



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

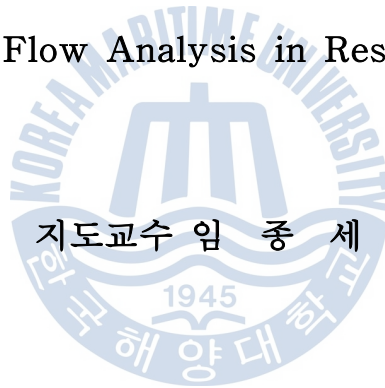
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

신개발기법자산에서의 석유생산감퇴곡선분석을 이용한  
궁극가채량 추정 및 현금흐름분석

Estimated Ultimate Recovery Prediction  
Using the Oil and Gas Production Decline Curve Analysis,  
and Cash Flow Analysis in Resource Play



지도교수 임종세

2013년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

신효진



공학석사 학위논문

신개발기법자산에서의 석유생산감퇴곡선분석을 이용한  
궁극가채량 추정 및 현금흐름분석

Estimated Ultimate Recovery Prediction  
Using the Oil and Gas Production Decline Curve Analysis,  
and Cash Flow Analysis in Resource Play



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

해양에너지자원공학과

신효진

본 논문을 신호진의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 신 성 렬 (인)

위 원 임 종 세 (인)

위 원 정 우 근 (인)

2012년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	v
Abstract .....	vi
1. 서 론 .....	1
2. 신개발기법자산에서의 생산감퇴곡선분석기법 적용 .....	4
2.1 신개발기법자산 .....	4
2.2 생산감퇴곡선분석기법 .....	6
2.2.1 일반적인 생산감퇴곡선분석(Conventional Decline Curve Analysis) .....	7
2.2.2 표준곡선(Type curve) 도출 .....	9
2.2.3 수정된 쌍곡선법(Modified Hyperbolic Decline) .....	10
2.2.4 Decline Envelope .....	12
2.2.5 Block Bootstrap Resampling .....	14
2.3 생산감퇴곡선분석 적용 과정 .....	17
2.4 현금흐름분석 및 민감도 분석 .....	19
3. 석유생산 현장자료 적용 및 평가 .....	21
3.1 연구지역 개요 .....	21
3.1.1 미국 Wolfberry play .....	21
3.1.2 미국 Mississippian lime play .....	23

3.2 생산감퇴곡선분석 적용 결과 .....	24
3.2.1 미국 Wolfberry play .....	24
3.2.2 미국 Mississippian lime play .....	34
3.3 현금흐름분석 및 민감도 분석 결과 .....	43
3.3.1 미국 Wolfberry play .....	43
3.3.2 미국 Mississippian lime play .....	46
4. 결 론 .....	49
감사의 글 .....	51
참고문헌 .....	53



## List of Tables

<b>Table 1</b> Criteria of Resource play .....	5
<b>Table 2</b> Production decline curve analysis using Arps equation .....	8
<b>Table 3</b> Production decline curve analysis using Modified Hyperbolic Decline .....	10
<b>Table 4</b> U.S. Regional Decline Exponent .....	18
<b>Table 5</b> Results of Modified Hyperbolic Decline method for oil production .....	25
<b>Table 6</b> Results of Modified Hyperbolic Decline method for gas production .....	25
<b>Table 7</b> Results of Decline Envelope method for oil production .....	26
<b>Table 8</b> Results of Decline Envelope method for gas production .....	26
<b>Table 9</b> Results of Block Bootstrap Resampling method for oil production .....	27
<b>Table 10</b> Results of Block Bootstrap Resampling method for gas production .....	27
<b>Table 11</b> Results of Type curve in Wolfberry play .....	29
<b>Table 12</b> Results of Modified Hyperbolic Decline method for oil and gas Production .....	34
<b>Table 13</b> Results of Decline Envelope method for oil production .....	35
<b>Table 14</b> Results of Decline Envelope method for gas production .....	35
<b>Table 15</b> Results of Block Bootstrap Resampling method for oil production .....	36
<b>Table 16</b> Results of Block Bootstrap Resampling method for gas production .....	36



<b>Table 17</b> Results of Type curve in Mississippian lime play .....	38
<b>Table 18</b> Base case for sensitivity analysis in Wolfberry play .....	44
<b>Table 19</b> Cash flow analysis results in Wolfberry play .....	44
<b>Table 20</b> Base case for sensitivity analysis in Mississippian lime play .....	47
<b>Table 21</b> Cash flow analysis results in Mississippian lime play .....	47



# List of Figures

<b>Fig. 1</b> Worldwide locations of Resource play .....	5
<b>Fig. 2</b> Comparison of exponential, hyperbolic, and harmonic declines .....	8
<b>Fig. 3</b> Comparison of production rate for Modified Hyperbolic Decline and Arps Equation .....	11
<b>Fig. 4</b> Flow chart of Decline Envelope .....	13
<b>Fig. 5</b> Applying non-linear regression analysis .....	16
<b>Fig. 6</b> Autocorrelation result of residual data .....	16
<b>Fig. 7</b> Work flow for Type curve extrapolation and EUR estimation .....	18
<b>Fig. 8</b> Map of the midland basin in West Texas showing Wolfberry productive areas .....	22
<b>Fig. 9</b> Stratigraphic classification of Wolfberry play .....	22
<b>Fig. 10</b> Locator map of Mississippian lime play .....	23
<b>Fig. 11</b> Type curve of oil in Wolfberry play .....	30
<b>Fig. 12</b> Type curve of gas in Wolfberry play .....	31
<b>Fig. 13</b> Type curve for each method in Wolfberry play .....	32
<b>Fig. 14</b> Type curve for decline exponent in Wolfberry play .....	33
<b>Fig. 15</b> Type curve of oil in Mississippian lime play .....	39
<b>Fig. 16</b> Type curve of gas in Mississippian lime play .....	40
<b>Fig. 17</b> Type curve for each method in Mississippian lime play .....	41
<b>Fig. 18</b> Type curve for decline exponent in Mississippian lime play .....	42
<b>Fig. 19</b> Annual cash flow of base case in Wolfberry play .....	45
<b>Fig. 20</b> Sensitivity analysis of key parameters .....	45
<b>Fig. 21</b> Annual cash flow of base case in Mississippian lime play .....	48
<b>Fig. 22</b> Sensitivity analysis of key parameters .....	48

# Estimated Ultimate Recovery Prediction

## Using the Oil and Gas Production Decline Curve Analysis, and Cash Flow Analysis in Resource Play

Hyo Jin Shin

Department of Ocean Energy & Resources Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

### Abstract

Resource play has gained great attention as a result of higher oil prices and improved new technologies such as horizontal drilling and hydraulic fracturing. It is known to exist over a large areal expanse of hydrocarbon accumulation and believed to have a lower geological and commercial development risk. To develop it, production decline curve analysis is used in the field where information lacks or immediate analysis is required.

Production decline curve analysis uses only production rate data to examine the status of production decline and forecast productivity. Arps proposed an experiential equation on the basis of the hundreds of production rate data analysis regarding the oil field. Existing production decline curve analysis is useful for the initial production, which is a deterministic technique to derive one result. However, production for a

long term is change the production condition of well due to change natural or physical factors. As the production rate fluctuation leads to increase of uncertainty. For this reason the probabilistic technique is introduced to advance reliability. This method is applying reliability in order to obtain maximum and minimum values according to the statistics and to forecast production decline history and productivity.

This study used various production decline curve analysis on the characteristics of the production decline history of Resource play to estimate production behavior and assume Estimated Ultimate Recovery (EUR). In addition, cash flow analysis for the purchase and management of the wells has been carried out and sensitivity analysis has been conducted to know the impact of the variables in cash flow analysis result. Through these results will be able to apply the production rate data of various fields and bring reliable results.

**KEY WORDS:** Resource play 신개발기법자산; Production decline curve analysis 생산감퇴곡선분석; Estimated Ultimate Recovery(EUR) 궁극가채량; Type curve 표준곡선; Cash flow analysis 현금흐름분석.

## 제 1 장 서 론

중국, 인도 등과 같은 신흥개발도상국의 성장과 더불어 석유자원에 대한 수요증가로 인해 국제 원유가는 상승하였으며, 고유가가 지속되고 있다(김진수 등, 2006). 이로 인해 해외 광구 참여를 통한 자주개발률을 제고하고자 하는 노력이 다각적으로 이루어지고 있으며, 탐사 단계 및 개발 초기 대상 유전에 대한 분석 기술 및 생산이 진행되고 있는 유전에 대한 관리기술이 절실히 요구되고 있다(한국지질자원연구원, 2006). 또한, 석유개발영역이 과거 육상 및 천해인 대륙붕 지역과 같이 특수한 기술이 필요하지 않은 지역에서 최근에는 심해 또는 극지방과 같이 개발비용이 높고 특수한 기술이 필요한 지역으로 이동함에 따라 '일반개발기법자산'(conventional play)의 개발비용이 증가하는 추세이다. 최근에는 수평정 시추(horizontal drilling), 수압파쇄(hydraulic fracturing) 등과 같이 생산성을 증대시키는 기술의 향상으로 보다 경제적으로 개발이 가능한 '신개발기법자산'(resource play 또는 unconventional play)에 대한 관심이 증가하고 있다(신승헌 등, 2012).

이러한 신개발기법자산 개발을 위해 해당 지역에 대한 평가를 우선적으로 수행하여야 하며, 이를 위해 분석 지역의 생산량, 압력, 지층의 물성 등의 특성을 나타내는 자료를 이용하여 매장량과 생산성을 정확히 예측하는 것은 운영권자의 자산 가치를 평가하는데 있어서 필수적인 작업이다. 이 작업은 주로 저류층 시뮬레이션에 의해 수행되나, 대상 저류층 혹은 유정에 대한 상세 정보가 부족하거나 신속한 분석이 필요한 현장에서는 주로 생산감퇴곡선분석기법(production decline curve analysis)을 통하여 작업이 이루어진다(이영수 등, 2008; 최진희, 2008).

생산감퇴곡선분석기법은 생산량 자료만을 이용하여 생산 감퇴 이력의 양상을 파악하고 생산성을 예측하는 방법으로 Arps(1944)가 수백 개의 생산유전 자료

에 대한 분석 결과를 바탕으로 경험식을 제안하였다. 기존의 일반 생산감퇴곡선분석기법은 하나의 결과 값을 도출하는 결정론적(deterministic) 기법으로서 생산초기의 생산량 변화가 크지 않을 때에는 적절한 분석결과를 도출할 수 있으나 장기간 생산함에 따라 자연적 혹은 수압파쇄 등과 같은 물리적인 요소로 인해 유정의 생산조건이 변하게 될 경우 생산량의 변동폭이 커져 불확실성이 증가하게 되므로 이를 최소화하고 신뢰도를 높여주기 위해 확률론적(probabilistic) 기법을 도입하였다(McNulty & Knapp, 1981; Jochen & Spivey, 1996; Fanchi, 2012). 이는 기존의 결정론적 생산감퇴곡선분석기법에 신뢰도 개념을 적용하여 예측 시 통계량에 따른 최대, 최소값을 도출함으로써 그 범위 내에서 생산 감퇴 이력 양상 및 생산성을 예측하는 방법이다.

생산감퇴곡선분석기법을 통해 예측한 생산 유·가스전에 대한 생산 감퇴 이력 및 생산성은 사업을 진행함에 있어 경제성에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용하게 된다. 사업은 기 생산중인 유정을 통한 현금흐름과 부존이 확인되었으나 추가시추를 요하는 확인미개발(Proved Undeveloped; PUD)매장량 지역의 추가개발을 통해 상승된 자산의 가치에 따라 투자수익을 기대할 수 있다(성원모 등, 2009). 생산자산 거래 시에는 다양한 자산 가치 평가(valuation) 방법을 통해 시장가(fair market value)를 계산하며(Hagg, 2005), 석유사업의 투자결정을 위한 경제성 평가법으로 석유개발의 계약내용에 따라 구성한 현금흐름분석(cash flow analysis)을 사용한다(박창협 등, 2009). 과거 유·가스전 거래사례로부터 통계적으로 얻어진 단위 매장량, 일 생산량, 에이커(acre) 등의 거래 단가 등을 비교 분석하는 방법이 병행된 미국의 경우 이러한 거래 단가는 마치 부동산 시세처럼 여러 기관에 의해 수집되어 발표되며(Knull, et al., 2007), 지역별로 생산자산의 특성이 존재하기 때문에 육·해상 및 그 지역에 따라 그 시세가 모두 다르다(신승헌 등, 2012).

이 연구에서는 최근 들어 각광받고 있는 신개발기법자산에서의 생산량 자료를 이용하여 비선형회귀분석을 적용해 Arps의 경험식을 기반으로 변형한 수정된 쌍곡선법(Modified Hyperbolic Decline), 여러 유정의 자료를 통합하여 지역적인 특징을 알 수 있는 확률론적 개념에 의거한 Decline Envelope 기법 그리고 생산량 자료가 많지 않을 때 가상의 자료를 생성하여 변수에 대한 확률을

구하여 적용하는 Block Bootstrap Resampling 기법을 이용하여 생산 감퇴 이력을 확인하고 궁극가채량(Estimated Ultimate Recovery; EUR)을 추정하였으며, 추정 결과의 누적확률분포를 통해 분석 지역을 대표할 수 있는 생산감퇴곡선인 표준곡선(type curve)을 확률에 따라 P10, P50, P90 세 가지 형태로 도출하였다. 또한, 현금흐름분석을 통해 내부수익률(Internal Rate of Return; IRR), 순현재가치(Net Present Value; NPV)를 구하여 최종적으로 도출한 표준곡선에 대한 경제성 유무를 판단하고, 유·가스전 생산 시 영향을 미치는 경제적 요소를 파악하기 위하여 민감도 분석을 수행하였다.



## 제 2 장 신개발기법자산에서의 생산감퇴곡선분석기법 적용

### 2.1 신개발기법자산

생산자산은 육·해상 또는 개발 방식에 따라 '일반개발기법자산'과 '신개발기법 자산'으로 대별되고 후자는 최근 각광을 받고 있는 셰일가스(shale gas)가 있으며(고재홍, 2007; 백문석, 2011), Fig. 1과 같이 치밀가스(tight gas), 석탄층메탄 가스(coalbed methane, CBM), 오일샌드(oil sand) 등이 포함된다.

이러한 신개발기법자산은 고유가의 지속과 시추 및 완결기술개발로 인한 개발비용의 단가 감소로 인해 2000년대 들어 석유산업계에서 사용하게 되었으며, 경제성이 충분하다고 판단되어 이미 개발된 지역이나 잠재적으로 가능성이 있는 지역을 개발하는 것을 의미한다. 또한, 기존의 일반개발기법자산과 비교하여 유체 유동능력이 떨어지는 대량부존 석유기반 자원으로 유형에 따라 상업화 정도가 결정되며(SPE, 2007), 일반적으로 대규모 연속체로 부존이 확인되어 상대적으로 탐사 위험도는 작으나 회수 기술 및 생산성에 따라 경제성 확보 여부가 결정되고 향후 시장가격과 회수 기술 개발에 따라 상업적 가치가 변동될 수 있다.

신개발기법자산에 대한 궁극가채량을 매장량으로 평가하기 위해서는 파일럿 시험에 근거하여 상업성판단과 회수가능성이 입증되어야 하고 사업성속도에 따라 '생산중', '개발승인', '개발타당'의 경우 매장량으로 평가가 가능하다(성원모 등, 2009). 또한, 신개발기법자산의 부존양상, 인접 시추공 사이의 관계 등 일반 개발기법자산과는 달리 나타나는 여러 가지 특징에 대하여 Table 1에 정리하였다.



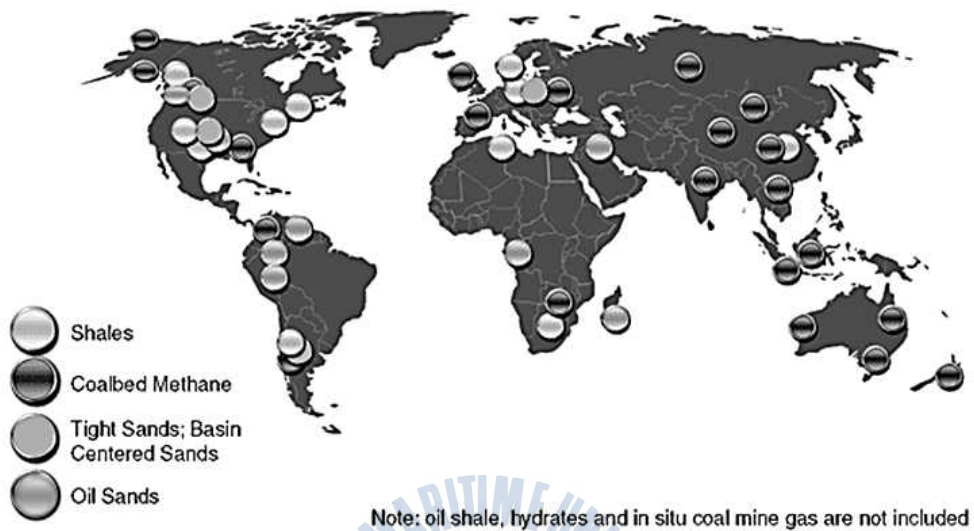


Fig. 1 Worldwide locations of Resource play(Fryklund, 2010)

Table 1 Criteria of Resource play(SPEE, 2010)

Tier 1 Criteria (Always observed)	Tier 2 Criteria (Often observed)
① Wells exhibit a repeatable statistical distribution of EURs	① Requires extensive stimulation to produce economically
② Offset well performance is not a reliable inductor of PUD performance	② Produces little in-situ water
③ Contains continuous hydrocarbon systems that are regional in extent	③ Does not exhibit on obvious seal or trap(geologically)
④ Hydrocarbon are not held in place by hydrodynamics	④ Low matrix permeability (<0.1mD)

## 2.2 생산감퇴곡선분석기법

석유 및 천연가스 저류층에 대한 향후 생산 계획 수립 및 경제 가치를 판단 하는데 있어 가장 중요한 인자 중 하나는 잔존하는 석유자원의 양과 생산 수명이며, 이를 결정하기 위해 가장 많이 사용되는 방법이 생산감퇴곡선분석기법이다. 생산감퇴곡선분석기법은 과거 생산 자료를 이용하여 감퇴곡선을 분석한 후 미래 생산량을 예측하는 방법으로 현재 존재하는 각 생산정 자료만으로 간편하게 감퇴추이를 알아내어 미래의 생산량을 외삽(extrapolation)한다(송진호, 2012). 북미의 많은 유·가스전 및 광구는 운영의 단순화 또는 비용 절감의 이유로 압력 자료가 없거나 얻기 어려운 경우가 많아, 대부분 감퇴곡선 분석법에 의한 향후 생산량의 합으로 계산되는 궁극가채량을 토대로 유·가스전 및 광구의 가치를 평가하며(강주명, 2009), 현실적으로 유·가스전의 경제적 가치 관점에서 유전의 매입 및 운영을 위한 현금흐름분석을 위해서도 널리 사용되고 있는 방법이다.

생산감퇴곡선분석의 주요 변수인 생산량(production rate)은 점진적으로 변화하게 되는데 그 원인은 설비 효율의 감소, 표피인자(skin)와 같은 유정 주변의 물리적 변화로 인한 생산성 지수(productivity index)의 감소, 그리고 저류층 내부조건 변화에 의한 정저압(bottomhole pressure), GOR(gas oil ratio)의 변화 등이 있으므로 실제 생산 설비나 유정 주변의 물리적 변화가 심하지 않을 경우 생산량의 변화는 저류층의 상태를 나타내며, 이러한 양상의 외삽 값은 잔존하는 석유자원의 양과 생산 수명 예측에 효과적으로 이용할 수 있다(한국지질자원연구원, 2002).

## 2.2.1 일반적인 생산감퇴곡선분석(Conventional Decline Curve Analysis)

유·가스전의 생산량은 시간에 따라 자연적으로 감소하게 되며 경제적인 한계에 도달할 때 까지만 생산을 지속하게 되는데, 일반적인 생산감퇴곡선분석기법의 기본적인 아이디어는 시간에 따른 생산량의 감퇴율이 생산량  $q$ 의 함수로 표현할 수 있다는 가정에서 출발한다. 이 때, 생산 감퇴율을 특징짓는 감퇴지수(decline exponent) 'b'를 어떠한 숫자로 보느냐에 따라 지수함수법(exponential), 쌍곡선법(hyperbolic), 조화곡선법(harmonic) 세 가지 방법으로 구분할 수 있으며, Table 2에 나타내었다(Arps, 1944).

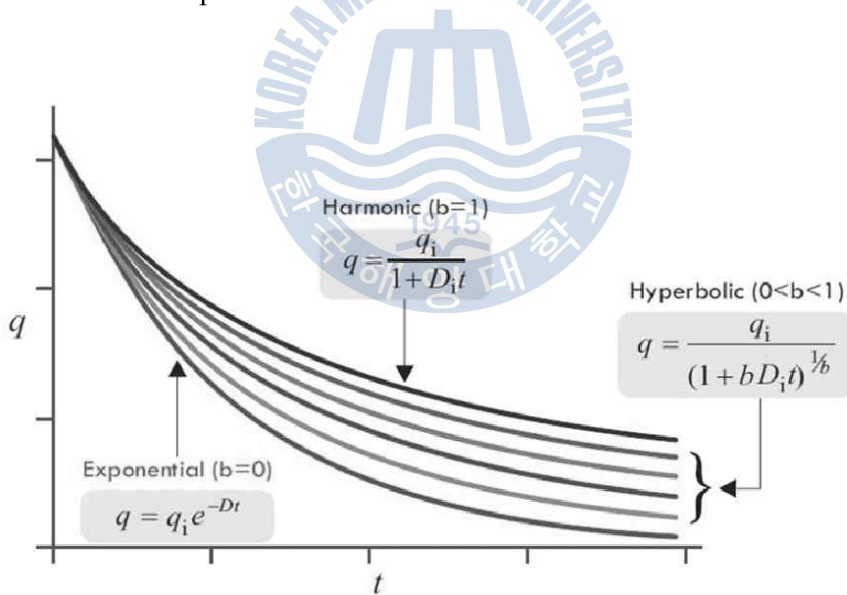
지수함수적으로 감퇴하는 특성은 통상 균열 저류층 혹은 매우 불균질한 저류층에서 나타나며, 이러한 저류층의 경우 궁극가채량을 과소 평가하는 오차 경향이 있으므로 체적법(volumetric)이나 유추법(analogy)을 이용하여 동시에 검토할 필요가 있다. 통상 이 방법은 생산 후반의 오차경향을 고려하여, 초기에 생산을 집중할 필요가 있는 저류층에 대해 현금흐름을 계획할 경우에 많이 활용된다. 쌍곡선 감퇴 특성은 중력배유(gravity drainage)에 의해 생산되는 저류층에서 특히 많이 발견되고 있으며, 대부분의 저류층은 감퇴지수가 0~0.7 범위를 갖는 쌍곡선법에 의해 묘사되는 것으로 알려져 있다(Arps, 1956). 조화곡선법은 감퇴지수가 1인 경우로 수공법(water flood)을 적용하는 저류층이나 저류층 주변의 대수층 배압 생산메커니즘(water drive)에서 이러한 감퇴경향이 발견되지만 일반적인 특성은 아니며(한국지질자원연구원, 2002), 감퇴지수에 의해 시간이 경과함에 따라 생산량이 변화하는 양상을 Fig. 2에 나타내었다.

이러한 Arps 경험식은 천이유동(transient flow)구간을 지나 저류층에서의 유체가 경계에 도달하여 유동하는 경계유동(Boundary Dominated Flow; BDF)일 때를 가정하고 있으므로 신개발기법자산에 적용할 경우 천이유동구간이 길고 저류층 경계에 도달하는 시점이 불확실하기 때문에 이와 같은 특징을 고려할 수 있는 연구 방법이 필요하다.

**Table 2** Production decline curve analysis using Arps Equation

Case	b	D	Rate relation	Cumulative relation
Exponential	b=0	Constant	$q_t = q_i \exp(-D_i t)$	$N_p = \frac{q_i - q_t}{D_i}$
Hyperbolic	0<b<1	Proportional q	$q_t = \frac{q_i}{(1 + bD_i t)^{1/b}}$	$N_p = [q_i / (1 - b)D_i] \times [1 - (q_i / q_t)^{1-b}]$
Harmonic	b=1	Inconstant	$q_t = \frac{q_i}{(1 + bD_i t)}$	$N_p = \frac{q_i}{D_i} \ln \left( \frac{q_i}{q_t} \right)$

t = time  
 $D_i$  = initial decline rate  
 $q_i$  = initial production rate  
 $N_p$  = cumulative production rate  
 b = decline exponent  
 D = decline rate  
 $q_t$  = production rate at time t



**Fig. 2** Comparison of exponential, hyperbolic, and harmonic declines(Fekete, 2010)

## 2.2.2 표준곡선(Type curve) 도출

해당 지역 또는 분석자료를 대표할 수 있는 생산감퇴곡선인 표준곡선을 도출하기 위해서 일반적으로 다음과 같은 과정을 거치게 된다.

- (1) 일 혹은 월 생산량 자료로 정리
- (2) 생산량( $q$ )와 시간( $t$ )에 대해 semi-log scale 그래프 도시
- (3)  $t=0$  에서의 초기 생산량( $q_i$ ) 설정
- (4) 생산 감퇴 경향을 따르는 임의의 2개의 점 선택
- (5) Arps의 경험식을 이용하여 두 개의 변수인 감퇴지수( $b$ )와 초기 감퇴율( $D_i$ )을 계산
- (6) 계산한 변수를 해당 식에 대입하여 생산거동 예측 및 EUR 추정

여기서 Arps의 경험식에 대한 설명은 앞 절에 나와 있으며, 임의의 2개의 점을 선택하는 주관적인 방법 대신 보다 정량적인 분석을 위해 비선형회귀분석(non-linear regression analysis)을 이용하였다. 비선형회귀분석은 회귀분석 중 어떤 변량  $X$ 로부터 다른 변량  $Y$ 를 추정하는 경우에 단순히 양자의 상관의 강약뿐만 아니라  $X$ 에 대한  $Y$ 의 평균적인 경향이나 불균형의 정도가 2차 곡선 등 고차의 곡선으로 특정 짓는 관계에 있는 변량군을 분석하기 위한 방법으로 이를 통해 초기 감퇴율을 구하였으며, 초기 생산량의 경우 생산량 자료의 시간  $t$ 가 0일 때의 값을 이용하였다.

### 2.2.3 수정된 쌍곡선법(Modified Hyperbolic Decline)

최근 들어 주목 받고 있는 신개발기법자산의 경우에는 수압파쇄와 같은 유정 완결기술을 적용하여 초기에 생산량이 증가하였다 급격히 감소하므로 초기 감퇴율이 크고 저류층 경계까지 도달하는데 오랜 시간이 걸려 천이유동구간이 길어져 감퇴지수 값이 1을 초과하는 특징을 나타내며, 이와 같은 경우 시간에 따라 생산량이 발산하는 경향을 보이므로 이에 대한 보정이 필요하다.

감퇴지수 값이 1을 넘지 않는다는 가정을 전제로 하는 Arps의 경험식을 신개발기법자산에 적용하게 되면 궁극가채량을 과대 산정하거나 실제 유량의 거동을 반영하지 못하는 한계가 있으므로 천이유동과 초기의 높은 감퇴율을 나타내는 유동 특징을 반영한 분석방법인 수정된 쌍곡선법(Robertson, 1988)을 사용하였다(Table 3). 이는 Seshadri and Matter (2010)에 의하여 감퇴지수가 1보다 클 경우에 천이유동구간에 적용 가능함을 보여주었으며, 특정 감퇴율 이전에서는 쌍곡선 형태로 감소하다가 이후에는 지수함수 형태로 생산 이력이 감퇴하도록 하여 생산 거동을 예측하는 방법으로 Fig. 3과 같이 기존의 Arps의 경험식과 비교하였을 때 생산량을 예측함에 있어 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

**Table 3** Production decline curve analysis using Modified Hyperbolic Decline

	D	Rate relation	Cumulative relation
Hyperbolic	$D > D_{\text{limit}}$	$q_t = \frac{q_i}{(1 + bD_i t)^{1/b}}$	$N_p = [q_i / (1 - b) D_i] \times [1 - (q_i / q_t)^{1-b}]$
Exponential	$D \leq D_{\text{limit}}$	$q_t = q_i \exp(-D_{\text{limit}} t)$	$N_p = \frac{q_t - q_i}{D_i}$

t = time

$D_i$  = initial decline rate

$D_{\text{limit}}$  = minimum decline rate

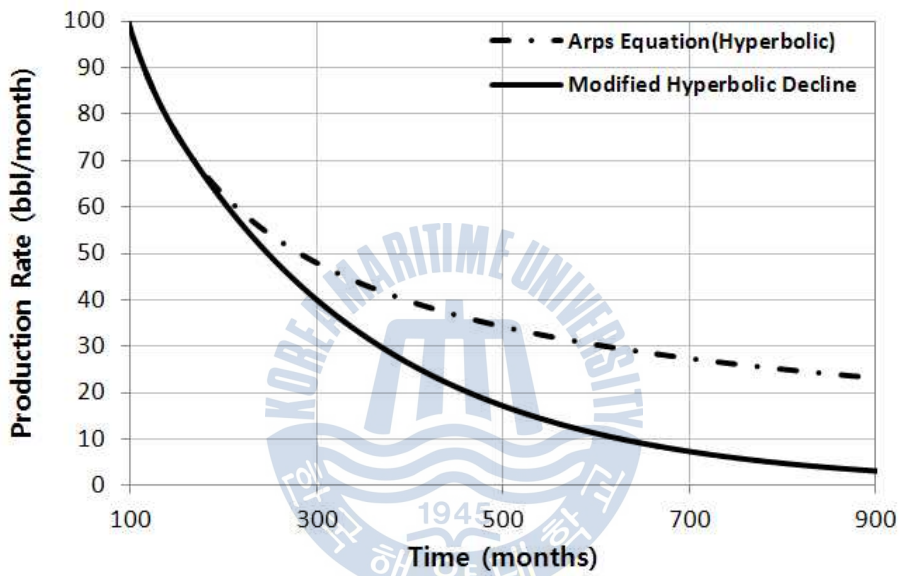
$q_t$  = production rate at time t

b = decline exponent

D = decline rate

$q_i$  = initial production rate

$N_p$  = cumulative production rate



**Fig. 3** Comparison of production rate for Modified Hyperbolic Decline and Arps equation(hyperbolic)

## 2.2.4 D-ecline Envelope

Decline Envelope은 여러 유정의 생산량 자료가 있을 때 decline band를 정의하기 위한 방법이다. 이는 저류층에 관한 자료나 지질학적인 정보를 필요로 하는 수치적 모델이나 복잡한 분석 없이 과거 생산 자료를 통해 확률론적 개념을 적용하여 생산을 예측하는 단순화된 방법으로 유동 구간(flow regime)과 감퇴경향(decline trend)을 선택할 필요가 없다(Brito & Belisario, 2012). 본 연구에서 생산량 자료에 대한 Decline Envelope을 도출하기 위하여 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- (1) 생산량 자료에 대한 전처리 과정(preprocessing)으로 필요한 자료를 선별하고, 일 혹은 월 단위로 자료 통합
- (2) 생산 시작일이 다른 자료에 대하여 동기화(synchronizing)함
- (3) 시간에 따른 생산량 자료를 초기 생산량으로 나누어 줌으로써 각 유정의 생산량 자료를 정규화(normalization)함
- (4) 정규화한 생산 이력 자료에서 최대, 평균, 최소값을 구하고, 각각에 대하여 비선형 회귀분석을 수행하여 envelope을 구함
- (5) 유정별 초기 생산량 자료에 대한 누적확률분포(cumulative probability distribution)를 구함
- (6) (4)와 (5)에서 구한 결과를 통하여 P10, P50, P90의 확률론적 개념을 적용한 감퇴곡선 도출

Fig. 4에 Decline Envelope의 적용 방법의 순서를 나타내었으며, 이 기법은 분석하고자 하는 지역에서 다수의 유정이 있을 경우 통합하기 편리하여 분석 지역의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다.



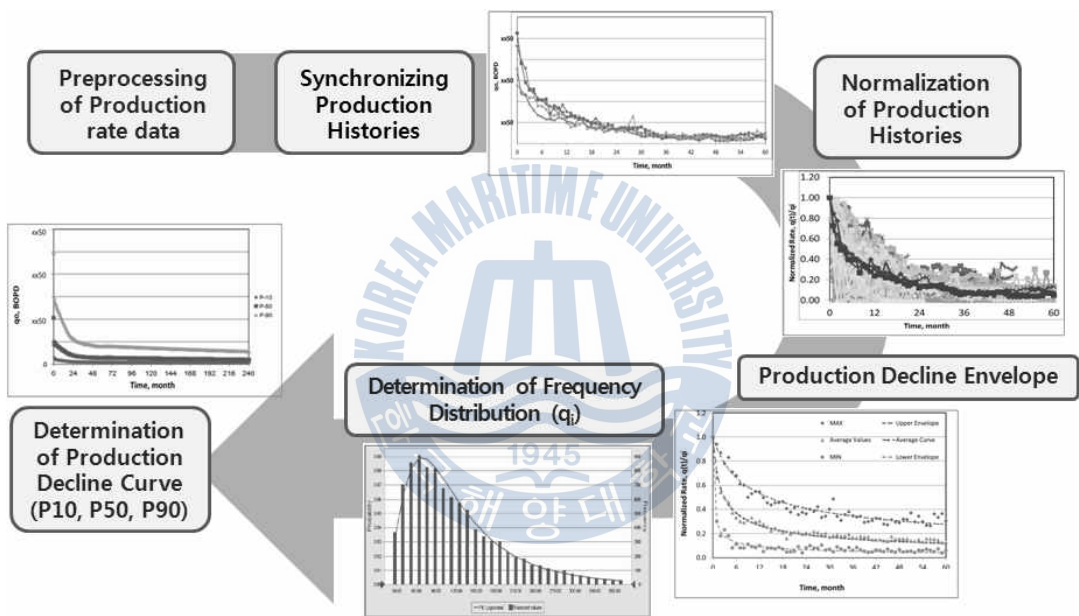


Fig. 4 Flow chart of Decline Envelope

## 2.2.5 Block Bootstrap Resampling

Jochen and Spivey(1996)는 분석지역의 궁극가채량 추정을 위한 생산감퇴곡 선분석기법 적용 시에 처음으로 일반적인 부트스트랩(bootstrap) 방법을 사용하였으며, 이를 통해 각 유정 하나에 대한 생산량 자료를 재추출하여 여러 개의 가상자료를 생성함으로써 확률론적인 분석을 가능하게 하였다. 이와 같이 부트스트랩 방법은 독립성이 보장되는 자료를 재추출하여 원하는 통계량의 추정에 이용하는 기법이지만, 시플레이션의 출력이나 시계열등의 자료 간에 종속관계가 존재하는 경우에는 부트스트랩을 적용시키기에 부적절한 점이 있다. 따라서 자료간의 종속관계가 존재하는 경우에도 부트스트랩을 적용하는 연구가 지속되어, 여러 가지 형태로 발전되어 왔다. 일정 수만큼의 블록(block)을 정의하여 재추출하는 블록 부트스트랩(block bootstrap), 재생성점(regeneration point)을 기준으로 재추출하는 정상 부트스트랩(stationary bootstrap), 그리고 임계값을 기준으로 주기를 형성하여 재추출하는 임계값 부트스트랩(threshold bootstrap)이 있다(박진수와 김윤배, 2010).

본 연구에서 사용하는 자료는 유·가스전의 생산량 자료로써 연속적인 자료이므로 단순 부트스트랩 기법을 사용하여 변동성을 평가하기엔 부적절하다는 판단아래 블록 부트스트랩 기법을 적용하였으며, 적용 과정은 다음과 같다 (Cheng, et al., 2010).

- (1) Fig. 5와 같이 회귀분석 자료(regression data)를 얻기 위하여 기존 자료(original data)에 대하여 비선형회귀분석을 수행
- (2) 기존 자료에서 회귀분석 자료의 차이인 잔차 자료(residual data)를 구함
- (3) 잔차 자료에 대하여 식(1)과 같은 자기상관 함수(autocorrelation function)를 통해 잔차 자료에 대한 값을 구함

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $k$  = the time lag, or number of time units(between data points)

$N$  = the sample size

$i$  = the time index

$X_i$  = the residual data at time index  $i$

$\bar{X}$  = average of  $X$

- (4) (3)과정에서 구한 R값과 시간에 대하여 Fig. 6과 같이 그래프를 도시하여 블록의 크기(block size)를 결정
- (5) 블록의 크기 별로 해당하는 생산 자료를 대상으로 무작위 표본추출(random sampling) 실시
- (6) 각각 생성된 가상자료(resampling data)에 대하여 비선형회귀분석을 적용하여 초기 감퇴율을 구함
- (7) 초기 생산량과 초기 감퇴율에 대한 누적확률분포를 구하여 P10, P50, P90의 감퇴곡선 도출

또한, 이 기법은 생산량 자료의 수는 지역적으로 편차가 크며 제한적인 경우가 많기 때문에 가용할 수 있는 생산량 자료를 기반으로 재추출하여 생성된 가상의 유정자료를 통해 생산감퇴곡선을 도출할 수 있는 특징이 있다.

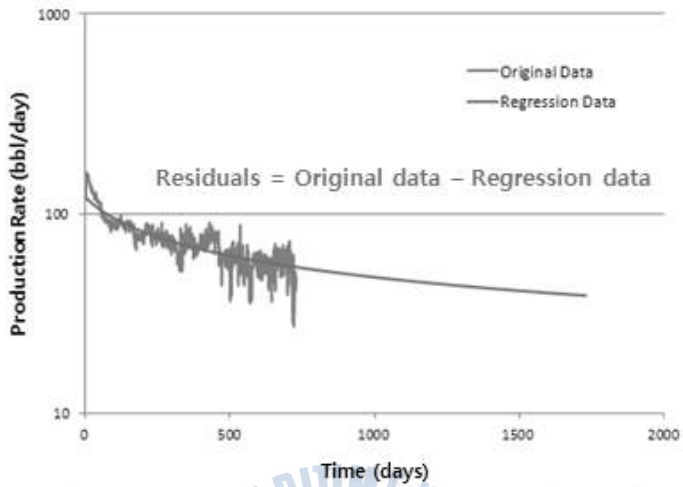


Fig. 5 Applying non-linear regression analysis

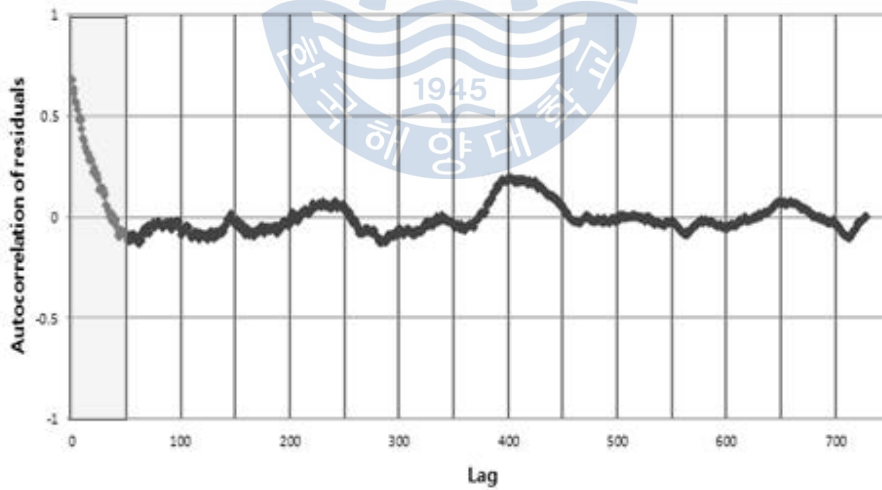
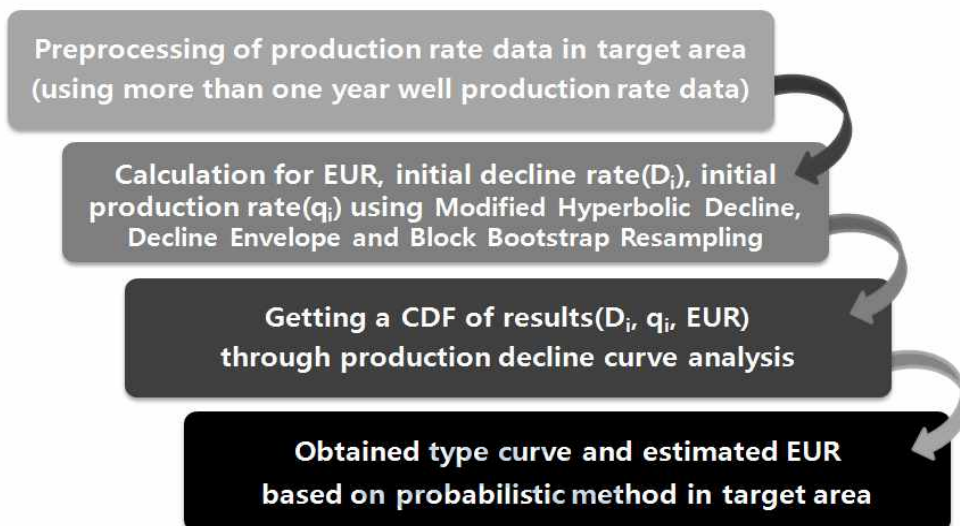


Fig. 6 Autocorrelation result of residual data

## 2.3 생산감퇴곡선분석 적용 과정

본 연구에서 적용한 생산감퇴곡선분석기법을 이용한 신개발기법자산에 대한 생산 거동 예측 과정은 Fig. 7과 같다. 이 때, 생산감퇴곡선분석기법을 통해 얻은 결과에 대하여 구한 누적확률에서 P10의 경우 확률론적 방법에서 나온 결과 값이 실제의 값이 될 확률이 적어도 10%, P50은 50%, P90은 90%가 된다는 의미이며, 일반적으로 P50 혹은  $P_{mean}$ 의 값을 이용한다.

신개발기법자산의 특징상 초기 감퇴율의 감소가 크고 Table 4와 같이 감퇴지수 값이 1을 초과하는 경향을 나타내며(Brown, et al., 1981; Kupchenko, et al., 2008; Baihly, et al., 2010), 연구 대상 지역인 Wolfberry play와 Mississippian lime play에서의 감퇴지수가 1.5 이상임을 고려하여(Albrecht & Associates, 2011; SEC, 2012) 앞서 언급한 생산감퇴곡선분석기법 적용 시 감퇴지수를 1.5, 2.0, 2.5의 경우로 나누어서 분석을 진행하였다. 이 때, 경제적인 이유로 제한조건을 설정하는데 일반적으로 생산포기 유량(abandonment production rate)이나 생산 기간(production period)을 기준으로 삼으며, 생산포기 유량 값에 따라 생산 기간은 크게 변화하지만 궁극가채량은 생산 기간에 비하여 변화폭이 아주 적다. 이러한 특징을 반영하여 이 연구에서는 궁극가채량이 최대가 되도록 최소한의 제한조건으로 생산포기 유량을 오일은 30bbl/month, 가스의 경우 130Mcf/month로 설정하였으며, 최소 감퇴율(minimum decline rate)은 5%/year로 적용하여 생산감퇴곡선분석을 실시하였다.



**Fig. 7** Work flow for type curve extrapolation and EUR estimation

**Table 4** U.S. Regional decline exponent

Region	b
Wolfberry	1.50
Mississippian Lime	1.50
Barnett	1.59
Eagle ford	1.69
Devonian	2.37
Hayneville	1.19

## 2.4 현금흐름분석 및 민감도 분석

석유개발 산업은 타 산업에 비하여 소요자본 뿐 아니라 정치적인 리스크(risk)가 크다는 특징을 갖고 있으며, 그 대상이 지하에 부존하고 있는 물질이라는 점에서 성공여부가 불확실하다. 따라서 대상 광구에 대한 탐사, 개발, 생산에 대한 투자결정시 그 특성을 제대로 반영하여야 하며, 다른 산업부문에의 투자평가 보다 엄격하고 세심한 주의와 판단이 요구된다(최영철, 2007). 석유산업의 투자절차는 탐사, 개발, 그리고 생산부문으로 나눌 수 있으며, 그 중 생산단계는 개발단계에서 결정된 사업 구조에 따라 석유자원을 생산하고 생산된 석유를 국내외 시장에 운반하고 판매하는 단계이다. 이는 사업의 실질적인 운영 단계로 수익의 창출을 실현하는 가장 중요한 부분이므로 본 연구에서는 생산 중 유전의 매입 및 운영을 위하여 현금흐름분석을 수행하였다.

현금흐름분석을 통해 프로젝트에 소요되는 비용과 프로젝트로 인해 미래에 발생할 수익을 동일하게 만드는 할인율(discount rate)이라는 의미로 순현재가치를 0으로 만드는 값인 내부수익률과 프로젝트 투자로 인해 매년 발생하는 이익을 현재 가치 기준으로 조정한 값인 순현재가치를 구할 수 있다. 이를 통해 도출된 결과가 NPV가 0보다 크면 프로젝트 비용을 초과할 만큼의 현금흐름을 생성한다는 의미이고, NPV가 0이면 프로젝트 비용의 회수가 가능한 현금흐름을 생성하고 NPV가 0보다 작으면 프로젝트 비용에 대하여 회수 할 수 없으므로 해당 프로젝트는 진행하여서는 안 된다는 것을 의미한다. 만약, 두 개의 프로젝트가 양의 NPV와 IRR 값을 가질 경우에는 NPV를 우선적으로 고려해야 한다.

또한, 각 요소들의 변화폭에 따른 경제성 평가결과의 변화인 민감도를 측정하기 위해 유가 및 월별 OPEX(Operating Expenditure)를 대상으로 리스크와 불확실성을 평가하는 방법 중 하나인 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행하였으며(Lima, et al., 2005; 최영철, 2007), 이는 투자결정에 영향을 미칠 수 있는 특정 요소 중 하나 혹은 그 이상의 변수의 값을 변화시켜 사업이 변수에 대해 얼마만큼 민감하게 나타나는가를 파악할 수 있다. 이 때, OPEX는 업무지출 또는 운영비용으로 갖춰진 설비를 운영하는데 드는 제반 비용을 의미하며,

인건비, 재료비, 유지비와 같은 직접 비용과 제세공과금 등의 간접비용으로 구성되어 있다. 이와는 대조적으로 통상 CAPEX(Capital Expenditure)를 사용하며, 이는 자본적 지출로 미래의 이윤 창출, 가치의 취득을 위해 지출된 투자 과정에서의 비용을 의미한다(Kjemperud, 2005).





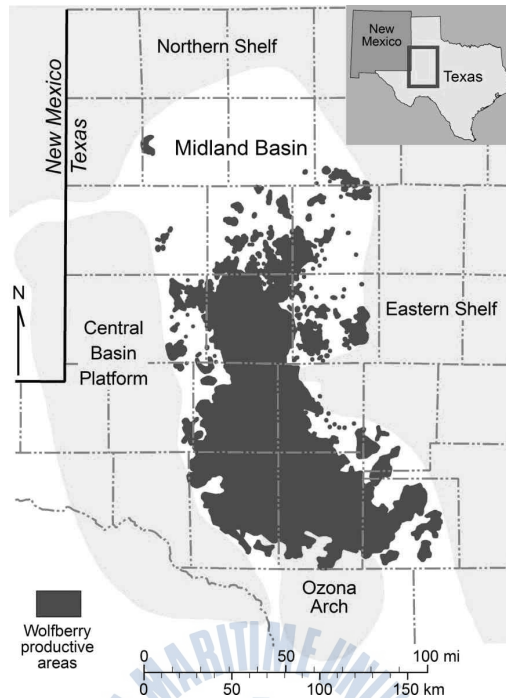
## 제 3 장 석유생산 현장자료 적용 및 평가

### 3.1 연구지역 개요

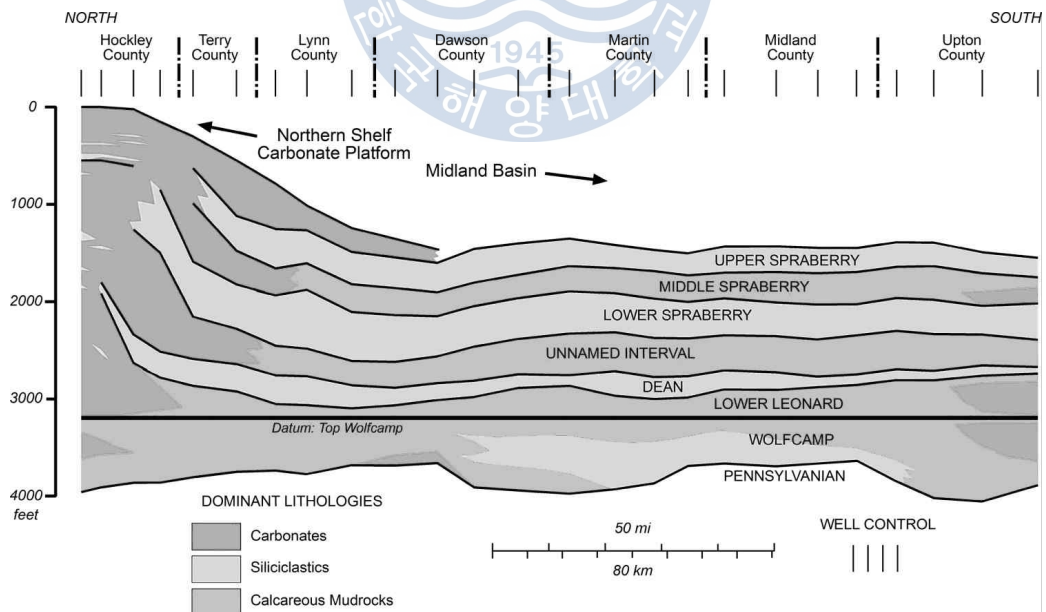
#### 3.1.1 미국 Wolfberry play

북미를 중심으로 수평정 시추, 수압파쇄법 등의 생산성을 증대시키는 기술의 향상으로 보다 경제적인 개발이 가능해졌으며, 이로 인해 이 전에 관심 받지 못하였던 유전을 탐사하는 추세이다.

그 중에서도 최고의 주가를 올리고 있는 지역인 Wolfberry Play는 미국 Texas주 서쪽 Permian 분지(basin)에서의 Midland 분지에 위치하고 있으며(Fig. 8), 7,000~11,500 ft 까지 시추를 목표로 하여 Fig. 9에 나타난 것처럼 Wolfcamp층(formation)과 Spraberry층을 주 대상으로 하여 생산 중에 있으며(STARR, 2010), 생산이 계속되면서 Wolfcamp층 아래의 지층도 포함하고 있는 추세이다. Wolfberry play는 풍부한 유기탄소, 낮은 유체투과도의 석회암질 이암(mudrock)으로 구성되어있으며, 1998년부터 2011년까지 8,700개의 수직 및 수평정을 통해 232 MMBO(Million Barrels of Oil)의 오일과 592 BCF(Billion Cubic Feet)의 가스가 생산되었다. 또한, 초기 생산량은 평균 30~125 bbl/day이며, 시추공 하나당 궁극가채량이 약 100,000~140,000 BOE(Barrels of Oil Equivalent)으로 추정되고 있다(Hamlin & Baumgardner, 2012). Mariani, et al. (2012)에 따르면 오일 가격이 100 \$/bbl일 때 약 23%의 내부수익률을 나타내는 것으로 알려져 있다.



**Fig. 8** Map of the midland basin in West Texas showing Wolfberry productive areas (STARR, 2010)



**Fig. 9** Stratigraphic classification of Wolfberry Play (STARR, 2010)

### 3.1.2 미국 Mississippian lime play

Fig. 10과 같이 미국 Oklahoma주의 북쪽과 Kansas주의 남쪽 사이에 위치하고 있으며, 암상은 주로 탄산염암(carbonate rock)으로 구성되어 있다. 수천 개의 수직정(vertical well)으로부터 30년 이상 생산이 진행되었으며, 기술개발에 의한 수평정 시추와 수압파쇄를 통하여 재개발 되고 있어 앞서 설명한 Texas주 서쪽에 위치한 Permian 분지와 비교될 수 있다. Mississippian은 석회암층 위에 존재하는 높은 유체투과도와 큰 공극률을 가진 일반개발기법자산에 속하는 Mississippian chat이 있으며, 이 지층 아래에 존재하고 새로운 기술이 이용하여 개발하고 있는 Mississippian lime으로 나뉜다(Broadhead, 2009). 현재 Mississippian lime play의 경우 5.4~5.9 BBOE의 범위에 이르는 원시 부존량이 존재하는 것으로 추정하고 있으며(Albrecht & Associates, 2011), NYMEX (2012)에 따르면 이 지역에서의 내부수익률은 약 79%인 것으로 알려져 있다.

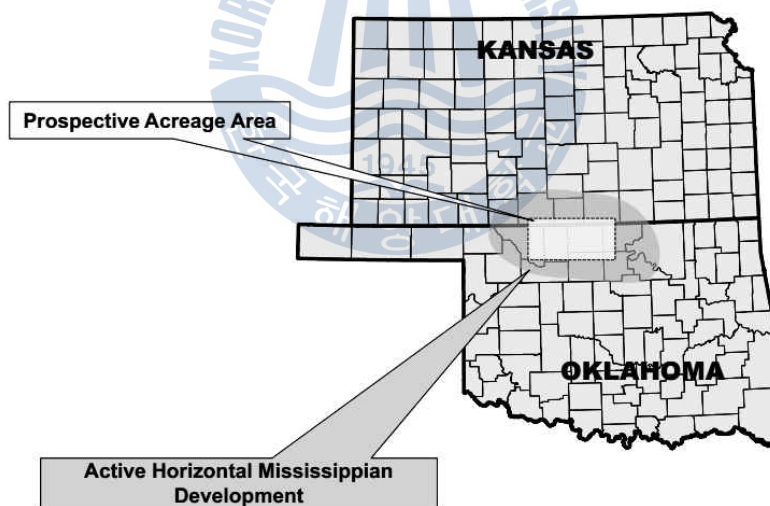


Fig. 10 Locator map of Mississippian lime play(Albrecht & Associates, 2011)

## 3.2 생산감퇴곡선분석 적용 결과

### 3.2.1 미국 Wolfberry play

생산감퇴곡선분석기법 적용을 위하여 1년 이상 생산된 5개 유정의 월별 생산량 자료를 사용하였으며, 생산을 진행함에 따라 오일과 가스 생산량에 대한 GOR이 증가하는 경향을 보여 각각 분리하여 분석을 진행하였다. 초기 생산량은 첫 번째 월의 생산량 자료를 이용하였으며, 감퇴지수 값이 1.5, 2.0, 2.5로 변함에 따라 수정된 쌍곡선법을 이용하였을 때의 오일과 가스의 초기 감퇴율, 궁극가채량을 Table 5와 Table 6에 정리하였다. 그리고 Decline Envelop 기법과 Block Bootstrap Resampling 기법의 경우 유정들의 생산량 자료 평균을 이용하였으며, 그 결과를 Table 7과 Table 8, Table 9와 Table 10에 나타내었다.



**Table 5** Results of Modified Hyperbolic Decline method for oil production

Oil	b	q <sub>i</sub> (bbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbbl)
Well #1	1.5	967.20	19.22	25.93
	2.0		23.62	26.79
	2.5		28.99	26.18
Well #2	1.5	1006.32	25.59	23.02
	2.0		32.50	24.12
	2.5		41.24	23.83
Well #3	1.5	1123.12	21.00	28.67
	2.0		25.98	29.81
	2.5		32.13	29.25
Well #4	1.5	847.04	18.92	22.89
	2.0		23.23	23.62
	2.5		28.44	23.08
Well #5	1.5	1098.56	21.21	27.74
	2.0		26.64	28.83
	2.5		33.02	28.32

**Table 6** Results of Modified Hyperbolic Decline method for gas production

Gas	b	q <sub>i</sub> <sup>1945</sup> (Mcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Well #1	1.5	3516.00	12.44	119.07
	2.0		14.60	119.58
	2.5		17.19	115.47
Well #2	1.5	2024.00	4.27	116.44
	2.0		4.69	109.88
	2.5		5.15	102.63
Well #3	1.5	2522.00	5.64	127.56
	2.0		6.17	123.15
	2.5		6.74	115.61
Well #4	1.5	2842.00	8.48	117.46
	2.0		9.94	113.96
	2.5		11.60	107.38
Well #5	1.5	3768.96	21.94	94.01
	2.0		27.24	97.81
	2.5		33.83	96.18

**Table 7** Results of Decline Envelope method for oil production

	b	q <sub>i</sub> (bbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbbl)
Total oil maximum	1.5	1133.71	17.08	32.50
	2.0		20.72	33.18
	2.5		25.09	32.44
Total oil average	1.5	1009.13	21.19	25.69
	2.0		26.29	26.63
	2.5		32.59	26.13
Total oil minimum	1.5	884.56	24.18	20.90
	2.0		30.38	21.85
	2.5		38.19	21.56

**Table 8** Results of Decline Envelope method for gas production

	b	q <sub>i</sub> (Mcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Total gas maximum	1.5	3203.92	10.35	138.33
	2.0		11.99	137.63
	2.5		13.85	131.91
Total gas average	1.5	2919.61	10.39	108.51
	2.0		12.08	107.89
	2.5		14.00	103.34
Total gas minimum	1.5	2135.29	7.50	93.48
	2.0		8.50	90.99
	2.5		9.60	85.92

**Table 9** Results of Block Bootstrap Resampling method for oil production

	b	q <sub>i</sub> (bbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbbl)
Total oil maximum	1.5	1133.71	12.30	38.73
	2.0		14.56	38.69
	2.5		17.40	37.05
Total oil average	1.5	1009.13	17.44	28.57
	2.0		21.29	29.16
	2.5		25.95	28.50
Total oil minimum	1.5	884.56	22.59	21.71
	2.0		28.02	22.67
	2.5		34.50	22.41

**Table 10** Results of Block Bootstrap Resampling method for gas production

	b	q <sub>i</sub> (Mcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Total gas maximum	1.5	3203.92	8.31	155.21
	2.0		9.25	153.05
	2.5		10.67	144.82
Total gas average	1.5	2919.61	9.61	116.22
	2.0		11.01	111.92
	2.5		12.70	106.56
Total gas minimum	1.5	2135.29	10.90	77.24
	2.0		12.76	76.73
	2.5		14.73	73.89

이러한 각 기법별 결과를 이용하여 추정한 궁극가채량, 초기생산량, 초기감퇴율에 대한 누적확률분포를 통해 분석지역의 오일과 가스에 대한 P10, P50, P90의 표준곡선을 도출하였으며(Fig. 11; Fig. 12), 그 결과를 Table 11에 정리하였다. 여기서, 범례에 나타나지 않은 선의 경우에는 분석에 사용한 유정들의 생산량 자료를 의미하며 오일에 비하여 가스의 경우 넓은 분포를 띠는 것을 알 수 있다. 도출한 P10, P50, P90 3가지 형태의 표준곡선은 분석에 사용한 생산량 자료를 포함하고 있으며, 평균 생산량 자료와 P50에서의 감퇴경향이 비교적 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 오일과 가스의 궁극가채량을 고려하였을 때 감퇴지수가 1.5인 경우 Wolfberry play에서 표준곡선으로 적합한 것으로 사료된다.

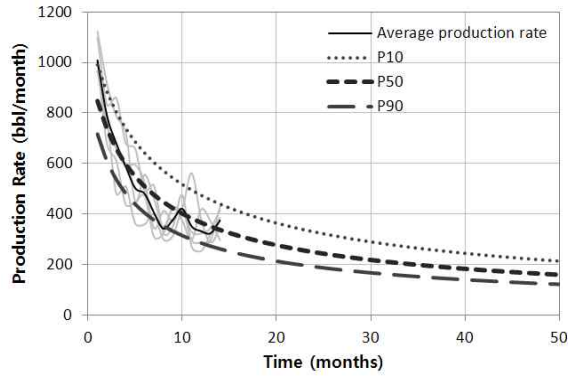
Fig. 13에는 각 기법별 결과 비교를 위하여 P50, 감퇴지수 값이 1.5에서의 표준곡선을 도시하였으며, 감퇴지수가 1을 초과할 경우 Arps의 경험식 중 쌍곡선법은 초기의 천이유동구간에 대한 외삽은 가능하나 장기간 생산함에 따라 발생하는 영향에 대한 부분은 고려하지 못하여 궁극가채량을 과대 산정할 수 있음을 보여준다. 또한, 이 연구에서 적용한 3가지 방법의 경우 값의 차이는 크게 나지 않으나 가지고 있는 생산량 자료에 따라 알맞은 방법을 선택하여 적용할 수 있을 것으로 본다.

다음으로 감퇴지수 값의 변화에 따른 감퇴양상을 Fig. 14에 나타내었으며, 이는 초기 생산 시에는 큰 영향을 미치지 않으나 장기적으로 생산함에 따라 궁극가채량 산정에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 궁극가채량 산정 시에 생산포기 유량과 최소 감퇴율 뿐만 아니라 감퇴지수가 1.5, 2.0, 2.5로 변함에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

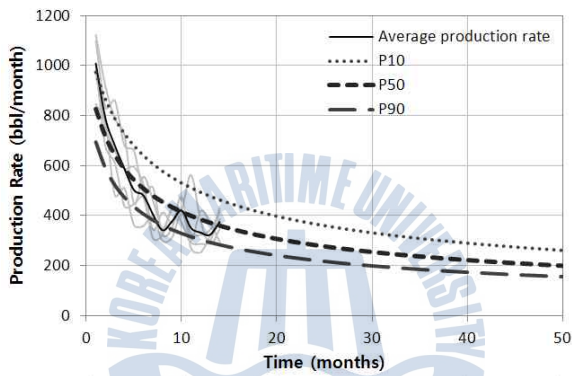


**Table 11** Results of Type curve in Wolfberry play

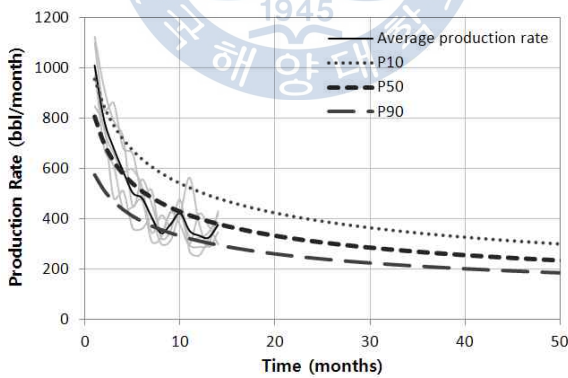
b	Probability	EUR	
		Oil (Mbbbl)	Gas (MMcf)
1.5	P10	34.87	206.37
	P50	26.55	107.84
	P90	20.59	62.25
2.0	P10	35.52	199.81
	P50	27.51	107.20
	P90	21.61	63.66
2.5	P10	34.32	193.34
	P50	26.85	102.05
	P90	21.38	61.78



(a)  $b = 1.5$

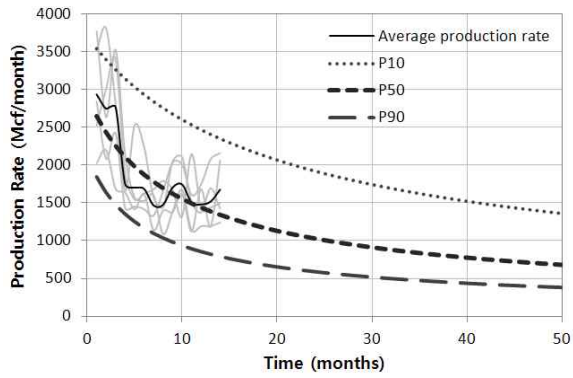


(b)  $b = 2.0$

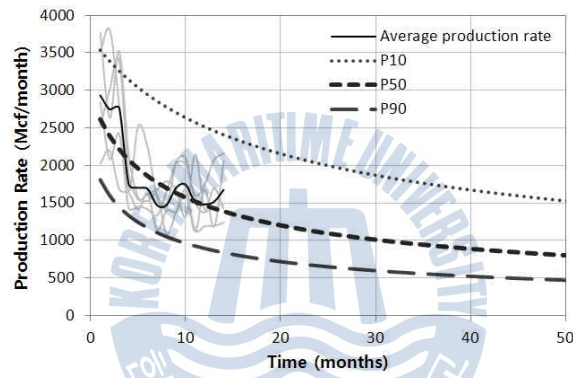


(c)  $b = 2.5$

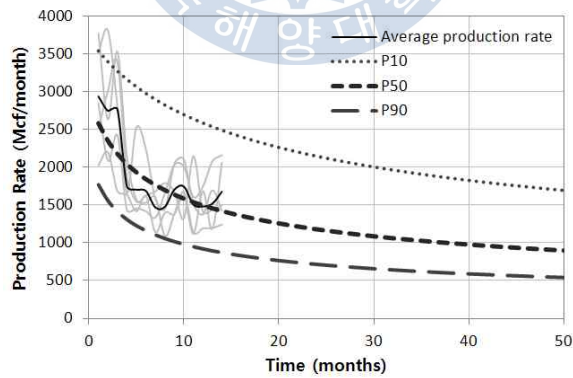
**Fig. 11** Type curve of oil production in Wolfberry play



(a)  $b = 1.5$

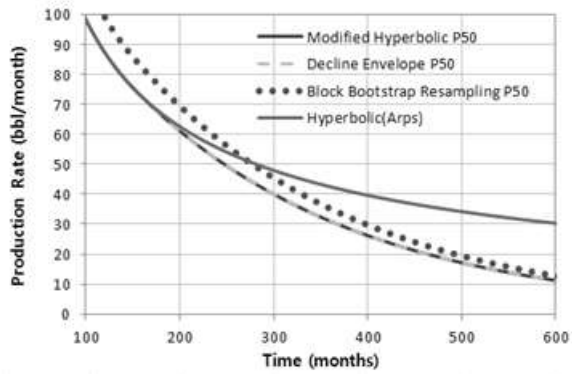


(b)  $b = 2.0$

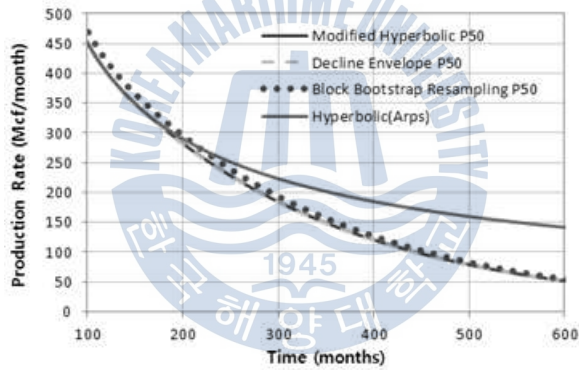


(c)  $b = 2.5$

Fig. 12 Type curve of gas production in Wolfberry play

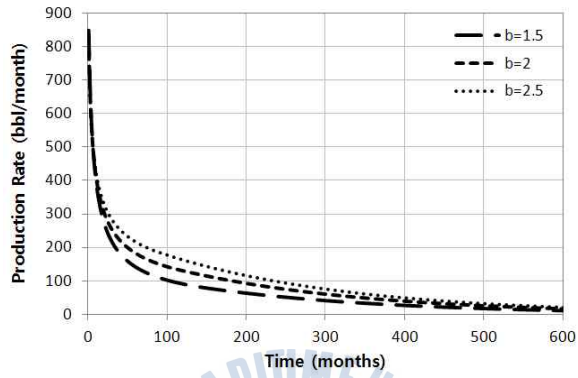


(a) oil production

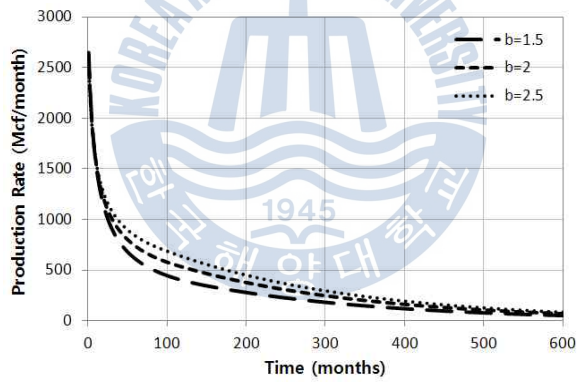


(b) gas production

Fig. 13 Type curve for each method in Wolfberry play



(a) oil production



(b) gas production

**Fig. 14** Type curve for decline exponent in Wolfberry play

### 3.2.2 미국 Mississippian lime play

1년 이상 생산된 유정의 일일 생산량 자료를 한 달 단위로 취합하여 생산감퇴곡선분석기법에 적용하였으며, 생산을 진행함에 따라 오일과 가스 생산량에 대한 GOR이 서서히 증가하는 양상을 띠어 각각 분리하여 분석을 진행하였다. 감퇴지수 값이 1.5, 2.0, 2.5로 변함에 따라 수정된 쌍곡선법을 이용하였을 때의 오일과 가스의 초기 감퇴율, 생산포기 유량과 최소 감퇴율에서의 궁극가채량 및 생산기간을 Table 12에 정리하였으며, Decline Envelop 기법과 Block Bootstrap Resampling 기법을 적용한 결과는 Table 13과 Table 14, Table 15와 Table 16에 나타내었다. 이 때, 초기 생산량은 첫 번째 월의 생산량 자료를 이용하였다.

**Table 12** Results of Modified Hyperbolic Decline method for oil and gas production

	b	q <sub>i</sub> (Mbbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbl)
Total oil average	1.5	4.51	13.93	144.95
	2.0		16.73	145.82
	2.5		20.06	140.02
	b	q <sub>i</sub> (MMcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Total gas average	1.5	22.44	14.47	706.40
	2.0		17.06	419.48
	2.5		20.09	696.52

**Table 13** Results of Decline Envelope method for oil production

	b	q <sub>i</sub> (Mbbbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbbl)
Total oil maximum	1.5	6.99	5.41	366.74
	2.0		5.92	352.03
	2.5		6.47	331.17
Total oil average	1.5	4.48	12.80	150.37
	2.0		14.97	151.49
	2.5		17.47	146.60
Total oil minimum	1.5	1.96	30.06	41.01
	2.0		38.13	43.77
	2.5		48.39	44.06

**Table 14** Results of Decline Envelope method for gas production

	b	q <sub>i</sub> (MMcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Total gas maximum	1.5	33.54	7.28	1513.84
	2.0		8.07	1496.84
	2.5		8.92	1410.58
Total gas average	1.5	23.11	13.59	753.37
	2.0		15.84	466.20
	2.5		18.43	741.31
Total gas minimum	1.5	12.67	21.99	317.13
	2.0		26.86	332.19
	2.5		32.81	328.14

**Table 15** Results of Block Bootstrap Resampling method for oil production

	b	q <sub>i</sub> (Mbbbl/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (Mbbbl)
Total oil maximum	1.5	6.99	7.98	301.21
	2.0		9.30	290.59
	2.5		10.85	273.90
Total oil average	1.5	4.48	11.06	162.89
	2.0		13.18	160.43
	2.5		15.76	152.53
Total oil minimum	1.5	1.96	14.15	62.69
	2.0		17.07	62.76
	2.5		20.68	60.11

**Table 16** Results of Block Bootstrap Resampling method for gas production

	b	q <sub>i</sub> (MMcf/month)	D <sub>i</sub> (%/month)	EUR (MMcf)
Total gas maximum	1.5	33.54	9.19	1342.79
	2.0		10.48	1327.03
	2.5		11.71	1274.74
Total gas average	1.5	23.11	12.25	795.28
	2.0		14.12	803.00
	2.5		16.62	774.51
Total gas minimum	1.5	12.67	15.31	386.37
	2.0		17.76	398.77
	2.5		21.52	385.45



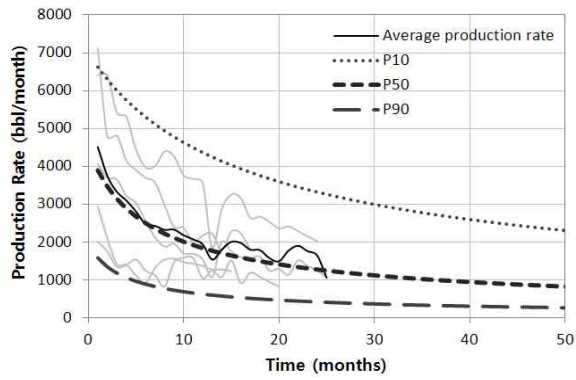
이러한 각 기법별 결과를 이용하여 추정한 궁극가채량, 초기생산량, 초기감퇴율에 대한 누적확률분포를 통해 분석지역의 오일과 가스에 대한 P10, P50, P90의 표준곡선을 도출하였으며(Fig. 15; Fig. 16), 그 결과를 Table 17에 정리하였다. 여기서, 범례에 나타나지 않은 선의 경우에는 분석에 사용한 유정들의 생산량 자료를 의미하며 Wolfberry play의 생산량 자료에 비하여 자료 간의 변동성이 큰 것을 볼 수 있다. 도출한 P10, P50, P90 3가지 형태의 표준곡선은 분석에 사용한 생산량 자료를 포함하고 있으며, 평균 생산량 자료와 P50에서의 감퇴경향이 비교적 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 오일과 가스의 궁극가채량을 고려하였을 때 감퇴지수가 2.0인 경우가 Mississippian lime play에서 표준곡선으로 적합한 것으로 사료된다. 여기서, 범례에 나타나지 않은 선의 경우에는 분석에 사용한 유정들의 생산량 자료를 의미하며 Wolfberry play의 생산량 자료에 비하여 자료 간의 변동성이 큰 것을 볼 수 있다.

Fig. 17에는 각 기법별 결과 비교를 위하여 P50, 감퇴지수 값이 2.0에서의 표준곡선을 도시하였으며, 감퇴지수가 1을 초과할 경우 Arps의 경험식 중 쌍곡선법은 초기의 천이유동구간에 대한 외삽은 가능하나 장기간 생산함에 따라 발생하는 영향에 대한 부분은 고려하지 못하여 궁극가채량을 과대 산정할 수 있음을 보여준다. 또한, 이 연구에서 적용한 3가지 방법의 경우 값의 차이는 크게 나타나지 않으나 가지고 있는 생산량 자료에 따라 알맞은 방법을 선택하여 적용할 수 있을 것으로 본다.

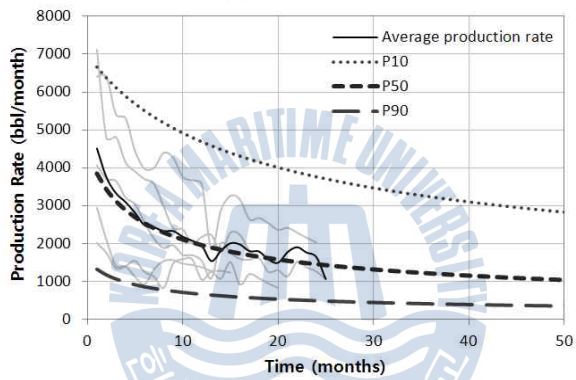
다음으로 감퇴지수 값의 변화에 따른 감퇴양상을 Fig. 18에 나타내었으며, 이는 초기 생산 시에는 큰 영향을 미치지 않으나 장기적으로 생산함에 따라 궁극가채량 산정에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 궁극가채량 산정 시에 생산포기 유량과 최소 감퇴율 뿐만 아니라 감퇴지수가 1.5, 2.0, 2.5로 변함에 따라 차이가 있음을 알 수 있다.

**Table 17** Results of Type curve in Mississippian lime play

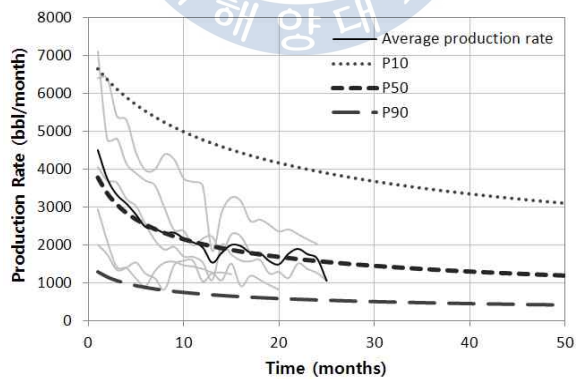
b	Probability	EUR	
		Oil (Mbbbl)	Gas (MMcf)
1.5	P10	357.42	1444.33
	P50	135.52	747.09
	P90	45.26	337.63
2.0	P10	375.09	1406.95
	P50	141.34	760.68
	P90	48.71	356.03
2.5	P10	358.69	1376.49
	P50	136.92	739.89
	P90	48.75	350.79



(a)  $b = 1.5$

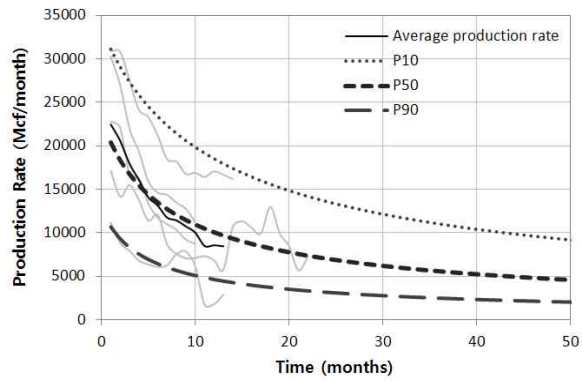


(b)  $b = 2.0$

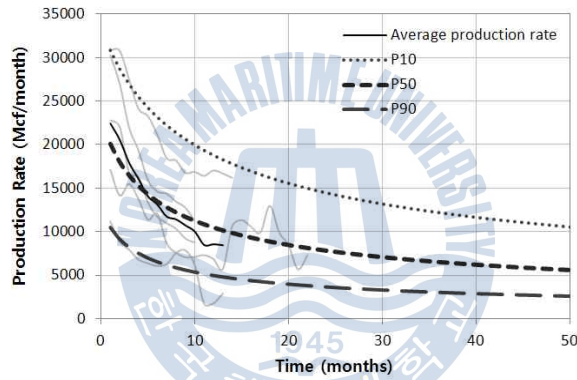


(c)  $b = 2.5$

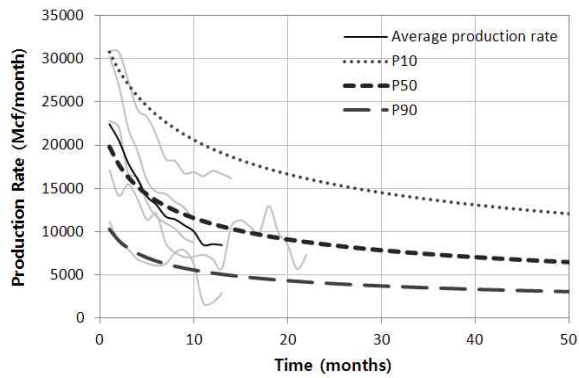
Fig. 15 Type curve of oil production in Mississippian lime play



(a)  $b = 1.5$

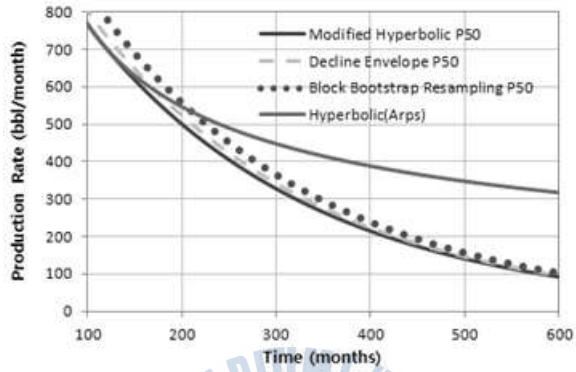


(b)  $b = 2.0$

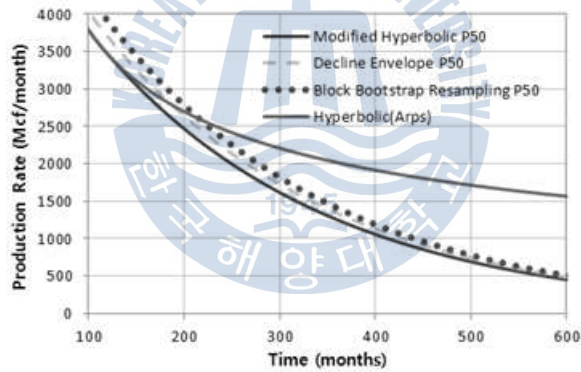


(c)  $b = 2.5$

**Fig. 16** Type curve of gas production in Mississippian lime play

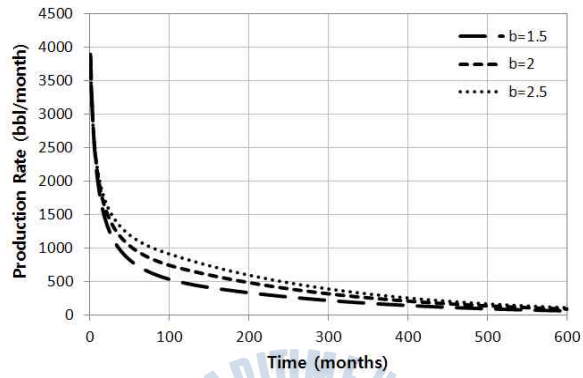


(a) oil production

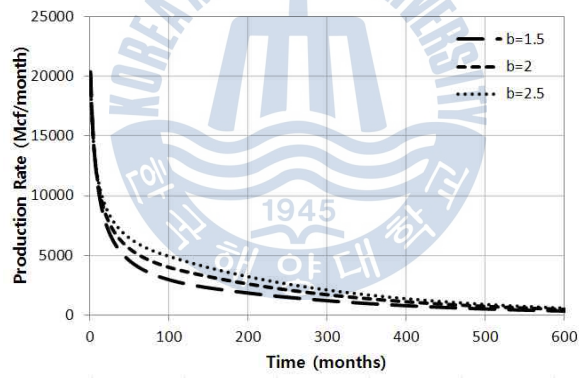


(b) gas production

Fig. 17 Type curve for each method in Mississippian lime play



(a) oil production



(b) gas production

Fig. 18 Type curve for decline exponent in Mississippian lime play

### 3.3 현금흐름분석 및 민감도 분석 결과

#### 3.3.1 미국 Wolfberry play

Wolfberry play의 생산량 자료에 대해 도출한 표준곡선에서 궁극가채량과 생산 기간(production period)을 고려하여 감퇴지수는 1.5, P50의 표준곡선을 최종적으로 선택하였으며, 해당 유전의 매입 및 운영을 위하여 필요한 현금흐름 분석을 수행하였다. 현재의 오일 및 가스 가격, 월별 OPEX를 반영하여 기준사례(base case)로 설정하였으며, Table 18에 나타내었다. 현금흐름분석 시 제한조건으로 앞서 설정한 값과 동일하게 오일은 30bbl/month, 가스는 130Mcf/month 그리고 최소 감퇴율은 5%/year로 적용하였다. 또한, 오일 및 가스 가격과 월별 OPEX의 차이에 따른 순현재가치의 변화를 알아보기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 오일 가격(\$/bbl)은 80, 90, 100으로 가스 가격(\$/MMBTU)은 2.5, 3, 3.5 그리고 월별 OPEX(\$)는 2,600, 2,700, 2,800으로 변화시켰다.

그 결과 2010년 4월~2024년 12월 동안 생산을 할 경우 연간 현금흐름에 대하여 Fig. 19를 통해 파악 할 수 있었으며, 민감도 분석을 통해 Fig. 20과 같이 오일 및 가스 가격에 대해서 NPV는 증가하는 경향을 보이며, 비용을 소모해야 하는 월별 OPEX의 경우에는 NPV가 감소하는 경향을 보였다. 여기서, 3가지 요인 중 오일 가격에 의해 NPV가 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 각 경우의 결과 값을 Table 19에 정리하였다. 또한, NPV의 값이 0보다 큰 값을 가지므로 앞서 적용한 생산포기 유량과 최소 감퇴율에 대한 궁극가채량 결과가 타당하고 사업을 진행할 수 있을 만큼의 현금흐름이 발생한다는 것을 파악할 수 있다.

**Table 18** Base case for sensitivity analysis in Wolfberry play

Oil price	90.0	\$/bbl
Gas price	3.0	\$/MMBTU
Gas BTU	1373.0	MMBTU/Mcf
Monthly OPEX	2,700	\$
CAPEX per well	1.1	Million\$

**Table 19** Cash flow analysis results in Wolfberry play

Case	Oil price(\$)	Gas price(\$)	Monthly OPEX(\$)	IRR(%)	NPV (Million\$)
Base case	90	3.0	2,700	11.8	14.65
case 1	80	3.0	2,700	7.6	8.80
case 2	100	3.0	2,700	16.0	20.08
case 3	90	2.5	2,700	10.7	13.10
case 4	90	3.5	2,700	12.9	16.18
case 5	90	3.0	2,600	12.1	15.17
case 6	90	3.0	2,800	11.5	14.14



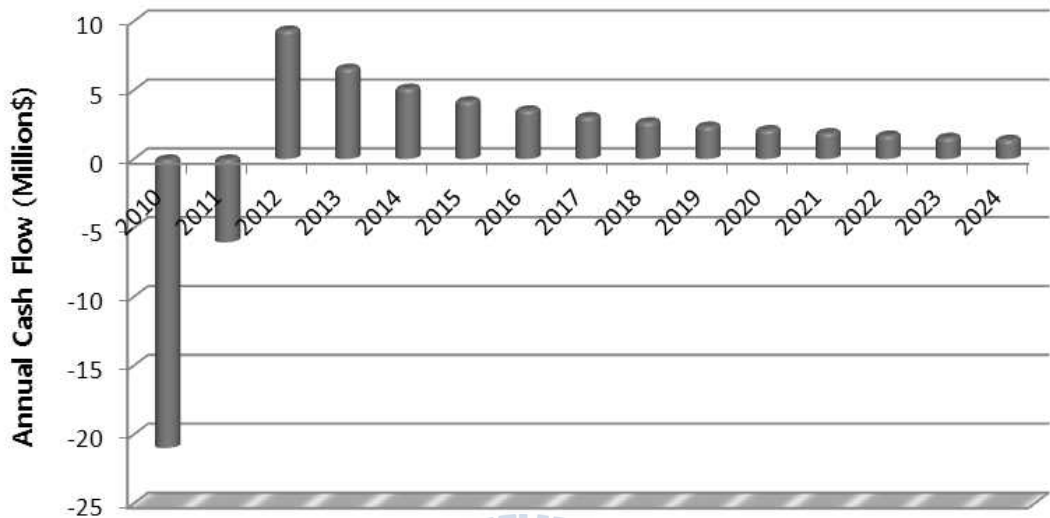


Fig. 19 Annual cash flow of base case in Wolfberry play

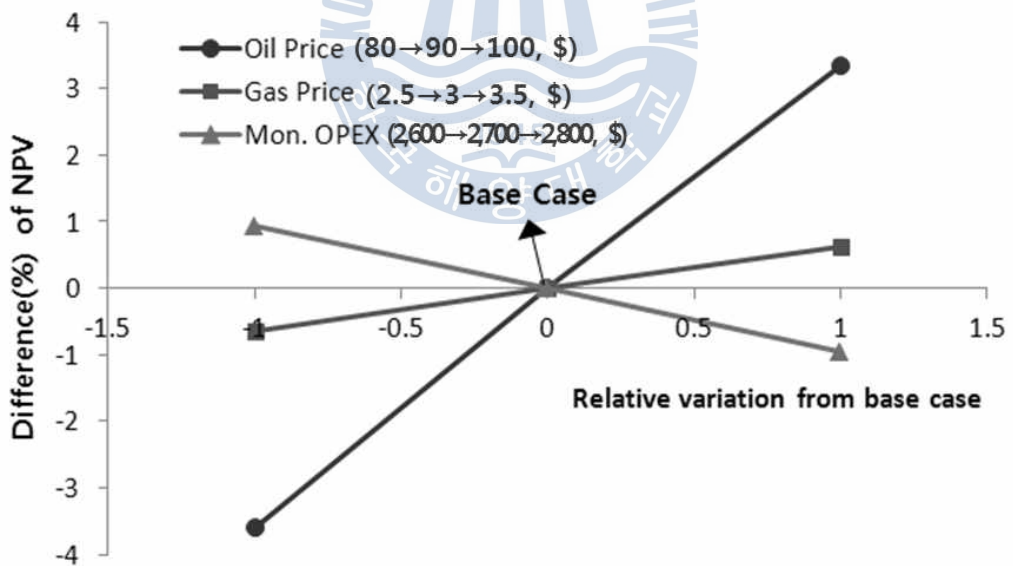


Fig. 20 Sensitivity analysis of key parameters

### 3.3.2 미국 Mississippian lime play

Mississippian lime play의 생산량 자료에 대해 도출한 표준곡선에서 궁극가채량과 생산 기간을 고려하여 감퇴지수는 2.0, P50의 표준곡선을 최종적으로 선택하였으며, 해당 유전의 매입 및 운영을 위하여 필요한 현금흐름분석을 수행하였다. 현재의 오일 및 가스 가격, 월별 OPEX를 반영하여 기준사례로 설정하였으며, Table 20에 나타내었다. Mississippian lime play에서 월별 OPEX의 경우 생산시작 36개월 전후로 나누어 적용하였으며, 현금흐름분석 시 제한조건으로 앞서 설정한 값과 동일하게 오일은 30bbl/month, 가스는 130Mcf/month 그리고 최소 감퇴율은 5%/year로 적용하였다. 또한, 오일 및 가스 가격과 월별 OPEX의 차이에 따른 순현재가치의 변화를 알아보기 위하여 민감도 분석을 수행하였으며, 오일 가격(\$/bbl)은 80, 90, 100으로 가스 가격(\$/MMBTU)은 2.5, 3, 3.5 그리고 월별 OPEX(\$)는 초기 36개월의 경우 7,900, 8,000, 8,100으로 36개월 이후에서는 4,330, 4,430, 4,530으로 변화시켰다.

그 결과 2009년 5월~2023년 12월 동안 생산을 할 경우 연간 현금흐름에 대하여 Fig. 21를 통해 파악 할 수 있었으며, 민감도 분석을 통해 Fig. 22와 같이 오일 및 가스 가격에 대해서 NPV는 증가하는 경향을 보이며, 비용을 소모해야 하는 월별 OPEX의 경우에는 NPV가 감소하는 경향을 보였다. 여기서, 3가지 요인 중 오일 가격에 의해 NPV가 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 각 경우의 결과 값을 Table 21에 정리하였다. 또한, NPV의 값이 0보다 큰 값을 가지므로 앞서 적용한 생산포기 유량과 최소 감퇴율에 대한 궁극가채량 결과가 타당하고 사업을 진행할 수 있을 만큼의 현금흐름이 발생한다는 것을 파악할 수 있다.

**Table 20** Base case for sensitivity analysis in Mississippian lime play

Oil price		90.0	\$/bbl
Gas price		3.0	\$/MMBTU
Gas BTU		1373.0	MMBTU/Mcf
Monthly OPEX	Before 36 months	8,000	+3.35/boe \$
	After 36 months	4,430	+3.35/boe \$
CAPEX per well		3.2	Million\$

**Table 21** Cash flow analysis results in Mississippian lime play

Case	Oil price(\$)	Gas price(\$)	Monthly OPEX(\$)		IRR(%)	NPV (Million\$)
			before 36 months	after 36 months		
Base case	90	3.0	8,000	4,430	65.4	10.89
case 1	80	3.0	8,000	4,430	50.7	9.95
case 2	100	3.0	8,000	4,430	81.7	11.59
case 3	90	2.5	8,000	4,430	60.0	10.58
case 4	90	3.5	8,000	4,430	70.9	11.17
case 5	90	3.0	7,900	4,330	65.5	10.58
case 6	90	3.0	8,100	4,530	65.2	10.85

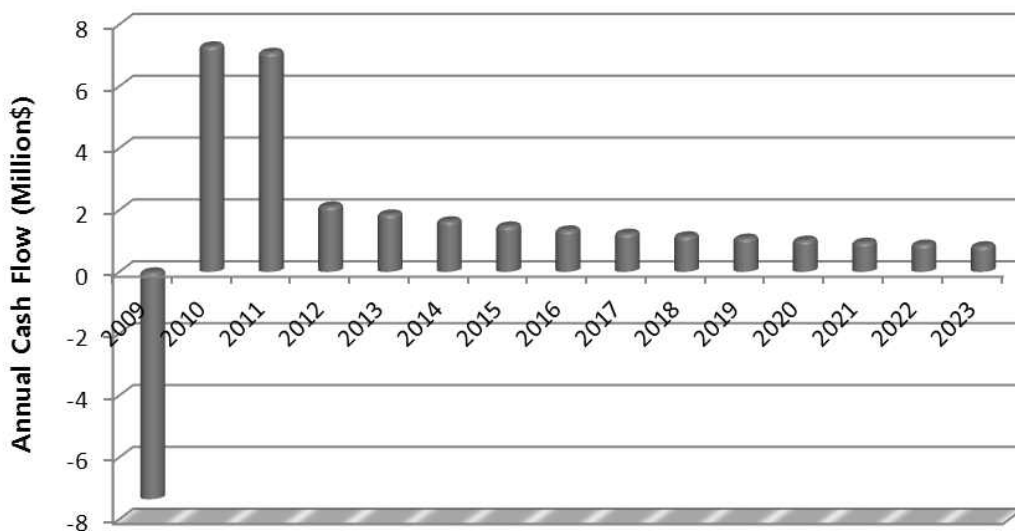


Fig. 21 Annual cash flow of base case in Mississippian lime play

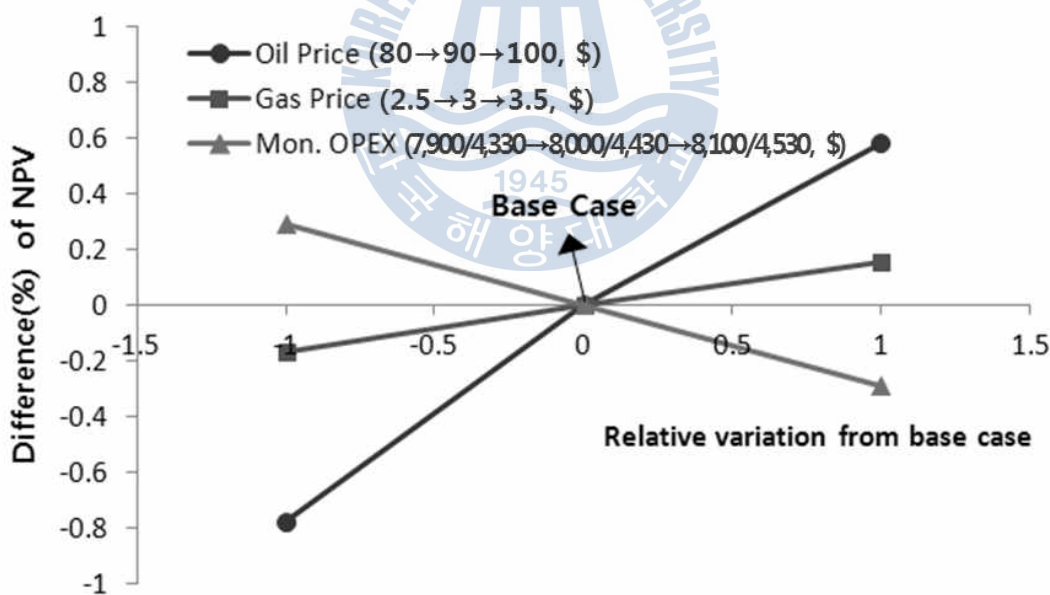


Fig. 22 Sensitivity analysis of key parameters

## 제 4 장 결 론

석유자원의 수요증가로 인한 국제 원유가의 상승과 생산성 증대를 위한 수평정 시추 및 수압파쇄 등과 같은 기술의 향상으로 '신개발기법자산'에 대한 관심이 증가하고 있다. 이를 개발하기 위하여 해당 지역에 대한 평가를 위해 상세 정보가 부족하거나 신속한 분석이 필요한 현장에서는 생산량 자료만을 이용하여 생산 거동을 파악하고 생산성 예측이 가능한 생산감퇴곡선분석기법을 사용한다. 이 때, 기존의 결정론적 생산감퇴곡선분석기법에 신뢰도 개념을 적용하여 예측 시 통계량에 따른 최대·최소값을 도출하여 특정한 범위를 가지는 확률론적 생산감퇴곡선분석기법을 적용하였다.

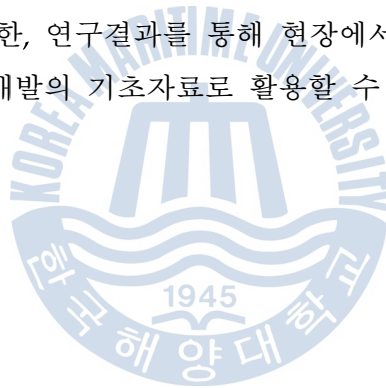
이 논문에서는 이러한 신개발기법자산의 생산 감퇴 이력 특징을 다양한 생산감퇴곡선분석기법을 이용하여 생산 거동을 예측하였으며 궁극가채량을 추정하였다. 또한, 석유자원 생산을 위한 유전의 매입과 운영을 위하여 필요한 현금흐름분석을 수행하였으며 민감도 분석을 통해 현금흐름분석 시 사용한 변수가 결과에 미치는 영향에 대하여 파악하였다. 그로부터 얻은 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 기존의 생산감퇴곡선분석기법에 신뢰도 개념을 적용하여 장기간 생산함에 따라 변하는 생산조건으로 인해 발생한 생산량 변동폭에 의한 불확실성을 최소화하고 신뢰도를 높여주기 위해 확률론적 기법을 사용하였으며 이를 통해 해당 지역에 대한 궁극가채량을 추정할 수 있었다.
2. 신개발기법자산에서의 생산량 자료를 이용하여 생산감퇴곡선분석을 수행한 결과 초기 감퇴율 및 초기 생산량에 비하여 감퇴지수에 의한 궁극가채

량의 변화가 크고, 초기에 생산 감퇴 이력 양상보다는 장기 생산 시 나타나는 감퇴 이력이 궁극가채량 산정에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3. 도출한 표준곡선을 이용하여 해당 유전의 매입 및 운영을 위한 현금흐름 분석을 적용하여 내부수익률, 순현재가치를 구하였으며 각 요소간의 민감도 분석을 통해 유·가스전 생산 시에 영향을 미치는 경제적인 요소에 대하여 파악하였다.

이 연구에서 적용한 신개발기법자산에서의 궁극가채량 추정을 위한 생산감퇴 곡선분석기법을 이용하여 다양한 지역의 석유생산 현장자료를 적용할 수 있을 것이며, 향후 분석지역에 대한 압력자료를 이용하여 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한, 연구결과를 통해 현장에서도 사용이 편리하며 경제성 분석이 가능한 모델 개발의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.



## 감사의 글

석사과정의 2년이란 시간은 저에게 많은 것을 깨닫게 하고 아직도 배울 것이 많음을 느끼게 해준 시간이었습니다. 부족하기만 한 제가 이렇게 석사과정을 마치고 박사과정으로 진학할 수 있게 된 것은 무엇보다도 소중한 사람들의 관심어린 애정이 있었기 때문이라 생각합니다. 앞으로 살아가면서 지금 얻은 소중한 경험을 깊이 간직하겠습니다.

처음 실험실에 들어온 이후 지난 3년 여 동안 따뜻한 배려와 항상 바른길로 인도해주신 임종세 교수님께 진심으로 감사의 인사를 드립니다. 바쁘신 와중에도 심사를 맡아주시고 논문의 방향을 올바르게 인도해 주신 신성렬 교수님과 정우근 교수님, 학부 및 대학원 생활동안 많은 가르침을 아끼지 않으신 장원일 교수님, 윤지호 교수님, 유경근 교수님께 진심어린 감사를 전하고 싶습니다. 또한, 저에게 아낌없이 코멘트를 해주시고 연구에 있어서 폭넓은 시각을 가지도록 지도해 주신 허천 교수님, 김정환 박사님, 노정용 박사님, 박희준 박사님, 신승헌 박사님께 머리 숙여 감사의 인사를 드립니다.

학부 4학년이 되기 전 겨울방학에 석유공학실험실의 일원이 된 후 너무도 많은 사람들과 인연을 맺을 수 있었고, 많은 것을 배우고 제 자신을 되돌아 볼 수 있었던 시간이었습니다. 3년이란 시간을 실험실에서 생활하며 여러 선배들께서 사회로 진출하시고, 여러 후배들이 들어오는 것을 겪어왔습니다. 그 와중에서도 항상 실험실의 발전을 위해 노력하시고 이끌어주시는 판상오빠와 동건오빠, 부족한 저를 감싸주고 많은 부분을 가르쳐 주는 선영언니, 노력하는 만큼 그 결실을 맺을 수 있을 승렬오빠, 실험실을 이끌어 나갈 것으로 기대되는 록상오빠, 앞으로 많은 것을 배워나갈 재홍오빠, 비룡, 수진, 지수, 그리고 제가 한참 부족하고 배울 것이 많을 때에 많은 것을 알려주셨던 광원오빠, 동생들을 잘 챙겨주시던 기하오빠, 실험실에 활기를 불어넣어주었던 승영오빠, 선후배 모두를 포용하고 논문 쓴다고 같이 고생한 송이언니, 그 외 자원처리공학실험실,

친환경에너지공학실험실, 물리탐사실험실, 암석역학실험실 식구들에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 25년 동안 힘든 내색 한번 하지 않고 부족하기만 한 딸을 위해서 물심양면 지원해주시고 항상 저의 곁에서 올바른 길로 인도해주신 아버지와 어머니, 동생을 위해서 관심어린 애정을 가져주는 친구 같은 우리 언니, 그리고 기쁠 때나 슬플 때나 오랜 시간 함께 지내오고 앞으로 꿈을 향해 훨훨 날아갈 수 있을 나의 친구들 현영, 나래, 지현, 수정, 수정, 정민, 미선, 은지에게 고맙다는 말을 전하며 글을 마칩니다.





## 참고문헌

- 강주명, 2009. 석유공학개론. 서울대학교출판부.
- 고재홍, 2007. 미국 텍사스 주 포트워스 분지의 바넷 셰일가스 시스템. *한국지구시스템공학회지*, 44(5), pp.455-473.
- 김진수, 김연배, 허은녕, 2006. 중국의 석유 수입과 국제원유가격 변동의 인과관계 분석. *한국지구시스템공학회지*, 43(6), pp.551-559.
- 박진수, 김운배, 2010. 계절성 데이터의 부트스트랩 적용에 관한 연구. *한국시뮬레이션학회 논문지*, 19(3), pp.119-125.
- 박창협, 강주명, 이호영, 2009. 평균-회귀 유가예측과 몬테카를로 기법에 의한 최적참여지분결정, *한국지구시스템공학회지*, 46(1), pp.61-71.
- 백문석, 2011. 비전통 가스자원 및 한국가스공사의 사업 현황. *한국지구시스템공학회지*, 48(4), pp.524-538.
- 성원모, 김세준, 이근상, 임종세, 2009. 국내 석유자원량 분류체계의 표준화. *한국지구시스템공학회지*, 46(4), pp.498-508.
- 송진호, 2012. 감퇴곡선 분석법을 이용한 다중 치밀 가스 저류층에서의 혼합생산 유정의 생산거동 예측. 석사학위논문. 서울대학교.
- 신승헌, 박희원, 임종세, 2012. 미국의 지역별 생산 유·가스전 가치평가의 특성 요소 분석. *한국지구시스템공학회지*, 49(3), pp.309-318.
- 최영철, 2007. 석유가스전 경제성 평가 및 리스크 분석. 석사학위논문. 연세대학교.
- 최진희, 2008. 2상유동-생산감퇴곡선분석법에 기반한 비주얼 통계적-생산감퇴곡선분석모델 개발 및 응용, 석사학위논문. 한양대학교.
- 이영수 등, 2008. 비주얼 통계적-2상유동 생산감퇴곡선 분석 모델 개발 및 응용. *한국지구시스템공학회지*, 45(6), pp.610-619.
- 한국지질자원연구원, 2002. 석유 및 천연가스 개발공정의 시각화 분석 통합프로

그랩 개발, 산업자원부.

한국지질자원연구원, 2006. 석유가스전 통합관리기술 연구, 과학기술부.

Albrecht & Associates, 2011. *MISSISSIPPIAN LIME ACREAGE* [Brochure]  
Available at: <http://www.albrechtai.com/divestments/Dynamic%20Brochure.pdf>  
[Accessed 19 August 2012].

Arps, J.J., 1944. Analysis of Decline Curves. *Transactions of the AIME*, 160(1), pp.228-247.

Arps, J.J., 1956. Estimation of Primary Oil Reserves. *Petroleum Conference Economics and Valuation*. Dallas, Texas, March 29-30.

Baihy, J., Altman, R., Malpani, R. & Luo, F., 2010. Shale Gas Production Decline Trend Comparison Over Time and Basins. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Florence, Italy, September 19-22.

Brito, L.E., Paz, F. & Belisario, D., 2012. "Probabilistic Production Forecasts Using Decline Envelopes. *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Mexico City, Mexico, April 16-18.

Broadhead, R.F., 2009. Mississippian strata of southeastern New Mexico: distribution, structure, and hydrocarbon plays. *New Mexico Geology*, 31(3), pp.65-76.

Brown, C.A., Erbe, C.B. & Crafton, J.W., 1981. A Comprehensive Reservoir Model of the Low Permeability Lewis Sands in the Hay Reservoir Area, Sweetwater County, Wyoming. *56th Annual Fall Technical Conference and Exhibition of Petroleum Engineers of AIME*. San Antonio, Texas, October 5-7.

Cheng, Y., Wang, Y., McVay, D.A. & Lee, W.J., 2010. Practical Application of a Probabilistic Approach to Estimate Reserves Using Production Decline Data. *Journal of SPE Economics & Management*, 2(1), pp.19-31.

Fanchi, J.R., 2012. Forecasting *Shale Gas Recovery Using Monte Carlo Analysis* [Online] Available at:

- <http://www.pennenergy.com/articles/pennenergy/2012/12/forecasting-shale-gas-recovery-using-monte-carlo-analysis---part-1.html?cmpid=EnlDailyPetroDecember42012&cmpid=EnlWeeklyPetroDecember72012> [Accessed 8 December 2012].
- Fekete, 2010. *Analysis Methods* [Manual] Available at: <http://www.fekete.com/software/rta/media/webhelp/index.htm#c-te-analysis.htm> [Accessed 22 May 2012].
- Fryklund, R.B., 2010. *Independents Transforming U.S. Resource Play Expertise Into International Success* [Magazine] Available at: <http://www.aogr.com/index.php/magazine/editors-choice/independents-transforming-u.s.-resource-play-expertise-international> [Accessed 28 June 2012].
- Hagg, J., 2005. *The Acquisition & Divestiture of Petroleum Property*. PennWell Corporation.
- Hamlin, H.S. & Baumgardner, R.W., 2012. Wolfberry Play, Midland Basin, West Texas. *AAPG Southwest Section Meeting*. Fort Worth, Texas, May 19-22.
- Jochen, V.A. and Spivey, J.P., 1996. Probabilistic Reserves Estimation Using Analysis with the Bootstrap Method. *ATCE of SPE*. Denver, Colorado, October 6-9.
- Kjemperud, A., 2005, Economic Modeling [Document] Available at: [http://www.ccop.or.th/ppm/document/CHEXV3/CHEXV3DOC10\\_kjemperud.pdf](http://www.ccop.or.th/ppm/document/CHEXV3/CHEXV3DOC10_kjemperud.pdf) [Accessed 16 December 2012].
- Kupchenko, C.L., Gault, B.W. & Mattar, L., 2008. Tight Gas Production Performance Using Decline Curves. *CIPC/SPE Gas Technology Symposium 2008 Joint Conference*. Alberta, Canada, June 16-19.
- Knull, W.H., Jones, S.T., Tyler, T.J. & Deutsch, R.D., 2007. Accounting for Uncertainty Oil and Gas Investments. *Journal of Energy and Natural Resources Law*, 25(3), pp.268-302.

- Lima, G.A.C., Suslick, S.B. & Bordieri, C.A., 2005. A Quantitative Method for Estimation of Volatility of Oil Production Projects. *SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium*. Dallas, Texas, April 3-5.
- Mariani, et al., 2012. *Southern Midland Basin Wolfcamp Shale Report* [Report] Available at: <http://bspcorp.com/wp-content/uploads/2012/11/BOLING-Wolfcamp-Article.pdf> [Accessed 15 November 2012].
- McNulty, R.R. & Knapp, R.M., 1981. Statistical Decline Curve Analysis. *ATCE of SPE of AIME*. San Antonio, Texas, October 5-7.
- NYMEX (New York Mercantile Exchange), 2012. Available at: <http://www.cmegroup.com/> [Accessed 21 May 2012].
- Robertson, S., 1988. Generalized Hyperbolic Equation. manuscript of SPE (USMS) 18731.
- Seshadri, J. and Matter, L., 2010. Comparison of Power Law Modified Hyperbolic Decline Methods. *Canadian Unconventional Resources & International Petroleum Conference* Calgary, Canada, October 19-21.
- SPE (Society of Petroleum Engineer), 2007. *Petroleum Resources Management System (PRMS)*. SPE:U.S.A.
- SPEE (Society of Petroleum Evaluation Engineers), 2010. *Guidelines for the Practical Evaluation of Undeveloped Reserves in Resource Plays*. SPEE:U.S.A.
- STARR (State of Texas Advanced Oil and Gas Resource Recovery), 2010. *The Spraberry Trend And Wolfberry Play Of The Midland Basin, West Texas* [Online] Available at: [http://www.beg.utexas.edu/starr/ur\\_wolfberry.php](http://www.beg.utexas.edu/starr/ur_wolfberry.php) [Accessed 30 August 2012].
- SEC (U.S. Securities and Exchange Commission), 2012. Available at: [http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1528129/000110465912020854/a12-7924\\_1ex99d1.htm](http://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1528129/000110465912020854/a12-7924_1ex99d1.htm) [Accessed 27 September 2012].