존의 방법보다 편차가 작았으나 큰 차이가 나타나지는 않았다.

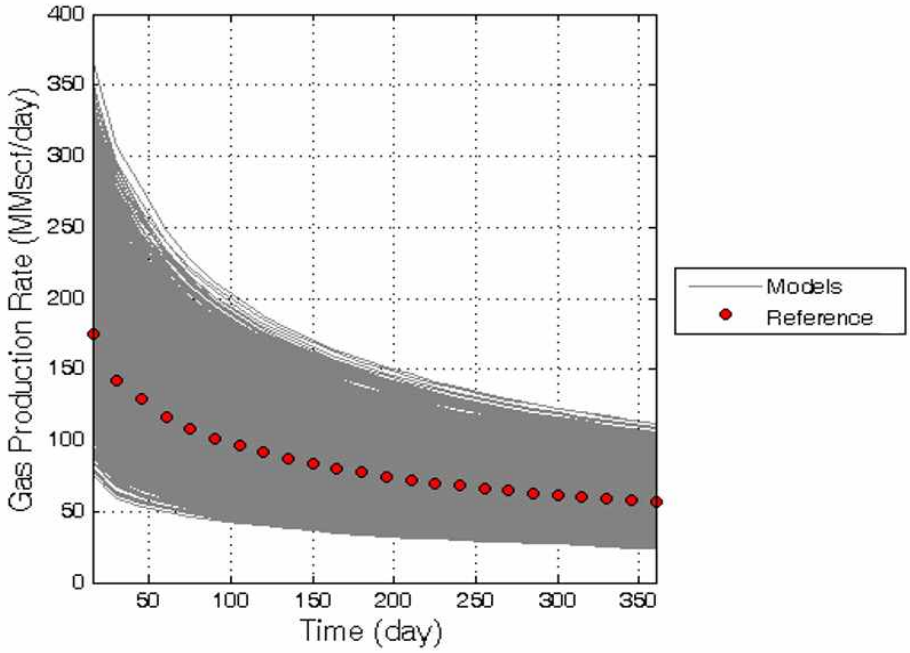


Figure 4.17 Gas production rate of initial models and reference1.

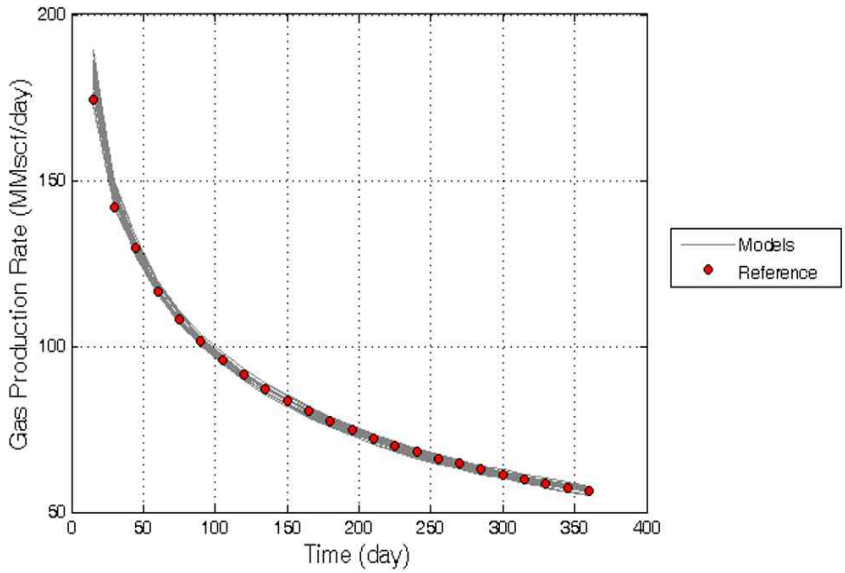
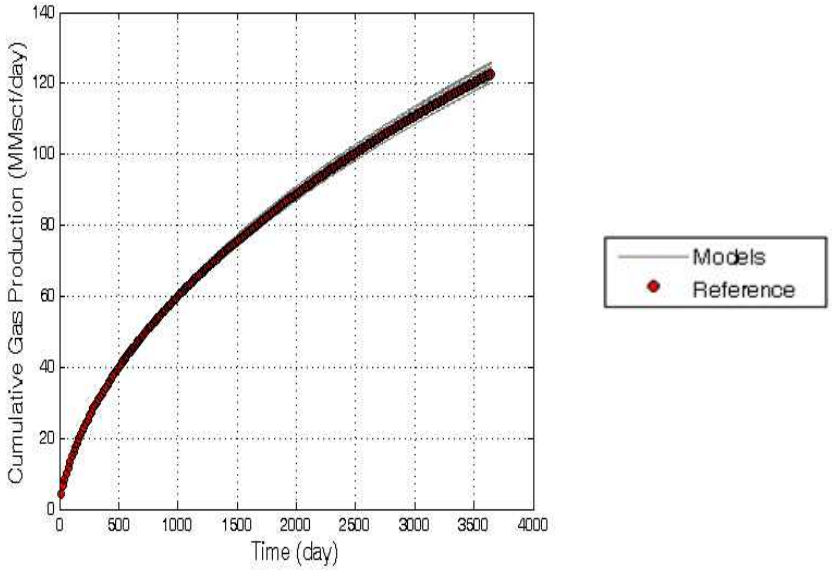


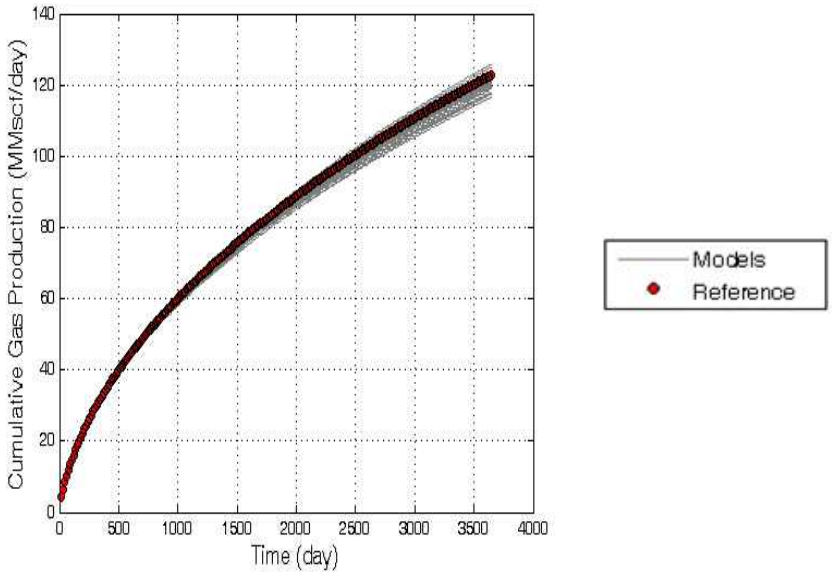
Figure 4.18 Gas production rate of selected models and reference1.

Table 4.10 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.100	30	1.50E-06	135	10	190	240
2	0.106	40	1.25E-06	135	10	190	240
3	0.113	30	1.50E-06	135	10	140	240
4	0.100	40	1.50E-06	135	10	140	240
5	0.106	30	1.25E-06	135	25	140	240
6	0.106	30	1.25E-06	135	25	190	190
7	0.106	50	1.50E-06	135	10	190	240
8	0.113	40	1.25E-06	135	10	190	240
9	0.106	60	1.50E-06	135	10	190	190
10	0.113	50	1.25E-06	135	10	240	140
11	0.113	60	1.50E-06	135	25	240	240
12	0.113	30	1.25E-06	135	10	140	240
13	0.120	30	1.00E-06	135	10	240	240
14	0.106	30	1.25E-06	135	10	190	190
15	0.120	40	1.00E-06	135	10	240	240
16	0.120	30	1.25E-06	135	25	190	240
17	0.106	30	1.50E-06	135	40	140	240
18	0.113	50	1.25E-06	135	40	140	240
Mean	0.110	39	1.32E-06	135	16.6	184.4	226.1
Reference1	0.113	31	1.10E-06	136	20.3	160.1	240.8
Error(%)	-2.65	25	20	-0.7	-18.2	15.17	-6.10



(a)



(b)

Figure 4.19 Cumulative gas production of selected models and reference1 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

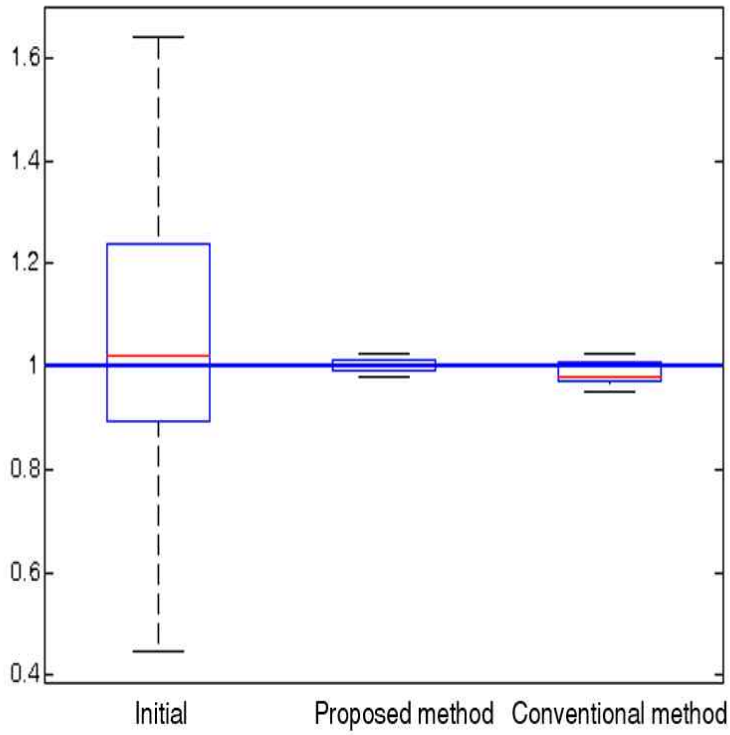


Figure 4.20 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference1 EUR).

4.3.2 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 모델 선정법

Table 4.11은 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대해 특성화할 균열 인자인 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이, 위치와 두 단계의 인공균열 반길이의 범위를 나타냈다. 각 인자들은 노두조사와 지질학적 조사를 통해 범위를 산정한 것으로 가정하였다. 모델 선정법에서 저류층 조건은 Table 4.1과 Table 4.2의 정보를 따르며 균열 특성은 Table 4.11을 따른다.

4.2장의 결과에 따라 균열 인자들의 민감도가 두 단계의 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 간극, 자연균열 집중성, 자연균열 방향성, 자연균열 길이의 순으로 나온 것을 기반으로 균열 인자 값에 대한 모델 생성에 대한 구간의 수를 설정했다. 인공균열 반길이의 구간 수를 6개, 자연균열 위치의 구간 수를 5개, 자연균열 간극의 구간 수를 4개, 자연균열 집중성의 구간 수를 3개, 자연균열 방향성과 길이의 구간 수를 1개로 하여 총 2,160개의 모델을 생성했다. 2,160개의 모델들은 군집화와 대표모델 선정 후 모델 선택을 반복적으로 진행하여 40개 이하의 수만큼 모델을 선정하는 것으로 모델 선정법이 진행된다. 4.3.1장과 마찬가지로 군집화 이후 각 군집의 대표모델들 중 참조 모델2의 생산이력과 가장 유사한 대표모델이 선정되고 해당 군집이 다음 모델 선정법의 대상이 된다. 참조 모델2의 생산이력은 15일 간격의 360일 동안의 가스 생산량이다. 선정된 모델들은 균열의 특성들을 정량화하고, 향후 10년 동안의 가스 생산량을 예측할 수 있는 표본으로 활용된다.

Table 4.12는 참조 모델2의 균열 특성이며, Figure 4.21은 참조 모델2의 생산이력이다.

Table 4.11 Ranges of fracture parameters for model selection at low natural fracture intensity

Parameter		Value		# of sections in range
		Low	High	
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.01	0.015	3
	Trend (NF trend), °	30	60	1
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7	4
	Length (NF length), ft	100	170	1
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40	5
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	140	240	6
	2nd half-length (2nd AF length), ft	140	240	6

Table 4.12 Values of fracture parameters for reference2 at low natural fracture intensity

Parameter		Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.0139
	Trend (NF trend), °	31
	Aperture (NF aperture), ft	6.68E-7
	Length (NF length), ft	159.3
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	36.58
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	156.5
	2nd half-length (2nd AF length), ft	160.7

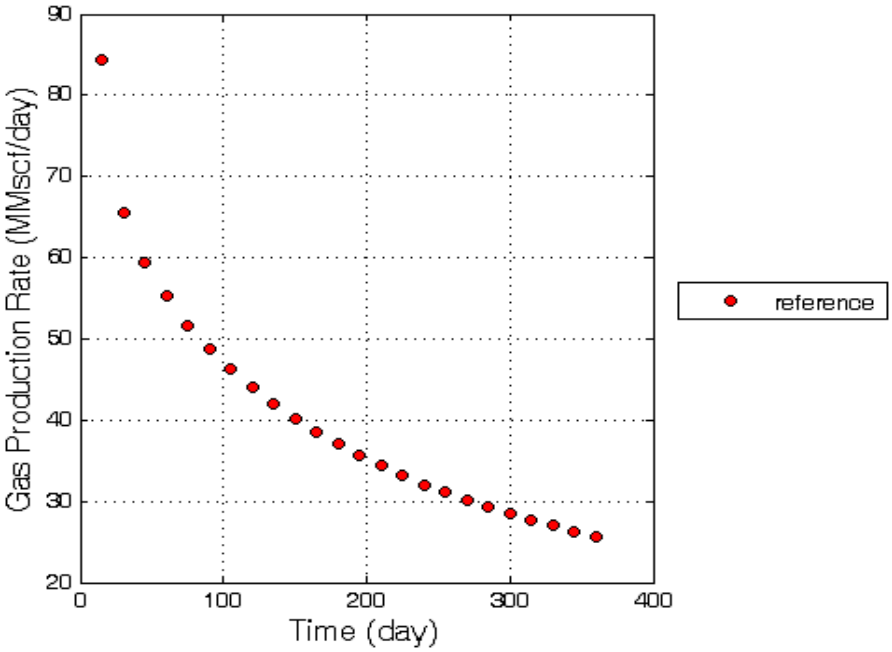


Figure 4.21 Gas production rate record of reference2.

2,160개의 모델을 참조 모델2의 생산이력과의 유사성으로 20개의 모델을 선정했다. Figure 4.22는 초기 모델 전체와 참조 모델2의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.23은 선정된 모델과 참조 모델2의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.13과 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델2와 유사성을 가진다. 20개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델2의 인자 값의 오차는 Table 4.13의 Error와 같다. Figure 4.24 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.25는 EUR을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 0.41%, 기존 방법은 2.59%로 나타났다.

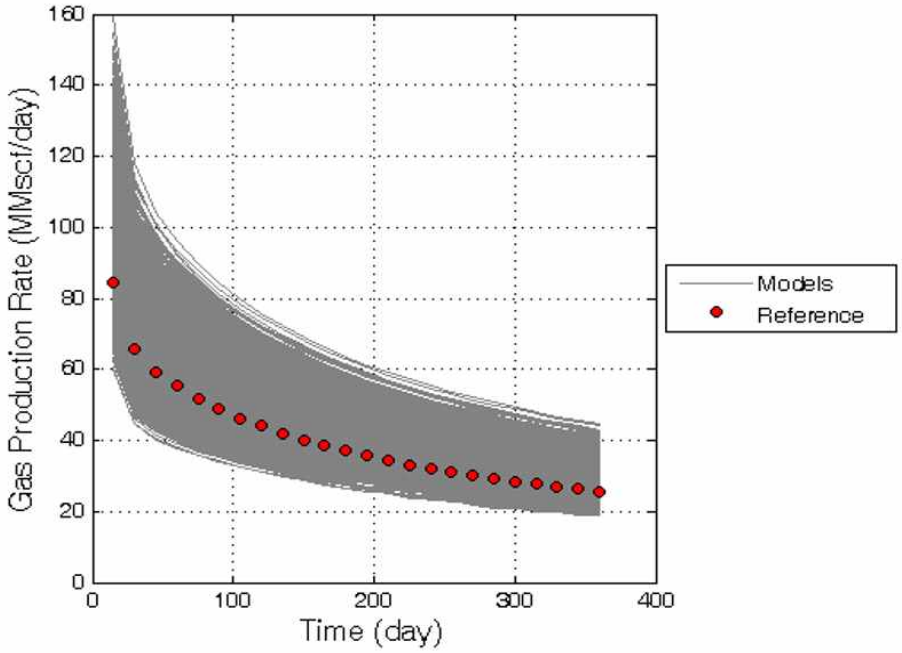


Figure 4.22 Gas production rate of initial models and reference2.

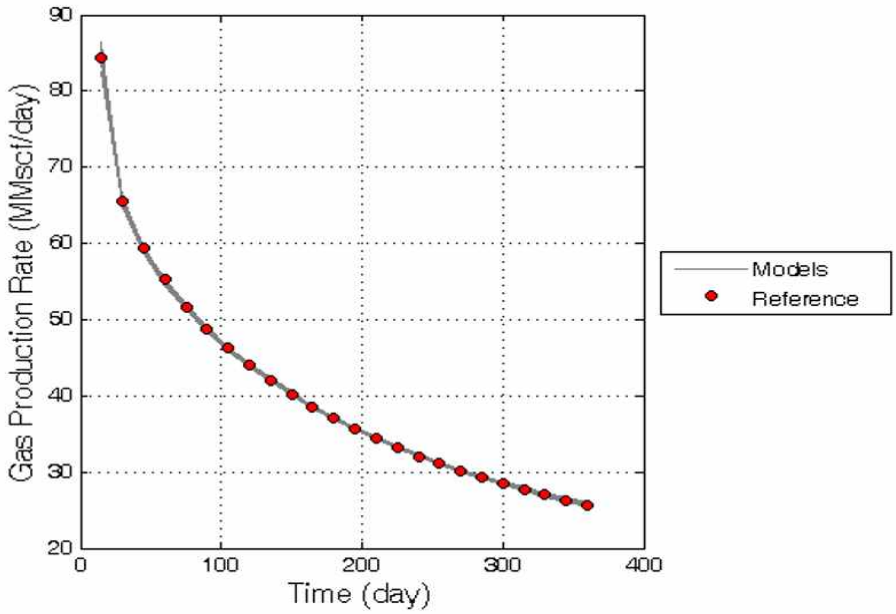
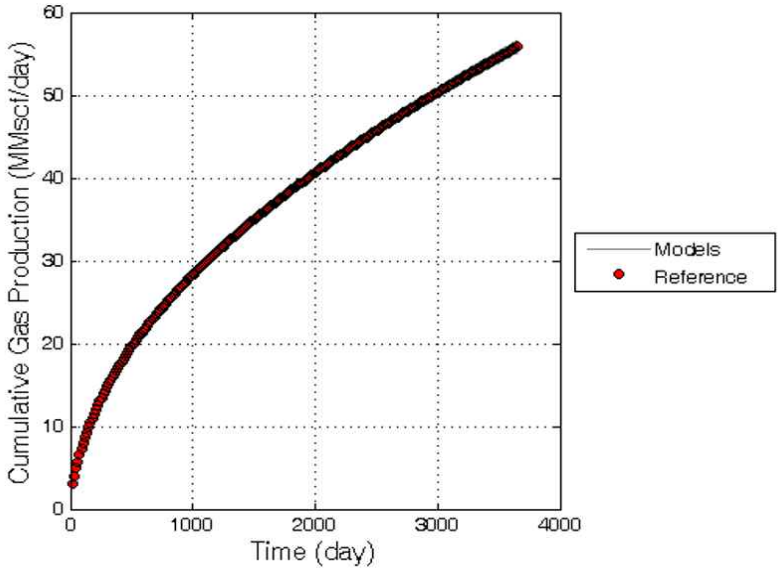


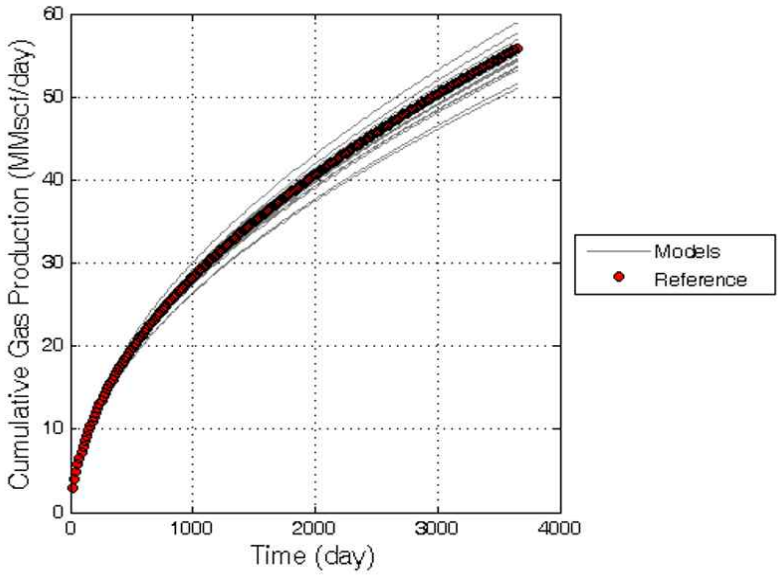
Figure 4.23 Gas production rate of selected models and reference2.

Table 4.13 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0125	45	1.00E-06	135	40	140	180
2	0.015	45	7.50E-07	135	40	160	160
3	0.015	45	5.00E-07	135	40	200	140
4	0.015	45	7.50E-07	135	20	160	180
5	0.015	45	5.00E-07	135	40	160	180
6	0.015	45	7.50E-07	135	40	180	140
7	0.0125	45	7.50E-07	135	20	180	160
8	0.0125	45	1.50E-06	135	20	140	180
9	0.015	45	5.00E-07	135	40	180	160
10	0.015	45	7.50E-07	135	40	140	180
11	0.0125	45	1.50E-06	135	20	160	160
12	0.01	45	1.25E-06	135	20	180	140
13	0.01	45	7.50E-07	135	40	140	200
14	0.01	45	5.00E-07	135	40	200	160
15	0.0125	45	1.50E-06	135	40	140	160
16	0.0125	45	1.00E-06	135	40	180	140
17	0.0125	45	1.00E-06	135	40	160	160
18	0.0125	45	5.00E-07	135	40	140	200
19	0.01	45	1.25E-06	135	20	140	200
20	0.015	45	1.25E-06	135	20	160	160
Mean	0.013	45	9.13E-07	135	33	162	167
Reference2	0.0139	31	6.68E-07	159	36.6	157	161
Error(%)	-6.47	45	36.60	-15	-9.7	3.2	3.7



(a)



(b)

Figure 4.24 Cumulative gas production of selected models and reference2 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

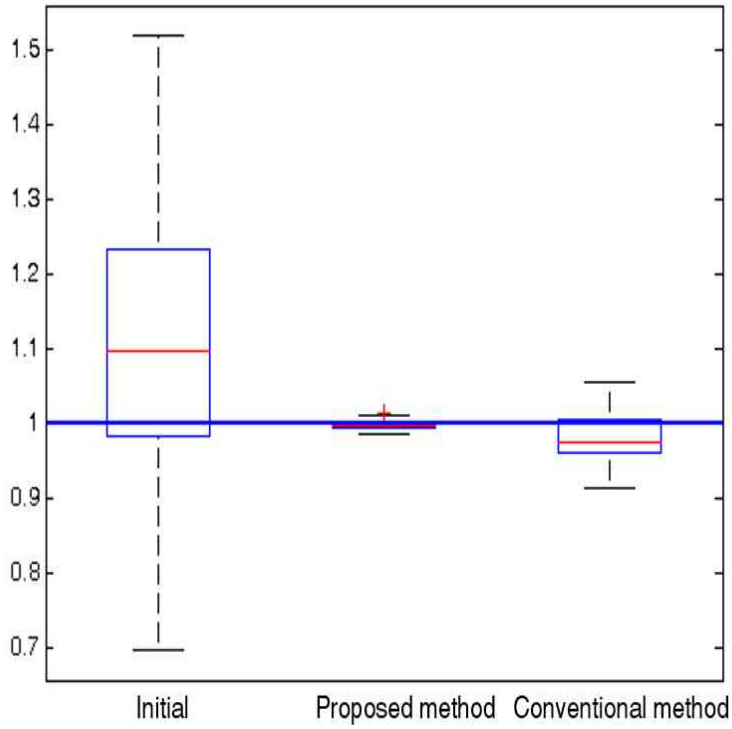


Figure 4.25 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference2 EUR).

자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 두 번째 예시로 참조 모델3의 모델 선정법을 수행하였다. Table 4.14는 참조 모델3의 균열 특성이며, Figure 4.26은 참조 모델3의 생산이력이다.

2,160개의 모델을 참조 모델3의 생산이력과의 유사성으로 19개의 모델을 선정했다. Figure 4.27은 초기 모델 전체와 참조 모델3의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.28은 선정된 모델과 참조 모델3의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.15와 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델3과 유사성을 가진다. 19개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델3의 인자 값의 오차는 Table 4.15의 Error와 같다. Figure 4.29 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.30은 EUR을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 0.39%, 기존 방법은 1.84%로 나타났다.

자연균열 집중성이 낮은 경우에 두 가지 참조 모델(참조 모델2, 참조 모델3)을 통해 제안한 방법의 예측성능이 기존의 방법보다 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 방법이 자연균열의 위치와 인공균열의 반길이의 분포로 인한 연결성을 고려하지 못했기 때문으로 볼 수 있다.

Table 4.10, Table 4.13, Table 4.15를 통해 참조 모델 1, 2, 3의 특성화가 이루어졌다. 자연균열 집중성이 높은 경우였던 참조 모델1의 경우 Table 4.10에서 자연균열 집중성에서는 오차가 낮았고, 다른 인자들도 20% 이내의 오차가 나타났다. 자연균열 집중성이 낮은 경우의 참조 모델2의 인자들은 Table 4.13에서 자연균열 방향성과 간극에 대해서는 높은 오차를 보였으나, 인공균열 반길이와 자연균열 집중성, 자연균열 위치와 같은 민감도가 높았던 균열 공간분포특

성에 대해 낮은 오차를 보였다. Table 4.15의 참조 모델3도 같은 결과를 보였다. 제안한 방법은 집중성이 낮은 경우에 대해 민감도가 높은 인자들에 대한 특성화가 신뢰성이 있는 것으로 볼 수 있다.

Table 4.14 Values of fracture parameters for reference3 at low natural fracture intensity

	Parameter	Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.0134
	Trend (NF trend), °	58
	Aperture (NF aperture), ft	9.89E-7
	Length (NF length), ft	154.3
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	27.92
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	198.9
	2nd half-length (2nd AF length), ft	206.1

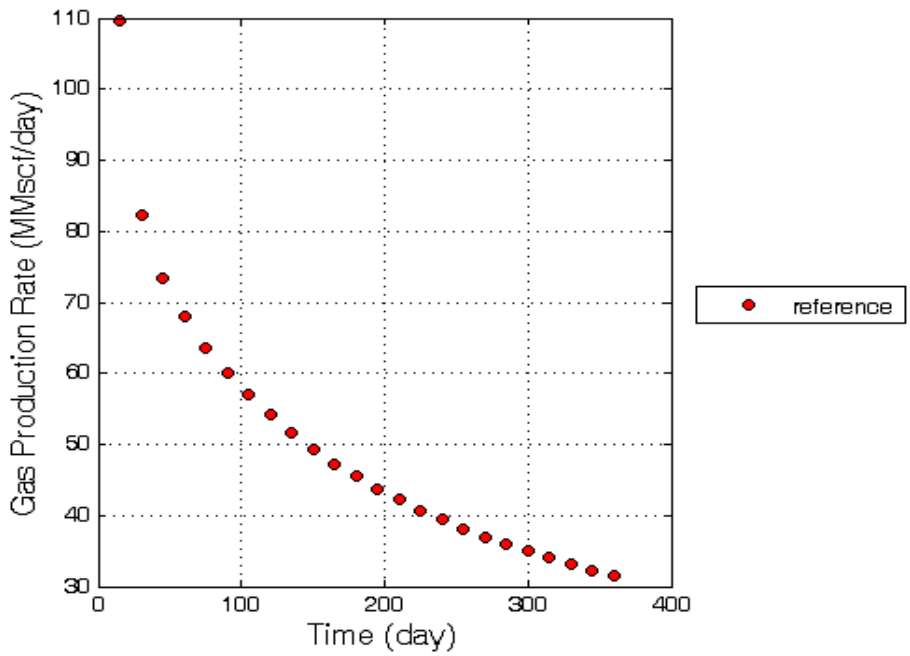


Figure 4.26 Gas production rate record of reference3.

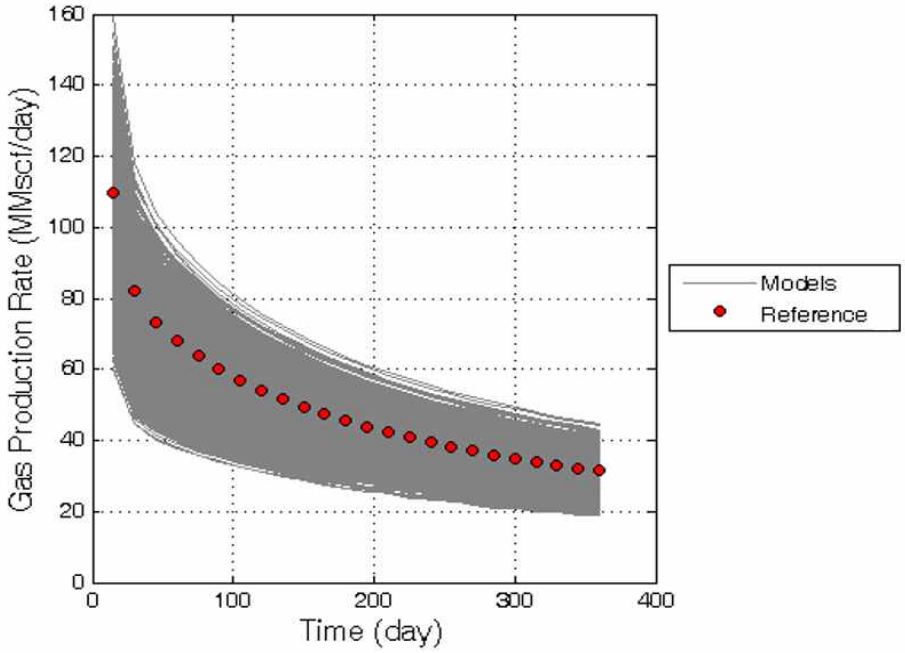


Figure 4.27 Gas production rate of initial models and reference3.

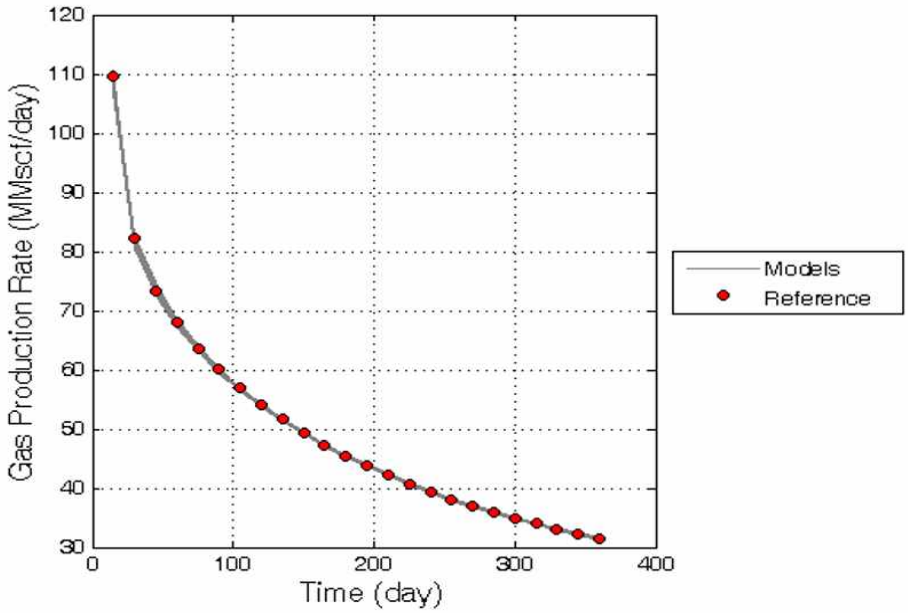
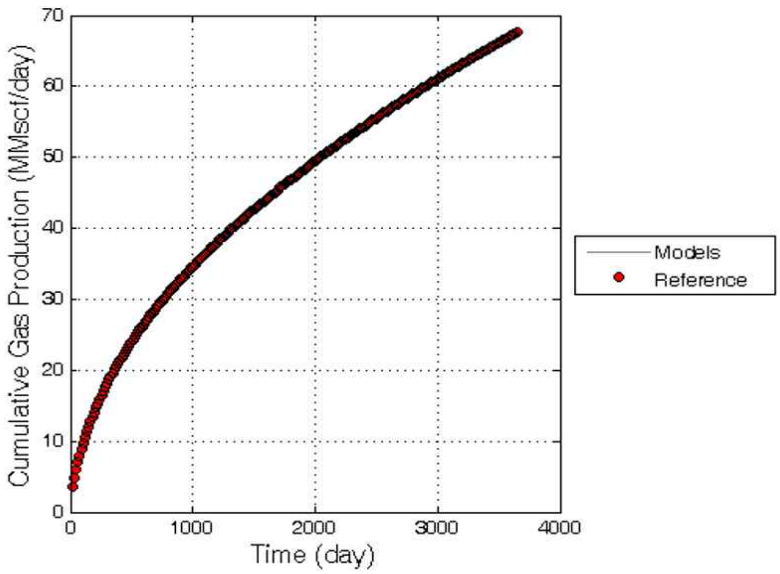


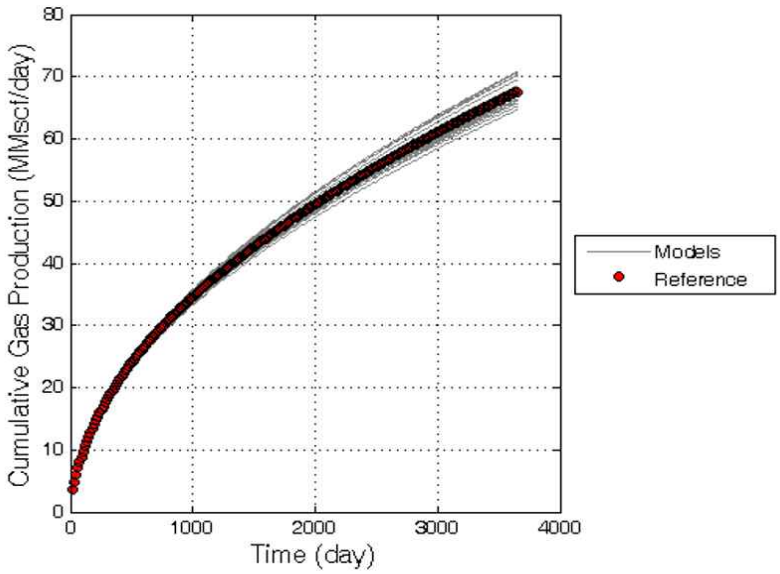
Figure 4.28 Gas production rate of selected models and reference3.

Table 4.15 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.01	45	5.00E-07	135	30	240	200
2	0.01	45	1.25E-06	135	30	200	200
3	0.0125	45	5.00E-07	135	40	200	220
4	0.0125	45	7.50E-07	135	30	240	160
5	0.01	45	7.50E-07	135	30	240	180
6	0.015	45	1.25E-06	135	20	240	140
7	0.0125	45	7.50E-07	135	20	240	180
8	0.01	45	5.00E-07	135	30	220	220
9	0.01	45	1.50E-06	135	30	220	160
10	0.0125	45	5.00E-07	135	20	240	200
11	0.0125	45	7.50E-07	135	20	220	200
12	0.0125	45	1.25E-06	135	30	180	200
13	0.0125	45	5.00E-07	135	20	200	240
14	0.01	45	7.50E-07	135	30	220	200
15	0.0125	45	1.00E-06	135	30	220	160
16	0.0125	45	7.50E-07	135	30	220	180
17	0.01	45	5.00E-07	135	30	200	240
18	0.015	45	5.00E-07	135	40	240	180
19	0.0125	45	5.00E-07	135	40	180	240
Mean	0.0118	45	7.76E-07	135	28.9	219	195
Reference3	0.0134	58	9.89E-07	154	27.9	199	206
Error(%)	-11.65	-22	-21.52	-12	3.66	10.1	-5.5



(a)



(b)

Figure 4.29 Cumulative gas production of selected models and reference3 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

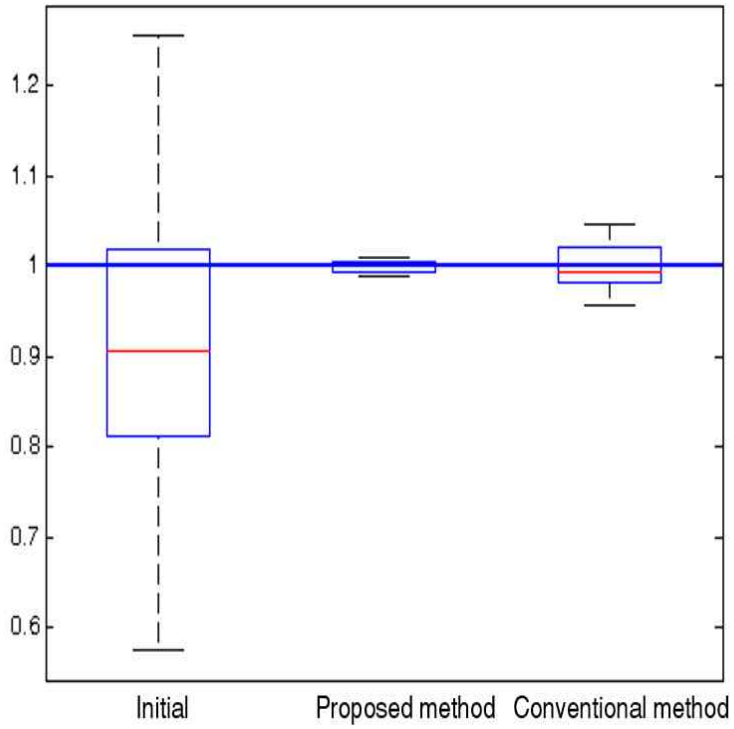


Figure 4.30 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference3 EUR).

5. 결 론

이 연구는 셰일가스 저류층의 자연균열과 수압파쇄기법으로 생성된 인공균열의 속성을 정량적으로 특성화하고, 이를 통해 향후 생산 거동 예측의 불확실성을 감소하는데 목적을 가졌다. 특성화하는 자연균열의 특성은 집중성, 방향성, 간극, 길이, 균열간 간격 및 위치였다. 특성화하는 인공균열의 특성은 균열 반길이였다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 거리기반 일반 민감도 분석 기법으로 각 인자들의 민감도를 분석하였으며, 민감도가 높은 인자들을 중심으로 모델을 생성하여 모델 선정법을 수행하였다. 분리균열모델중 하나인 Levy-Lee 모델로 실제의 자연균열 모사하고, 이를 Oda 방법으로 업스케일링하여 이중공극·이중유체투과도모델의 인자로 반영한 혼합모델을 사용했다. 반영된 인자인 x, y, z 방향의 균열 유체투과도와 매질-균열연결인자는 자연균열의 특성을 반영한 정보를 가지고 인공균열 반길이와 연결되어 균열망을 형성했다. 자연균열과 인공균열의 연결성은 가스 생산량 등의 저류층 생산 거동에 영향을 주기 때문에 특성화 인자로 사용될 수 있다. 각 모델들의 동적 반응 변수인 가스 생산량을 이용해 클러스터링하는 방식으로 모델 선정법을 진행했다. 참조 모델의 가스 생산량 자료와 각 클러스터의 대표 모델들의 가스 생산량 자료의 우도함수 값을 계산하여 유사성을 판단했다. 반복적인 모델 선정법으로 유사성이 가장 높은 모델 그룹이 선정됐다. 선정된 모델들이 가지고 있는 자연균열 특성과 인공균열 특성으로 참조 모델의 균열 특성을 불확실성 범위

내에서 특성화했다. 또한 선정된 다수의 모델의 향후 생산 거동을 시뮬레이션 하여, 참조 모델의 향후 생산 거동을 예측할 수 있었다. 이러한 과정을 통한 이번 연구의 결론은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. 셰일가스 저류층 내에서 자연균열과 인공균열의 연결성은 동일한 균열 개체특성을 가지고 있어도 균열 공간분포특성에 따라 다른 연결성을 보이며 이는 저류층 내의 가스 유동반경과 유동성에 영향을 주어 최종적으로 가스 생산량에 반영되었다. 기존의 자연균열과 인공균열의 상호적인 연결성을 고려하지 않은 셰일가스 저류층 모사가 가지는 균열 특성화와 향후 생산거동 예측 불확실성의 한계를 균열간 연결성의 고려로 해결할 수 있다.

2. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 균열의 공간분포특성은 중요성이 다르게 나타난다. 자연균열 집중성이 높은 경우 균열간의 상호적인 연결성이 저류층 전체에서 나타나기 때문에 균열 개체특성에 비해 균열 공간분포특성의 비중이 낮게 나타난다. 자연균열 집중성이 낮은 경우는 이와 다른 양상을 보이는데, 균열이 저류층 전체에 걸쳐 나타나지 않기 때문에 균열간 간격 및 위치와 자연균열과 연결되는 인공균열 반길이의 분포가 전체 연결성에 큰 영향을 준다. 이에 따라 자연균열 집중성이 낮은 경우에는 균열의 공간분포 특성이 강조된다. 균열의 특성화를 진행함에 있어서 기존의 방법에서 배제된 균열 공간분포 특성이 반영되어야 한다.

3. 자연균열 집중성이 높은 경우 이번 연구에서 제안한 방법과 같이 균열 공간분포특성를 고려한 결과와 기존의 방법이 향후 생산거동 예측에서 큰 차이를 보이지 않았다. 자연균열 집중성이 낮은 경우 공간분포 특성을 고려한 이번 연구의 제안한 방법이 기존의 방법보다 향후 생산거동 예측 성능과 균열 특성 정량화에서 우수한 결과를 가졌다. 이러한 점에서 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열의 공간분포특성의 고려가 필수적이며, 제안한 방법으로 기존 방법의 한계점을 극복할 수 있다.

참고 문헌

박영숙, 2013. 반응표면법을 이용한 셰일가스 생산 모델링. 서울대학교 공학석사학위논문.

정승필, 2008. 앙상블칼만필터를 이용한 균열저류층 특성화. 서울대학교 공학박사학위논문.

Al-Huthali, A. and Datta-Gupta, A. 2004. Streamline Simulation of Counter-current Imbibition in Naturally Fractured Reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering Vol (43): 271-300.

Bello, R. O. 2009. Rate Transient Analysis in Shale Gas Reservoirs with Transient Linear Behavior. PhD dissertation, Texas A&M University.

Berkhin, P. 2006. A Survey of Clustering Data Mining Techniques, Grouping Multidimensional Data, 25-72.

Bhowmik, S., Srinivasan, S., and Bryant, S. L. 2010. Predicting the Migration of CO2. Plume Using Injection Data and a Distance-Metric Approach to Reservoir-Model Selection. Paper SPE 139709 presented at the SPE International Conference on CO2 Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, 10–12 November.

Bhowmik, S. 2014. Particle Tracking Proxies for Prediction of CO2

Plume Migration Within a Model Selection Framework. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

Cherpeau, N., Caumon, G., Caers, J. et al. 2012. Method for Stochastic Inverse Modeling of Fault Geometry and Connectivity using Flow Data. Math. Geosci. Vol(44): 147-168.

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.

Cui, H. and Kelkar, M. 2005. Automatic History Matching of Naturally Fractured Reservoirs and a Case Study. Paper SPE 94037 presented at the Western Regional Meeting, Irvine, California, USA, 30 March-1 April.

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, New Mexico, 3-5 June.

Fenwick, D., Scheidt, C., and Caers, J. 2014. Quantifying Asymmetric Parameter Interactions in Sensitivity Analysis: Application to Reservoir Modeling. Math. Geosci. Vol(46): 493-511.

Fisher, R. 1953. Dispersion on a Sphere. The Royal Society of London Vol (217): 295-305.

Ghods, P. and Zhang, D. 2012. Automatic Estimation of Fracture Properties in Multi-Stage Fractured Shale Gas Horizontal Wells for Reservoir Modeling. Paper SPE 153913 presented at the SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 21-23 March.

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

Hu, L. Y. and Jenni, S. 2005, History Matching of Object-Based Stochastic Reservoir Models. Paper SPE 81503 in proceeding SPE J. Vol(3): 312-323.

Kalantari-Dahaghi, A. 2010. Numerical Simulation and Modeling of Enhanced Gas Recovery and CO_2 Sequestration in Shale Gas Reservoirs: A Feasibility Study. Paper SPE 139701 presented SPE International Conference on CO_2 Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, 10-12 November.

Mantilla, C.A. 2010. Feedback Control of Polymer Flooding

Process Considering Geologic Uncertainty. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

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.

Morales-German, G., Navarro-Rosales, R., and Dubost, X. F. 2012. Production Forecasting for Shale Gas Exploration Prospects Based on Statistical Analysis and Reservoir Simulation. Paper SPE 152639 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, 16-18 April.

Nejadi, S., Leung, J., and Trivedi, J. 2012. Integration of Production Data for Estimation of Natural Fracture Properties in Tight Gas Reservoirs Using Ensemble Kalman Filter. Paper SPE 162783 presented SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Alberta, 30 October-1 November.

Nejadi, S., Leung, J., and Trivedi, J. 2015. Integrated Characterization of Hydraulically Fractured Shale Gas Reservoirs-Production History Matching. 2015. Paper SPE 171664 presented SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary, Canada, 30 September-2 October.

Oda, M. 1985. Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses, Geotechnique, Vol (35): 483.

Ouenes, A.m Richardson, S., and Weiss, W. W. 1995. Fractured Reservoir Characterization and Performance Forecasting using Geomechanics and Artificial Intelligence. Paper SPE 30572 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, USA, 22-25 October.

Suzuki, S., Daly, C., Caers, J. et al. 2007. History Matching of Naturally Fractured Reservoirs using Elastic Stress Simulation and Probability Perturbation Method. Paper SPE 95498 proceeding SPE J. Vol(1): 118-129.

Warren, J.E. and Root, P.P. 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoir. SPE J. Vol (3): 245-255.

ABSTRACT

The most effective parameter for gas production in shale gas reservoirs is the connectivity between artificial fractures and natural fractures. Artificial fractures and natural fractures are represented by individual characteristics, which are fracture aperture, length, and trend of fractures. They are also represented by spatial distribution characteristics, which are fracture intensity, location, and interval. Fluid flow radius and flow volume in shale gas reservoirs depend on connectivity changes in the characteristic value of artificial and natural fractures.

Previous studies have not considered artificial fractures and natural fractures simultaneously, and assumed individual characteristics or spatial distribution characteristics of fractures for the limits of analysis objects during the characterization of fractures. These studies have shown unstable prediction performance because they cannot reflect the connectivity of fractures.

This study develops a fracture characterization method that involves uncertain parameter quantification for each fracture when considering artificial and natural fractures in shale gas reservoirs. Uncertain fracture parameters are ranked by high sensitivity through Distance-based Generalized Sensitivity Analysis (DGSA) in cases of high natural fracture intensity and low natural fracture intensity in each reservoir. Also, the model selection uses different

model groups generated by the sensitivity of each case to quantify the characteristic parameters of artificial and natural fractures. The proposed method minimizes the number of models and improves quantified accuracy as reference values.

Key words: natural fracture, artificial fracture, fracture intensity, distance-based generalized sensitivity analysis, model selection approach

Student number: 2014-20527

creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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

dCollection

공학석사학위논문

모델 선정법을 이용한 셰일가스 저류층 균열 특성화

Characterization of Fractures in Shale Gas Reservoirs by a Model Selection Approach

2016년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

임 지 훈

초 록

셰일가스 저류층에서 생산량에 영향을 주는 가장 큰 요소는 인공균열과 자연균열의 연결성이다. 인공균열과 자연균열은 독립된 균열의 특성인 개체특성과 균열들의 분포를 나타내는 공간분포특성으로 표현한다. 인공균열과 자연균열의 특성에 따라 나타나는 균열 연결성의 변화는 저류층 내 유체의 유동반경과 유동량에 영향을 준다. 셰일가스 저류층의 생산량은 균열 연결성에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 주어진 자료 내에서 각각의 인자들을 정량화할 필요가 있다.

기존의 연구방법은 인공균열과 자연균열을 동시에 고려하지 않거나 균열의 개체특성 또는 공간분포특성을 가정하여 분석의 대상을 제한하는 방법으로 균열들의 특성화를 진행하였다. 이러한 제한된 특성화는 형성되는 인공균열과 자연균열의 연결성을 충분히 반영하지 못하기 때문에 불안정한 예측성능을 보였다.

이 연구에서는 셰일가스 저류층의 인공균열과 자연균열 연결성, 모두를 고려하여 각 균열의 인자를 정량화하는 균열 특성화 방법을 개발하였다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우로 나누어 거리기반 일반 민감도 분석기법으로 각각의 민감도를 분석하여, 민감도 수치가 높은 균열 특성만을 고려하였다. 또한 각 경우에 대해 모델 생성 방식을 달리한 모델 선정법으로 인공균열과 자연균열의 인자를 정량화하였다. 제안한 방법은 모델 수를 최소화하고 참값에 대한 정량적인 정확도를 높일 수 있었다.

주요어: 자연균열, 인공균열, 균열 집중성, 거리기반 일반 민감도 분석, 모델 선정법

학 번: 2014-20527

목 차

초 록 ····· i
List of Tables ····· iii
List of Figures ····· v

1. 서 론 ····· 1

2. 이론적 배경 ····· 8
2.1 균열 특성 ····· 8
2.2 균열 모델 ····· 16
2.3 거리기반 일반 민감도 분석 ····· 24
2.4 모델 선정법 ····· 28

3. 민감도 기반 균열 모델 선정법 개발 ····· 35

4. 연구 결과 ····· 37
4.1 유동모사를 통한 균열 연결성 평가 ····· 37
4.2 자연균열 집중성에 다른 생산량 민감도 평가 ····· 59
4.3 공간적 균열분포에 따른 모델 선정법 효과 분석 ····· 63

5. 결론 ····· 87

참고 문헌 ····· 90
ABSTRACT ····· 95

List of Tables

Table 2.1 Measure for fracture intensity (Dershowitz and Herda, 1992) ····· 13
Table 4.1 Reservoir data of the reference field ····· 38
Table 4.2 Fracture data of the reference field ····· 39
Table 4.3 Initial gas production rate as sum of half-length of artificial fractures ····· 43
Table 4.4 Initial gas production rate as same half-length of artificial fractures and different natural fracture locations ····· 50
Table 4.5 30 cases: Initial gas production rate as same sum of half-length of artificial fractures and different natural fracture locations ····· 55
Table 4.6 Ranges of fracture parameters for DGSA at high natural fracture intensity ····· 61
Table 4.7 Ranges of fracture parameters for DGSA at low natural fracture intensity ····· 61
Table 4.8 Ranges of fracture parameters for model selection at high natural fracture intensity ····· 65
Table 4.9 Values of fracture parameters for reference at high natural fracture intensity ····· 65
Table 4.10 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 69
Table 4.11 Ranges of fracture parameters for model selection at low natural fracture intensity ····· 73
Table 4.12 Values of fracture parameters for reference2 at low na

tural fracture intensity ····· 73
Table 4.13 Values of fracture parameters of selected models (1: I ntensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 77
Table 4.14 Values of fracture parameters for reference3 at low na tural fracture intensity ····· 82
Table 4.15 Values of fracture parameters of selected models (1: I ntensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length) ····· 84

List of Figures

Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoirs (박영숙, 2013) ····· 5
Figure 2.1 Cumulative gas production on various trends ····· 11
Figure 2.2 Cumulative gas production on various intensities ····· 14
Figure 2.3 Classification of continuum models in a fractured reservoir (Al-Huthali and Datta-Gupta, 2004) ····· 20
Figure 2.4 Schematic diagram of dual porosity (Golf-Racth, 1982) ····· 20
Figure 2.5 Idealization of a fractured system (Warren and Root, 1963) ····· 23
Figure 2.6 Distance map of DGSA for 3 clusters ····· 26
Figure 2.7 Sensitivity for input parameters at each cluster ····· 26
Figure 2.8 Parameter x probability distribution function at each cluster ····· 27
Figure 2.9 Distance-based generalized sensitivity of parameter x, y, and z ····· 27
Figure 2.10 Effectiveness of clustering: a) actual data points used for the demonstration, and there are clearly 4 clusters points in this case, b) plot of effectiveness of clustering versus the number of clusters shows a kink at 4 which is the correct number of clusters (Bhowmik, 2014) ····· 31
Figure 2.11 Uncertainty envelopes around reference data. The Production data of on reservoir model falls within the 66% probability envelope (Mantilla, 2010) ····· 34
Figure 3.1 Flow chart of the proposed method ····· 36

Figure 4.1 5 types of natural fracture location ····· 42
Figure 4.2 Artificial fractures at Figure 4.1 (a) natural fracture distr ibution ····· 42
Figure 4.3 Initial gas production rate at 6 cases of Table 4.3 ···· 45
Figure 4.4 Discrete fracture network models: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3 ····· 45
Figure 4.5 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3 ····· 46
Figure 4.6 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 year s, and (d) 10 years of Case 1 of Table 4.3 ····· 47
Figure 4.7 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 year s, and (d) 10 years of Case 6 of Table 4.3 ····· 48
Figure 4.8 Initial gas production rate at 5 cases of Table 4.4 ···· 51
Figure 4.9 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4 ···· ····· 52
Figure 4.10 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1, (b) Cas e 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4 ····· 53
Figure 4.11 Initial gas production rate of Case 1 and Case 18 of Table 4.5 ····· 57
Figure 4.12 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5 ····· 58
Figure 4.13 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5 ····· 58
Figure 4.14 Sensitivity by DGSA at high natural fracture intensity ····· 62
Figure 4.15 Sensitivity by DGSA at low natural fracture intensity

····· 62
Figure 4.16 Gas production rate record of reference1 ····· 66
Figure 4.17 Gas production rate of initial models and reference1 ····· 68
Figure 4.18 Gas production rate of selected models and reference 1 ····· 68
Figure 4.19 Cumulative gas production of selected models and ref erence1 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 70
Figure 4.20 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference1 EUR) ····· 71
Figure 4.21 Gas production rate record of reference2 ····· 74
Figure 4.22 Gas production rate of initial models and reference2 ····· 76
Figure 4.23 Gas production rate of selected models and reference 2 ····· 76
Figure 4.24 Cumulative gas production of selected models and ref erence2 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 78
Figure 4.25 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference2 EUR) ····· 79
Figure 4.26 Gas production rate record of reference3 ····· 82
Figure 4.27 Gas production rate of initial models and reference3 ····· 83
Figure 4.28 Gas production rate of selected models and reference 3 ····· 78
Figure 4.29 Cumulative gas production of selected models and ref

erence3 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method ····· 85
Figure 4.30 EUR box plot by Initial, proposed method, and conve ntional method (The center line is reference3 EUR) ····· 86

1. 서 론

지속적인 에너지 수요의 증가와 전통적인 석유자원의 고갈로 셰일가스, 셰일오일, 오일샌드, 가스 하이드레이트 등의 비전통 석유자원의 개발과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 중 셰일가스는 세계적으로 풍부한 가채매장량과 비편재된 분포로 향후 중요 에너지 자원으로 인식되고 있다. 셰일가스는 유기물과 함께 퇴적된 셰일층에 존재하는 천연가스이다. 셰일층의 낮은 유체투과도는 생성된 천연가스의 확산을 지연시킨다.

셰일층은 공극률과 유체투과도가 매우 낮아 자연 상태에서 유체 유동이 거의 일어나지 않는다. 일반적인 천연가스 회수 방법은 적용이 어렵기 때문에 수평시추와 다단계 수압파쇄기법을 적용하여 생산한다. 다단계 수압파쇄기법은 셰일가스 생산을 위해 셰일층에 고압의 파쇄수로 인공균열을 만드는 방법이다. 파쇄수는 프로판트(proppant), 화학 물질 등과 함께 지층에 단계적으로 인공균열을 생성한다. 생성된 인공균열은 셰일층 내의 자연균열과 연결되어 균열망(fracture network)을 만든다. 주입된 프로판트는 파쇄 이후 생긴 균열의 유지를 위해 사용된다.

셰일가스 생산은 전통 가스 저류층의 회수율인 80-90%에 비해 비교적 낮은 5-15%의 회수율을 가진다(Cipolla와 Lolon, 2010). 셰일가스 저류층은 수평정 시추 및 다단계 수압파쇄기법으로 인하여 개발 및 생산설비의 비용이 높다. 셰일층은 높은 취성도로 수압파쇄에 유리한 조건을 가지고 있지만 인공균열 및 자연균열과의 균열망 형성 예측이 어렵다. 개발의 과정에서

인공균열과 자연균열의 특성화를 통해 연결성을 파악하는 것은 향후 생산거동 예측과 의사결정에서 필수적이다.

셰일가스 저류층 내의 유동양상은 흡착가스의 탈착 및 확산, 매질 내 자유가스의 확산, 균열 내 유동으로 나타난다. 흡착가스는 압력이 강하될 때, 셰일 매질 내 유기물질의 표면에서 가스가 탈착되며 생긴다. 탈착된 가스와 자유가스는 Figure 1.1과 같이 매질에서 공극을 따라 균열면에 도달할 때까지 확산을 통해 이동한다. 균열에 도달한 가스는 압력이 상대적으로 낮은 유정으로 이동되어 생산이 이루어진다.

셰일가스 저류층 내의 유체유동은 대부분 균열을 통한다. 생산거동을 예측하기 위해 정확한 균열망의 분포와 균열의 속성 값을 알아내야 한다. 탄성파자료나 시추자료를 통한 균열 정보와 노두조사 자료는 한정적이지만 자연균열의 개체특성인 자연균열 방향성, 간극, 길이 등을 일정범위 내에서 한정할 수 있다. 수압파쇄 과정에서 얻는 미소지진(microseismic) 자료는 생산자료 없이 균열분포를 유추할 수 있다. 하지만 저류층 내의 균열망의 세부 속성 값을 파악하는 것이 어렵고, 불확실성이 크다. 신뢰성 있는 균열속성을 예측하고 생산거동의 불확실성을 감소시키기 적합한 균열 모델을 찾아야 한다.

Ouenes 등(1995)는 인공신경망을 이용하여 자연균열의 집중성을 특성화하는 것으로 셰일가스 저류층의 유동성을 파악했다. Suzuki 등(2005)은 확률변화법(Probability-Petrurbation method)로 자연균열의 집중성과 방향성을 특성화하고 저류층에서의 가스 유동을 설명했다. Hu와 Jenni (2005)는 참거짓 시뮬레이션(Boolean simulation)을 이용한 점진적 변형법(Gradual Deformation

method)으로 자연균열의 위치와 집중성을 전통 석유자원 저류층에 적용하여 특성화했다. Cui와 Kelkar (2005)는 코어 자료, 로깅 자료, 탐사를 통한 유전 전체 정보, 구조적 지질학적 정보 등을 이용하여 자연균열 집중성을 파악하고 이를 통해 균열의 유체투과율과 균열-매질 연결인자를 계산했다. Mattar 등(2008)은 다단계 수압파쇄법이 적용된 수평정을 대상으로 생산량 감퇴곡선 분석 및 생산량 예측을 시행했다. 단일공극 저류층에 단상의 유체가 거동한다는 가정 하에 멱함수지수를 이용한 생산량 감퇴곡선 분석을 실시했다. Cipolla 등(2009)은 수평정을 시추했을 때, 생산성 향상을 위해 고려해야 할 인자로써 파쇄전도도, 파쇄간격, 파쇄길이 등을 제시했다. 초기 전도도가 낮은 저류층에서 수압파쇄 간격을 줄여 균열망의 복잡성과 유정자극범위(Stmulated Reservoir Volume, SRV)를 증가시킬 경우 생산성 및 회수율이 크게 향상될 것으로 예측했다. 그러나 셰일가스 저류층의 자연균열에 따른 이방성과 비균질성을 고려하지 않았다. Bello (2009)는 천이유동분석(Rate Transient Analysis, RTA)를 이용하여 셰일가스 저류층에서의 인공균열 반길이, 균열-매질 접촉 면적 등의 인자를 특성화했다. Kalantari-Dahaghi (2010)는 셰일가스 저류층 가스 회수율 증가를 위한 이산화탄소 주입 최적화에서 균열 특성에 대한 민감도 분석을 수행했다. 미소지진파 자료는 수압파쇄 작업에 의해 균열이 생성될 때 발생하는 지진파를 수집하여 얻는다. 이를 역산하여 균열의 위치와 길이 등의 속성 값을 추정한다. Zimmer (2011)는 미소지진파 자료를 이용하여 유정자극범위를 계산하는 방법을 제안했다. Ghods와 Zhang (2012)는 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter, EnKF)를 사용해 치밀가스 및 셰일가스 저류층의

균열특성화를 수행했다. 이중공극·이중유체투과도(dual porosity·dual permeability, DPDP)모델 기반의 저류층을 구성하고 인공균열대를 각각 독립적인 개체로 가정하여 서로간의 영향을 배제했다. 4개월의 물과 가스 생산 자료를 사용해 히스토리 매칭을 수행했다. Morales-German 등(2012)은 통계분석과 시뮬레이션을 통해 셰일가스 저류층의 생산거동 예측을 수행하였고, 균열 인자에 대한 민감도 분석을 수행했다. 인공균열 반길이와 자연균열 유체투과도, 공저압력, 유정 길이 순으로 높은 민감도를 가졌으며, 자연균열의 특성보다 인위적으로 형성된 특성에 대한 고려를 통한 분석을 했다. Cherpeau 등(2012)은 유체 생산 정보를 통해 추계학적 역산 모델링을 수행하고 이를 몬테카를로 마르코프 체인(Monte Carlo Marcov Chain, MCMC)로 단층의 방향성, 위치, 크기, 곡률 등을 특성화하고 단층간 연결성을 분석했다. Nejadi 등(2012)은 앙상블칼만필터를 이용하여 치민가스 저류층의 자연균열 특성화를 수행했다. Nejadi 등(2015)는 미소지진파 자료를 활용한 앙상블칼만필터 히스토리 매칭을 했다. 균열의 특성을 다양하게 고려하는 시도가 있었지만, 많은 부분에서 가정을 적용했고, 자연균열 위치에 따른 인공균열과의 연결성에 대한 고려가 부족하여 특성화와 향후생산거동 예측에서 불안정한 결과가 나타나는 한계가 있었다.

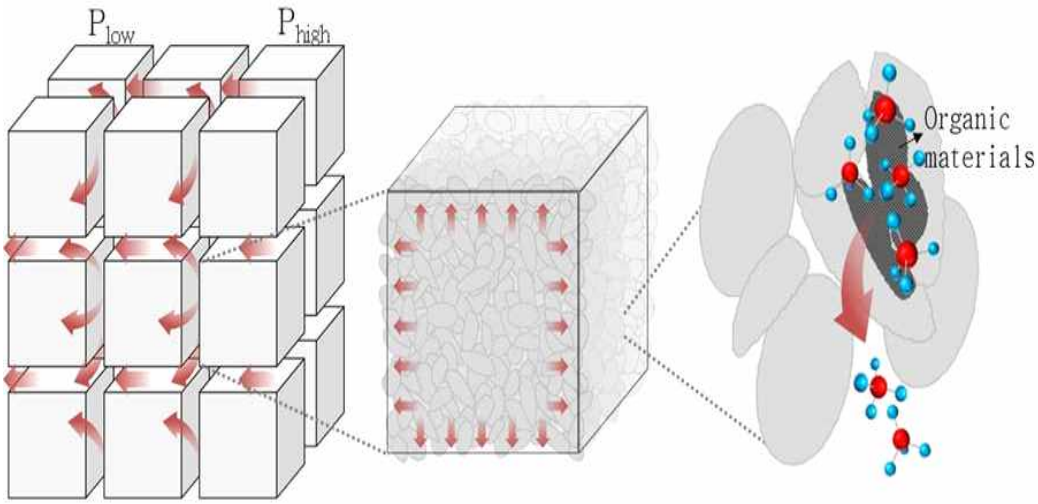


Figure 1.1 Schematic diagram of gas production mechanism in shale reservoirs (박영숙, 2013).

기존 연구의 한계점은 다음과 같다.

1) 자연균열과 인공균열의 연결성에 대한 고려가 부족했다. 셰일가스 생산에서 저류층 내의 유체 유동통로로 사용되는 균열은 서로간의 연결성이 극대화 되었을 때 최대의 생산량을 보일 수 있다. 균열들의 공간분포특성이 반영되지 않아 연결성과 이에 따른 유동반경과 유동성의 차이가 균열 특성화에서 나타나지 않을 경우, 실제 균열 인자들의 값을 불안정하게 정량화하고, 향후 생산거동 예측 성능도 감소하게 된다.

2) 자연균열 집중성에 따른 균열 특성의 민감도 분석이 이루어지지 않았다. 자연균열 집중성이 높은 경우 균열간의 연결이 이미 진행되어 있기 때문에 자연균열의 위치에 대한 고려가 충분하지 않아도 다른 균열 특성이 강조된 특성화를 수행할 수 있다. 하지만 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열의 공간분포 특성의 중요성은 높아지며 이에 따른 연결성과 유체 유동성의 변화를 고려해야 한다.

3) 기존의 균열 특성화와 생산거동 예측은 균열 특성의 민감도를 고려하지 않았다. 균열을 구성하는 특성의 수가 많아질수록 고려해야 하는 인자가 많아지기 때문에 특성화를 진행할 때 초기 모델의 수가 많아지게 된다. 초기 모델의 수가 과도하게 많아지면, 연산 시간이 오래 걸리고 지역 최소화(local minimum)로 인해 특성화 성능이 감소한다. 따라서 각 인자들의 민감도를 고려한 가중치 부여 형식의 특성화가 필요하다.

셰일가스 저류층의 인공균열과 자연균열이 이루는 균열망의

속성은 향후 생산거동을 예측하는데 중요한 요소로 작용한다.

모델 선정법은 가능한 속성 인자의 변화에 따른 모델을 다수 만들어 가장 실제 생산거동에 가까운 모델을 선정하는 방법이다. 이 연구에서는 자연균열과 인공균열의 개체특성과 공간분포특성을 균열망의 속성 인자로 하여 다수의 모델을 만들었다. 민감도에 따라 생성되는 모델들은 균열 특성에 따라 클러스터링 되어 분류된다. 각 클러스터의 대표모델을 시뮬레이션한 결과와 가상의 참조 셰일 저류층 생산 자료를 비교하여 거동이 유사한 대표모델이 속한 클러스터를 선택하는 방식으로 모델 선정법을 진행한다.

반복적인 클러스터 선정을 통해 가상의 참조 셰일 저류층의 가스 생산 거동과 유사한 모델들로 균열을 특성화한다. 선정된 모델들을 이용하여 향후 생산 거동 예측을 수행한다.

2. 이론적 배경

2.1 균열 특성

셰일가스 저류층에서 균열 특성은 개체특성(individual characteristic)과 공간분포특성(spatial distribution characteristic)으로 나눌 수 있다. 균열 개체특성은 단일 균열을 정의할 수 있는 속성으로 자연균열 간극, 길이, 방향성을 포함한다. 균열 공간분포특성은 저류층 내의 다수의 균열이 형성하는 특성으로 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이를 의미한다. 여기서 인공균열 반길이가 자연균열 길이와 다르게 공간분포특성에 포함되는 이유는 인공균열은 인위적으로 자연균열과의 공간적 연결성을 위해 형성하는 것이기 때문이다. 각각의 특성은 수압파쇄대의 성장 및 연결성과 관련이 있으며, 이러한 연결성은 셰일가스 저류층의 생산거동에 큰 영향을 미친다.

2.1.1 균열 개체특성

균열 개체특성은 자연균열의 간극, 길이, 방향성 등의 단일한 균열의 특성을 의미한다.

자연균열의 방향성은 지층면에 대한 주향(strike)과 경사(dip)로 분류한다. 주향은 지층면과 수평면이 만나 이루는 선의 방향성을 진북을 기준으로 측정한 각이다. 지층에서 경사의 방향성은 주향과 직각이 되며, 관측 지점에서 측정한 수직각을 경사각이라고 한다.

분리균열모델에서 균열의 방향성은 선주향(trend)과 선경사(plunge)로 표시된다. 균열의 축이 가리키는 방향을 pole로 지정한다. pole의 수평면에 대한 정사영과 북쪽 방향성이 만드는 각도를 선주향이라 한다. 선경사는 pole이 수평면과 만드는 각도이다. 방향성을 나타내는 각 용어들의 관계는 식 (2.1), (2.2)와 같다.

$$trend = strike - 90^\circ = dip\ azimuth - 180^\circ \tag{2.1}$$

$$plunge = 90^\circ - dip \tag{2.2}$$

균열의 방향성은 대표적으로 Fisher 분포를 이루는 것으로 가정한다. Fisher 분포는 식 (2.3)의 확률밀도함수로 표현된다(Fisher, 1953). 균열의 방향성이 분포인자 κ와 평균 경사 θ를 따른다. Fisher 분포는 자연균열방향성의 분포를 생성하는데 가장 많이 쓰인다. 분포인자는 5-50 범위로 쓰인다. 0일 때 균열이 전 방향성으로 임의의 분포를 보이고, 값이 양수로 커질수록 같은 방향성으로 분포한다.

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

다른 균열 특성 값은 고정하고, Fisher 분포에서 선주향을 변화시키며 셰일가스 저류층의 10년 기간의 누적 가스 생산량은 Figure 2.1과 같다. 균열방향성의 범위는 0-180°로 10°의 간격을 가진다. 인공균열의 선주향은 90°이다. 자연균열의 방향성과

관련하여, 인공균열과 직각을 이루는 0°(=180°)에서 누적 가스 생산량이 최대로 나타나고, 인공균열과 같은 방향성의 선주향 90°에 가까울수록 누적 가스 생산량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 인공균열과 수직일수록 더 많은 수의 자연균열과 균열망을 이룰 수 있기 때문에 생산 가스량도 증가하는 것으로 볼 수 있다.

균열 간극은 하나의 균열을 일종의 틈으로 보고, 해당하는 틈의 길이를 의미한다. 간극이 클수록 유체의 유동채널이 넓어짐을 의미하고, 이는 유체투과도의 증가로 이어진다. 균열의 개체특성으로써 단일 균열에 대한 유동성과 균열 간극은 비례한다고 볼 수 있다.

균열의 길이는 유체의 유동 채널의 길이를 의미하는 것으로 균열 간극에서 설명한 틈의 수직적인 의미로 볼 수 있다. 균열의 길이가 긴 것과 저류층 내의 가스 유동성이 비례하지는 않는다. 하지만 매질로부터 연결되는 범위가 균열의 길이만큼 확장되기 때문에 유동량을 증가시키는 역할을 하고, 공간적으로는 다른 균열과의 연결 확률을 높이기 때문에 균열의 길이는 일반적으로 세일가스 저류층에서 가스 생산량을 증가시키는 요소로 작용한다.

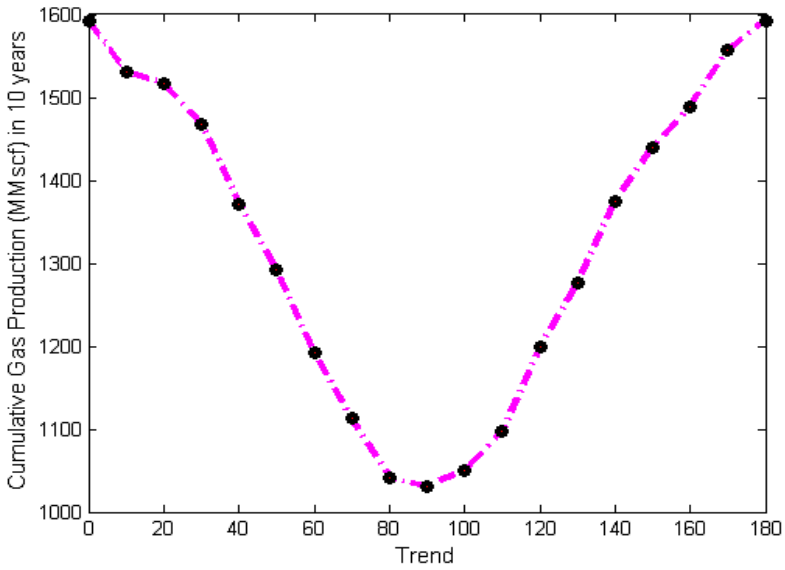


Figure 2.1 Cumulative gas production on various trends.

2.1.2 균열 공간분포특성

균열 공간분포특성은 다수의 균열들이 집합적으로 공간 내에서 이루는 특성으로 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이다.

균열의 집중성은 균열과 매질간의 선, 면, 부피의 비율로 특정지을 수 있다. Table 2.1은 매질 대비 균열의 양 또는 비율을 결정하는 기준을 분류한다. 매질을 측정하는 차원을 a, 균열의 차원을 b라고 할 때, P_{ab}로 표기한다(Dershowitz와 Herda, 1992).

균열 저류층 시뮬레이션에서 주로 P_{10}, P_{32}, P_{33}을 균열 기준으로 사용한다. P_{10}은 임의의 측정선과 교차하는 균열의 빈도를 의미하며, 선형균열 강도라고 한다. P_{32}는 단위부피 내에 존재하는 균열의 면적을 의미하며, 면적균열밀도라고 한다. P_{33}은 부피균열밀도로, 단위부피 내에 존재하는 균열 부피를 의미한다.

균열망의 크기는 유정자극범위와 비례하며, 이는 가스 생산량과 비례한다. 자연균열의 집중성이 커질수록 유정자극범위가 늘어나 생산량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 생산량 평가에 영향을 주는 자연균열의 요소로서 균열의 집중성을 중요한 속성으로 설정해야 한다.

다른 균열 특성 값은 고정하고, P_{32} 기준 지표의 집중성을 변화시켜 셰일가스 저류층의 10년 기간 누적 가스 생산량을 비교한 결과는 Figure 2.2와 같다. 집중성의 범위는 0.01-0.09로 0.01 간격이다. 집중성이 증가할수록 누적 가스 생산량이 증가한다.

Table 2.1 Measure for fracture intensity (Dershowitz and Herda, 1992)

		Dimension of features			
		0	1	2	3
Dimension of sampling region	0 (point)	P_{00}: Number of fracture samples per point sample rock mass [-]			
	1 (linear)	P_{10}: Number of fractures per unit length of scanline or borehole [L^{-1}]	P_{11}: Length of intersects fractures per unit length of scan line[-]		
	2 (areal)	P_{20}: Number of trace centers per unit sampling area [L^{-2}]	P_{21}: Length of fracture traces per unit sampling area [L^{-1}]	P_{22}: Area of fractures per unit sampling area[-]	
	3 (volumetric)	P_{30}: Number of fracture centers per unit rock volume [L^{-3}]		P_{32}: Area of fractures per unit volume of rock mass [L^{-1}]	P_{33}: Volume of fractures per unit volume of rock mass [-]

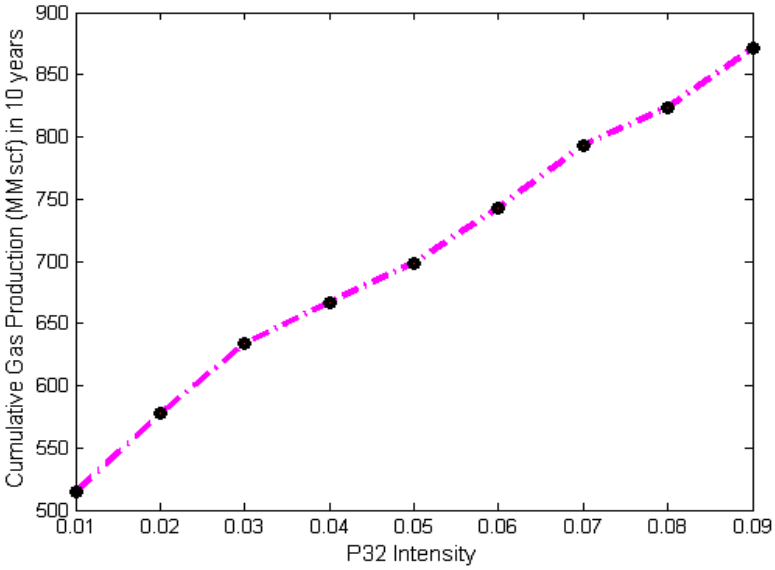


Figure 2.2 Cumulative gas production on various intensities.

균열 공간분포특성은 균열간의 연결성에 대해 큰 영향을 주는 인자로, 자연균열 집중성은 연결성에 비례하게 나타나지만, 자연균열 위치와 인공균열 반길이는 완전한 비례관계라고 할 수 없다. 자연균열 집중성과 다른 개체특성이 모두 동일한 값을 가져도 자연균열 위치와 여러 단계의 인공균열 반길이의 분포는 공간의 특성으로써 해당 인자의 수치와 연결하여 가스 생산량을 예측할 수 없으며, 이는 연결성을 구성하는 중요한 요소로 작용하지만 특성화하기 어려운 요소이다. 4장에서 이러한 공간분포특성과 저류층내 유체의 유동성에 관한 분석과 모델 선정법을 이용해 다수의 모델로서 해당 특성을 정량화하는 시도를 나타낼 것이다.

2.2 균열 모델

셰일가스 저류층은 매질과 매질 사이의 균열을 통한 가스의 탈착과 유동으로 가스의 생산이 이루어진다. 매질에 흡착되어 저장되는 가스는 압력이 낮아지면 탈착된다. 이 때 가스는 매질의 유기물질에 흡착되므로 유기물질의 함량이 높을수록 흡착하는 가스의 양이 많아진다. 탈착된 가스와 매질 내에 저장되어 있던 가스는 확산을 통해 균열면으로 이동한다. 자연균열은 균열 내부에 가스를 저장하고, 생산시 가스 유동의 통로가 된다. 셰일가스 저류층은 매질의 유체투과도가 매우 작기 때문에 매질간 유동성이 낮다. 생산 가스의 대부분은 수압파쇄대의 성장과 자연균열과의 연결성으로 형성된 균열망에 큰 영향을 받는다.

이번 연구에서는 셰일가스 저류층의 연결성을 모사하기 위해 분리균열(discrete fracture network, DFN)모델과 등가연속체모델의 DPDP모델을 함께 적용하는 혼성모델을 사용했다. 혼성모델은 분리균열모델의 사실적인 자연균열 모사와 DPDP모델의 유체거동 모사를 동시에 고려한다. 분리균열모델을 통해 자연균열의 방향성, 간극, 길이, 집중성, 균열간 간격 및 위치를 반영한 저류층을 생성한다. 분리균열모델에서 생성된 균열 저류층을 Oda 방법(Oda, 1985)으로 업스케일링한다. 각 격자의 x, y, z 방향의 균열 유체투과도와 해당 격자의 균열 공극률이 DPDP모델에 적용된다. 매질 내 비정상흐름, 매질과 균열 사이의 유동, 균열 내에서의 유체 유동을 모사한다. Langmuir 등온선을 적용하여 압력과 온도에 따른 유기물에서 흡착 및 탈착되는 가스의 거동을 반영한다.

2.2.1 분리균열모델

분리균열모델은 다양한 스케일의 균열을 서로 다른 기하학적 분포로 암반에 불연속적으로 생성하는 모델이다(정승필, 2008). 코어분석, 물리검층, 노두조사, 탄성파 탐사자료 등 실측자료를 바탕으로 균열을 생성하며 추계학적 방법을 이용하므로 단일 해를 도출하지 않는다. 위치, 방향성, 크기 등 실제 균열의 특성을 반영한 균열 저류층을 생성한다.

분리균열모델의 개념모델은 Enhanced-Baecher, Levy-Lee, Nearest Neighbor가 있다. Baecher 모델은 균열 중심을 저류층 시스템 내에 포아송 분포로 위치시키고, 균열의 모양을 원형판 또는 타원형으로 나타낸다. Enhanced-Baecher 모델은 균열을 다각형 형태로 모사하고, 중심위치, 방향성, 길이 등의 입력 자료로 균열을 생성한다. Levy-Lee 모델은 프랙탈 형태의 Levy flight 과정으로 균열을 생성한다. Levy-Lee 모델을 통해 자연균열의 간격을 조정함으로써 균열의 위치를 정량화할 수 있다. Nearest Neighbor 모델은 주요 균열들을 선정하고 이에 대해 거리가 멀어질수록 균열집중성이 지수함수적으로 줄어드는 방식으로 균열을 생성한다. 저류층 시스템 내에서 각 지점이 균열생성 지점이 될 확률을 가지게 된다.

이번 연구에서는 Levy-Lee 모델을 사용했다. 자연균열의 개체특성과 공간분포특성을 정량화하여 나타낼 수 있는 모델이기 때문에 자연균열이 가지는 현실적인 특성을 구현할 수 있다. 특히 저류층 내 자연균열들의 불균질성을 Levy-Lee 모델의 인자중 하나인 차원(dimension)으로 나타낼 수 있다.

2.2.2 이중공극·이중유체투과도모델

등가연속체모델은 균열 저류층의 유체유동을 해석하기 위해서 하나의 격자의 균열의 공극률, 유체투과도와 매질의 공극률, 유체투과도를 따로 할당하는 것이다(Warren과 Root, 1963). 이때 균열과 매질 사이에 유체유동 유무에 따라 세 가지 방식으로 분류한다. 단일공극·단일유체투과도(single porosity·single permeability, SPSP)모델은 유체가 균열에만 존재하여 균열을 통해서만 이동한다고 가정한다. 이중공극·단일유체투과도(dual porosity·single permeability, DPSP)모델은 균열을 통해서만 유체유동이 일어나지만, 매질과 균열이 유체의 저장 공간의 근원이 되는 것으로 가정한다. 이중공극·이중유체투과도(dual porosity·dual permeability, DPDP)모델은 유체유동이 균열뿐만 아니라 매질 사이에서도 이루어지고 균열과 매질 간에 물질 전달이 일어나는 것으로 가정한다. 등가연속체모델의 세 가지 분류는 Figure 2.3에 나타냈다.

DPDP모델에서 매질과 균열의 공극률은 Figure 2.4와 같이 나타난다. 전체 공극률(ϕ_t)은 전체 암석의 부피에 대한 매질공극의 부피인 일차공극률(ϕ_1)과 전체 암석의 부피에 대한 균열공극의 부피인 이차공극률(ϕ_2)의 합이다(식 2.4). 매질공극률(ϕ_m)은 전체 매질에 대한 매질공극의 부피이다(식 2.5), 균열공극률(ϕ_f)은 이차공극과 값을 동일하게 한다(식 2.6).

$$\phi_t = \phi_1 + \phi_2 \tag{2.4}$$

$$\phi_1 = (1-\phi_2)\phi_m \tag{2.5}$$

$$\phi_2 \approx \phi_f \tag{2.6}$$

매질과 균열이 있는 시스템에서 유체투과도(k_{mf})은 매질 유체투과도(k_m)과 매질과 연관된 균열의 유체투과도(k_{eff})의 합이다. 이 때 k_{eff}는 매질에 있는 전체 균열과 그 연결성에 의한 유체투과도를 나타낸다.

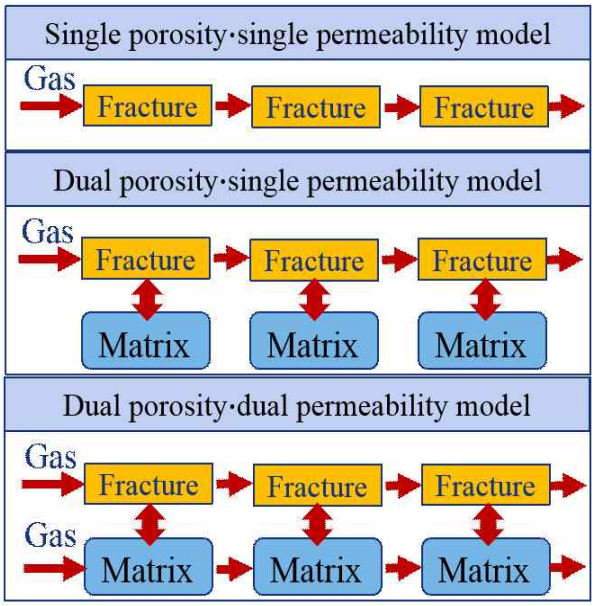


Figure 2.3 Classification of continuum models in a fractured reservoir (Al-Huthali and Datta-Gupta, 2004).

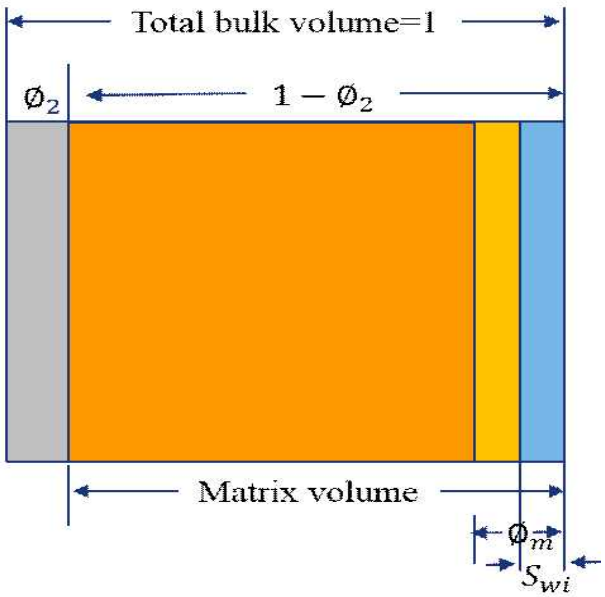


Figure 2.4 Schematic diagram of dual porosity (Golf-Racth, 1982).

2.2.3 혼합 모델

이번 연구에서는 균열의 유체투과도를 매질과 연관된 균열의 유체투과도로 한정한다. 분리균열모델에서 생성된 자연균열 저류층을 DPDP모델로 전환한다. 분리균열모델과 DPDP모델의 형태는 Figure 2.5와 같다.

Oda는 임의의 균열망을 유체투과도 텐서로 계산하는 해석적인 방법을 제시했다(Oda, 1985). 식 (2.7)은 Oda 방법에서 격자 내에서 균열들의 방향성을 단위법선벡터로 고려하여 균열의 법선벡터들의 관성모멘트를 구하는 식이다. N은 균열의 개수, n_i, n_j는 균열 n의 단위법선벡터, $E(n)$은 단위법선벡터 n을 가지는 균열의 수를 나타내는 확률밀도함수이다. Ω는 단위구면에서 평면이 상응하는 각이다.

$$N = \int_{\frac{\Omega}{2}} n_i n_j E(n) d\Omega \tag{2.7}$$

식 (2.8)을 이용하여 각 방향성의 균열텐서는 균열면적과 균열의 투수계수의 부피가중평균으로 계산한다.

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^{N} A_k T_k n_{ik} n_{jk} \tag{2.8}$$

T는 균열의 투수계수, A는 균열의 단면적, n_{ij}는 균열의 단위법선벡터를 나타낸다. 단일균열의 투수계수는 균열간극 b의

세제곱에 비례하며 식 (2.9)와 같다.

$$T = \frac{\rho g b^3}{12\mu} \tag{2.9}$$

유체투과도 텐서는 균열텐서 F_{ij}로 식 (2.10)과 같이 표현된다. k_{ij}는 유체투과도 텐서, δ_{ij}는 Kronecker 델타이다.

$$k_{ij} = \frac{1}{12}(F_{kk}\delta_{ij} - F_{ij}) \tag{2.10}$$

이 때 매질-균열연결인자(matrix-fracture coupling factor, σ)는 매질부피와 균열면 넓이의 비가 균열과 매질 사이의 물질전달에 미치는 영향의 척도이며 식 (2.11)로 계산된다. l_x, l_y, l_z는 분리균열모델의 각 격자에서 x, y, z방향성으로의 평균 선균열 집중성 거리를 의미한다.

$$\sigma = 4(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2}) \tag{2.11}$$

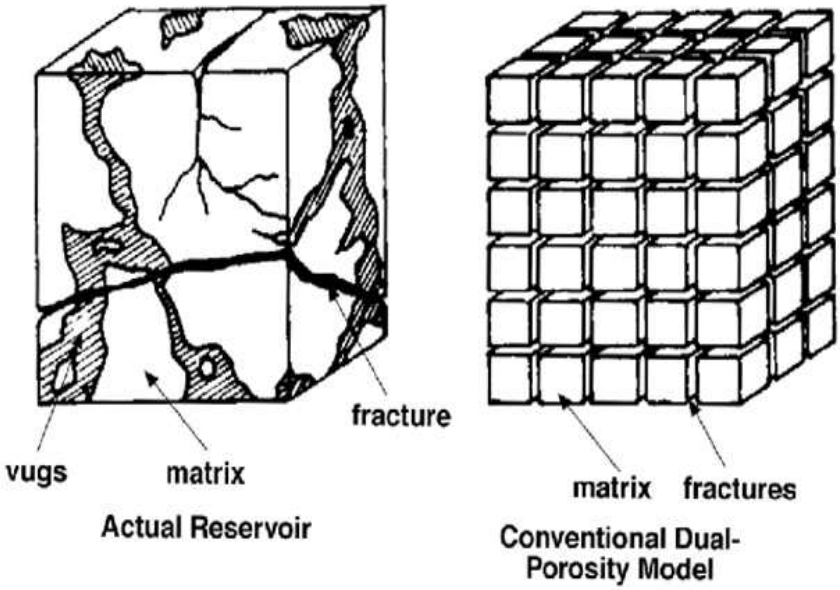


Figure 2.5 Idealization of a fractured system (Warren and Root, 1963).

2.3 거리기반 일반 민감도 분석

거리기반 일반 민감도 분석(Distance-based Generalized Sensitivity Analysis, DGSA) 기법은 균열 인자들의 상호적인 관계에 대한 고려를 반영하는 민감도 분석 기법으로 이번 연구에서 제안한 방법인 균열간 연결성을 고려한 민감도 기반 모델 선정법에서 주요하게 사용된다. 자연균열과 인공균열의 특성은 2.2장에서 밝힌 것과 같이 개체특성에서 자연균열 방향성, 간극, 길이가 있고, 공간분포특성에서 자연균열 집중성, 균열간 간격 및 위치, 인공균열 반길이로 총 6 가지의 인자로 정의된다. 또한 인공균열의 단계가 많아질수록 고려할 인자의 수가 많아지고, 이러한 인자의 다양성은 인자들 값의 다양한 조합을 가지게 한다. 다양한 조합 속에서 상호적인 관계와 이로 인한 유동성을 분석하기 위해서는 기존의 단일 인자 민감도 분석 기법이 아닌 상호성을 고려할 수 있는 민감도 분석 기법이 필요하다. 따라서 거리기반 일반 민감도 분석 기법은 이에 대한 단계적 장치로 활용될 수 있다.

거리기반 일반 민감도 분석 기법은 기존의 민감도 분석 기법과 마찬가지로 입력 변수와 반응 변수를 가지고 있다. 입력 변수에 의해 변하는 자료량인 반응 변수를 산정하고, 반응 변수의 차이를 통해 입력 변수에 따른 민감도를 계산할 수 있다.

Figure 2.6은 세 가지 입력변수인 x, y, z를 0과 1 사이의 범위에서 균등하게 200개의 표본을 만들고 반응 변수인 x, y, z의 조합으로 계산된 반응 변수 d의 거리지도(distance map)이다. 해당 거리 지도는 k-medoid 방식으로 클러스터를 나누며, Figure

2.6에서는 세 개의 클러스터를 사용하여 각 표본들을 분류했다. k-medoid 방식의 군집화는 2.4장 모델 선정법에서 다시 한 번 다룬다. 각 클러스터의 대표 표본은 자신의 클러스터에 있는 다른 표본들과의 기하학적인 거리가 가장 가깝게 되는 것으로 선정된다(Fenwick 등, 2014). 나누어진 클러스터들은 서로 반응 변수 d에 대해 유사성을 가지고 있으며, 이러한 반응 변수의 유사성과 각 표본이 가지고 있는 입력 변수의 값을 이용하여 다른 클러스터들의 표본과 비교했을 때 나타나는 입력변수의 차이와 비교된다. 하나의 표본이 자신의 클러스터 내의 입력 변수와 유사성을 가지면서 다른 클러스터의 입력 변수와 큰 차이를 가진다면, 이는 반응 변수에 대해 큰 민감도를 가진 것으로 판단된다. 각 입력 변수에 대한 클러스터의 민감도는 Figure 2.7과 같다. 하나의 표본은 세 가지 입력 변수를 가지고 있고, 200개의 표본들은 다양한 조합으로 입력 변수를 형성하기 때문에 계산된 민감도는 세 가지 입력 변수의 상호적인 결과로 볼 수 있다. Figure 2.8은 균등한 범위를 가진 입력 변수 x가 각 클러스터에서 어떠한 확률 분포로 나타나는지 보여주며, 이러한 클러스터들 간의 확률분포를 거리로 측정하여 민감도로 계산한다. Figure 2.9는 계산된 민감도의 순서대로 인자를 배열한 것이다.

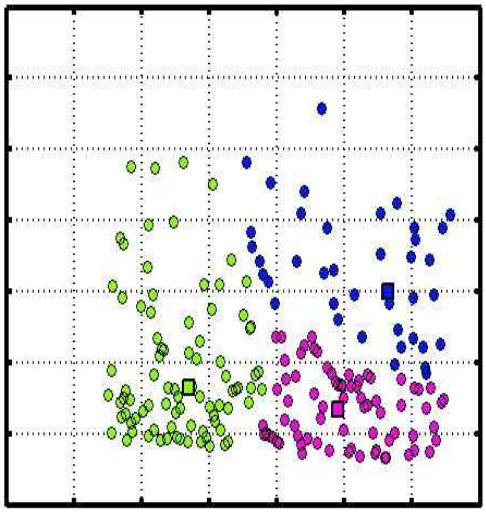


Figure 2.6 Distance map of DGSA for 3 clusters.

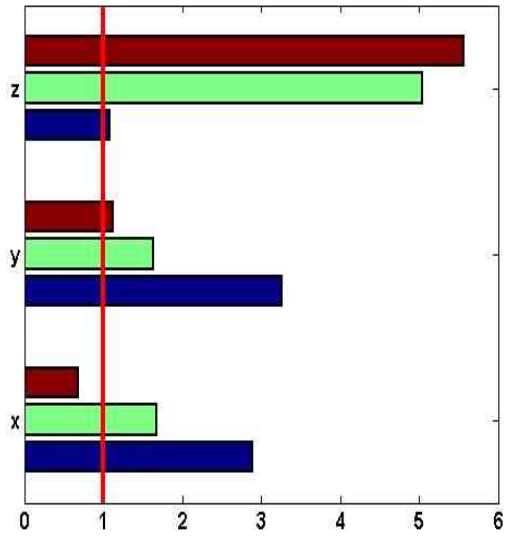


Figure 2.7 Sensitivity for input parameters at each cluster.

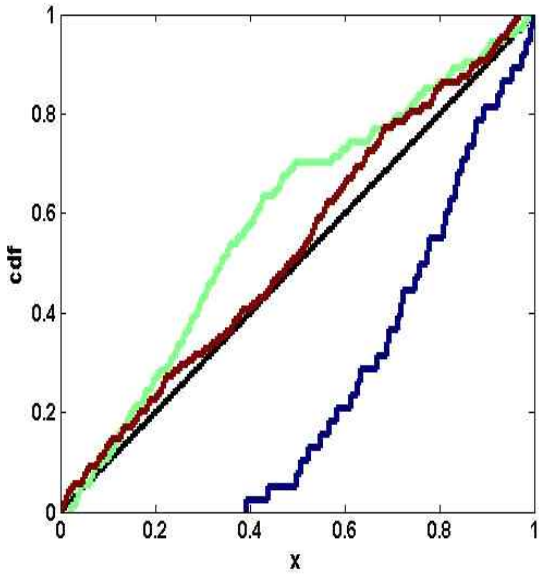


Figure 2.8 Parameter x probability distribution function at each cluster.

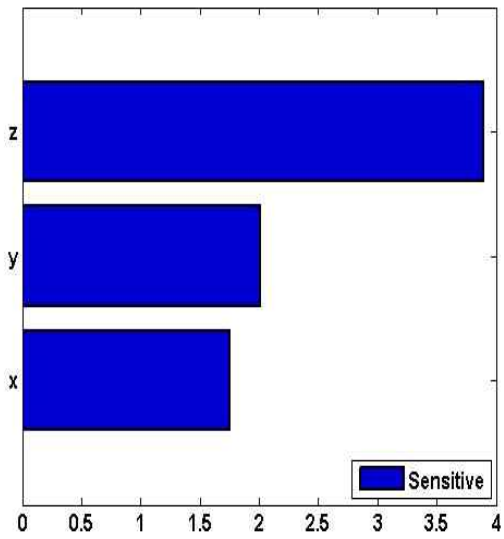


Figure 2.9 Distance-based generalized sensitivity of parameter x, y, and z.

2.4 모델 선정법

모델 선정법은 참값을 포함한다고 가정하는 범위 내에서 다수의 모델을 만들고 클러스터링을 통해 유사한 결과를 보여주는 대표 모델을 가진 클러스터를 선정하는 방식으로 참조 모델의 속성 특성화와 결과 자료 불확실성 감소 및 예측을 가능하게 하는 방법이다. 클러스터링의 방법은 목적에 따라 다양하며 모델 선정법에서 모델을 선정하는 기준도 다양하다. 이번 연구에서는 k-medoid 클러스터링과 우도함수를 이용한 클러스터 선정방식으로 모델 선정법을 수행했다.

2.4.1 K-medoid 클러스터링

클러스터 분석은 다수의 모델을 시뮬레이션 등의 방법으로 직접 확인하지 않고 각각 클러스터의 대표 모델을 확인해 전체 모델의 특성을 파악하는 기법이다.

클러스터 분석 기법중 대표적으로 k-means 클러스터링, k-medoid 클러스터링 등이 있다. k-means 클러스터링은 주어진 모델의 자료 값을 구간으로 나눈 후, 클러스터 내 각 모델들의 거리를 계산하여 클러스터의 평균값을 가진 중심점(centroid)을 찾는다. 선정된 중심점을 기준으로 다시 구간을 나누고 새로운 중심점을 찾는 것을 반복한다. 연산 속도가 빠르지만, 지역 최솟값(local minimum)이 나타날 수 있고, 이상점(outlier)에 취약한 단점이 있다. k-medoid 클러스터링은 k-means 클러스터링이 가지는

이상점에 약한 단점을 보완하기 위해 중간점(medoid)을 사용한다. 자료의 평균 대신 클러스터에서 가장 거리적으로 중심에 위치한 객체를 중간점으로 선정함으로써 클러스터 내에 다른 모델들의 유사성을 대표적으로 반영한다.

이번 연구에서는 주어진 모델이 가진 자연균열과 인공균열 속성의 이상점까지 클러스터링하기 위해 k-medoid 클러스터링을 수행했다. k-medoid 클러스터링의 순서는 다음과 같다(Berkhin, 2006).

1) 모델 집합에서 임의의 k개의 모델을 선택하여 중간점으로 설정한다. k는 미리 지정한 클러스터의 개수이다.

2) 선택된 중간점들이 바뀌지 않을 때까지 다음의 단계를 반복한다.

2-1) 선택되지 않은 모델들을 가장 가까운 중간점과 묶는다. 이때 유클리드 거리 등의 거리 함수를 사용한다.

2-2) 선택되지 않은 각 모델들에 대해, 해당 모델을 자신이 포함된 집합의 새로운 중간점으로 가정하여 거리를 계산한다.

2-3) 기존의 중간점들에 대한 거리와 새로 제안된 중간점들에 대한 거리 값을 비교하여, 새로운 중간점의 거리 값이 작을 경우 중간점을 교체한다.

클러스터의 개수를 정하기 위해 Bhowmik의 방법을 사용하여 클러스터링을 수행했다(Bhowmik 등, 2010). Bhowmik 방법은 식 (2.12)와 같다. η_k는 클러스터의 개수가 k개일 때의 유효성이다. k는

클러스터의 개수, m은 특정 클러스터 내의 모델의 개수, i와 l은 클러스터 중간점의 번호, j는 특정 클러스터 내의 모델의 번호이다. 식 (2.12)에서 분자항은 특정 클러스터 내의 중간점에 대한 각 모델들의 거리 합이고, 분모항은 중간점들끼리의 거리 합이다.

$$\eta_k = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1,\, j \in i}^{m} d_{ij}^2 / \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=1,\, l \neq i}^{k} d_{il^2} \tag{2.12}$$

클러스터링의 효과를 극대화하기 위해 클러스터 유효성을 최소화하는 것이 필요하다. 낮은 값의 유효성은 클러스터링의 우수성을 의미한다. Figure 2.10은 Bhowmik (2014)에서 나타난 클러스터링 유효성에 대한 분석을 보여준다. 일반적으로 클러스터의 개수가 많을수록 유효성이 증가한다. 하지만 유효성의 큰 변화 없이 클러스터 개수가 증가하는 것은 결과의 신속성과 정확성 측면에서 비효율적이다. 이 연구에서는 유효성이 일정 범위 이내로 낮아지게 되는 최소 클러스터 개수를 선정하여 모델 선정법을 진행했다.

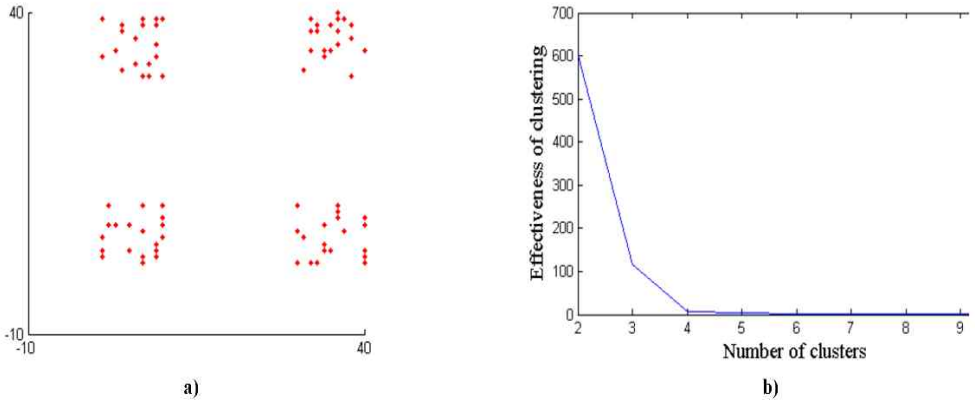


Figure 2.10 Effectiveness of clustering: a) actual data points used for the demonstration, and there are clearly 4 clusters points in this case, b) plot of effectiveness of clustering versus the number of clusters shows a kink at 4 which is the correct number of clusters (Bhowmik, 2014).

2.4.2 우도함수 기반 모델 선정법 알고리듬

우도함수(likelihood function) 기반 모델 선정법은 클러스터링을 통해 선정된 대표 모델들의 생산 거동과 실제 참조 모델의 생산 거동 자료를 비교하여 가장 유사한 대표 모델을 가진 클러스터를 선정하는 방법이다. 참조 모델의 생산 자료와 각 클러스터 대표 모델의 생산 자료를 비교하기 위해 우도함수 값을 계산한다.

모델 선정법에서 사전확률은 클러스터링 이후 각 클러스터가 참조 모델을 포함할 확률을 의미한다. 식 (2.13)은 사전확률의 계산식이다. 참값에 대한 정보는 배제하고 각 클러스터들이 가지는 확률은 전체 모델 수와 각 클러스터 내의 모델 수의 비율이다.

$$P(z^m(u)) = \text{m번 클러스터의 모델 수 / 전체 모델 수} \quad (2.13)$$

각 클러스터의 우도함수는 각 클러스터들이 먼저 존재한다는 전제 하에 해당 클러스터 내에 참조 모델이 존재할 확률이다. 우도함수는 식 (2.14)와 같이 표현된다.

$$P(RF_{ref}|z^m(u)) \quad (2.14)$$

각 클러스터의 대표 모델의 생산 자료의 우도함수 측정 시점을 p로 명명한다. p 시점의 모델 생산 자료 값을 RF_p, 참조 모델의 생산 자료를 RF_{ref}라고 할 때, 식 (2.15)와 같이 대표모델의 최대

분산 값(σ^2)을 구할 수 있다.

$$\sigma_p^2 = |RF_{ref} - RF_p|^2 \quad (2.15)$$

해당 분산 값과 참조 모델의 생산 자료 값을 이용하여 $N(RF_{ref}, \sigma_p^2)$의 정규분포의 범위로 확률 경계를 갖게 된다. Figure 2.11 예시에서는 모델의 우도함수 값이 0.66 값을 갖게 된다. 우도함수 값은 각 시점에 대해 편향될 가능성이 있기 때문에 모든 시점에 대한 우도함수 값을 구하고, 이를 평균 내어 관찰 범위 내의 모든 시점의 참조 모델과의 유사성을 계산할 수 있다. 우도함수 값의 평균이 클수록 참조 모델과 유사한 모델이라고 할 수 있다. 이번 연구에서는 대표 모델을 통해 클러스터를 선정할 때 우도함수 값의 평균이 높은 클러스터를 선정하는 방식으로 모델 선정법을 진행했다.

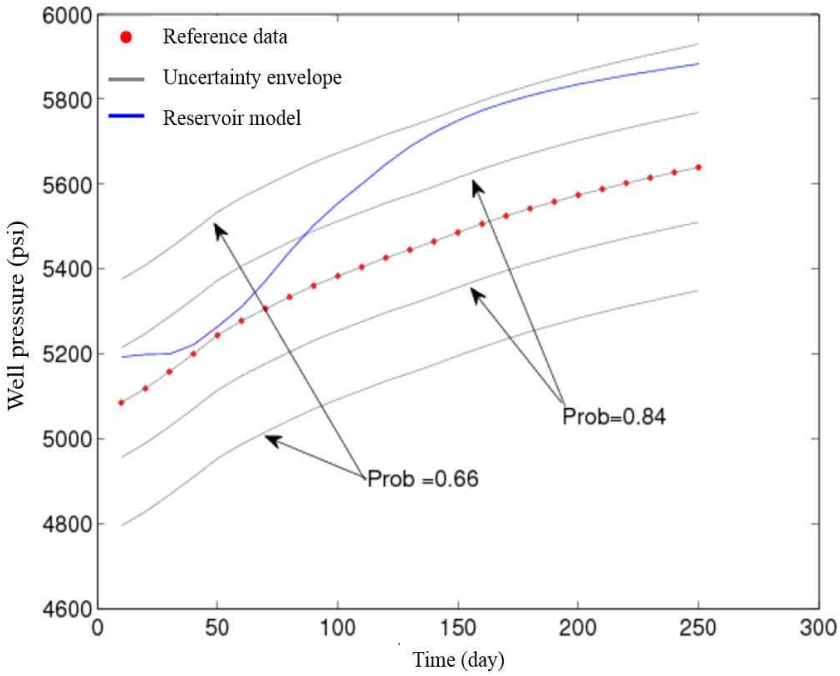


Figure 2.11 Uncertainty envelopes around reference data. The Production data of on reservoir model falls within the 66% probability envelope (Mantilla, 2010).

3. 민감도 기반 균열 모델 선정법 개발

제안한 방법인 연결성을 고려한 민감도 기반 균열 모델 선정법은 자연균열과 인공균열의 공간분포특성에 대한 유동성 변화를 분석하는 것으로 시작한다. 자연균열의 균열간 간격 및 위치와 인공균열의 반길이의 조합에서 나타나는 셰일가스 생산량의 변화와 저류층의 압력 변화를 통해 균열 공간분포 특성으로 인한 연결성과 유동성의 차이를 분석한다.

두 번째 단계로 거리기반 일반 민감도 분석 기법을 통해 저류층의 균열 특성에 대한 민감도를 계산한다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 따라 균열 공간분포특성의 민감도가 다른 양상을 보인다. 따라서 모델 선정법의 적용에서 이러한 민감도의 크기가 반영되어야 한다. 제안한 방법에서 사용하는 모델 선정법은 민감도의 크기를 기반으로 모델을 생성한다. 자연균열 집중성에 따라 다르게 산정된 균열 특성들의 민감도에 따라 민감도가 크게 나타나는 균열 특성들에 대해 해당 특성의 범위 내의 구간을 세분화하여 적용한다. 민감도의 크기 순서대로 세분화하는 구간 수를 다르게 하여 모델을 생성한다. 두 가지 특성에 대한 모델을 생성할 때 민감도가 높은 특성의 구간 수를 5개로 하면, 두 번째 순위의 민감도를 가진 특성의 구간 수는 4개로 하는 방식으로 구간 수를 설정한다. 총 20개의 모델을 만들게 되는 것이다. 이러한 방식은 각 인자들의 구간을 동등하게 나누어 모델을 선정하는 기존의 모델 선정법에 비해 생성하는 모델 수를 최소화할 수 있고, 인자들을 정량화에 있어서 정확도를 높일 수 있다.

민감도 기반 균열 모델 선정법은 Figure 3.1과 같은 순서로

나타난다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 적용하여 자연균열과 인공균열을 정량적으로 특성화한다. 또한 선정된 모델들을 이용해 향후 생산거동 예측을 수행한다.

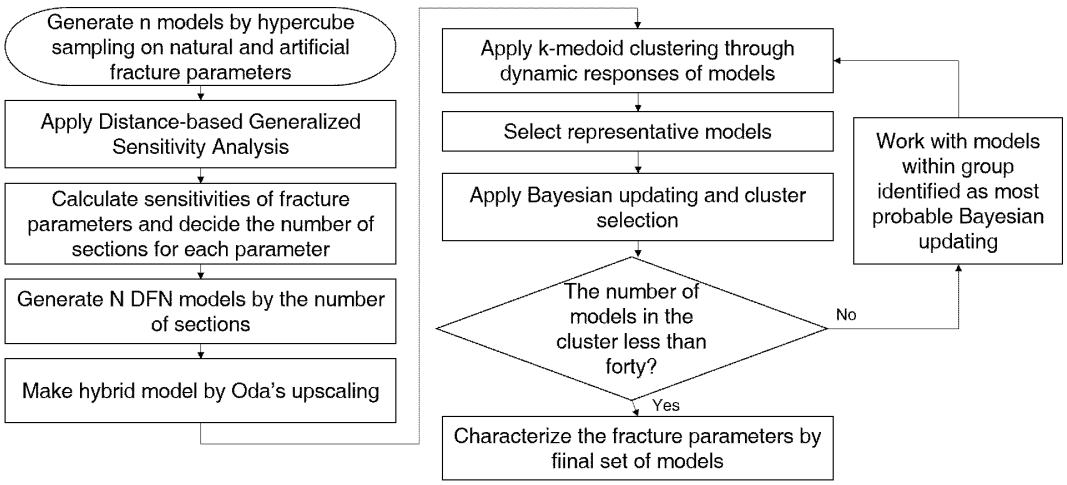


Figure 3.1 Flow chart of the proposed method.

4. 연구결과

4.1 유동모사를 통한 균열 연결성 평가

자연균열의 집중성, 방향성, 간극, 길이, 균열간 간격 및 위치, 인공균열의 균열 반길이를 분리균열모델을 통해 나타낸다. 각각의 특성은 개별적인 크기도 균열들의 연결성에 영향을 주지만, 상호적인 작용에 의한 영향이 크게 나타난다. 노두조사 등을 통해 값의 범위를 특정 지을 수 있는 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이와 달리 공간분포특성인 자연균열의 위치, 인공균열 반길이는 예측이 어렵다. 또한 같은 조건에서도 자연균열 위치에 따라 효과적인 인공균열 반길이가 달라지고 큰 차이를 보이기 때문에 유동모사를 통한 균열 연결성이 평가되어야 한다.

균열 연결성 평가를 시행할 저류층의 초기 조건은 Table 4.1과 같으며, 균열 조건은 Table 4.2와 같다. Table 4.2에서 나타낸 것과 같이 균열 특성은 자연균열 위치와 인공균열 길이를 제외하고 동일하게 적용된다. 자연균열 위치는 Levy-Lee 모델방식으로 생성되어 자연균열간 간격을 10 ft 단위의 10-50 ft 범위에서 변화를 주어 다르게 나타냈다. 두 단계(stage)의 인공균열 반길이는 140-240 ft의 범위에서 20 ft 단위로 바꾸어 연결성을 평가했다.

Table 4.1 Reservoir data of the reference field

Reservoir properties	Value
Size of reserovir, ft^3	600×600×100
The number of reservoir grid, x×y×z	30×30×5, 4,500
△x=△y=△z, ft	20
Matrix permeability, md	8E-6
Matrix porosity, fraction	0.08
Reservoir depth, ft	5,000
Initial pressure, psi (reference depth, ft)	4,500 (5,000)
Reservoir temperature, ℉	200
Rock compressibility, 1/psi	1E-6
Rock density, lbm/ft3	120
Langmuir adsorption constant, 1/psi	0.002
Bottomhole pressure, psi	100

Table 4.2 Fracture data of the reference field

Artificial Fracture	
Fracture properties	Value
The number of stages, unitless	2
Spacing of stages, ft	200
Half Length, ft	140-240
Intrinsic permeability, md	10,000
Effective permeability, md	5
Natural Fracture	
Fracture properties	Value
Model	Levy-Lee
Levy-Lee model fracture interval, ft	10-50
Levy-Lee model fracture dimension, unitless	1.5
Intensity, P32, unitless	0.0125
Orientation, Fisher, (°, unitless, unitless)	(45, 0, 10)
Aperture, ft	
Length, ft	135
Intrinsic permeability, md	1,000

유동모사를 통한 균열 연결성 평가는 세 가지 방식으로 이루어진다. 첫 번째 방식은 자연균열의 위치가 동일한 상태에서 두 단계의 인공균열 반길이의 분포의 변화에 따른 유동성 차이를 통해 연결성을 평가한다. 두 번째는 동일한 인공균열 반길이에서 자연균열의 위치가 다를 때의 유동성 차이를 본다. 세 번째는 두 단계의 인공균열 반길이의 합이 같고, 자연균열의 위치가 다를 때의 종합적인 유동성의 차이를 본다.

4.1.1 인공균열 반길이 분포에 따른 유동성 평가

Figure 4.1은 자연균열의 집중성, 방향성, 간극, 길이는 동일하게 설정한 5 종류의 자연균열 분포이다. 두 단계의 인공균열은 Figure 4.2와 같은 위치에 생성하였으며, 각 단계의 인공균열 반길이는 다르지만 두 단계의 인공균열 반길이 합이 380 ft가 되는 조건으로 초기 가스 생산량을 나타낸 것이 Table 4.3이다.

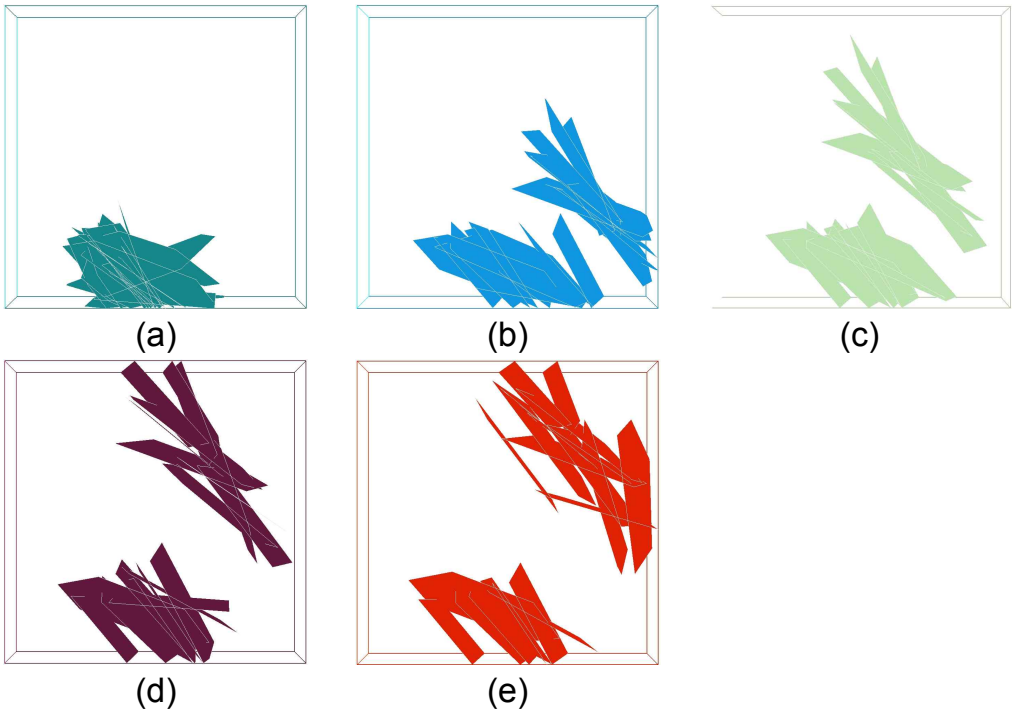


Figure 4.1 5 types of natural fracture location.

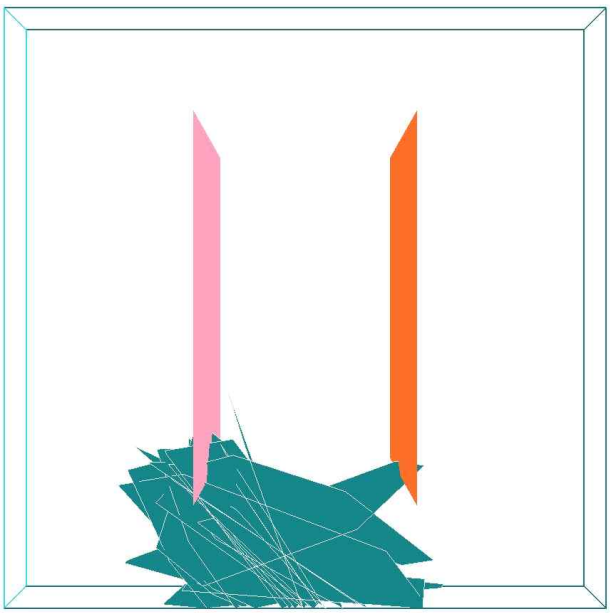


Figure 4.2 Artificial fractures at Figure 4.1 (a) natural fracture distribution.

Table 4.3 Initial gas production rate as sum of half-length of artificial fractures

Case	Artificial fracture half-length		Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	85.97	62.31	55.87	51.87
2	160	220	86.49	63.17	56.88	52.81
3	180	200	90.63	66.99	60.08	56.13
4	200	180	95.81	71.61	64.66	59.42
5	220	160	98.86	74.79	67.17	61.72
6	240	140	101.5	77.44	69.47	63.90

각 경우(case)에 대한 초기 가스 생산량은 Figure 4.3과 같이 나타났다.

Case 6이 가장 큰 초기 가스 생산량을 나타냈으며, Case 1이 가장 작은 초기 가스 생산량을 보였다. Case 1과 6은 인공균열 첫 번째 단계와 두 번째 단계의 반길이가 서로 맞바뀐 예이다. 자연균열의 위치와 인공균열의 길이의 연결성으로 인해 가스 생산량의 차이가 발생한 것으로 볼 수 있다. 균열의 연결성은 각 모델의 분리균열모델, 혼합모델, 시간에 따른 저류층 압력변화를 통해 볼 수 있다. Figure 4.4는 Case 1과 6의 분리균열모델이다. 분리균열 모델을 통해 Case 6에서 자연균열과 인공균열이 접하는 부분이 많은 것을 볼 수 있다.

Figure 4.5는 Figure 4.4의 분리균열모델을 혼합모델로 전환하여 유체투과율 분포로 나타낸 것이다. Case 6의 첫 번째 단계 인공균열이 자연균열 영역과 접하여 연결되어 있는 것을 볼 수 있다. Case 1의 두 인공균열은 자연균열 근처까지만 균열이 뻗어 있어 자연균열과의 연결성이 좋지 않다.

생산기간동안의 압력 변화를 통해 Case 1과 Case 6의 균열간의 연결성을 비교할 수 있다. Figure 4.6과 Figure 4.7은 각각 Case 1과 Case 6의 10년 동안의 저류층 압력 변화를 보여준다. 초기, 3년째, 6년째, 10년째의 압력 변화를 나타내며, 인공균열과 자연균열이 연결성이 높을수록 압력 변화가 크게 나타난다. Case 6에서 자연균열이 있는 격자의 압력변화가 Case 1에 비해 더 큰 영역에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 압력의 감소와 가스 생산량이 비례하는 것을 의미한다.

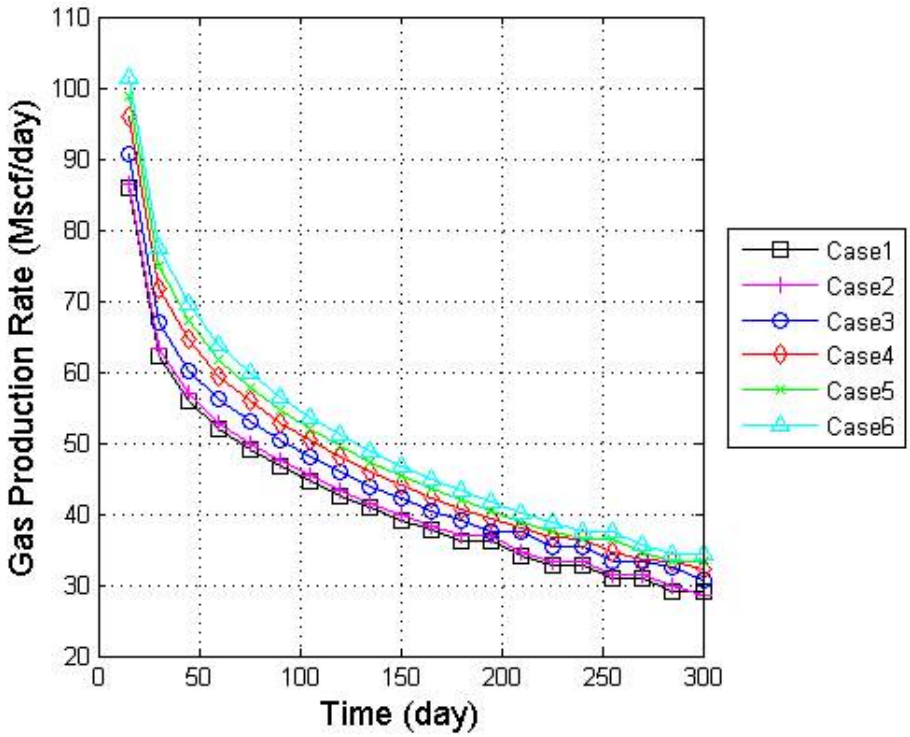
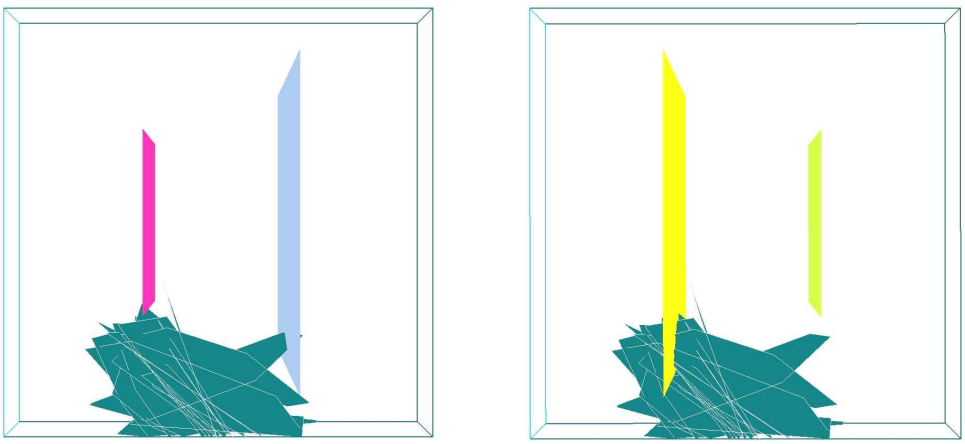


Figure 4.3 Initial gas production rate at 6 cases of Table 4.3.



(a) (b)

Figure 4.4 Discrete fracture network models: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3.

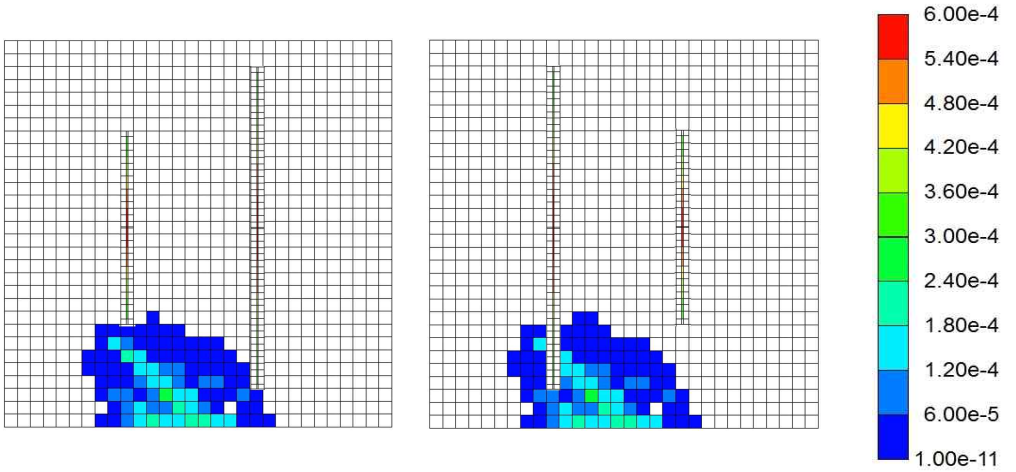


Figure 4.5 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 6 of Table 4.3.

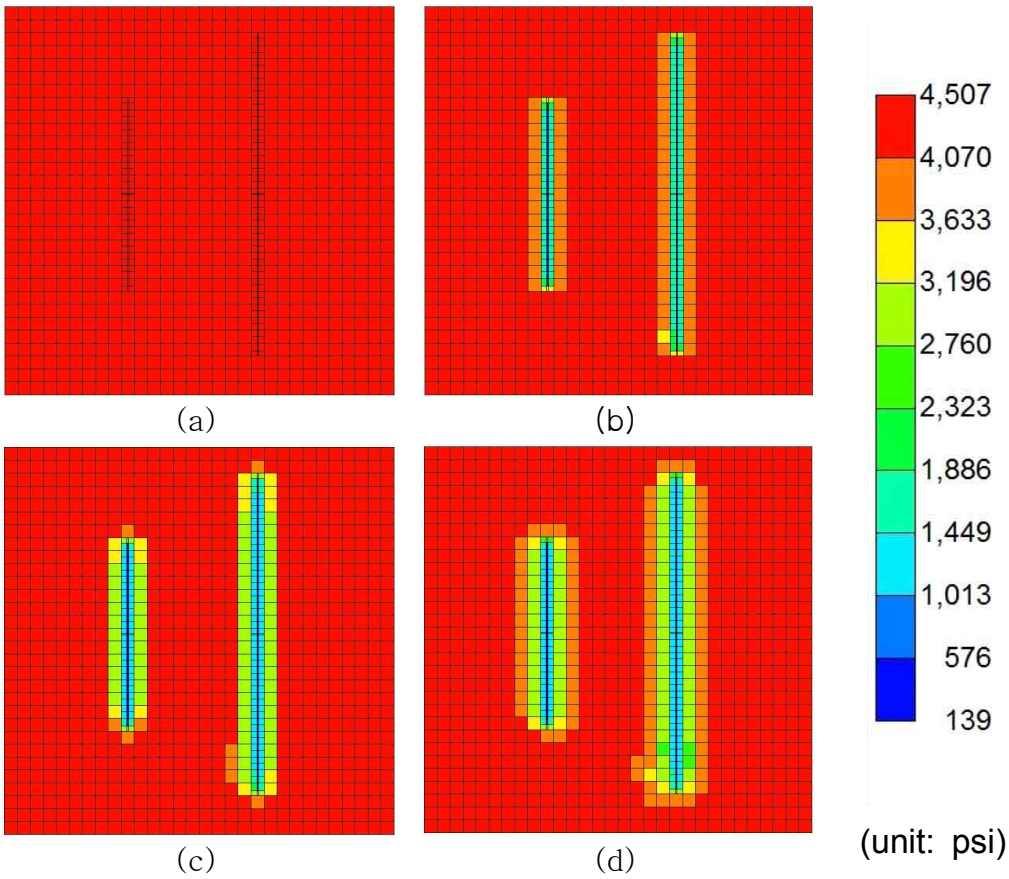


Figure 4.6 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 years, and (d) 10 years of Case 1 of Table 4.3.

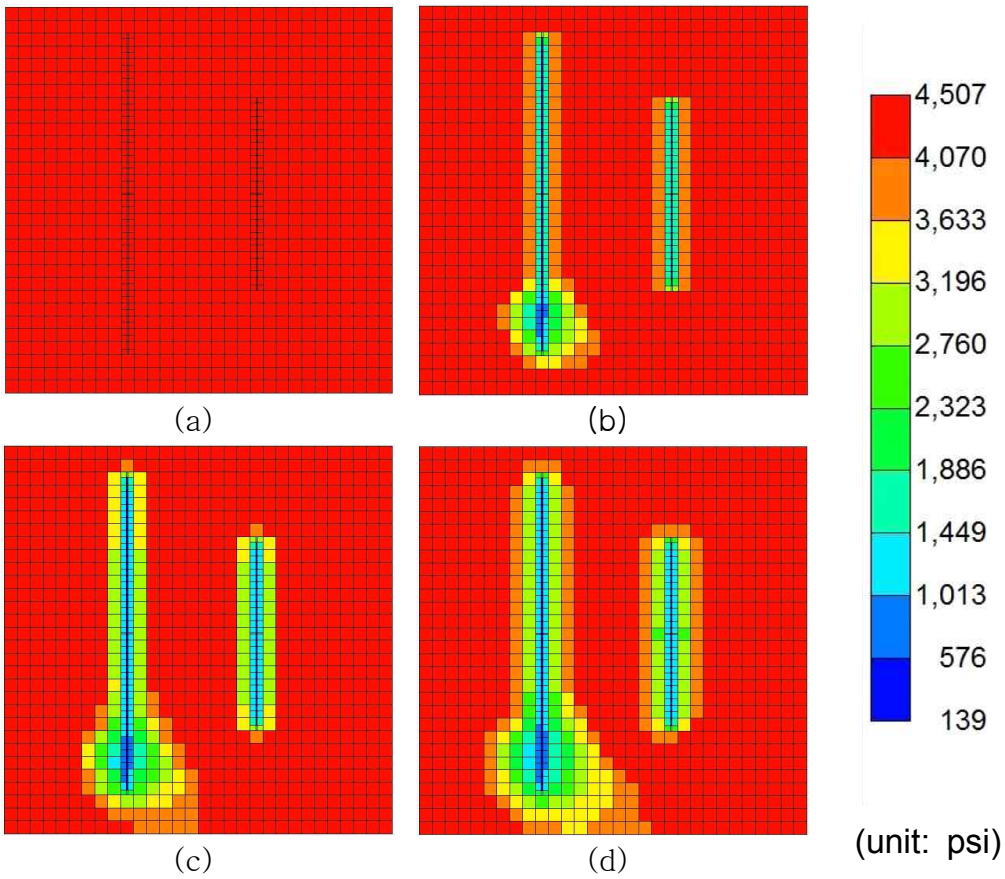


Figure 4.7 Pressure change at (a) 0 year, (b) 3 years, (c) 6 years, and (d) 10 years of Case 6 of Table 4.3.

4.1.2 자연균열 위치에 따른 유동성 평가

Table 4.3의 Case 1의 경우는 첫 번째 단계 인공균열 반길이는 140 ft, 두 번째 단계 인공균열 반길이는 240 ft였다. Case 6에 비해 낮은 가스 생산량을 보인 경우이다. 하지만 Case 1의 인공균열 반길이에 위치가 다른 자연균열이 분포하게 되면 유동성이 다르게 나타난다. Table 4.4는 Figure 4.1의 5 가지 자연균열 분포를 적용한 혼합모델의 초기 가스 생산량을 나타낸다.

Figure 4.8은 Table 4.4의 각 Case들의 초기 생산량을 나타낸다. Figure 4.9는 Table 4.4 Case들의 혼합모델 유체투과율 분포이다. Figure 4.9에서 (c), (d), (e)는 비슷한 수준의 인공균열과 자연균열의 연결성을 보이고 있다. Table 4.4에서 실제 초기 가스 생산량도 유사하게 나타난다.

Figure 4.10은 10년의 생산기간 이후의 압력 감소를 나타낸다. Figure 4.10 (c), (d), (e)를 비교하였을 때 연결되는 범위는 다르지만 유사한 부피로 압력 감소가 나타난 것을 볼 수 있다. 동일한 인공균열 반길이에서도 자연균열의 위치에 따라 연결성이 다르게 나타나고 압력의 변화와 생산량에서 차이가 생기는 것을 볼 수 있다.

Table 4.4 Initial gas production rate as same half-length of artificial fractures and different natural fracture locations

Case	Artificial fracture half-length		Natural fracture	Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	Figure 4.1 Case	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	(a)	85.9	62.3	55.8	51.8
2	140	240	(b)	97.3	73.6	67.7	61.6
3	140	240	(c)	104	79.8	71.7	66.0
4	140	240	(d)	103	80.5	74.1	67.4
5	140	240	(e)	101	77.5	70.0	64.6

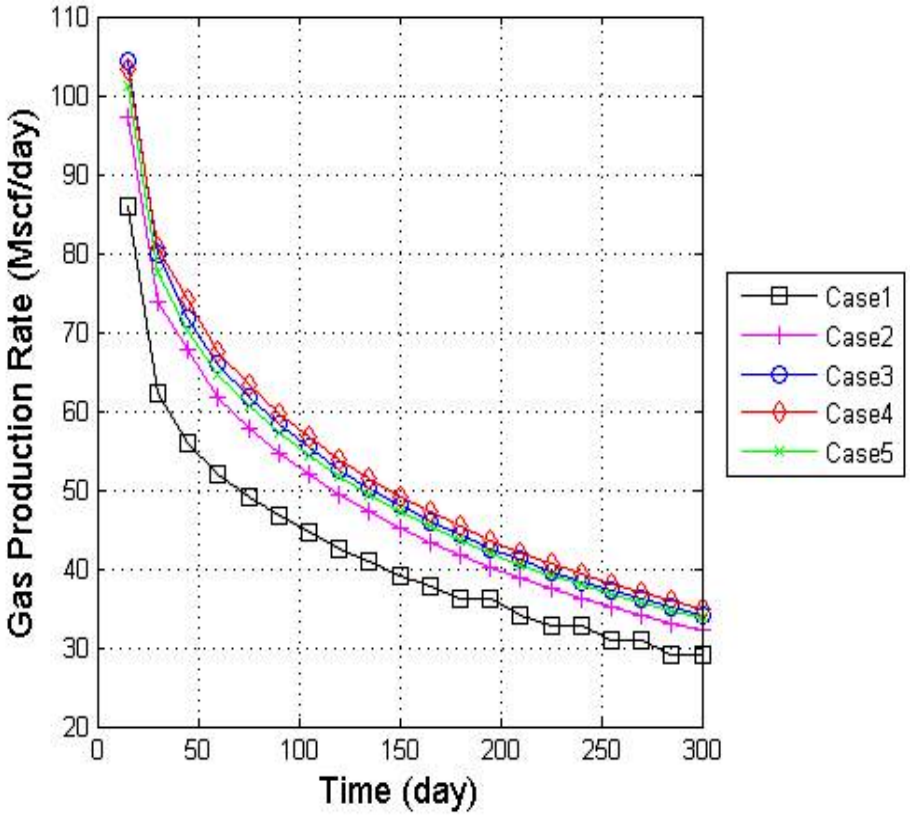


Figure 4.8 Initial gas production rate at 5 cases of Table 4.4.

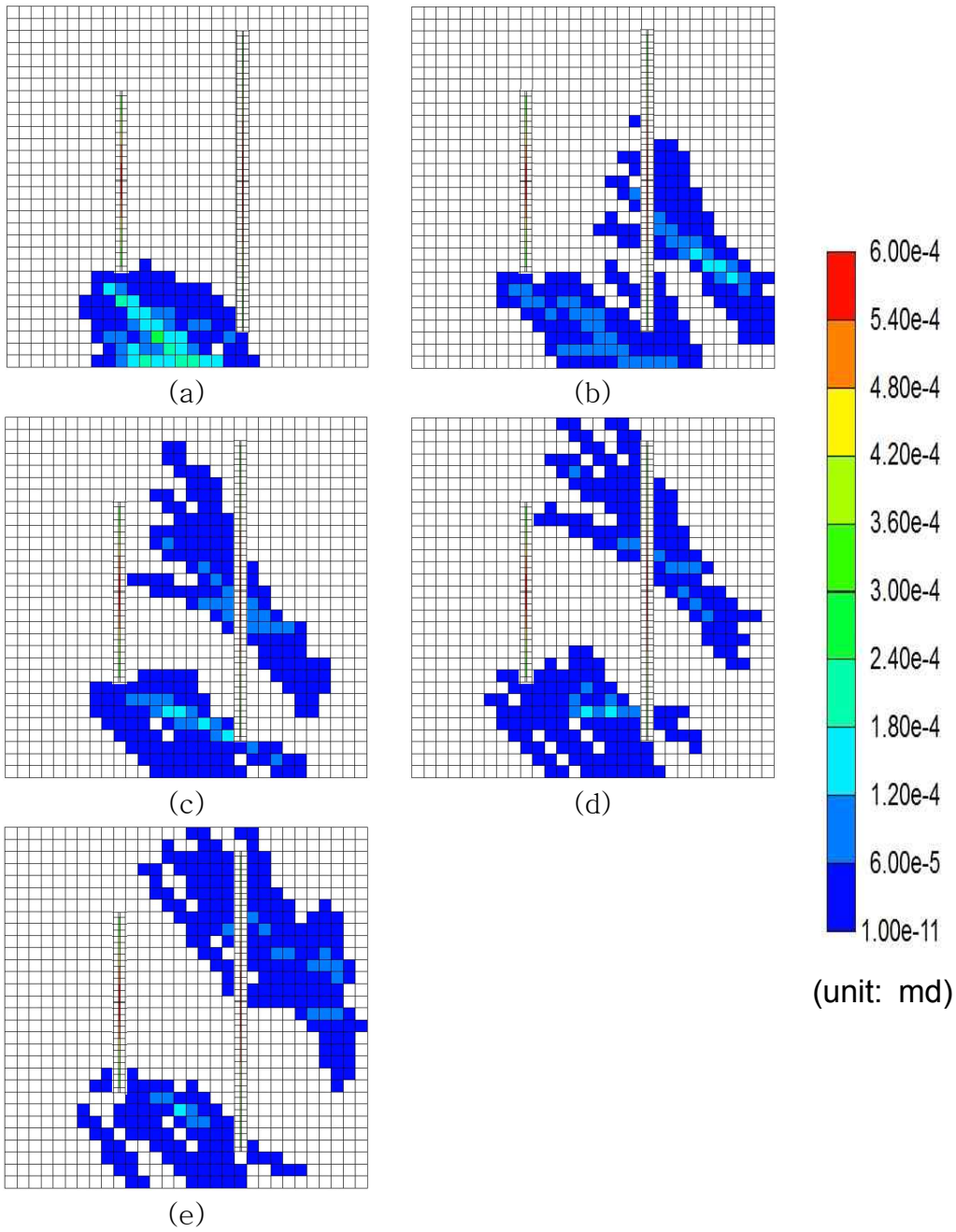


Figure 4.9 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4.

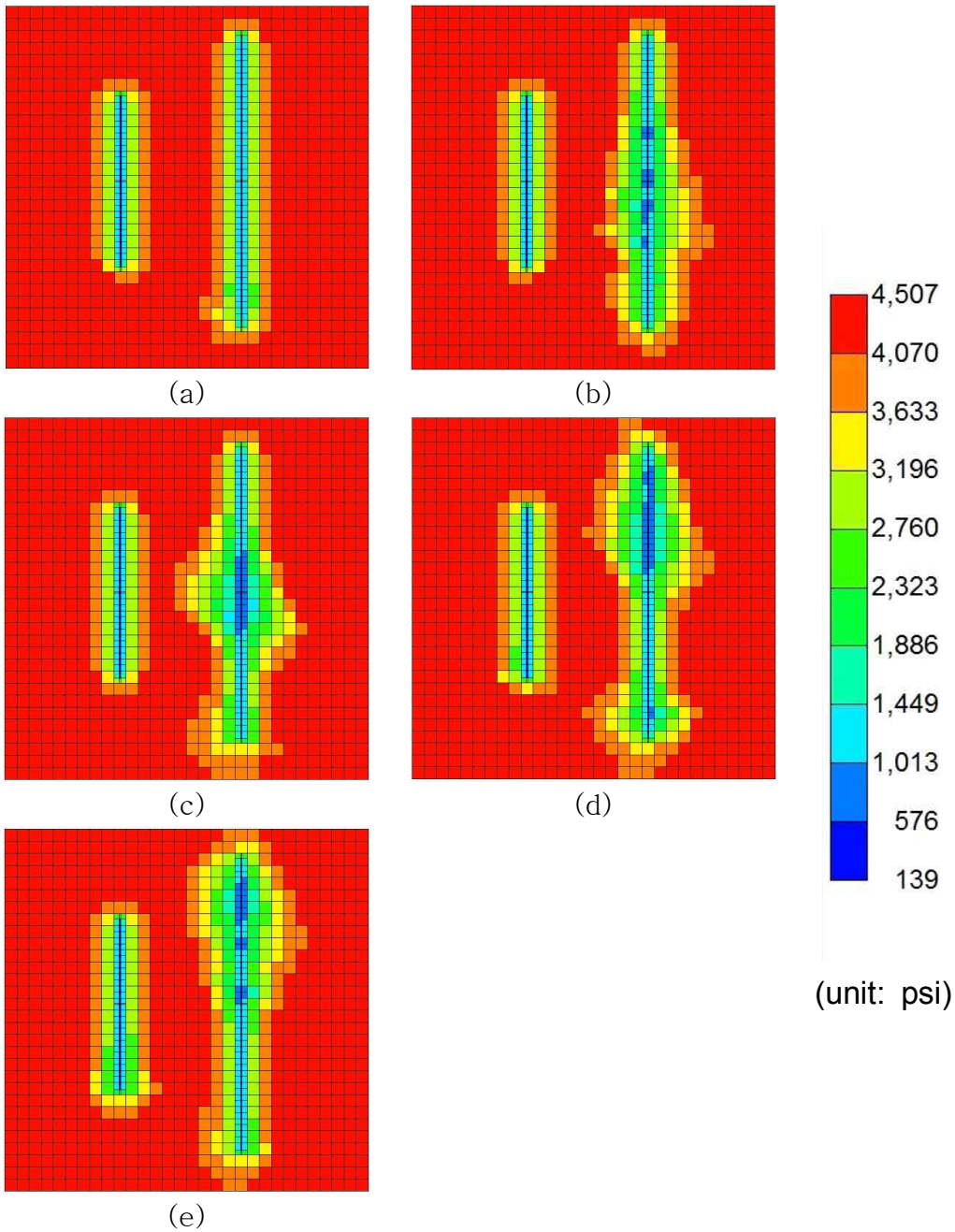


Figure 4.10 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4, and (e) Case 5 of Table 4.4.

4.1.3 인공균열의 반길이의 분포와 자연균열의 위치에 따른 유동성 평가

4.1.1장의 내용을 통해 자연균열의 위치가 동일한 경우 인공균열 반길이의 분포에 따라 유동성이 다르게 나타난다는 것을 볼 수 있었다. 4.1.2장의 내용에서 인공균열의 반길이가 동일할 때 자연균열 위치에 따라 유동성이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 4.1.3장에서는 두 가지 조건을 조합하여 인공균열 반길이의 분포와 자연균열의 위치의 변화에 따라 유동성이 확대되는 경우와 감소되는 경우를 Case로 나누어 확인한다.

두 단계의 인공균열 반길이는 140-240 ft의 범위를 가진다. 20 ft 간격으로 총 6개의 길이 분포를 가지며, 두 단계이므로 36개의 조합이 나타난다. 합이 380 ft가 되는 경우는 Table 4.3과 같이 6 가지이다. 자연균열 분포는 Table 4.4와 같이 5 가지이므로 총 30개의 Case가 있다.

Table 4.5는 30개 Case의 인공균열 반길이와 자연균열 위치에 따른 초기 가스 생산량이다. 5 가지 자연균열 위치에 대한 초기 가스 생산량을 평균을 내어 비교하면 자연균열 위치 (a)가 가장 작은 값을 가지고, (c)가 가장 큰 값을 가진다.

30개 Case를 개별적으로 보았을 때, 가장 작은 초기 가스 생산량을 가지는 것은 Case 1이다. 가장 큰 값을 가지는 Case는 Case 18이다. Figure 4.11은 두 Case의 초기 가스 생산량 그래프이다. Figure 4.12는 두 Case의 혼합모델 유체투과율 분포, Figure 4.13은 두 Case의 10년 생산시기 이후의 압력 분포를 나타낸다. 동일 조건에서 인공균열 반길이의 분포와 자연균열 위치에 따라 연결성의 크기가 다르게 나타나고, 이는 가스 생산량과 압력 변화의 차이를 만들어내는 것을 볼 수 있다.

Table 4.5 30 cases: Initial gas production rate as same sum of half-length of artificial fractures and different natural fracture locations

Case	Artificial fracture half-length		Natural fracture	Initial gas production rate (Mscf/day)			
	1st stage, ft	2nd stage, ft	Figure 4.1 Case	15 day	30 day	45 day	60 day
1	140	240	(a)	85.97	62.31	55.87	51.87
2	160	220	(a)	86.49	63.17	56.88	52.81
3	180	200	(a)	90.63	66.99	60.08	56.13
4	200	180	(a)	95.81	71.61	64.66	59.42
5	220	160	(a)	98.86	74.79	67.17	61.72
6	240	140	(a)	101.5	77.44	69.47	63.90
	Case (a) mean			93.21	69.39	62.35	57.64
7	140	240	(b)	97.32	73.68	67.71	61.67
8	160	220	(b)	96.37	72.88	65.89	60.92
9	180	200	(b)	97.62	73.68	66.35	61.44
10	200	180	(b)	99.75	75.97	68.42	63.33
11	220	160	(b)	100.7	77.20	69.52	64.91
12	240	140	(b)	105.4	77.66	70.29	64.73
	Case (b) mean			99.53	75.18	68.03	62.83
13	140	240	(c)	104.3	79.83	71.72	66.04
14	160	220	(c)	104.1	79.31	71.73	65.64
15	180	200	(c)	104.9	79.95	72.28	66.21
16	200	180	(c)	105.8	80.86	73.08	66.97
17	220	160	(c)	107.4	82.61	74.67	68.29
18	240	140	(c)	108.4	83.67	75.17	68.94
	Case (c) mean			105.8	81.04	73.11	67.01
19	140	240	(d)	103.3	80.59	74.1	67.49
20	160	220	(d)	103.5	80.44	73.13	67.48
21	180	200	(d)	103.3	79.59	71.70	66.73
22	200	180	(d)	101.6	77.92	70.86	65.26
23	220	160	(d)	101.2	77.93	70.59	65.19

24	240	140	(d)	101.3	77.85	70.38	65.03
	Case (d) mean			102.4	79.05	71.79	66.20
25	140	240	(e)	101.1	77.59	70.00	64.67
26	160	220	(e)	100.2	76.71	69.32	63.91
27	180	200	(e)	100.9	76.96	69.82	64.14
28	200	180	(e)	100.2	76.28	68.49	63.62
29	220	160	(e)	98.67	75.00	67.94	62.52
30	240	140	(e)	96.20	72.62	65.51	60.59
	Case (e) mean			99.55	75.86	68.51	63.24
Minimum gas production case					Case 1		
Maximum gas production case					Case 18		

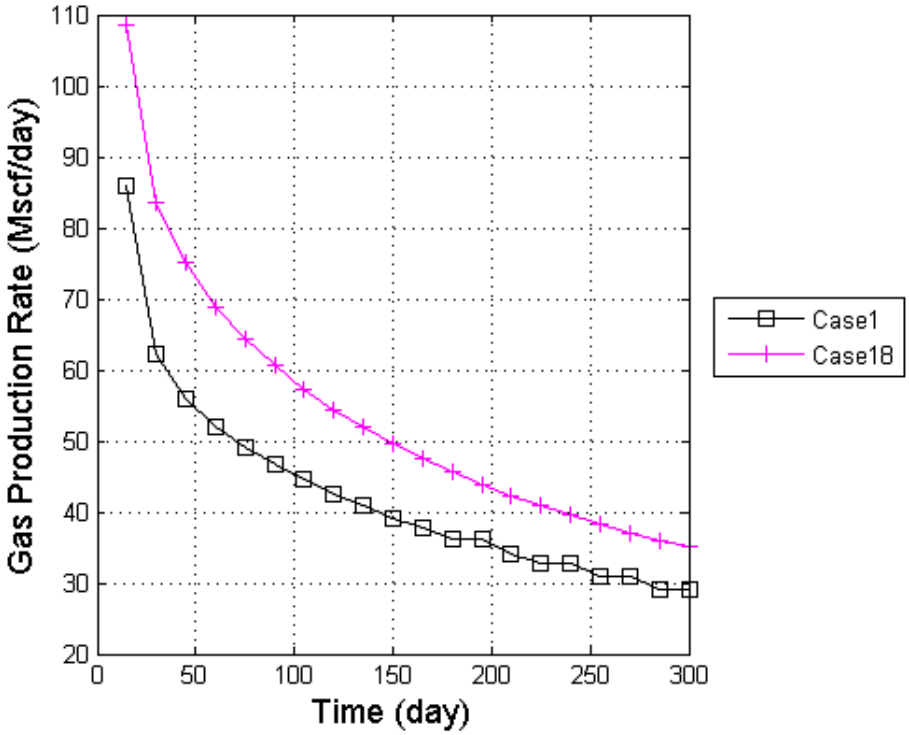


Figure 4.11 Initial gas production rate of Case 1 and Case 18 of Table 4.5.

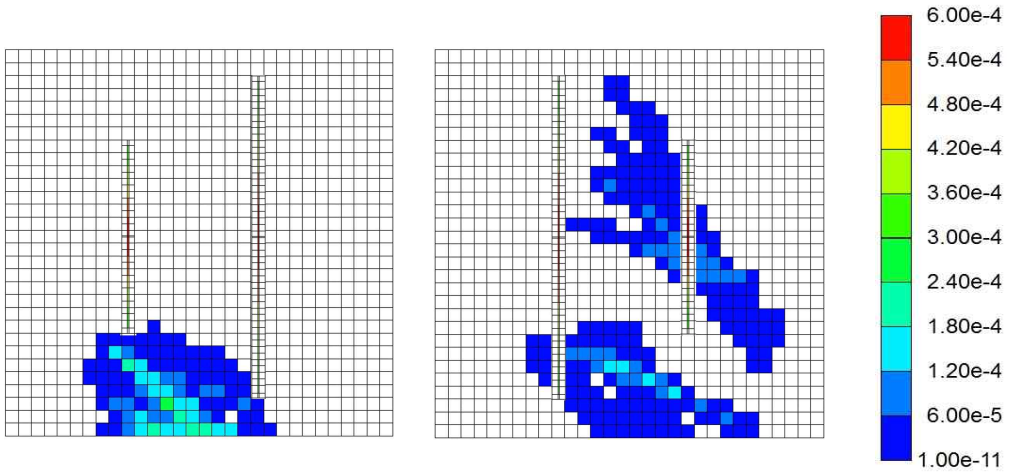


Figure 4.12 Hybrid model permeability distribution: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5.

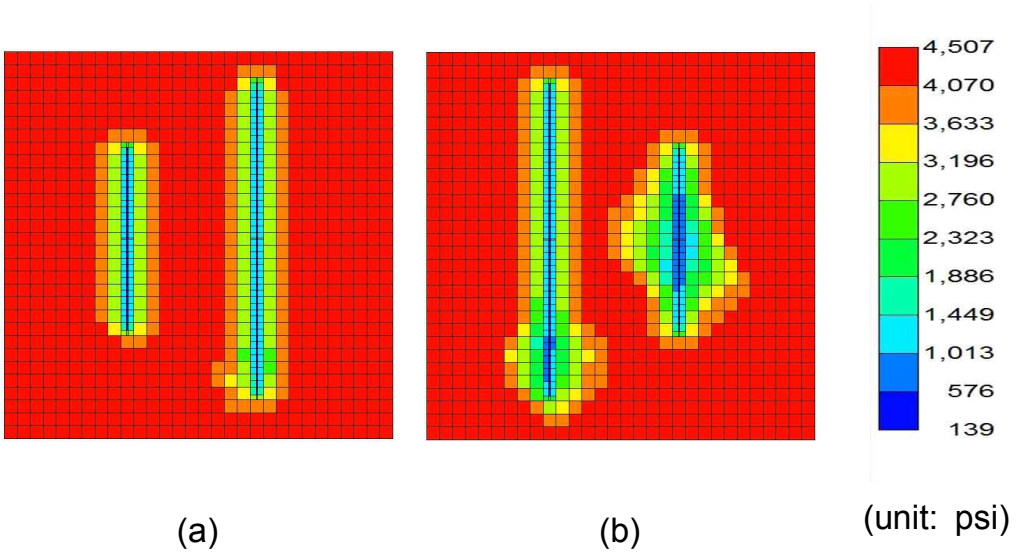


Figure 4.13 Pressure distribution at 10 years: (a) Case 1 and (b) Case 18 of Table 4.5.

4.2 자연균열 집중성에 따른 생산량 민감도 평가

민감도 분석 기법은 각각의 입력 변수와 반응 변수와의 상관계수를 계산하여 민감도를 분석한다. 입력 변수와 반응 변수가 높은 상관관계를 가진다면 민감도 또한 높게 나타난다. 거리기반 일반 민감도 분석 기법은 입력변수간의 상호작용을 고려하여 민감도를 계산한다. 따라서 자연균열과 인공균열의 특성을 반영하는 인자를 입력변수로, 가스 생산량을 반응 변수로 채택하여, 각 인자들의 상호적, 독립적인 가스 생산량에 대한 상관관계를 유추할 수 있다. 4.1장의 결과에서 자연균열과 인공균열의 특성은 동일한 조건하에서도 연결성에 따라 가스 생산량이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 공간분포특성인 자연균열의 위치와 인공균열의 반길이 분포의 영향 정도를 거리기반 일반 민감도 분석으로 정량화하여 평가 할 수 있다.

이번 연구는 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우를 나누어 민감도를 분석했다. 자연균열 집중성이 높은 경우 저류층 전체에 걸쳐 자연균열이 나타나기 때문에 자연균열 집중성이 낮은 경우에 비해 균열의 공간분포특성보다 개체특성이 더 높을 것으로 예상되었다.

Table 4.6과 Table 4.7은 각각 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 민감도를 분석할 인자들의 범위를 나타낸다. 두 조건에서 자연균열 집중성 이외에는 모두 동일한 범위를 가진다. Table 4.1 조건의 가상 저류층으로 시뮬레이션 하였다.

두 경우에 대한 민감도 분석은 균열 인자들의 조합을 다양하게 한 800개의 표본으로 이루어졌으며, 인자들 값의 분포는 Low와 High 값 사이에서 표본의 수만큼 균등하게 생성되어 적용되었다.

Figure 4.14는 자연균열 집중성이 높은 경우에 대한 거리기반 일

반 민감도 분석 결과이며, Figure 4.15는 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 거리기반 일반 민감도 분석 결과이다.

자연균열 집중성이 높은 경우 Figure 4.14와 같이 균열의 개체특성인 자연균열 간극과 자연균열 방향성이 가장 높은 민감도를 가졌다. 두 번째 단계 인공균열 반길이, 첫 번째 단계 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 집중성, 자연균열 길이의 순으로 민감도가 높았다. 자연균열 집중성이 낮은 경우는 Figure 4.15와 같이 다른 민감도 순서가 나타났다. 첫 번째와 두 번째 단계 인공균열 반길이, 자연균열 위치가 가장 높은 민감도를 가졌고, 자연균열 간극, 집중성, 방향성이 그 뒤를 이었다.

자연균열 집중성을 제외하고 모두 동일한 조건에서 민감도를 계산한 것이지만 다른 결과를 보였다. 자연균열 집중성이 낮을 때, 균열의 공간분포특성의 값이 강조되었다. 이는 공간분포특성에 기인한 균열간 연결성이 자연균열 집중성이 낮을 때 더 높은 상관관계를 가짐을 볼 수 있다. 따라서 기존의 히스토리 매칭 또는 모델 선정법을 통한 셰일가스 저류층 특성화와 미래 생산 거동 예측 측면에서 자연균열과 인공균열의 공간분포특성을 고려하지 않을 때 나타나는 결과는 신뢰성이 낮다고 볼 수 있다. 4.1장의 결과에서도 균열 공간분포특성으로 인한 저류층 내 유체의 유동성의 차이와 가스 생산량의 차이를 볼 수 있기 때문에 균열간 연결성에 대한 고려는 필수적이라 생각할 수 있다. 자연균열 집중성이 높은 경우에도 균열의 공간분포특성이 높은 비중을 차지하지만, 균열의 개체특성 또한 높은 비중을 가지고 있으므로, 자연균열 집중성이 낮은 경우에 비해 해당 균열 특성화에서 높은 신뢰도를 가질 것으로 예상된다.

Table 4.6 Ranges of fracture parameters for DGSA at high natural fracture intensity

	Parameter	Value	
		Low	High
Natural fracture	**Intensity (NF intensity), P32, unitless**	**0.1**	**0.12**
	Trend (NF trend), °	30	60
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7
	Length (NF length), ft	100	170
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	150	250
	2nd half-length (2nd AF length), ft	150	250

Table 4.7 Ranges of fracture parameters for DGSA at low natural fracture intensity

	Parameter	Value	
		Low	High
Natural fracture	**Intensity (NF intensity), P32, unitless**	**0.01**	**0.015**
	Trend (NF trend), °	30	60
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7
	Length (NF length), ft	100	170
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	150	250
	2nd half-length (2nd AF length), ft	150	250

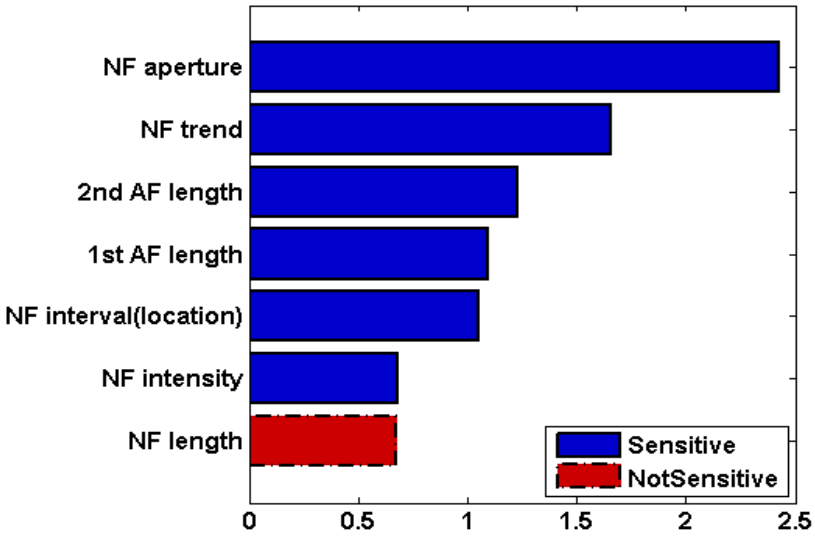


Figure 4.14 Sensitivity by DGSA at high natural fracture intensity.

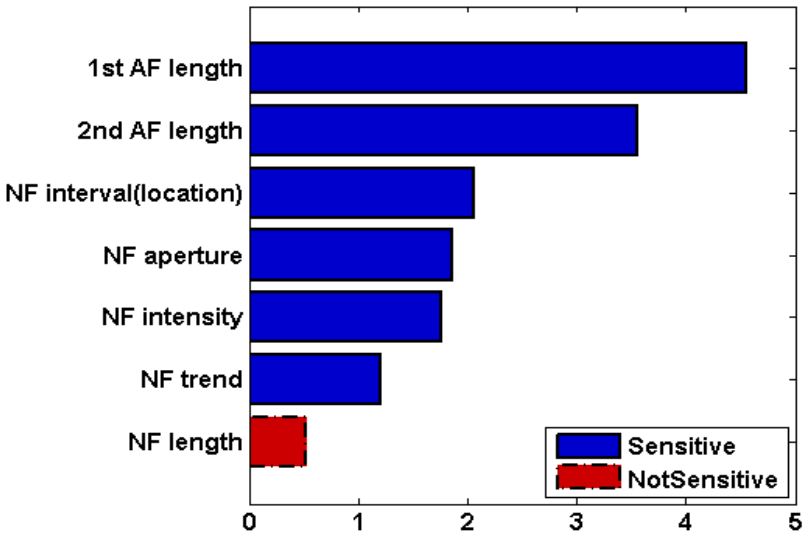


Figure 4.15 Sensitivity by DGSA at low natural fracture intensity.

4.3 공간적 균열분포에 따른 모델 선정법 효과 분석

이번 연구는 이러한 자연균열과 인공균열의 연결성을 고려한 모델 선정법의 개발에 의의가 있다. 자연균열 집중성이 높은 경우에 비해 상대적으로 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열간 연결성은 셰일가스 생산량에 높은 영향을 주기 때문에 해당 민감도 분석 결과를 기반으로 모델을 생성한 모델 선정법은 신뢰성 있는 균열 인자 특성화 및 미래 생산거동 예측을 가능하게 한다. 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 기존의 균열간 연결성을 고려하지 않은 방법과 제안한 방법인 균열간 연결성을 고려한 민감도 기반 모델 선정법을 비교하였다.

4.3.1장에서는 자연균열 집중성이 높은 경우에 대해 제안한 방법과 기존의 방법을 비교했다. 4.3.2장에서는 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대해 제안한 방법과 기존의 방법을 비교하였다.

4.3.1 자연균열 집중성이 높은 경우에 대한 모델 선정법

Table 4.8은 자연균열 집중성이 높은 경우에 대해 특성화할 균열 인자인 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이, 위치와 두 단계의 인공균열 반길이의 범위를 나타냈다. 각 인자들은 노두조사와 지질학적 조사를 통해 범위를 산정한 것으로 가정하였다. 모델 선정법에서 저류층 조건은 Table 4.1과 Table 4.2의 정보를 따르며 균열 특성은 Table 4.8을 따른다.

4.2장의 결과에 따라 균열 인자들의 민감도가 자연균열 간극, 자연균열 방향성, 두 단계의 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 집중성, 자연균열 길이의 순으로 나온 것을 기반으로 균열 인자 값에 대한 모델 생성에 대한 구간의 수를 설정했다. 자연균열 간극의 구간 수를 5개, 자연균열 방향성의 구간 수 4개 인공균열 반길이의 구간 수를 4개, 자연균열 위치 구간 수를 3개, 자연균열 집중성 구간 수를 3개로 하여 총 2,880개의 모델을 생성했다. 2,880개의 모델들은 군집화와 대표모델 선정 후 모델 선택을 반복적으로 진행하여 40개 이하의 수만큼 모델을 선정하는 것으로 모델 선정법이 진행된다. 군집화 이후 각 군집의 대표모델들 중 참조 모델1의 생산이력과 가장 유사한 대표모델이 선정되고 해당 군집이 다음 모델 선정법의 대상이 된다. 참조 모델1의 생산이력은 15일 간격의 360일 동안의 가스 생산량이다. 선정된 모델들은 균열의 특성들을 정량화하고, 향후 10년 동안의 가스 생산량을 예측할 수 있는 표본으로 활용된다.

Table 4.9는 참조 모델1의 균열 특성이며, Figure 4.16은 참조 모델1의 생산이력이다.

Table 4.8 Ranges of fracture parameters for model selection at high natural fracture intensity

Parameter		Value		# of sections in range
		Low	High	
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.1	0.12	3
	Trend (NF trend), °	30	60	4
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7	5
	Length (NF length), ft	100	170	1
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40	3
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	140	240	4
	2nd half-length (2nd AF length), ft	140	240	4

Table 4.9 Values of fracture parameters for reference at high natural fracture intensity

Parameter		Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.113
	Trend (NF trend), °	31
	Aperture (NF aperture), ft	1.10E-6
	Length (NF length), ft	136
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	20.38
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	160.1
	2nd half-length (2nd AF length), ft	240.8

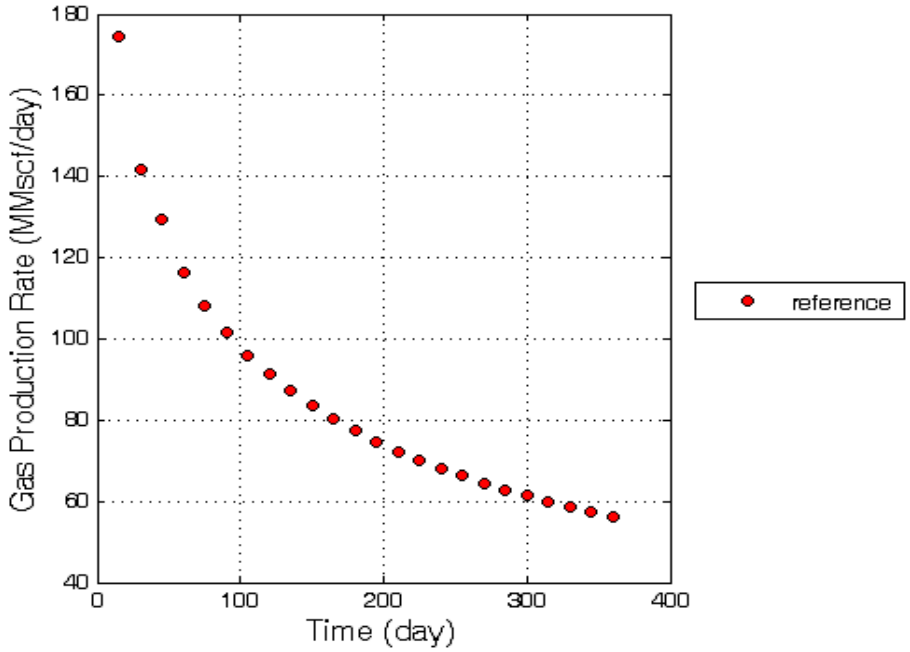


Figure 4.16 Gas production rate record of reference1.

2,880개의 모델을 참조 모델1의 생산이력과의 유사성으로 18개의 모델을 선정했다. Figure 4.17은 초기 모델 전체와 참조 모델1의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.18은 선정된 모델과 참조 모델1의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.10과 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델1과 유사성을 가진다. 18개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델1의 인자 값의 오차는 Table 4.10의 Error와 같다. Figure 4.19 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.20는 궁극가채량(Estimated Ultimate Reserve, EUR)을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림(box plot)으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델1의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 1.71%, 기존 방법은 2.81%로 나타났다. 제안한 방법이 기존의 방법보다 편차가 작았으나 큰 차이가 나타나지는 않았다.

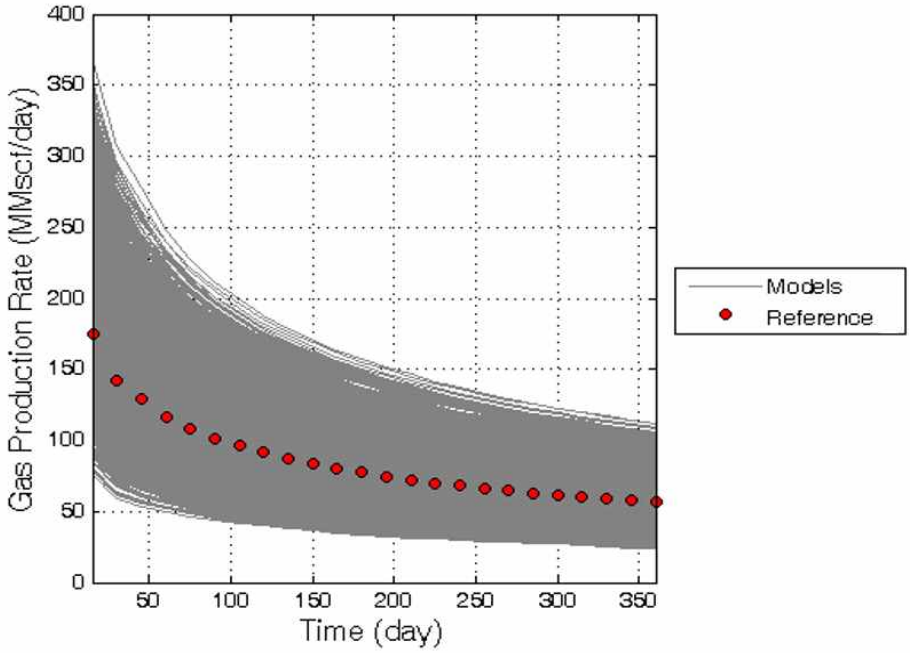


Figure 4.17 Gas production rate of initial models and reference1.

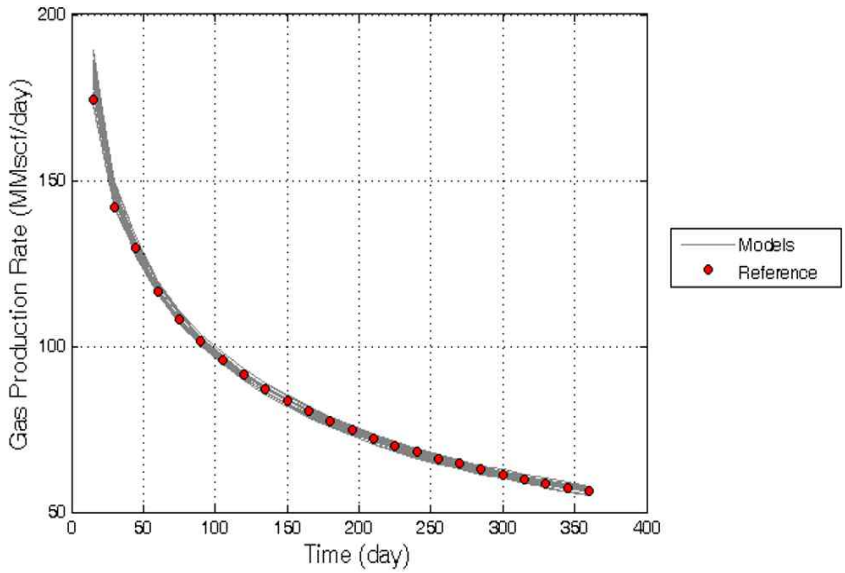
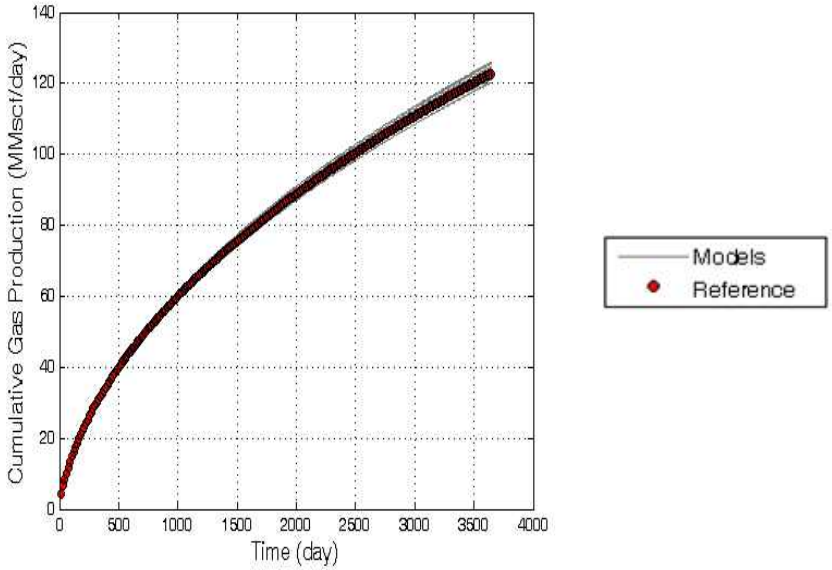


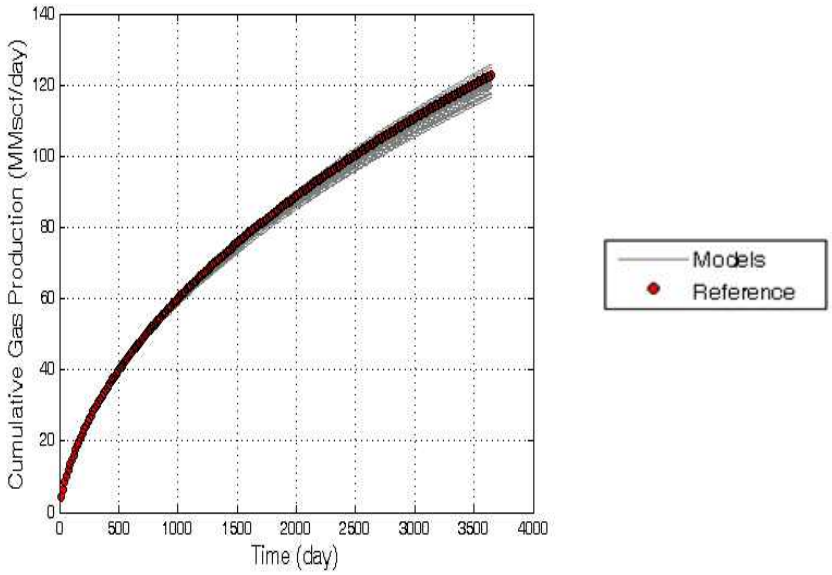
Figure 4.18 Gas production rate of selected models and reference1.

Table 4.10 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.100	30	1.50E-06	135	10	190	240
2	0.106	40	1.25E-06	135	10	190	240
3	0.113	30	1.50E-06	135	10	140	240
4	0.100	40	1.50E-06	135	10	140	240
5	0.106	30	1.25E-06	135	25	140	240
6	0.106	30	1.25E-06	135	25	190	190
7	0.106	50	1.50E-06	135	10	190	240
8	0.113	40	1.25E-06	135	10	190	240
9	0.106	60	1.50E-06	135	10	190	190
10	0.113	50	1.25E-06	135	10	240	140
11	0.113	60	1.50E-06	135	25	240	240
12	0.113	30	1.25E-06	135	10	140	240
13	0.120	30	1.00E-06	135	10	240	240
14	0.106	30	1.25E-06	135	10	190	190
15	0.120	40	1.00E-06	135	10	240	240
16	0.120	30	1.25E-06	135	25	190	240
17	0.106	30	1.50E-06	135	40	140	240
18	0.113	50	1.25E-06	135	40	140	240
Mean	0.110	39	1.32E-06	135	16.6	184.4	226.1
Reference1	0.113	31	1.10E-06	136	20.3	160.1	240.8
Error(%)	-2.65	25	20	-0.7	-18.2	15.17	-6.10



(a)



(b)

Figure 4.19 Cumulative gas production of selected models and reference1 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

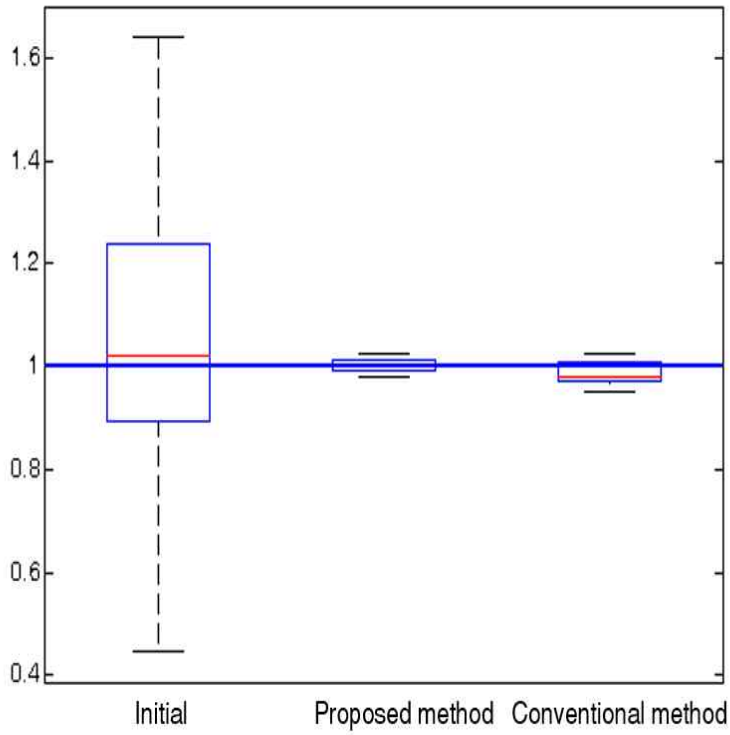


Figure 4.20 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference1 EUR).

4.3.2 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 모델 선정법

Table 4.11은 자연균열 집중성이 낮은 경우에 대해 특성화할 균열 인자인 자연균열 집중성, 방향성, 간극, 길이, 위치와 두 단계의 인공균열 반길이의 범위를 나타냈다. 각 인자들은 노두조사와 지질학적 조사를 통해 범위를 산정한 것으로 가정하였다. 모델 선정법에서 저류층 조건은 Table 4.1과 Table 4.2의 정보를 따르며 균열 특성은 Table 4.11을 따른다.

4.2장의 결과에 따라 균열 인자들의 민감도가 두 단계의 인공균열 반길이, 자연균열 위치, 자연균열 간극, 자연균열 집중성, 자연균열 방향성, 자연균열 길이의 순으로 나온 것을 기반으로 균열 인자 값에 대한 모델 생성에 대한 구간의 수를 설정했다. 인공균열 반길이의 구간 수를 6개, 자연균열 위치의 구간 수를 5개, 자연균열 간극의 구간 수를 4개, 자연균열 집중성의 구간 수를 3개, 자연균열 방향성과 길이의 구간 수를 1개로 하여 총 2,160개의 모델을 생성했다. 2,160개의 모델들은 군집화와 대표모델 선정 후 모델 선택을 반복적으로 진행하여 40개 이하의 수만큼 모델을 선정하는 것으로 모델 선정법이 진행된다. 4.3.1장과 마찬가지로 군집화 이후 각 군집의 대표모델들 중 참조 모델2의 생산이력과 가장 유사한 대표모델이 선정되고 해당 군집이 다음 모델 선정법의 대상이 된다. 참조 모델2의 생산이력은 15일 간격의 360일 동안의 가스 생산량이다. 선정된 모델들은 균열의 특성들을 정량화하고, 향후 10년 동안의 가스 생산량을 예측할 수 있는 표본으로 활용된다.

Table 4.12는 참조 모델2의 균열 특성이며, Figure 4.21은 참조 모델2의 생산이력이다.

Table 4.11 Ranges of fracture parameters for model selection at low natural fracture intensity

Parameter		Value		# of sections in range
		Low	High	
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.01	0.015	3
	Trend (NF trend), °	30	60	1
	Aperture (NF aperture), ft	5E-7	15E-7	4
	Length (NF length), ft	100	170	1
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	10	40	5
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	140	240	6
	2nd half-length (2nd AF length), ft	140	240	6

Table 4.12 Values of fracture parameters for reference2 at low natural fracture intensity

Parameter		Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.0139
	Trend (NF trend), °	31
	Aperture (NF aperture), ft	6.68E-7
	Length (NF length), ft	159.3
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	36.58
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	156.5
	2nd half-length (2nd AF length), ft	160.7

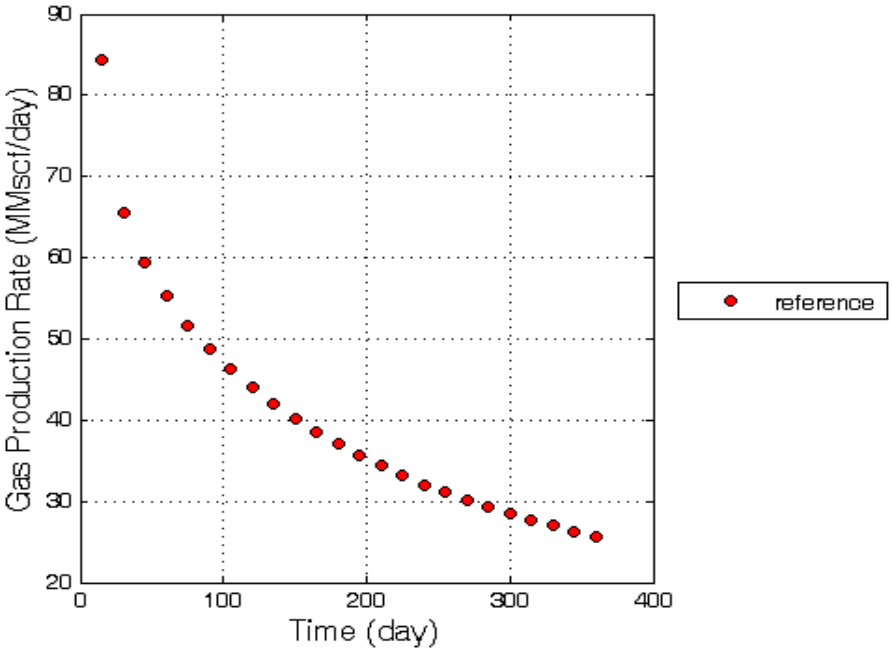


Figure 4.21 Gas production rate record of reference2.

2,160개의 모델을 참조 모델2의 생산이력과의 유사성으로 20개의 모델을 선정했다. Figure 4.22는 초기 모델 전체와 참조 모델2의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.23은 선정된 모델과 참조 모델2의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.13과 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델2와 유사성을 가진다. 20개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델2의 인자 값의 오차는 Table 4.13의 Error와 같다. Figure 4.24 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.25는 EUR을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 0.41%, 기존 방법은 2.59%로 나타났다.

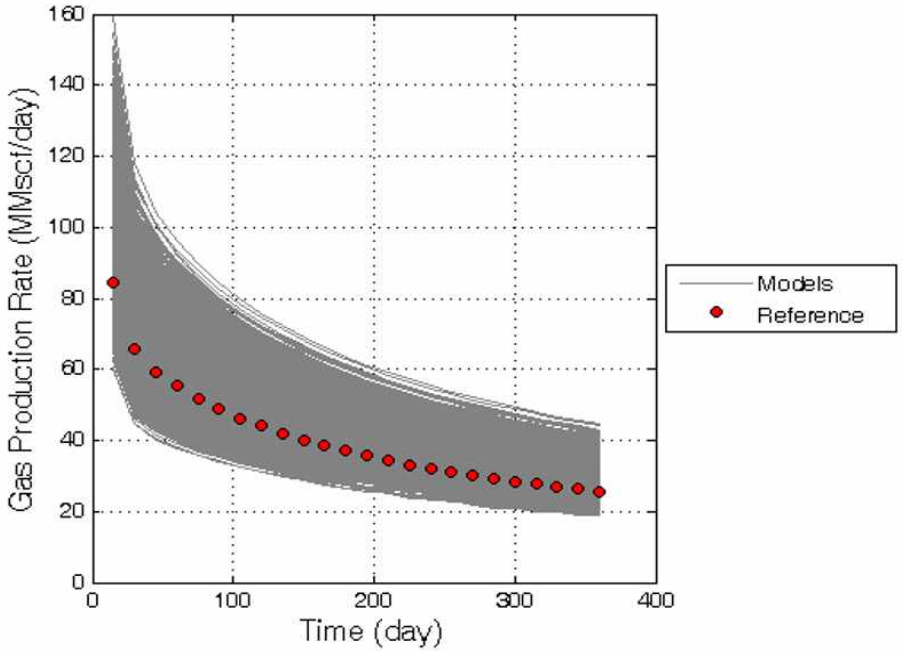


Figure 4.22 Gas production rate of initial models and reference2.

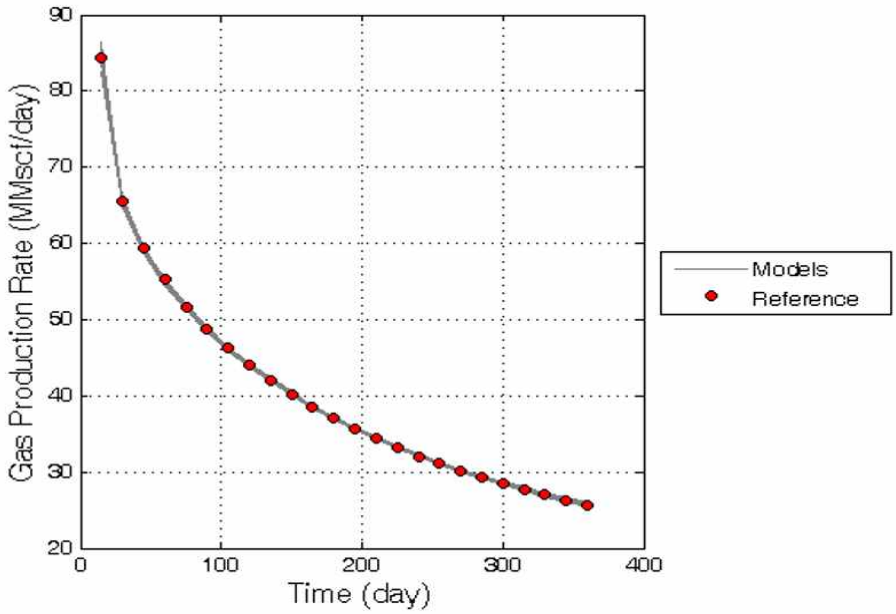
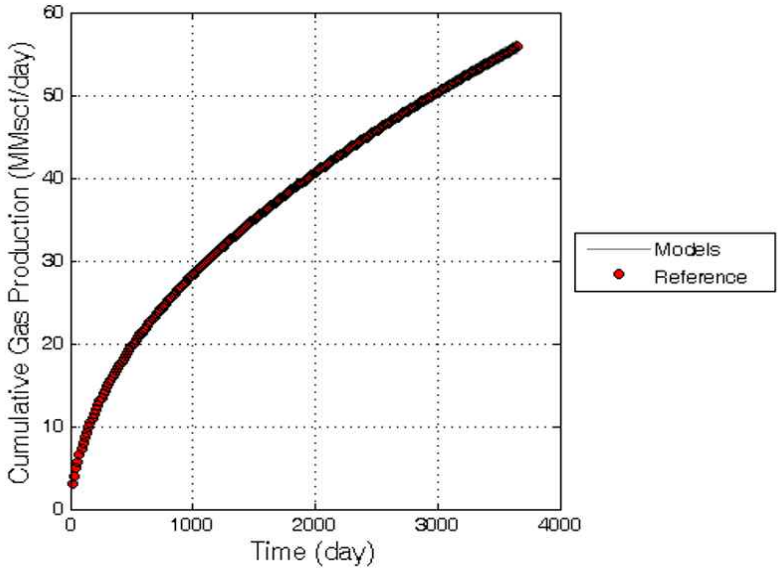


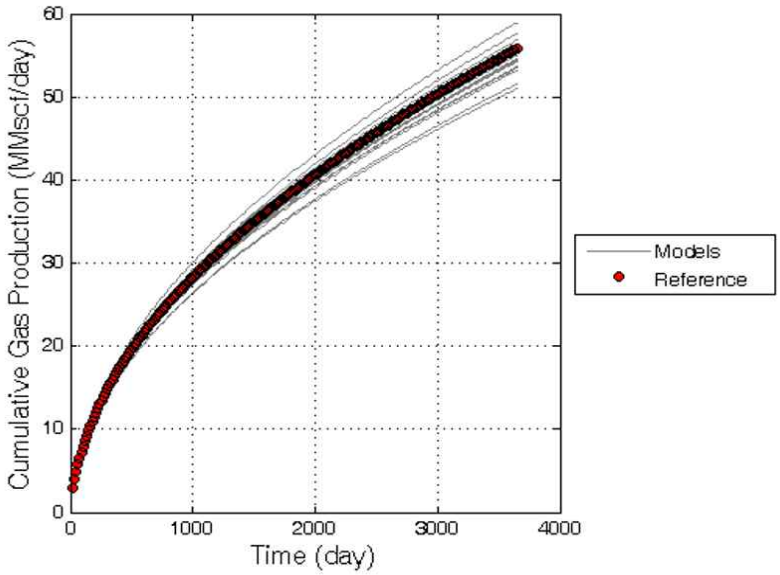
Figure 4.23 Gas production rate of selected models and reference2.

Table 4.13 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0125	45	1.00E-06	135	40	140	180
2	0.015	45	7.50E-07	135	40	160	160
3	0.015	45	5.00E-07	135	40	200	140
4	0.015	45	7.50E-07	135	20	160	180
5	0.015	45	5.00E-07	135	40	160	180
6	0.015	45	7.50E-07	135	40	180	140
7	0.0125	45	7.50E-07	135	20	180	160
8	0.0125	45	1.50E-06	135	20	140	180
9	0.015	45	5.00E-07	135	40	180	160
10	0.015	45	7.50E-07	135	40	140	180
11	0.0125	45	1.50E-06	135	20	160	160
12	0.01	45	1.25E-06	135	20	180	140
13	0.01	45	7.50E-07	135	40	140	200
14	0.01	45	5.00E-07	135	40	200	160
15	0.0125	45	1.50E-06	135	40	140	160
16	0.0125	45	1.00E-06	135	40	180	140
17	0.0125	45	1.00E-06	135	40	160	160
18	0.0125	45	5.00E-07	135	40	140	200
19	0.01	45	1.25E-06	135	20	140	200
20	0.015	45	1.25E-06	135	20	160	160
Mean	0.013	45	9.13E-07	135	33	162	167
Reference2	0.0139	31	6.68E-07	159	36.6	157	161
Error(%)	-6.47	45	36.60	-15	-9.7	3.2	3.7



(a)



(b)

Figure 4.24 Cumulative gas production of selected models and reference2 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

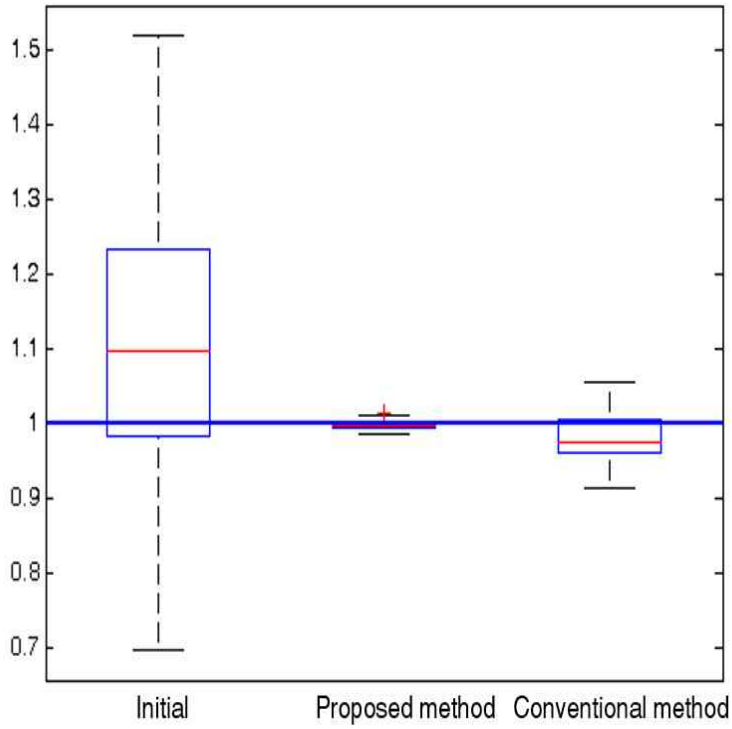


Figure 4.25 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference2 EUR).

자연균열 집중성이 낮은 경우에 대한 두 번째 예시로 참조 모델3의 모델 선정법을 수행하였다. Table 4.14는 참조 모델3의 균열 특성이며, Figure 4.26은 참조 모델3의 생산이력이다.

2,160개의 모델을 참조 모델3의 생산이력과의 유사성으로 19개의 모델을 선정했다. Figure 4.27은 초기 모델 전체와 참조 모델3의 가스 생산량을 비교한 결과이고 Figure 4.28은 선정된 모델과 참조 모델3의 가스 생산량을 비교한 결과이다. 선정된 모델은 Table 4.15와 같은 인자 값을 가지고 있으며, 참조 모델3과 유사성을 가진다. 19개 모델의 평균 인자 값과 참조 모델3의 인자 값의 오차는 Table 4.15의 Error와 같다. Figure 4.29 (a)는 제안한 방법을 통한 10년 동안의 가스 생산거동을 예측한 결과이고, (b)는 기존의 방법을 통해 예측한 결과이다. Figure 4.30은 EUR을 제안한 방법과 기존의 방법을 상자그림으로 비교하여 나타낸 결과이다. 선정된 모델들과 참조 모델의 EUR 표준편차는 제안한 방법은 0.39%, 기존 방법은 1.84%로 나타났다.

자연균열 집중성이 낮은 경우에 두 가지 참조 모델(참조 모델2, 참조 모델3)을 통해 제안한 방법의 예측성능이 기존의 방법보다 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 방법이 자연균열의 위치와 인공균열의 반길이의 분포로 인한 연결성을 고려하지 못했기 때문으로 볼 수 있다.

Table 4.10, Table 4.13, Table 4.15를 통해 참조 모델 1, 2, 3의 특성화가 이루어졌다. 자연균열 집중성이 높은 경우였던 참조 모델1의 경우 Table 4.10에서 자연균열 집중성에서는 오차가 낮았고, 다른 인자들도 20% 이내의 오차가 나타났다. 자연균열 집중성이 낮은 경우의 참조 모델2의 인자들은 Table 4.13에서 자연균열 방향성과 간극에 대해서는 높은 오차를 보였으나, 인공균열 반길이와 자연균열 집중성, 자연균열 위치와 같은 민감도가 높았던 균열 공간분포특

성에 대해 낮은 오차를 보였다. Table 4.15의 참조 모델3도 같은 결과를 보였다. 제안한 방법은 집중성이 낮은 경우에 대해 민감도가 높은 인자들에 대한 특성화가 신뢰성이 있는 것으로 볼 수 있다.

Table 4.14 Values of fracture parameters for reference3 at low natural fracture intensity

	Parameter	Value
Natural fracture	Intensity (NF intensity), P32, unitless	0.0134
	Trend (NF trend), °	58
	Aperture (NF aperture), ft	9.89E-7
	Length (NF length), ft	154.3
	Interval(location) (NF interval(location)), ft	27.92
Artificial fracture	1st half-length (1st AF length), ft	198.9
	2nd half-length (2nd AF length), ft	206.1

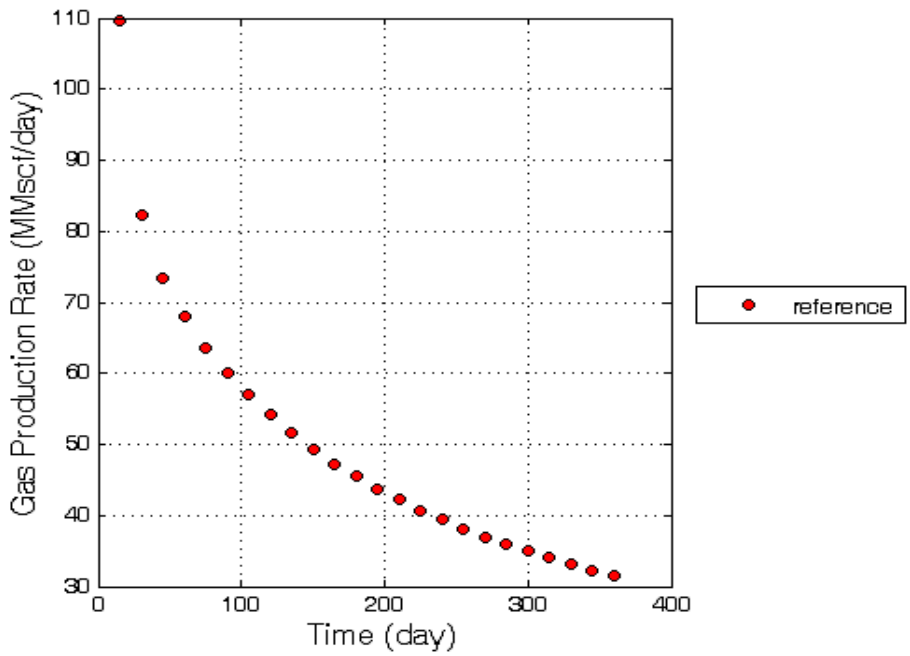


Figure 4.26 Gas production rate record of reference3.

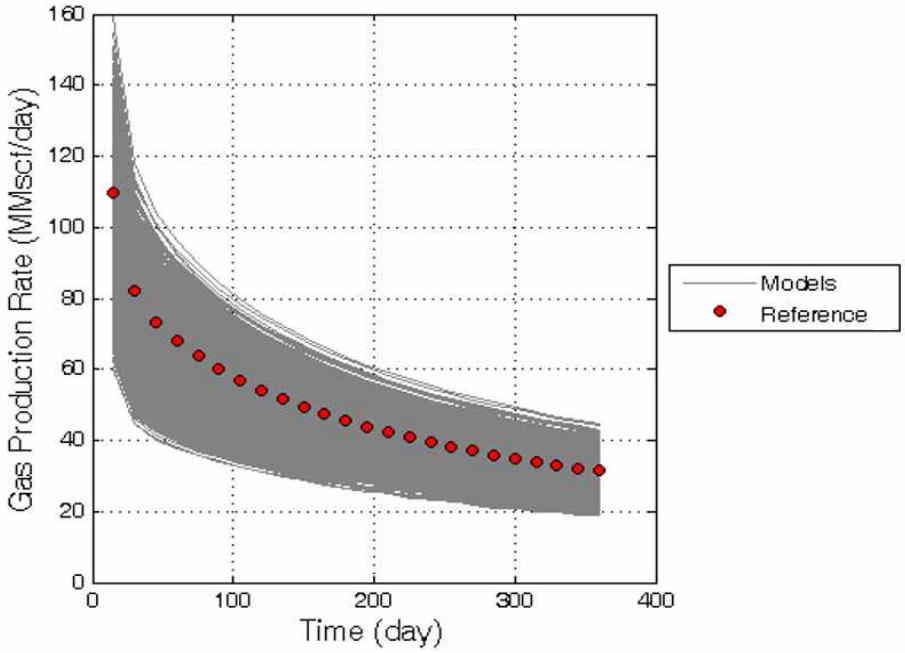


Figure 4.27 Gas production rate of initial models and reference3.

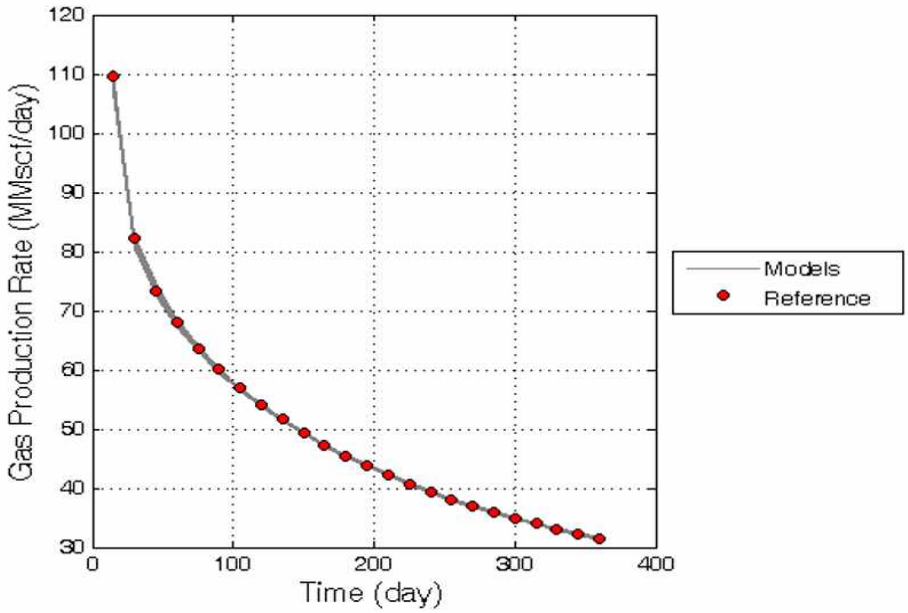
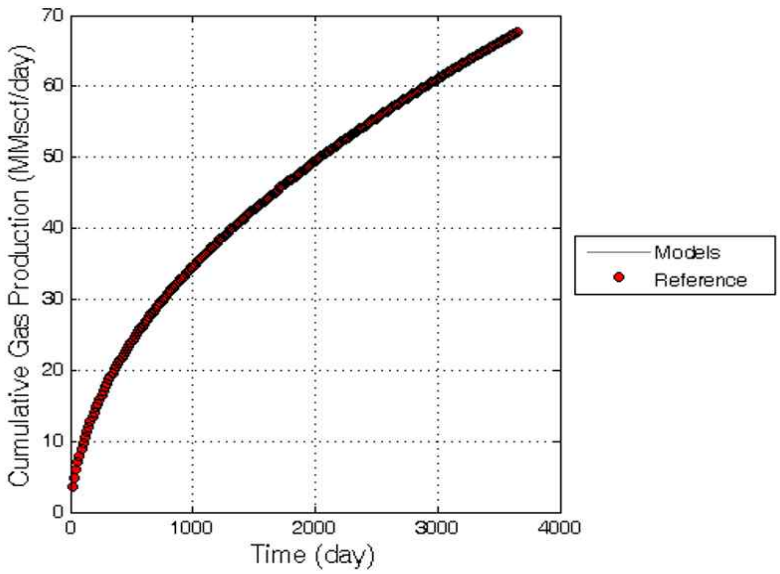


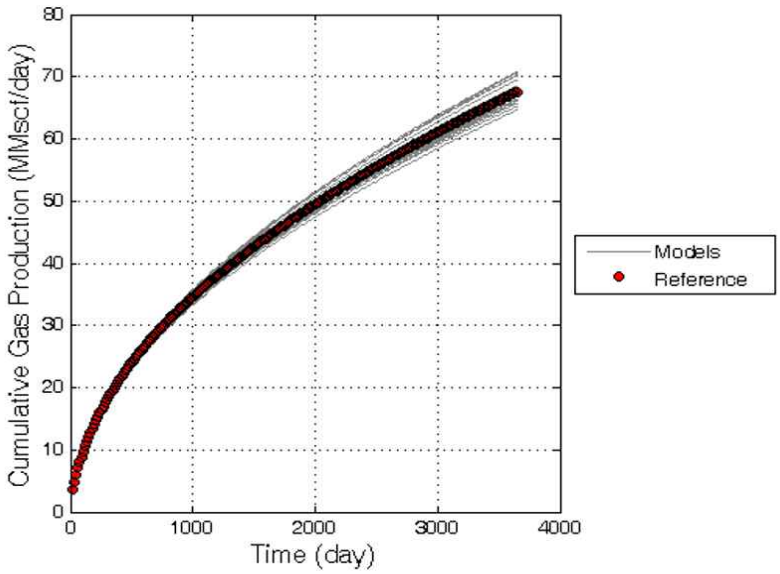
Figure 4.28 Gas production rate of selected models and reference3.

Table 4.15 Values of fracture parameters of selected models (1: Intensity, 2: Trend, 3: Aperture, 4: Length, 5: Interval(Location), 6: 1st half-length, 7: 2nd half-length)

Model	Natural fracture parameters					Artificial fracture parameters	
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.01	45	5.00E-07	135	30	240	200
2	0.01	45	1.25E-06	135	30	200	200
3	0.0125	45	5.00E-07	135	40	200	220
4	0.0125	45	7.50E-07	135	30	240	160
5	0.01	45	7.50E-07	135	30	240	180
6	0.015	45	1.25E-06	135	20	240	140
7	0.0125	45	7.50E-07	135	20	240	180
8	0.01	45	5.00E-07	135	30	220	220
9	0.01	45	1.50E-06	135	30	220	160
10	0.0125	45	5.00E-07	135	20	240	200
11	0.0125	45	7.50E-07	135	20	220	200
12	0.0125	45	1.25E-06	135	30	180	200
13	0.0125	45	5.00E-07	135	20	200	240
14	0.01	45	7.50E-07	135	30	220	200
15	0.0125	45	1.00E-06	135	30	220	160
16	0.0125	45	7.50E-07	135	30	220	180
17	0.01	45	5.00E-07	135	30	200	240
18	0.015	45	5.00E-07	135	40	240	180
19	0.0125	45	5.00E-07	135	40	180	240
Mean	0.0118	45	7.76E-07	135	28.9	219	195
Reference3	0.0134	58	9.89E-07	154	27.9	199	206
Error(%)	-11.65	-22	-21.52	-12	3.66	10.1	-5.5



(a)



(b)

Figure 4.29 Cumulative gas production of selected models and reference3 for 10 years: (a) proposed method and (b) conventional method.

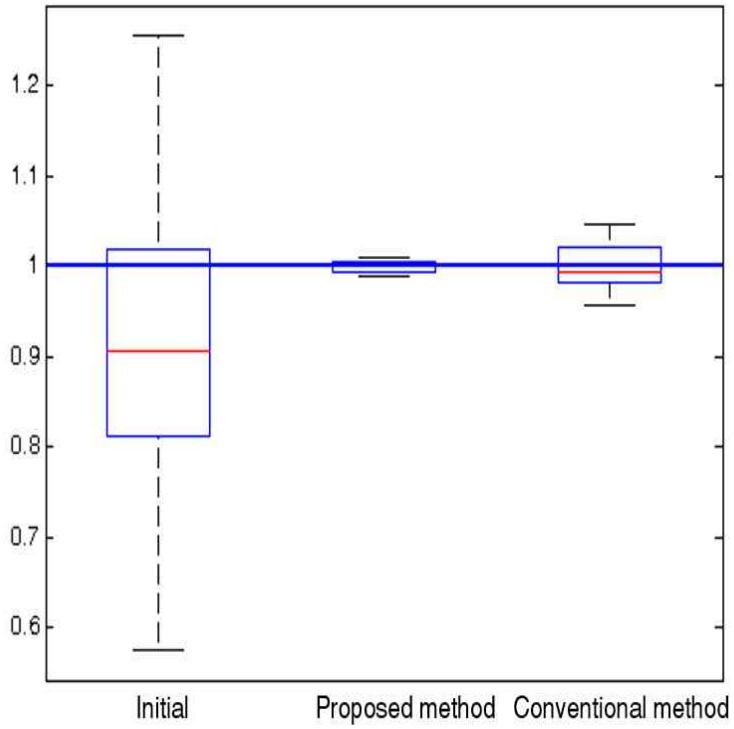


Figure 4.30 EUR box plot by Initial, proposed method, and conventional method (The center line is reference3 EUR).

5. 결 론

이 연구는 셰일가스 저류층의 자연균열과 수압파쇄기법으로 생성된 인공균열의 속성을 정량적으로 특성화하고, 이를 통해 향후 생산 거동 예측의 불확실성을 감소하는데 목적을 가졌다. 특성화하는 자연균열의 특성은 집중성, 방향성, 간극, 길이, 균열간 간격 및 위치였다. 특성화하는 인공균열의 특성은 균열 반길이였다. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 거리기반 일반 민감도 분석 기법으로 각 인자들의 민감도를 분석하였으며, 민감도가 높은 인자들을 중심으로 모델을 생성하여 모델 선정법을 수행하였다. 분리균열모델중 하나인 Levy-Lee 모델로 실제의 자연균열 모사하고, 이를 Oda 방법으로 업스케일링하여 이중공극·이중유체투과도모델의 인자로 반영한 혼합모델을 사용했다. 반영된 인자인 x, y, z 방향의 균열 유체투과도와 매질-균열연결인자는 자연균열의 특성을 반영한 정보를 가지고 인공균열 반길이와 연결되어 균열망을 형성했다. 자연균열과 인공균열의 연결성은 가스 생산량 등의 저류층 생산 거동에 영향을 주기 때문에 특성화 인자로 사용될 수 있다. 각 모델들의 동적 반응 변수인 가스 생산량을 이용해 클러스터링하는 방식으로 모델 선정법을 진행했다. 참조 모델의 가스 생산량 자료와 각 클러스터의 대표 모델들의 가스 생산량 자료의 우도함수 값을 계산하여 유사성을 판단했다. 반복적인 모델 선정법으로 유사성이 가장 높은 모델 그룹이 선정됐다. 선정된 모델들이 가지고 있는 자연균열 특성과 인공균열 특성으로 참조 모델의 균열 특성을 불확실성 범위

내에서 특성화했다. 또한 선정된 다수의 모델의 향후 생산 거동을 시뮬레이션 하여, 참조 모델의 향후 생산 거동을 예측할 수 있었다. 이러한 과정을 통한 이번 연구의 결론은 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. 셰일가스 저류층 내에서 자연균열과 인공균열의 연결성은 동일한 균열 개체특성을 가지고 있어도 균열 공간분포특성에 따라 다른 연결성을 보이며 이는 저류층 내의 가스 유동반경과 유동성에 영향을 주어 최종적으로 가스 생산량에 반영되었다. 기존의 자연균열과 인공균열의 상호적인 연결성을 고려하지 않은 셰일가스 저류층 모사가 가지는 균열 특성화와 향후 생산거동 예측 불확실성의 한계를 균열간 연결성의 고려로 해결할 수 있다.

2. 자연균열 집중성이 높은 경우와 낮은 경우에 대해 균열의 공간분포특성은 중요성이 다르게 나타난다. 자연균열 집중성이 높은 경우 균열간의 상호적인 연결성이 저류층 전체에서 나타나기 때문에 균열 개체특성에 비해 균열 공간분포특성의 비중이 낮게 나타난다. 자연균열 집중성이 낮은 경우는 이와 다른 양상을 보이는데, 균열이 저류층 전체에 걸쳐 나타나지 않기 때문에 균열간 간격 및 위치와 자연균열과 연결되는 인공균열 반길이의 분포가 전체 연결성에 큰 영향을 준다. 이에 따라 자연균열 집중성이 낮은 경우에는 균열의 공간분포 특성이 강조된다. 균열의 특성화를 진행함에 있어서 기존의 방법에서 배제된 균열 공간분포 특성이 반영되어야 한다.

3. 자연균열 집중성이 높은 경우 이번 연구에서 제안한 방법과 같이 균열 공간분포특성를 고려한 결과와 기존의 방법이 향후 생산거동 예측에서 큰 차이를 보이지 않았다. 자연균열 집중성이 낮은 경우 공간분포 특성을 고려한 이번 연구의 제안한 방법이 기존의 방법보다 향후 생산거동 예측 성능과 균열 특성 정량화에서 우수한 결과를 가졌다. 이러한 점에서 자연균열 집중성이 낮은 경우 균열의 공간분포특성의 고려가 필수적이며, 제안한 방법으로 기존 방법의 한계점을 극복할 수 있다.

참고 문헌

박영숙, 2013. 반응표면법을 이용한 셰일가스 생산 모델링. 서울대학교 공학석사학위논문.

정승필, 2008. 앙상블칼만필터를 이용한 균열저류층 특성화. 서울대학교 공학박사학위논문.

Al-Huthali, A. and Datta-Gupta, A. 2004. Streamline Simulation of Counter-current Imbibition in Naturally Fractured Reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering Vol (43): 271-300.

Bello, R. O. 2009. Rate Transient Analysis in Shale Gas Reservoirs with Transient Linear Behavior. PhD dissertation, Texas A&M University.

Berkhin, P. 2006. A Survey of Clustering Data Mining Techniques, Grouping Multidimensional Data, 25-72.

Bhowmik, S., Srinivasan, S., and Bryant, S. L. 2010. Predicting the Migration of CO2. Plume Using Injection Data and a Distance-Metric Approach to Reservoir-Model Selection. Paper SPE 139709 presented at the SPE International Conference on CO2 Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, 10–12 November.

Bhowmik, S. 2014. Particle Tracking Proxies for Prediction of CO2

Plume Migration Within a Model Selection Framework. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

Cherpeau, N., Caumon, G., Caers, J. et al. 2012. Method for Stochastic Inverse Modeling of Fault Geometry and Connectivity using Flow Data. Math. Geosci. Vol(44): 147-168.

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.

Cui, H. and Kelkar, M. 2005. Automatic History Matching of Naturally Fractured Reservoirs and a Case Study. Paper SPE 94037 presented at the Western Regional Meeting, Irvine, California, USA, 30 March-1 April.

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, New Mexico, 3-5 June.

Fenwick, D., Scheidt, C., and Caers, J. 2014. Quantifying Asymmetric Parameter Interactions in Sensitivity Analysis: Application to Reservoir Modeling. Math. Geosci. Vol(46): 493-511.

Fisher, R. 1953. Dispersion on a Sphere. The Royal Society of London Vol (217): 295-305.

Ghods, P. and Zhang, D. 2012. Automatic Estimation of Fracture Properties in Multi-Stage Fractured Shale Gas Horizontal Wells for Reservoir Modeling. Paper SPE 153913 presented at the SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, 21-23 March.

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

Hu, L. Y. and Jenni, S. 2005, History Matching of Object-Based Stochastic Reservoir Models. Paper SPE 81503 in proceeding SPE J. Vol(3): 312-323.

Kalantari-Dahaghi, A. 2010. Numerical Simulation and Modeling of Enhanced Gas Recovery and CO_2 Sequestration in Shale Gas Reservoirs: A Feasibility Study. Paper SPE 139701 presented SPE International Conference on CO_2 Capture, Storage, and Utilization, New Orleans, Louisiana, USA, 10-12 November.

Mantilla, C.A. 2010. Feedback Control of Polymer Flooding

Process Considering Geologic Uncertainty. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.

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.

Morales-German, G., Navarro-Rosales, R., and Dubost, X. F. 2012. Production Forecasting for Shale Gas Exploration Prospects Based on Statistical Analysis and Reservoir Simulation. Paper SPE 152639 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Mexico City, Mexico, 16-18 April.

Nejadi, S., Leung, J., and Trivedi, J. 2012. Integration of Production Data for Estimation of Natural Fracture Properties in Tight Gas Reservoirs Using Ensemble Kalman Filter. Paper SPE 162783 presented SPE Canadian Unconventional Resources Conference, Alberta, 30 October-1 November.

Nejadi, S., Leung, J., and Trivedi, J. 2015. Integrated Characterization of Hydraulically Fractured Shale Gas Reservoirs-Production History Matching. 2015. Paper SPE 171664 presented SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary, Canada, 30 September-2 October.

Oda, M. 1985. Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses, Geotechnique, Vol (35): 483.

Ouenes, A.m Richardson, S., and Weiss, W. W. 1995. Fractured Reservoir Characterization and Performance Forecasting using Geomechanics and Artificial Intelligence. Paper SPE 30572 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, USA, 22-25 October.

Suzuki, S., Daly, C., Caers, J. et al. 2007. History Matching of Naturally Fractured Reservoirs using Elastic Stress Simulation and Probability Perturbation Method. Paper SPE 95498 proceeding SPE J. Vol(1): 118-129.

Warren, J.E. and Root, P.P. 1963. The Behavior of Naturally Fractured Reservoir. SPE J. Vol (3): 245-255.

ABSTRACT

The most effective parameter for gas production in shale gas reservoirs is the connectivity between artificial fractures and natural fractures. Artificial fractures and natural fractures are represented by individual characteristics, which are fracture aperture, length, and trend of fractures. They are also represented by spatial distribution characteristics, which are fracture intensity, location, and interval. Fluid flow radius and flow volume in shale gas reservoirs depend on connectivity changes in the characteristic value of artificial and natural fractures.

Previous studies have not considered artificial fractures and natural fractures simultaneously, and assumed individual characteristics or spatial distribution characteristics of fractures for the limits of analysis objects during the characterization of fractures. These studies have shown unstable prediction performance because they cannot reflect the connectivity of fractures.

This study develops a fracture characterization method that involves uncertain parameter quantification for each fracture when considering artificial and natural fractures in shale gas reservoirs. Uncertain fracture parameters are ranked by high sensitivity through Distance-based Generalized Sensitivity Analysis (DGSA) in cases of high natural fracture intensity and low natural fracture intensity in each reservoir. Also, the model selection uses different

model groups generated by the sensitivity of each case to quantify the characteristic parameters of artificial and natural fractures. The proposed method minimizes the number of models and improves quantified accuracy as reference values.

Key words: natural fracture, artificial fracture, fracture intensity, distance-based generalized sensitivity analysis, model selection approach

Student number: 2014-20527