다양한 시추궤도에서의 유성이수 유정제어 모델링

이태엽¹⁾ · 이경북¹⁾ · 성국주²⁾ · 최종근^{1)*}

Well Control Modeling of Oil Based Mud for Various Well Trajectories

Taeyeob Lee, Kyungbook Lee, Kukju Sung and Jonggeun Choe*

Abstract : A kick is unscheduled flow of formation fluids into the wellbore. Well control includes the whole process of kick prevention, kick detection, kick control, and kick removal. Well control may occur in a variety of drilling conditions. It is essential to understand kick behaviors for safe drilling. In this study, an oil based mud well control model is developed and it considers mud types, well trajectories, formation conditions and thermal effects of mud. When the gas kick occurs with oil based mud, it goes into solution resulting very small initial pit gain and choke pressure, which compensates hydrostatic pressure loss in the wellbore. These effects make kick detection more difficult and become remarkable as horizontal sections of well trajectories are long. However, if early kick detection is made in oil based mud, the kick removal in oil based mud can be much easier than that in water based mud, because low choke pressure is needed.

Key words : Well control, Oil based mud, Kick, Well trajectories, Wellbore temperature profile

요 약 : 킁(kick)이란 의도하지 않은 상황에서 지층의 유체가 유정으로 유입되는 현상이다. 이러한 킁의 발생을 방지하며 킁이 유입된 경우 빠르게 감지하고 제어하여 안전하게 제거하는 과정을 유정제어(well control)라 한다. 유정제어는 다양한 시추상황에서 발생할 수 있어 킁의 거동을 파악하고 숙지하는 것은 안전한 시추를 위해 필수적이다. 본 연구에서 이수의 종류, 시추궤도, 지층조건, 열전달 효과를 고려한 유성이수 유정제어 모델을 개발하였다. 유성이수에서는 수성이수와 비교하여 가스킁의 용해현상 때문에 유성이수의 이수부피 증가와 이를 보상해 주기 위한 초크압력이 낮다. 따라서 킁감지가 어려우며 특히 이러한 현상은 시추궤도의 수평구간이 길수록 두드러진다. 하지만 만약 유성이수에서 킁을 빠른 시간에 감지할 수 있으면 수성이수에 비해 지표에서 가해줄 여야 할 초크압력이 낮으므로 킁을 제거하는 것이 더욱 용이할 수 있다.

주요어 : 유정제어, 유성이수, 킁, 방향성 시추궤도, 시추공 온도분포

서 론

전 세계적인 에너지 수요증가와 고유가의 지속은 신규 유가스전 개발을 위한 활발한 시추활동을 야기한다. 시추의 목적은 정해진 예산 내에서 계획된 시추공의 크기로 목표심도에 도달하는 것이며, 성공적인 시추를 위해서는 유정제어(well control)가 반드시 필요하다. 유정제어란 광의의 의미에서 시추, 유정완결, 생산의 전 과정을

통하여 필요한 유정의 압력과 안정성을 확보하여 계획된 작업을 성공적으로 수행하기 위한 제반행위를 통칭한다. 협의적인 의미에서 본다면 의도하지 않은 상황에서 유체가 지층으로부터 유입되는 현상인 킁(kick)을 방지하며 킁이 유입된 경우 빠르게 감지하고 제어하여 안전하게 제거하는 과정을 말한다(Choe, 2012).

시추작업에 사용되는 이수는 주된 구성성분에 따라 수성이수(water based mud)와 유성이수(oil based mud)로 구분할 수 있다. 수성이수는 물을 기반으로 여러 가지 첨가물이 혼합되어 있으며 유성이수에 비해 가격이 싸고 사용 후 처리가 쉽다. 유성이수는 주된 구성성분이 오일상인 기저유(base oil)이므로 수성이수에 비해 윤활성이 높아 시추과정 중 가해지는 토크가 낮고 장비의 부식이 방지된다. 또한 높은 온도에서 안정하므로 고온고압환경에서 시추하거나 물과의 반응성으로 문제가 되는 세일층

2013년 3월 29일 접수, 2013년 7월 23일 심사완료

2013년 8월 16일 게재확정

1) 서울대학교 에너지시스템공학부

2) Schlumberger

*Corresponding Author(최종근)

E-mail; johnchoe@snu.ac.kr

Address; Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

이나 압연층 시추시에 사용될 수 있다.

하지만 유성이수를 사용 시 가스키이 발생하면 유입된 가스가 유성이수에 용해되기 때문에 수성이수에 비해 이 수부피의 증가속도가 느려 키크감지가 지연된다. 이렇게 용해되어 있던 가스는 기포점압력보다 낮은 압력에서 빠져나와 갑자기 팽창하므로 작업자가 대응할 시간이 짧아 때로는 유정폭발로 이어질 수 있다. 또한 유성이수는 온도, 압력, 조성에 따라 그 물성이 달라지므로 정확한 모델링을 통해 물성변화를 파악하여야 한다.

실제로 이러한 이수의 특징을 고려한 유정제어 모델링에 관한 많은 연구들이 진행되었지만 여러 한계점들이 있다. Nickens(1987)는 유정을 여러 개의 격자로 나누고 격자 내의 이수, 자유가스의 질량 및 운동량 보존방정식을 이용하여 키크와 이수의 이상유동을 모델링하였다. Nickens는 펌프유량, 지층조건, 유정제어방법 등을 변화시키며 다양한 유정제어 상황을 분석하였지만 유성이수를 고려하지 않았다.

Rommetveit와 Blyberg(1989)는 이수, 자유가스, 용해가스의 질량 및 운동량 보존방정식을 이용하여 유성이수 유정제어를 모델링하였다. 그러나 이들은 유성이수를 구성하는 기저유의 조성을 고려하지 않았다. 또한 가스키의 용해도를 계산하기 위해 제한된 압력범위에서 수행된 실험결과를 외삽하여 사용하였으므로 압력이 높은 구간에서 사용한 용해도의 신뢰도가 낮다.

기존의 이상유동모델은 수치해의 발산 및 감쇄 문제와 같은 문제점들이 발생하여 이를 개선하고자 가스키와 이수가 각각의 단상의 성질을 가지면서 완전히 섞여 있는 혼합체를 가정한 새로운 이상모델이 제시되었다(Choe and Juvkam-Wold, 1997; Choe, 2001a). 이 모델은 계산이 용이하고 이상유동모델에서 나타나는 수치해의 문제점들을 극복하였으며 기존모델과 비교하여 그 오차가 대부분 ($\pm$)5.5% 이내로 나타난다. 하지만 이 모델은 수성이수만을 고려하였으며 유정 내 온도구배를 일정하다고 가정하였다. Choe 등(2005)은 동일한 모델을 사용하여 장거리타입, 수평타입의 시추궤도에서 유정제어모델링을 수행하였지만 그 역시 수성이수만을 고려하였다.

Peterson 등(2008)은 다양한 키크 유체(dry gas, wet gas, volatile oil, black oil)의 유입을 가정하여 유성이수와 수성이수를 이용한 유정제어 모델링을 수행하였다. 하지만 시추궤도를 수직정에 한정하였고 다양한 방향성 시추궤도를 고려하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 수치해석적 안정성이 있는 Choe와 Juvkam-Wold의 모델을 기반으로 온도, 압력에 따른 가스키의 용해도와 이수의 열전달효과를 고려한 유성이수의 유정제어과정을 모델링하였다. 개발된 모델은 Peng-

Robinson 상태방정식을 통해 유성이수와 가스키의 물성변화를 정확히 예측하며 다양한 방향성 시추궤도에 적용할 수 있다.

유정제어 모델링

유성이수 유정제어 모델링은 크게 지층에서부터 키크이 유입되는 상황과 초크압력을 조절하여 키크를 제거하는 과정으로 나눌 수 있다. 이를 모식도로 나타내면 Fig. 1과 같다. 각 세부과정의 계산을 위해서는 가스키의 용해도와 유성이수의 PVT 모델링, 가스키 유입모델링이 필요하며 전 과정에서 순환이수의 온도를 알아야 하므로 시추공 온도분포 모델링이 필요하다.

시추 중 다양한 이유로 시추공저압력(BHP)이 지층압력보다 낮아지면 키크이 유입된다. 유입된 키크는 용해도에 따라 용해가스와 자유가스로 나뉜다. 가스가 용해된 유성이수와 자유가스의 물성은 상태방정식을 통해 계산한다. 이렇게 계산된 각 구간의 압력을 통해 새로운 시추공저압력이 계산되고 지층압력과 차이에 따라 키크이 유입된다.

키크를 제거하는 상황에서는 추가적인 키크를 방지하기 위해 시추공저압력을 지층의 압력과 동일하게 유지하는 일정공저압력법을 사용한다. 순환유량과 시추공의 기하를 통해 주어진 시간동안 이동한 가스키의 새로운 위치를 결정한다. 키크이 포함된 구간의 상부에서 압력을 예측하고 용해도를 계산한다. 키크유입 상황과 마찬가지로 가스가 용해된 유성이수와 자유가스의 물성을 상태방정식을 통해 계산한다. 각 구간의 압력을 더하여 시추공저압력을 얻을 수 있고 이 압력이 지층압력과 같아질 때까지 키크 상부의 압력을 반복법으로 계산한다. 키크 상부의 압력은 이수에 의한 정수압과 마찰손실, 초크에 의한 압력을 모두 포함하고 있으며 나머지 압력을 알고 있는 정보이므로 지표에서 가해주어야 할 초크압력을 계산할 수 있다.

용해도 모델링

가스키이 유성이수에 용해되는 현상을 모사하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다(O'Bryan and Bourgoyne, 1988; Silva *et al.*, 2004; Monteiro *et al.*, 2008). 하지만 기존의 연구는 기저유의 조성과 유입되는 가스의 종류를 미리 결정하고 제한된 압력범위에서 실험을 한 뒤 그 결과를 경험식으로 제시하고 있으므로 일반적인 경우에 통용되기 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 상용프로그램인 Schlumberger(社)의 PVTi를 이용하여 가스의 용해도를 계산하여 입력자료로 사용하였다. 사용자가 기저유의 조성(Table 1)과 가스의 종류를 입력하면 Fig. 2와 같이 온

Fig. 1. Well control modeling algorithm.

Table 1. Compositions of diesel oil (O'Bryan and Bourgoyne, 1988)

Carbon Number	Mol %
9	1.3997
10	2.5340
11	4.0720
12	6.5313
13	11.6477
14	12.2027
15	16.0007
16	14.3790
17	11.8823
18	8.9947
19	4.2977
20	1.7457
21	2.5613
22	1.1000
23	0.4487
24	0.2013
Molecular weight (lbm/lbm-mol)	204.2
Density at 60 ° F (ppg)	6.936

Fig. 2. Gas solubility curve.

도, 압력에 따른 용해도 곡선을 얻을 수 있으며 이 곡선을 유정제어모델링의 입력자료로 사용하였다.

PVT 모델링

유성이수는 기저유 및 각종 첨가물들로 구성되어 있으며 기저유의 비율이 가장 높다. 기저유는 다양한 탄화수소들의 혼합물로서 압력, 온도, 조성에 따라 물성이 변화한다. 특히 기저유에 가스키이 녹아있는 경우 그 양에 따라 기저유의 부피와 밀도가 변한다. 이것을 정확히 예측하기 위해 Peng-Robinson 상태방정식을 사용하였다. Peng-

Robinson 상태방정식의 일반식은 식 (1)과 같다(Peng and Robinson, 1976).

$$p = RT / (V_M - b) - a(T) / [V_M(V_M + b) + b(V_M - b)] \quad (1)$$

여기서, $a(T)$ 는 molecular attraction 인자, b 는 molecular repulsion 인자, p 는 압력, T 는 온도, R 은 일반기체상수, V_M 은 몰랄부피를 의미한다. 임계온도에서 상수 a 와 b 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$a(T_c) = 0.45724R^2 T_c^2 / p_c \quad (2)$$

$$b(T_c) = 0.0778RT_c / p_c \quad (3)$$

주어진 온도에서 상수 a 와 b 는 다음과 같이 계산된다.

$$a(T) = a(T_c) \times \alpha(T_r, w), \quad \alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226w - 0.26992w^2)(1.0 - T_r^{0.5})]^2 \quad (4)$$

$$b(T) = b(T_c) \quad (5)$$

가스키이 녹아있는 유성이수는 혼합물이므로 혼합물을 대표할 수 있는 상수 a 와 b 를 계산하여야 한다. 이는 다음과 같은 mixing rule을 사용하여 얻을 수 있다.

$$a = \sum_i \sum_j f_i f_j a_{ij}, \quad a_{ij} = (1.0 - C_{ij}) a_i^{0.5} a_j^{0.5} \quad (6)$$

$$b = \sum_i f_i b_i \quad (7)$$

여기서, p_c 는 임계압력, T_c 는 임계온도, T_r 은 현재온도와 임계온도의 비, w 는 분자의 acentric factor, f_i 는 분자의 mole %, a_{ij} 는 i 분자와 j 분자간 molecular attraction 인자, C_{ij} 는 binary interaction 계수, b_i 는 i 분자의 molecular repulsion 인자를 나타낸다. Peng-Robinson 상태방정식의 일반식을 압축인자에 관한 3차방정식으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$Z^3 - (A - C)Z^2 + (A - 3C^2 - 2C^3)Z - (AC - C^2 - C^3) = 0 \quad (8)$$

여기서, Z 는 압축인자, $A = ap / R^2 T^2$, $C = bp / RT$ 를 의미하며 반복법으로 방정식의 해를 구하여 부피계산에 사용한다.

키크유입 모델링

지층으로부터의 가스유입량은 무한 저류층에서 일정 유량의 가스생산에 의한 압력감소식을 변형하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다(Lee, 1982).

$$q_g = \frac{T_{sc} h k \Delta p}{50300 p_{sc} T \left[1.151 \text{Log} \left(\frac{kt}{1688 \phi \mu c_r r_w^2} \right) + S' \right]} \quad (9)$$

여기서, Δp 는 지층과 유정의 압력차, q_g 는 가스유입량, T 는 온도, h 는 저류층을 시추한 깊이, k 는 지층의 유체 투과율, t 는 시간, μ 는 가스점성도, r 은 유정의 반지름, ϕ 는 저류층 공극률, c_r 는 총 압축률, S 는 유정손상지수 (skin factor)를 나타낸다. 이 때 첨자 sc 는 표준조건의 온도와 압력이다(14.7 psia, 60°F).

시추공 온도분포 모델링

깊이에 따른 유정의 온도분포를 아는 것은 시추의 전 과정에서 중요하며 특히 유정제어 상황에서는 애눌러스로 유입된 가스키이 온도에 따라 부피가 달라지므로 정확한 온도 모델링이 필요하다. 실제로 애눌러스에서 순환하는 이수의 온도는 단순히 지층의 온도구배에 따른 온도와는 차이가 있으며 유체의 대류현상, 주변 지층 및 시추파이프 내의 유체와의 열전달에 영향을 받는다. Holmes와 Swift(1970)는 이러한 열전달을 정상상태로 가정하고 이수순환 유량, 순환 유체특성, 지층특성, 시추공의 깊이에 따른 애눌러스 온도분포를 제시하였고 이를 본 연구에서 사용하였다.

결과 및 토의

이수 종류별 유정제어 거동분석

동일한 지층을 수성이수와 유성이수를 사용하여 시추하였을 때 동일시간(3분)동안 유입된 키크를 감지하고 제거하는 과정을 비교하였다. 사용된 입력자료는 Choe(2001b)의 자료를 바탕으로 유성이수에 적용될 수 있게 재구성하였으며 Table 2와 같다. 시추공의 온도분포는 Fig. 3과 같으며 심도가 깊어질수록 순환이수의 온도는 지층구배에 의한 온도보다 낮고, 지표근처에 가까울수록 지층구배 온도보다 높다. 이는 저온의 이수가 시추공하부에서 지열에 의해 데워지기 때문이다. 유정제어방법으로는 2회의 이수순환을 통해 가스키를 제거하는 시추자방법을 사용하였다.

Fig. 4는 시간에 따른 이수부피증가를 보여준다. 수성 이수의 경우에는 유입된 가스키이 자유가스로 존재하기

Table 2. Default input data

Well trajectory type	Vertical	Pump rate while drilling, <i>gpm</i>	337
Well vertical depth, <i>ft</i>	10,000	Pump rate while kill operation, <i>gpm</i>	168
Water depth, <i>ft</i>	1,000	Formation over pressure, <i>psi</i>	520
Mud density, <i>ppg</i>	14	Gas specific gravity	0.554
Base oil type	Diesel oil	Formation permeability, <i>md</i>	250
Length of HWDP, <i>ft</i>	1,000	Formation skin factor	2
Length of drill collars, <i>ft</i>	600	Formation porosity, fraction	0.25
ID of the last casing, <i>in</i>	11	Rate of penetration, <i>ft/hr</i>	60
Open hole diameter, <i>in</i>	9.875	Surface temperature, $^{\circ}F$	59.5
OD and ID of drill pipe, <i>in</i>	5×4.214	Mud injection temperature, $^{\circ}F$	75
OD and ID of HWDP, <i>in</i>	5.5×3	Formation temperature grad., $^{\circ}F/100ft$	1.127
OD and ID of drill collar, <i>in</i>	7.5×2	Mud specific heat, <i>Btu/lb/°F</i>	0.4
ID of choke line, <i>in</i>	4	Overall heat transfer coeff. across drill pipe, <i>Btu/hr/ft²/°F</i>	30
ID of marine riser, <i>in</i>	19	Overall heat transfer coeff. across wellbore, <i>Btu/hr/ft²/°F</i>	1.0

Fig. 3. Temperature profile in the annulus. **Fig. 5.** Surface choke pressures needed for OBM and WBM. **Fig. 4.** Pit volume gains for OBM and WBM.

때문에 이수부피증가가 크다. 하지만 유성이수의 경우에는 가스키이 이수에 용해되면서 이수의 팽창현상(O'Bryan and Bourgoyne, 1990)으로 인해 이수부피가 약간 증가하지만 그 증가폭이 수성이수의 경우보다 작다. 가스가 용해된 이수는 지표로 순환하면서 압력이 감소하면 녹아 있던 가스가 빠져나오면서 팽창하여 이수부피가 증가한다. 가스팽창은 유정 내의 정수압을 감소시키므로 추가적인 키크를 방지하기 위해 지표에서 더 높은 초크압력이 요구된다. 수성이수의 경우 가스키이 용해되지 않으므로 유정 내에 자유가스의 양이 많아 초크압력의 최대값이 높다. 또한 자유가스의 상승속도로 인해 이수보다 빨리

유동하여 초크압력 최대값의 시기가 유성이수에 비해 일찍 나타난다(Fig. 5).

다양한 시추궤도에 따른 유정제어 거동분석

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 동일한 목표층을 시추하더라도 시추궤도는 다양하게 구성될 수 있다. 이 때 빌드구간(build section)은 시추공의 경사각을 증가시키는 것을 의미하고 홀드구간(hold section)은 경사를 유지하는 것을 의미한다. 세 가지 종류의 유정 궤도(수직정, 방향정, 수평정)에 대해 시추작업 중 가스키이 발생하였을 때 키의 거동을 분석하였다. 또한 이수의 종류에 따라 나타나는 차이점을 분석하였다. 기본적인 입력자료 및 지층정보는 Table 2와 같다.

Choe 등(2005)은 수성이수를 사용하여 궤도에 따른 이수부피증가와 초크압력의 변화를 분석하였다. 수성이수에서는 유입된 가스키이 용해되지 않고 유정에서 정수압을 감소시키므로 궤도에 따라 초기 가스유입량이 달라진다. 따라서 키이 지상에 도달했을 때 가해주어야 할 최대 초크압력의 크기가 다르며 그 시점은 궤도의 측정깊이가 깊수록 늦어진다.

Fig. 7과 Fig. 8은 유성이수를 사용한 경우 궤도에 따른 이수부피 증가와 초크압력의 변화를 보여준다. 유성이수의 경우 유입된 가스키이 용해되므로 궤도에 따른

정수압 감소의 차이가 크지 않다. 따라서 궤도별 초기 이수부피증가가 비슷하게 나타난다. 시추궤도 내의 수평구간에서는 키상부에 가해지는 정수압이 동일하므로 용해가스의 방출 및 자유가스의 팽창이 제한되어 이 구간을 지나는 동안 이수부피증가가 일정하게 나타난다(Fig. 7). 이러한 현상은 키감지를 더욱 어렵게 만든다.

수성이수의 초크압력 변화양상은 가스키이 지나는 유정 내 기하변화에 민감한 반면 유성이수의 경우에는 대부분의 가스가 용해되어 있으므로 키이 지표에 도달할 때 까지 큰 변화를 보이지 않는다(Fig. 8). 수성이수와 마찬가지로 궤도의 측정깊이에 따라 초크압력의 최대시점이 달라진다. 수성이수의 경우 자유가스의 상승속도(Hasan and Kabir, 1988)로 인해 이수보다 빨리 유동하지만 유성이수에서는 대부분의 가스가 이수과 함께 유동한다. 따라서 유성이수에서는 측정깊이의 차이에 따른 초크압력의 최대시점 차이가 명확하게 나타난다.

Fig. 6. Various well trajectories for the same vertical depth (Choe, 2012).

Fig. 7. OBM pit volume gains of the three trajectory types.

Fig. 8. OBM choke pressures of the three trajectory types.

결 론

이 연구에서는 유성이수를 사용한 유정제어과정을 모델링하였다. 개발된 모델을 다양한 유정제어 상황에 적용한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 본 연구에서 개발된 모델은 이수의 종류, 시추궤도, 지층조건, 열전달 효과를 고려한 다양한 유정제어 상황에 적용될 수 있다.
2. 유성이수를 사용한 유정제어 시 가스킵이 유입되었을 때 이수부피증가가 수성이수를 사용한 경우보다 현저히 낮으므로 킵감지에 유의해야 한다. 하지만 유입된 킵의 양이 같다면, 수성이수에 비해 유성이수의 최대 이수부피증가와 초크압력이 낮으므로 킵을 제거하는 것이 더 용이할 수 있다.
3. 유성이수에서는 유입된 대부분의 가스가 용해되므로 수성이수와는 달리 시추궤도에 따른 초기 킵 유입량의 차이가 크지 않다. 또한 유입된 가스가 시추궤도 내 수평구간을 지날 때는 가스의 방출 및 부피팽창이 제한되므로 이수부피증가를 이용한 킵감지가 지연된다.
4. 유성이수의 경우 유정의 기하변화에 따른 초크압력의 증감이 수성이수에 비해 적다. 또한 대부분의 가스가 이수와 함께 유동하므로 측정깊이의 차이에 따른 초크압력의 최대시점이 명확하게 나타난다.

사 사

이 연구는 연구과제(2010201010092C, 2011201030001C, 10038618, 10042556)로 지원받았고 공학연구소에서 관리되어 이에 감사드립니다.

References

Choe, J. and Juvkam-Wold, H.C., 1997, "A Modified Two-Phase Well Control Model and Its Computer Applications as a Training and Educational Tool," *SPE Computer Applications*, Vol. 9, No. 1, pp. 14-20.

Choe, J., 2001a, "Advanced Two-Phase Well Control Analysis," *J. of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 40, No. 5, pp. 39-47.

Choe, J., 2001b, "A Well Control Simulator with Hardware Interface," *J. of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-8.

Choe, J., Schubert, J.J. and Juvkam-Wold, H.C., 2005, "Well Control Analyses on Extended Reach and Multilateral Trajectories," *SPE Drilling & Completion*, Vol. 20, No. 2, pp. 101-108.

Choe, J., 2012, *Offshore Drilling Engineering*, 1st Ed., 2nd Print, CIR Press, Seoul, Korea, pp. 217-257.

Hasan, A.R. and Kabir, C.S., 1988, "Predicting Multiphase Flow Behavior in a Deviated Well," *SPE Production Engineering*, Vol. 3, No. 4, pp. 474-482.

Holmes, C.S. and Swift, S.C., 1970, "Calculations of Circulating Mud Temperatures," *J. of Petroleum Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 670-674.

Lee, J.W., 1982, *Well Testing*, 1st Ed., SPE Textbook Series, Dallas, Texas, USA, pp. 76-85.

Monteiro, E.N., Ribeiro, P.R. and Lomba, R.F.T., 2008, "Study of the PVT Properties of Gas-Synthetic Drilling Fluid Mixtures Applied to Well Control Operations," *Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, Sept. 21-24.

Nickens, H.V., 1987, "A Dynamic Computer Model of a Kicking Well," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 159-173.

O'Bryan, P.L. and Bourgoyne, A.T., 1988, "An Experimental Study of Gas Solubility in Oil-Based Drilling Fluids," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 33-42.

O'Bryan, P.L. and Bourgoyne, A.T., 1990, "Swelling of Oil-Based Drilling Fluids Resulting From Dissolved Gas," *SPE Drilling Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 149-155.

Peng, D.Y. and Robinson, D.B., 1976, "A New Two-Constant Equation of State," *Industry and Engineering Chemistry: Fundamentals*, Vol. 15, No. 1, pp. 9-64.

Peterson, J., Rommetveit, R., Bjorkevoll, K.S. and Froyen, J., 2008, "A General Dynamic Model for Single and Multiphase Flow Operations during Drilling, Completion, Well Control and Intervention," *Proc. of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, Aug. 25-27.

Rommetveit, R. and Blyberg, A., 1989, "Simulation of Gas Kicks during Oil Well Drilling," *Modeling, Identification and Control*, Vol. 10, No. 4, pp. 213-225.

Silva, C.T., Mariolani, J.R.L., Bonet, E.J., Lomba, R.F.T., Santos, O.L.A. and Ribeiro, P.R., 2004, "Gas Solubility in Synthetic Fluids: A Well Control Issue," *Proc. of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, Sept. 26-29.

이 태 엽

2011년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사
2013년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 공학석사

현재 LG상사 석유사업부 사원
(E-mail; tylee@lgi.co.kr)

이 경 북

2009년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부 공학사

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정
(E-mail; book0108@snu.ac.kr)

성 국 주

2010년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사
2012년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 공학석사

현재 Schlumberger Oilfield Services Drilling Engineer
(E-mail; KSung@slb.com)

최 종 군

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학석사
1995년 Texas A&M University 공학박사

현재 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수
(E-mail; johnchoe@snu.ac.kr)