



셰일 저류층에서의 핵밀도 함수를 이용한 확률론적 궁극가채량 예측

신호진 · 황지유 · †임종세

한국해양대학교 에너지자원공학과

(2016년 11월 30일 접수, 2017년 5월 20일 수정, 2017년 6월 22일 채택)

Probabilistic Prediction of Estimated Ultimate Recovery in Shale Reservoir using Kernel Density Function

Hyo-Jin Shin · Ji-Yu Hwang · †Jong-Se Lim

Dept. of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 49112, Korea

(Received November 30, 2016; Revised May 20, 2017; Accepted June 22, 2017)

요약

생산성을 증대시키는 기술의 발달로 상업적인 생산이 가능해진 비전통 가스에 대한 개발이 북미를 중심으로 진행되고 있다. 셰일 저류층은 유체투과도가 낮으며, 일반적인 석유자원과 달리 수압파쇄로부터 생성된 균열을 통해 가스 생산이 이루어지므로 초기의 생산 감퇴율이 큰 반면 후반부에서는 감퇴하는 변화율이 매우 작은 특징을 나타낸다. 이러한 셰일가스의 생산량 변동성으로 인해 단일 예측값을 산출하는 생산감퇴곡선분석 기법을 생산량 자료 분석에 적용할 경우 불확실성을 고려하기 어렵다. 이 연구에서는 미국 Eagle Ford 지역의 생산량 자료에 대하여 확률론적 기법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였으며, 생산감퇴곡선인자에 대한 난수발생 시 핵밀도 함수를 활용하여 분포에 대한 가정 없이 자료의 특성을 반영한 확률분포를 도출하였다. 또한, 일반적으로 사용되고 있는 Arps 쌍곡선함수와 치밀/셰일층의 특성을 고려하여 생산량 예측이 가능한 Modified SEPD 적용에 있어 단일값이 아닌 확률에 따른 궁극가채량을 예측함으로써 불확실성을 최소화하고자 하였다.

Abstract - The commercial development of unconventional gas is pursued in North America because it is more feasible owing to the technology required to improve productivity. Shale reservoir have low permeability and gas production can be carried out through cracks generated by hydraulic fracturing. The decline rate during the initial production period is high, but very low latter on, there are significant variations from the initial production behavior. Therefore, in the prediction of the production rate using deterministic decline curve analysis(DCA), it is not possible to consider the uncertainty in the production behavior. In this study, production rate of the Eagle Ford shale is predicted by Arps Hyperbolic and Modified SEPD. To minimize the uncertainty in predicting the Estimated Ultimate Recovery(EUR), Monte Carlo simulation is used to multi-wells analysis. Also, kernel density function is applied to determine probability distribution of decline curve factors without any assumption.

Key words : shale gas, Monte Carlo simulation, kernel density function, decline curve analysis

†Corresponding author:jslim@kmou.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

대규모 연속체로 부존이 확인되어 상대적으로 탐사위험도는 작으나 회수 기술 및 생산성에 따라 경제성 확보 여부가 결정되는 비전통 자원(unconventional resources)에 대한 개발이 북미를 중심으로 진행되고 있다. 이는 일반적으로 상업성에 따라 '발견잠재자원량(contingent resources)'과 '매장량(reserves)'으로 분류되며, 생산정의 궁극가채량(Estimated Ultimate Recovery; EUR)은 반복적인 통계 분포로 나타난다. 또한, 비전통자원은 일반적인 석유자원과 달리 인접 생산정의 자료를 바탕으로 미개발 지역의 생산량 예측이 어려우며, 자유가스/오일(비흡착)이 수력학적 현상에 의해 부존하고 있지 않다[1]. 이러한 자원 중 셰일가스(shale gas)는 수평정 시추(horizontal drilling), 다단계 수압파쇄(multi-stage hydraulic fracturing) 등과 같은 생산 기술의 발달로 개발단가가 감소하였으며, 북미를 중심으로 개발이 진행되고 있다. 이렇듯 상업적인 생산이 가능해진 셰일가스 개발을 위해서는 신뢰성 있는 생산성 예측을 바탕으로 개발 지역에 대한 평가를 우선적으로 수행하여야 한다. 이를 위해 저류층 시뮬레이션, 유동전이분석(Rate Transient Analysis) 등과 같은 방법을 적용하나, 생산량 이외의 저류층에 대한 상세 정보 취득에 한계가 있는 현장에서는 신속한 분석이 이루어져야 하므로 주로 생산감퇴곡선분석기법(Depression Curve Analysis; DCA)을 활용한 평가가 수행되어 왔다[2, 3]. 생산감퇴곡선분석기법은 과거 생산량 자료를 이용하여 생산감퇴 이력양상을 파악하고 미래 생산성을 파악하는 방법으로 Arps의 경험식이 보편적으로 사용되고 있으나, 경계영향유동(boundary dominate flow)을 가정하는 식의 특성상 셰일가스 생산량 자료를 적용하기에는 신뢰성이 떨어질 수 있다. 최근에는 Stretched Exponential Production Decline(SEPD), Duong 모델 등과 같이 다양한 생산감퇴곡선분석기법이 제시되고 있으나[4, 5], 생산자료 특성 별로 적합한 기법이 상이하여 결과의 신뢰도를 높이기 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 단일 예측값을 산출하는 결정론적 방법인 생산감퇴곡선분석기법을 생산량 자료 분석에 적용할 경우 불확실성을 고려하기 어려우므로 신뢰도 개념을 적용하여 생산량 예측 시 통계량에 따른 최대, 최소값 등을 도출하는 확률론적 기법을 활용하여 궁극가채량을 추정할 바 있다[6].

이 연구에서는 미국 Eagle Ford 지역의 다수 생산정 자료에 대하여 보편적으로 사용되고 있는 Arps 쌍곡선함수와 치밀/셰일층의 특성을 고려하여 생산

량 예측이 가능한 Modified SEPD를 활용하였다. 또한, 확률론적 기법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션 적용 시 확률분포 형태에 따라 결과가 상이할 수 있으므로 비매개변수적(nonparametric) 핵밀도 함수(kernel density function)를 활용하였다. 쌍곡선함수 및 Modified SEPD의 생산감퇴곡선인자 자료의 특성을 반영한 적정 분포형을 핵밀도 함수를 통해 도출하여 불확실성을 고려하고, 최종적으로 각 기법에 대한 궁극가채량의 히스토그램과 누적확률분포를 도출하고자 한다.

II. 생산감퇴곡선분석기법의 적용

유·가스 저류층에 대한 향후 생산 계획 수립 및 경제 가치를 판단하는데 있어 잔존하는 석유자원의 양과 생산 수명은 중요한 인자로 이를 결정하기 위해 가장 많이 사용되는 방법이 생산감퇴곡선분석기법이다. 이는 현재 존재하는 각 생산정 자료만으로 간편하게 감퇴추이를 알아내어 미래의 생산량 외삽(extrapolation)이 가능하다[7]. 북미의 유·가스전은 운영의 단순화 또는 비용 절감의 이유로 압력 자료가 없거나 얻기 어려운 경우가 많아 대부분 감퇴곡선분석기법으로 도출된 생산량의 합으로 계산되는 궁극가채량을 토대로 그 가치를 평가한다[8].

2.1. Arps 경험식

유·가스전의 생산량은 시간에 따라 자연적으로 감소하고 경제적인 한계에 도달할 때까지만 생산을 지속하며, 감퇴곡선의 기본 개념은 시간에 따른 생산량의 감퇴율을 생산량 'q'의 함수로 표현할 수 있다는 가정에서 출발한다[9]. 이 때, 생산 감퇴율을 특징짓는 감퇴지수(decline exponent) 'b'의 조건에 지수(exponential)함수, 쌍곡선(hyperbolic)함수, 조화(harmonic)함수의 세 가지 방법으로 구분할 수 있으며(Table 1), 생산량 자료만으로 간편하게 감퇴추이를 알아 낼 수 있다. 그 중에서도 일반적인 석유자원에서는 감퇴지수가 0과 0.7 사이의 범위를 나타내며, 쌍곡선 함수를 가장 보편적으로 사용하고 있다[10].

Table 1. Arps decline model

	<i>b</i>	<i>D</i>	Rate relation
Exponential	<i>b</i> = 0	constant	$q_t = q_i \exp(-D_i t)$
Hyperbolic	$0 < b < 1$	proportional <i>q</i>	$q_t = q_i / (1 + bD_i t)^{1/b}$
Harmonic	<i>b</i> = 1	proportional <i>q</i>	$q_t = q_i / (1 + bD_i t)$

2.2. Modified SEPD

Arps의 쌍곡선 함수 적용 시 유의미한 생산거동 추정을 위해서는 천이유동(transient flow) 구간을 지나 저류층에서의 유체가 경계에 도달하여 유동하는 경계영향유동에서의 생산량 자료를 이용하여야 한다. 그러나 세일가스와 같이 치밀한 지층을 가진 저류층의 경우에는 경계영향유동까지 도달하기에는 오랜 시간이 소요되므로 Valko와 Lee는 식(1)과 같이 치밀/세일층의 특성을 고려하여 생산 예측이 가능한 SEPD를 제안하였다[11]. 이 기법은 초기 생산거동은 쌍곡선함수와 비슷하나 생산 후반부로 갈수록 감퇴지수가 1을 초과하는 생산량 자료에 대한 고려가 가능하다.

$$q_t = q_i \exp[-(t/\tau)^n] \tag{1}$$

Yu와 Miocevic은 감마함수(gamma function)에 대한 연립 방정식을 통해 주요 변수인 n, τ 를 도출하는 SEPD의 적용과정을 개선한 Modified SEPD 혹은 YM-SEPD를 제안하였다. Fig. 1과 같이 새로운 specialized plot인 $\ln(q_0/q)$ 와 시간에 대한 그래프를 통해 기울기로 n 을 구하고 절편값(y_0)을 이용하여 식(2)로부터 τ 를 도출할 수 있다. 또한, 단기간의 생산량 자료 분석 시 다른 생산감퇴곡선분석 기법에 비해 보다 신뢰성 있는 생산거동 및 궁극가채량을 예측할 수 있다[12].

$$\tau = \exp[-\ln(y_0)/n] \tag{2}$$

III. 확률론적 궁극가채량 예측 방법

세일은 유체투과도가 $10^{-5} \sim 10^{-11}$ Darcy로 매우 낮아 수압파쇄로부터 생성된 균열을 통해 생산이 이루어지므로 초기의 가스 생산량이 크게 나타나며, 초기 감퇴율이 큰 반면 후반부의 감퇴율은 매우 작고 장기간의 천이유동이 발생하는 특징을 보인다. 이러한 세일가스 생산량 자료에 대하여 단일 예측값을 도출하는 생산감퇴곡선분석기법에 적용할 경우, 생산거동의 변동성으로부터 파생되는 불확실성이 존재하므로 이를 최소화하기 위해 이 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션과 비매개변수적 핵밀도 함수 방법을 적용하였다.

3.1. 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 자원량 산정에 필요한 저류층 입력변수들에 대하여 가능한 모든 범위를 나타낸 확률분포를 통해 난수를 발생시키며, 각 변

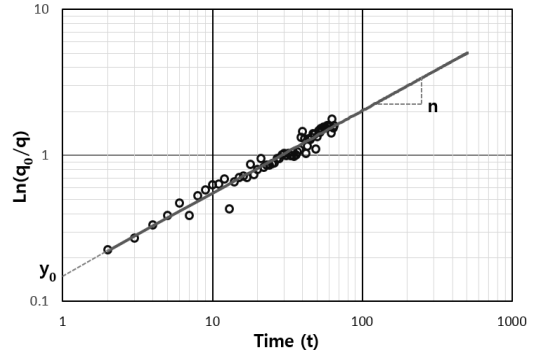


Fig. 1. Using New Specialized Plot to find 'n' & 'τ'.

수 값을 추출함으로써 확률에 따른 자원량을 도출하는 기법이다[13]. 이를 적용하기 위해서는 자료의 특성에 따른 확률분포형태를 결정해야 하며, 자료의 개수가 많은 경우는 정규(normal)분포 또는 로그정규(log-normal)분포를 사용하고 자료의 개수가 적은 경우는 균등(uniform)분포 또는 삼각(triangular)분포를 주로 사용한다[14]. 확률분포형태가 결정되면 누적확률분포로 나타내어 y축에서 난수를 발생시키고, 이에 해당하는 x축의 값을 추출하여 얻어진 값을 생산감퇴곡선분석기법에 적용함으로써 몬테카를로 시뮬레이션을 활용할 수 있다[15]. 이 때, 각 입력변수 자체의 고유한 통계학적 특징 파악이 어려운 경우, 실제 변수의 확률분포를 왜곡되게 추정할 가능성이 있다.

3.2. 비매개변수적 핵밀도 함수

확률론적 기법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션 적용에 있어 난수발생 시 확률분포 형태에 따라 상이한 결과를 도출할 수 있으므로 자료의 수와 각 생산감퇴곡선인자들의 특징에 따른 분포 형태 파악이 필요하다. 하나의 확률분포함수의 객관적인 선택, 짧은 기록 자료와 왜곡된 자료에 대한 매개변수의 신뢰성 결여와 그 외의 여러 원인으로 인해 복합분포(mixed distribution)의 밀도함수를 가진 자료가 나타날 때 기존의 히스토그램과 같은 방법을 적용하기에는 어려움이 따른다. 히스토그램은 가장 오래되고 쉽게 사용되는 확률밀도함수 추정법이나, 계급구간이 변화하는 점에서 불연속적이고 구간 간격과 시작점의 선택에 따라 확률밀도함수의 모양이 달라진다[16]. 이렇듯 조사대상이 모집단 분포에 관한 정보의 부족으로 어떤 가정이 어렵거나, 부정확한 가정을 전제로 하지 않고 통계량을 분석하여 통계적 추론을 하는 방법을 비매개변수적 방법이라 한다. 식 (3)과 같이 표본 자료에 대하여 곡선 형태

로 연속적인 값을 가지는 확률밀도함수(probability density function)로 나타낼 수 있으며, 비매개변수적 핵밀도 함수는 어떤 분포의 가정 없이 분석하고자 하는 자료 자체에서 분포형을 유도할 수 있다. 이 연구에서는 이를 적용하여 분포형 선정의 어려움을 해소할 수 있을 뿐 아니라 자료에 대한 적정 분포형을 선정하고자 하였다.

$$f(x) = \frac{1}{mh} \sum_{i=1}^m K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (3)$$

3.3. 확률에 따른 궁극가채량 예측 과정

확률론적 궁극가채량 예측을 위해 우선적으로 변동성이 크고 최대 유량 이전의 자료 제외 등과 같이 전처리 과정을 거친 생산량 자료를 생산감퇴곡선분석기법에 적용하며, 각 기법에서 생산예측에 주요하게 영향을 미치는 인자를 도출하였다. 각 생산감퇴곡선인자에 대한 결과를 통해 핵밀도 함수로 확률분포를 선정하고, 누적확률분포로부터 난수를 발생시켜 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한다. 발생시킨 난수의 수만큼 생산감퇴곡선을 도출할 수 있으며, 생산감퇴곡선별로 궁극가채량을 예측하여 누적확률분포로 나타낼 수 있다. 여기서, 90%의 확률

에서의 값을 P90, 50%에서 P50, 10%에서의 값을 P10으로 분류함으로써 확률론적 결과값을 얻을 수 있다. 이 때, 확률분포를 가정하는 것으로부터 결과에 대한 불확실성이 발생할 수 있으며, 삼각분포, 정규분포, 로그정규분포 등과 같은 확률분포를 지정하게 될 경우 왜곡된 값이 포함될 수 있다. 따라서 생산량 자료에 대한 간접적인 지표가 될 수 있는 생산감퇴곡선인자들에 대해 자료 자체에서 분포형을 유도하여 결과의 신뢰성에 대한 보완이 가능하도록 하였다. 또한, 분석에 사용하는 주변 생산정의 수에 따라 확률분포 형태가 달라질 수 있으므로 이 연구에서는 다수의 생산정 자료를 사용하였으며, 연구과정에 대하여 Fig. 2에 나타내었다.

IV. 미국 Eagle Ford의 생산량 자료 적용

4.1. 연구대상 지역

미국 Eagle Ford의 Webb county, Briscoe Ranch의 생산정 자료 중 전처리 과정을 거친 약 150여개 생산정 자료를 활용하였으며, 해당 자료는 Fig. 3과 같다. 각 생산정의 생산기간은 상이하며, 초기 생산량이 크고 초기의 감퇴율이 큰 양상을 나타내고 있다.

4.2. 생산감퇴곡선인자의 적정 확률분포 추정

현장자료를 대상으로 Arps의 쌍곡선함수에서는 비선형회귀분석을 통해 초기 생산량(q_i), 초기감퇴율(D_i), 감퇴지수(b) 값을 각 생산정별로 추정하였다. 또한, Modified SEPD에서 관련인자 n , τ 를 specialized plot을 통해 구하고 초기 생산량을 계산하여 각 기법별 생산감퇴곡선인자를 도출하였다. 특히, 생산거동에 대한 간접적인 지표로 활용할 수 있는 생산감퇴곡선인자는 지역별 지질학적 특징, 수압과 쇄설계 등에 따라 확률분포형태가 유동적으로 변화하게 되며, 정규분포, 로그정규분포 등과 같이 일정

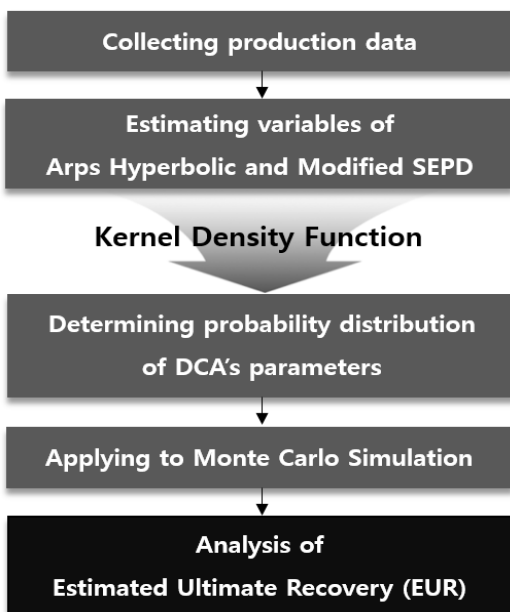


Fig. 2. Procedure for Combining Kernel Density Function with Monte Carlo Simulation.

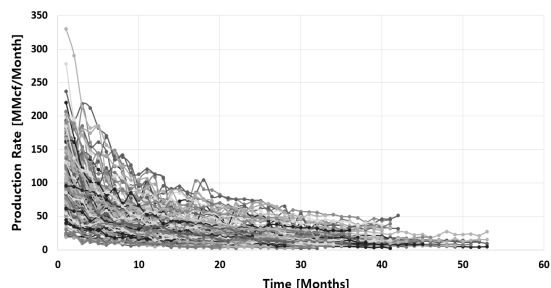
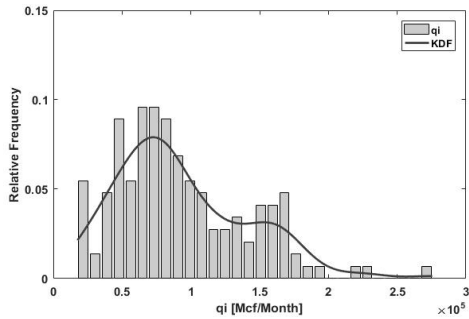


Fig. 3. Production history in the Eagle Ford.

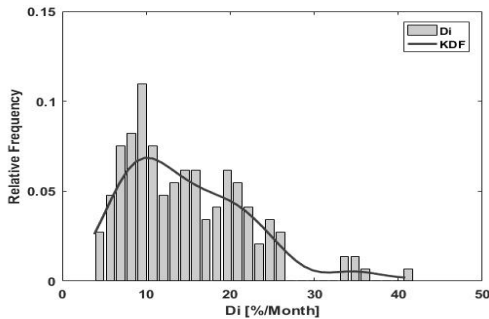
한 형태로 정의된 바 없으므로 핵밀도 함수를 적용함으로써 이에 대한 분석을 수행하고자 하였다.

Fig. 4, Fig 5의 막대그래프는 각 모델의 생산감퇴곡선인자에 대한 분포 결과이며, 이를 바탕으로 핵밀도 함수를 통해 연구대상 지역의 생산량 자료에 따른 적정 분포형을 선정할 수 있었다. 쌍곡선함수의 초기 생산량에 대한 분포는 분석을 수행한 생산량 자료 값의 영향을 직접적으로 받아 복합분포의 형태를 나타내었으며, 초기감퇴율 또한 이에

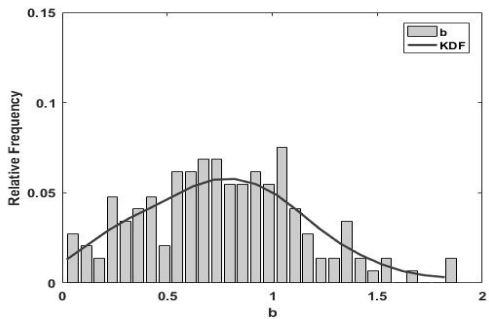
대한 결과로 일정한 형태의 분포로 나타나지 않음을 파악하였다. 감퇴지수의 경우 정규 혹은 로그정규분포와 유사한 형태를 보였으며, 향후 해당 지역에서 확률분포 형태에 대한 가정 시 이러한 분석결과를 활용할 수 있을 것이다. Modified SEPD 초기 생산량의 확률분포는 쌍곡선함수와 유사한 양상을 보였으며, 그 외의 생산감퇴곡선인자는 로그정규분포 형태와 유사한 것을 알 수 있었다.



(a) initial production rate

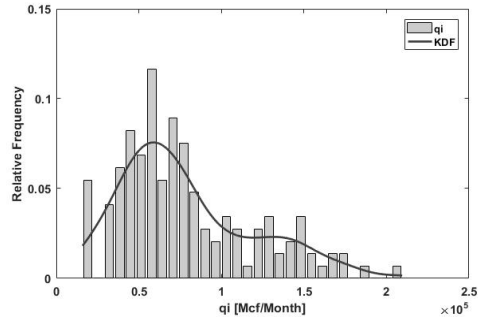


(b) initial decline rate

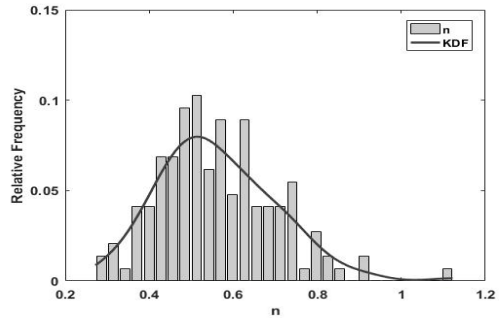


(c) decline exponent

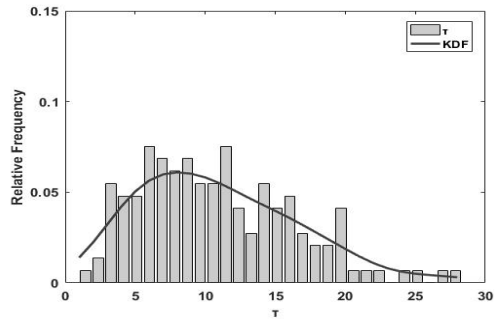
Fig. 4. Probability distribution of Hyperbolic variables.



(a) initial production rate



(b) exponent



(c) time exponent

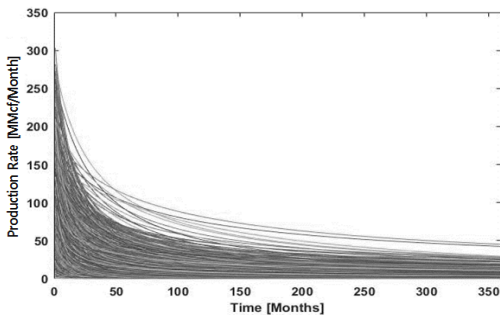
Fig. 5. Probability distribution of Modified SEPD variables.

4.3. 생산감퇴곡선 도출 결과

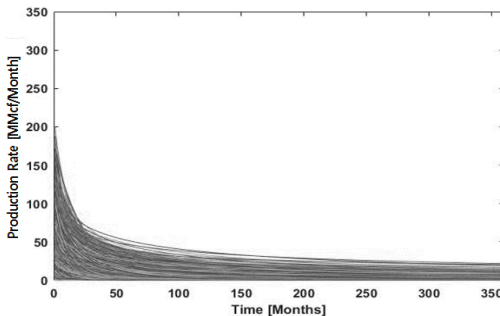
핵밀도 함수를 활용하여 선정된 생산감퇴곡선인의 확률분포에 대한 누적확률분포를 통해 확률론적 결과를 도출하기에 충분히 큰 5,000회를 시행하여 난수를 발생시켰으며[17], 도출한 인자 값을 각 기법별 식에 대입하여 생산거동을 추정하였다. 이때, 경제적인 이유로 제한조건을 설정하는데 생산 포기 유량(abandonment production rate)이나 생산 기간을 기준으로 삼으며, 이 연구에서는 일반적으로 생산정의 수명인 30년을 기준으로 기간을 설정하여 궁극가채량을 추정하였다[18]. 또한 Fig 6을 통해 Modified SEPD의 생산거동이 초기 생산에서의 급격한 감퇴와 천이유동 구간에 대해 반응이 되며, 발생시킨 난수로 부터의 결과 값이 쌍곡선함수에 비해 비교적 일정한 경향을 보이는 것을 파악할 수 있었다.

4.4. 확률에 따른 궁극가채량 예측 결과

몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 도출된 5,000개의 생산감퇴곡선을 통해 Fig. 7에 생산감퇴곡선



(a) Hyperbolic



(b) Modified SEPD

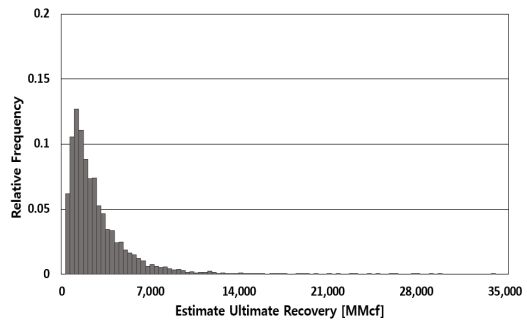
Fig. 6. Results of Decline curve.

분석기법별 히스토그램을 나타내었으며, 쌍곡선함수의 궁극가채량 추정 결과가 Modified SEPD에 비해 큰 값을 가지는 경우가 많은 것을 파악할 수 있다.

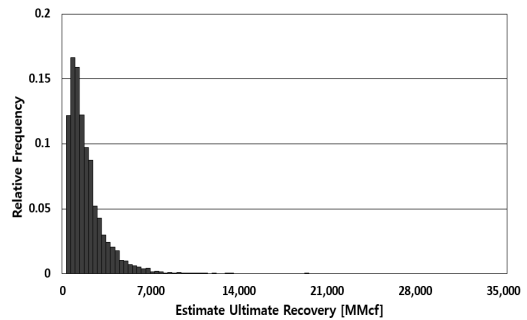
이에 대한 통계적인 분석을 위하여 자료의 산포 정도를 나타내는 표준편차(standard deviation)와 자료가 평균을 중심으로 한 방향으로 치우친 정도를 나타내는 척도인 왜도(skewness)를 통해 히스토그램의 분포 형태를 Table 2와 같이 정량적으로 파악하였다. 여기서 왜도 값은 분포의 모양이 좌측으로 긴 꼬리를 가질 때 음수(-) 값을 가지며, 우측으로 긴 꼬리가 이어질 경우 양수(+)의 값을 나타내게 된다. 그 결과 쌍곡선함수로 예측한

Table 2. Statistical results for Histogram of EUR

	Standard deviation (MMcf)	Skewness
Hyperbolic	2742.32	3.5421
Modified SEPD	1474.88	2.3120



(a) Hyperbolic



(b) Modified SEPD

Fig. 7. Histogram of EUR.

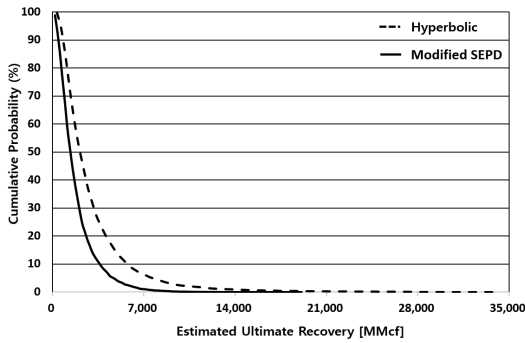


Fig. 8. Cumulative probability distribution of EUR.

Table 3. Results of probabilistic EUR

	P90 (MMcf)	P50 (MMcf)	P10 (MMcf)
Hyperbolic	681.70	2031.90	5744.93
Modified SEPD	381.84	1336.43	3627.46

궁극가채량 히스토그램의 표준편차가 Modified SEPD 보다 크게 도출되어 산포가 큰 형태의 확률분포로 나타났으며, 선정한 생산감퇴곡선인자의 확률분포 형태의 영향으로 두 기법 모두 왜도가 양수 값을 보여 우측으로 긴 꼬리를 가지는 형태로 나타남을 정량적으로 파악할 수 있었다.

궁극가채량의 누적확률분포는 Fig. 8과 같으며, 연구대상 지역에 대한 P10, P50, P90 값을 Table 3에 나타내었다. 그 결과 쌍곡선함수의 궁극가채량 값이 Modified SEPD 보다 모두 큰 것을 알 수 있으며, 이를 통해 쌍곡선함수 적용 시에 감퇴지수의 값이 1을 초과하는 경우 생산거동이 발산하는 형태를 보여 궁극가채량 예측값에 영향을 받았음을 파악할 수 있다. 또한, 이는 생산감퇴곡선분석기법별 특성에 따른 초기 생산량 값의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

V. 결론

생산량의 변동성이 큰 특징을 가지는 세일가스의 경우 단일값을 예측하는 결정론적 방법만으로는 불확실성을 고려하기에 어려움이 따른다. 이 연구에서는 현장 생산량 자료를 분석하여 보편적으로 사용되고 있는 Arps의 쌍곡선함수와 치밀/세일층

의 특성을 고려하여 생산량 예측이 가능한 Modified SEPD에 대한 생산감퇴곡선인자를 추정하고, 다수의 생산정 자료를 바탕으로 핵밀도 함수를 활용해 적정 분포형을 도출하였다. 이를 통해 확률론적 기법 중 하나인 몬테카를로 시뮬레이션에 적용함으로써 궁극가채량을 예측하였으며, 그로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 확률분포형태에 대한 가정 없이 다수의 생산정 자료를 통해 생산감퇴곡선인자의 분포를 도출하였으며, 이를 통해 미국 Eagle Ford 지역의 생산량 자료의 특성을 반영한 분석을 수행할 수 있었다.

(2) 장기간 생산이 진행될수록 쌍곡선함수의 경우 감퇴지수 값이 1을 초과하는 일부 결과로 인해 발산하는 양상을 보였다.

(3) 궁극가채량의 히스토그램에 대한 통계적 분석 결과를 통해 쌍곡선함수의 표준편차 및 왜도 값이 Modified SEPD 보다 크게 도출되었으며, 두 기법 모두 양수의 값을 가지는 왜도를 통해 우측으로 긴 꼬리를 가지는 형태로 나타남을 정량적으로 파악할 수 있었다.

(4) 생산거동의 차이로 인하여 누적확률분포에서와 같이 쌍곡선함수의 궁극가채량 값의 범위가 일부값으로 인해 크게 나타났으며, Modified SEPD의 궁극가채량이 쌍곡선함수 보다 비교적 작은 P90, P50, P10의 확률론적 예측값을 나타내었다.

이 연구에서 적용한 과정을 통해 생산량 자료 분석으로부터 도출된 생산감퇴곡선인자의 확률분포 형태에 대한 가정 없이 자료의 특성을 반영하여 도출할 수 있을 것이며, 다양한 생산감퇴곡선분석기법에 활용할 수 있을 것이다. 또한, 확률론적 기법을 적용함으로써 세일가스 저류층의 궁극가채량 예측 시 보다 신뢰성 있는 분석이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 자원개발특성화대학 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

사용기호

- b : decline exponent
- D : decline rate [%]
- D_i : decline rate at flow rate q_i [%]

h : bandwidth
 K : kernel function
 n : exponent
 m : sample size
 q_i : initial production rate
 q_t : production rate at time t
 t : time
 x : random variable
 x_1, x_2, \dots, x_n : measured data
 y_0 : intercept

그리스 문자

τ : time exponent

REFERENCES

- [1] Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE), *Guidelines for the practical evaluation of undeveloped reserves in resource plays*, Society of Petroleum Evaluation Engineers, Houston, TX, (2010)
- [2] Lee, Y. S., Choi, J. H., Choi, H. W., Bae, J. Y., Jang, I. S., Kim, J. Y., and Sung, W. M., "Development and Application of the Visual Statistical-Two Phase Flow Decline Curve Analysis model," *J. of Korean Society for Geosystem Engineering*, 45(6), 610-619, (2008)
- [3] Ye, P., and Ayala L., "Straight-Line Analysis of Flow Rate vs. Cumulative Production Data for the Explicit Determination of Gas Reserves," *J. Canadian Petroleum Technology*, 52(4), 296-305, (2013)
- [4] Valko, P., and Lee, W. J., "A Better Way to Forecast Production From Unconventional Gas Wells," paper 134231 presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Florence, Italy, September 19-22, (2010)
- [5] Joshi, K., and Lee, J., "Comparison of Various Deterministic Forecasting Techniques in Shale Gas Reservoirs," paper 163870 presented at the *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, Texas, USA, February 4-6, (2013)
- [6] Shin, H. J., Lim, J. S., and Shin, S. H., "Estimated ultimate recovery prediction using oil and gas production decline curve analysis and cash flow analysis for resource play," *Geosystem Engineering*, 17(1), 78-87, (2014)
- [7] Song, J. H., "Production performance prediction of a commingled well from a multi-layered tight gas reservoir using a new decline curve analysis," Master Thesis, Seoul National University, Korea, (2012)
- [8] Kang, J. M., *Introduction to petroleum engineering*, Seoul National University, Korea, (2009)
- [9] Arps, J. J., "Analysis of Decline Curves," *Transactions of the AIME*, 160(1), 228-247, (1945)
- [10] Arps, J. J., "Estimation of Primary Oil Reserves," *J. of Petroleum Technology*, 207, 182-191, (1956)
- [11] Valko, P., and Lee, W. J., "A better way to forecast production from unconventional gas wells," paper 134231 presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Florence, Italy, September 19-22, (2010)
- [12] Yu, S., and Miocevic, J., "An Improved Method to Obtain Reliable Production and EUR Prediction for Wells with Short Production History in Tight/Shale Reservoirs," paper 168684 presented at the *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, USA, August 12-14, (2013)
- [13] Fanchi, R., "Forecasting Shale Gas Recovery using Monte Carlo Analysis of Decline Curves," *PennEnergy*, <http://www.pennenergy.com/articles/pennenergy/2012/12/forecasting-shale-gas-recovery-using-monte-carlo-analysis-part-2.html>, (2012)
- [14] Budzaya, U., "A Study on Estimation of CBM Resources Using Probabilistic Approach from Coal Basin Information," Master Thesis, Chonnam National University, Korea, (2013)
- [15] Kim, J. S., Shin, H. J., and Lim, J. S., "Probabilistic Decline Curve Analysis for Forecasting Estimated Ultimate Recovery in Shale Gas Play," *J. of Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 51(6), 808-819, (2014)
- [16] Moon, Y. I., "Analysis of probability distribution for water level of dam," *Korea Water Resources Association*, 1-22, (2004)
- [17] Han, H. G., and Moon, S. J., "Estimation of the Project Cost for a Coal-fired Power Plant

- using Stochastic Simulation," *J. of The Plant*, 8(4), 45-54, (2012)
- [18] Clark, C. E., Burnham, J. H., and Wang, D. M., *Life-Cycle Analysis of Shale Gas and Natural Gas*, Argonne National Laboratory, ANL/ESN/11-1, (2011)