



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](#)

공학석사 학위논문

이중구배 시추시스템에서의  
유성이수 유정제어 모델링

**Well Control Modeling of Oil Based Mud for  
Dual Gradient Drilling System**

2017년 2월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
박재용

이중구배 시추시스템에서의  
유성이수 유정제어 모델링

**Well Control Modeling of Oil Based Mud for  
Dual Gradient Drilling System**

지도교수 최 종 근

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017 년 2 월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
박 재 용

박재용의 공학석사 학위논문을 인준함

2017 년 2 월

위 원 장           박  형  동           (인)

부위원장           최  종  근           (인)

위      원           송  재  준           (인)

## 초 록

심해시추 신기술인 이중구배시추의 현장적용을 위해서는 유정제어 연구가 필수적이다. 유성이수는 온도, 압력, 조성에 따라 이수밀도가 변하며 가스용해성으로 킁감지가 지연되는 문제점이 있다. 본 연구에서는 이런 유성이수의 특징을 반영한 이수모델을 사용하여 이중구배 시추시스템의 유정제어 모델을 개발하였다.

지상펌프유량, 이수점도, 이수종류, air gap 높이에 따른 U-tubing 현상을 분석하였다. 펌프유량이 시스템 최대 자유낙하 유량보다 작은 경우는 시추파이프 내부를 이수로 완전히 채우지 못해 시스템 내의 유체를 순환시키는 힘이 줄어들어 천이유량이 달라진다. 높은 이수점도는 지표면 회수유량을 감소시켜 시스템 안정화를 지연시킨다. 하지만 동일한 이수밀도와 점도의 조건에서는 이수종류와 air gap의 영향은 미미하였다.

천이과정 중에 킁 발생 시 지표면 회수유량이 증가하며 추가적으로 지상 이수부피 변화를 동시에 비교하면 킁감지에 효과적이다. 유입된 가스킁이 유성이수에 용해됨으로 수성이수 보다 지표면 회수유량 증가폭이 줄어들어 킁감지가 지연될 가능성이 높다. 따라서 유성이수 사용 시 유량변화의 관찰이 중요하다. 제안된 모델은 유성이수를 사용한 이중구배 시추시스템의 유정제어에 효과적으로 적용될 수 있다.

**주요어** : 이중구배시추, 심해, 해양시추, 유성이수, 유정제어, 킁감지

**학 번** : 2015-21317

# 목 차

초 록 .....	i
목 차 .....	ii
List of Tables .....	iv
List of Figures.....	v
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경.....	1
1.2 기존연구.....	8
1.3 연구목적.....	10
제 2 장 이중구배 시추시스템 .....	11
2.1 시스템의 특징 .....	11
2.2 U-tubing 현상.....	18
2.3 킥감지 방법.....	23
제 3 장 유성이수 모델링 .....	28
3.1 유성이수 밀도모델.....	28
3.2 가스용해도 모델.....	33
3.3 가스킥 유무에 따른 유성이수 밀도변화 .....	35
제 4 장 연구결과 .....	40
4.1 유정형상 정보와 기본 입력자료.....	40
4.2 이수종류에 따른 U-tubing 현상 분석.....	42
4.3 Air gap 높이 고려에 따른 U-tubing 현상 분석 .....	44

4.4	이수점도에 따른 U-tubing 현상 분석.....	46
4.5	지상 이수펌프 순환유량에 따른 U-tubing 현상 분석.....	48
4.6	가스킵이 유입된 상황에서 유정 제어 분석.....	51
제 5 장	결 론.....	54
참고 문헌	.....	56
ABSTRACT	.....	62

## **List of Tables**

Table 1.1 Deepwater drilling problems .....	2
Table 1.2 Advantages of oil based mud over water based mud .....	7
Table 2.1 Comparison of kick detection methods .....	24
Table 3.1 Default input data for well geometry .....	36
Table 3.2 Volume fraction and density for mud compositions .....	37
Table 3.3 Hydrocarbon compositions of No. 2 diesel oil .....	37
Table 4.1 Default input data for this study .....	41

## List of Figures

Fig. 1.1 Effects of increasing water depth on the drilling window .....	2
Fig. 1.2 Riserless mud recovery system.....	4
Fig. 1.3 Subsea mudlift drilling system.....	5
Fig. 2.1 Pressure gradient and casing points for conventional drilling and dual gradient drilling.....	12
Fig. 2.2 Types of dual gradient drilling system .....	14
Fig. 2.3 Configuration of the subsea mudlift drilling system.....	15
Fig. 2.4 Subsea mudlift pump (GE MaxLift 1800 pump model).....	15
Fig. 2.5 Drill string valve .....	17
Fig. 2.6 U-tubing effect in dual gradient drilling system .....	18
Fig. 2.7 Volumetric flow rate and mud level due to U-tubing and fill up .....	22
Fig. 2.8 Comparison of surface return flow rates and surface pit volume losses with and without a kick.....	27
Fig. 3.1 Comparison of compositions for WBM and OBM .....	28
Fig. 3.2 Four sections in an annulus during well control operations .....	29
Fig. 3.3 Gas solubility curve for this study .....	33



Fig. 3.4 Static OBM density with and without a kick .....	39
Fig. 4.1 Well geometry data for this study .....	40
Fig. 4.2 Comparison of U-tubing and fill up with WBM and OBM.....	43
Fig. 4.3 Comparison of U-tubing and fill up with and without air gap.....	45
Fig. 4.4 Comparison of U-tubing and fill up with different mud viscosities..	47
Fig. 4.5 Comparison of U-tubing and fill up with different flow rates .....	50
Fig. 4.6 Comparison of surface return flow rates and surface pit volume losses for WBM and OBM with and without a kick.....	53

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

심해저의 석유가스 탐사 및 생산을 목표로 이루어지는 심해 해양시추 작업을 기존의 전통적인 육상시추 작업이나 천해시추 작업과 비교하면 여러 가지 문제점들이 나타난다(Table 1.1).

이러한 문제들 중에서 두 가지 주요한 문제가 있다. 첫 번째는 수심이 깊어짐에 따라 해양라이저의 길이와 크기가 증가한다. 그 결과 라이저 내부의 이수부피가 전체 이수순환시스템의 80%을 차지할 만큼 급격히 늘어난다. 따라서 이수액의 준비 및 장비용량, 해양라이저의 중량 등이 증가한다. 이로 인해 더 큰 사이즈의 시추선이 필요하게 되고 전체 시추비용을 증가시킨다.

두 번째로 천부 해양지층과 달리 심해저 지층은 해수와 미고결 천부 해양지층의 영향으로 공극압과 파쇄압의 차이가 작은 특징이 있다(Fig. 1.1). 따라서 케이싱 설치개수가 늘어나며 유정직경이 작아져 일일생산량이 감소한다. 이는 유정에서 회수될 수 있는 개발이익이 감소함을 의미한다.

Table 1.1 Deepwater drilling problems

(해양시추공학, 최종근, 2011)

1	Huge weight and space requirements
2	Large mud volume in a riser
3	Severe stresses in a riser
4	Extensive buoyancy units
5	Difficult station keeping
6	Long tripping time
7	Numerous casing points required
8	Narrow gap between pore and fracture pressures
9	Marginal well control practices
10	Existence of inter-related problems
11	Very limited rigs
12	Huge day rate of available rigs
13	Inability to drill an adequate hole size

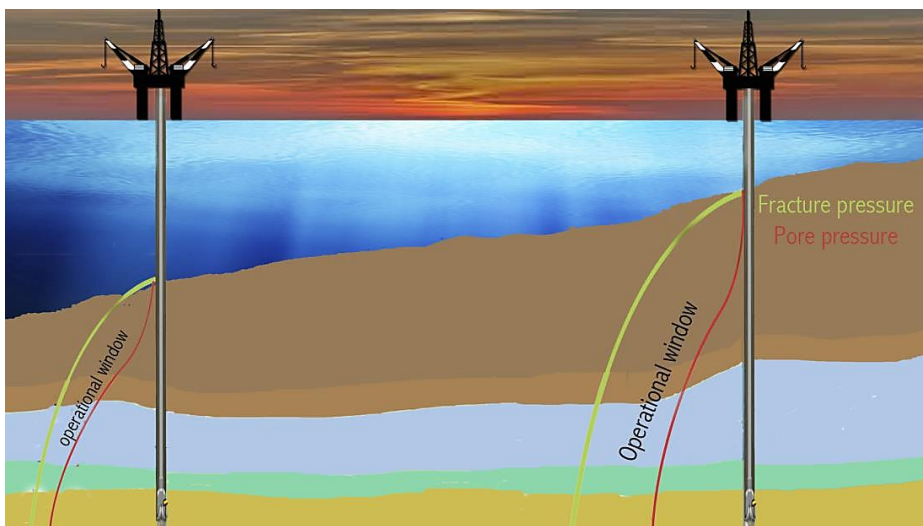


Fig. 1.1 Effects of increasing water depth on the drilling window

(Arrouj, 2014)

심해시추 문제점을 해결하기 위한 여러 노력들 중의 하나로 이중구배시추(dual gradient drilling) 기술이 개발되었다. 이 기술의 기본개념은 이미 1960 년대에 고안되었으며 1990 년대에 들어 본격적으로 연구가 진행되었다. 2001 년에는 처음으로 멕시코 만에서 현장시추에 성공하였다. 이후에 AGR 의 Riserless mud recovery system(Fig. 1.2), Chevron, GE, Pacific drilling 의 Subsea mudlift drilling system(Fig. 1.3) 기술 등이 활발하게 연구되었다. 이러한 노력의 결과로 이중구배시추 기술은 상용화 단계를 목전에 두고 있으며, 앞으로 시추산업에 잠재적 영향력이 매우 크다.

이런 신기술의 현장적용을 위해서는 많은 연구가 필요하며 그 중에서도 유정 제어(well control)방법은 필수적이다. 의도하지 않은 상황에서 지층의 유체가 유정으로 유입되는 현상을 킁(kick)이라 하며, 킁이 제어되지 않은 상태로 지상으로 유출 시 유정폭발(blowout)로 이어진다. 이러한 킁의 발생을 방지하고 유입된 킁을 빠르게 감지, 제어하여 안전하게 제거하는 과정을 유정제어라 한다. 따라서 안전하고 성공적인 이중구배시추 작업을 위해서는 유정제어에 대한 연구가 반드시 필요하다.

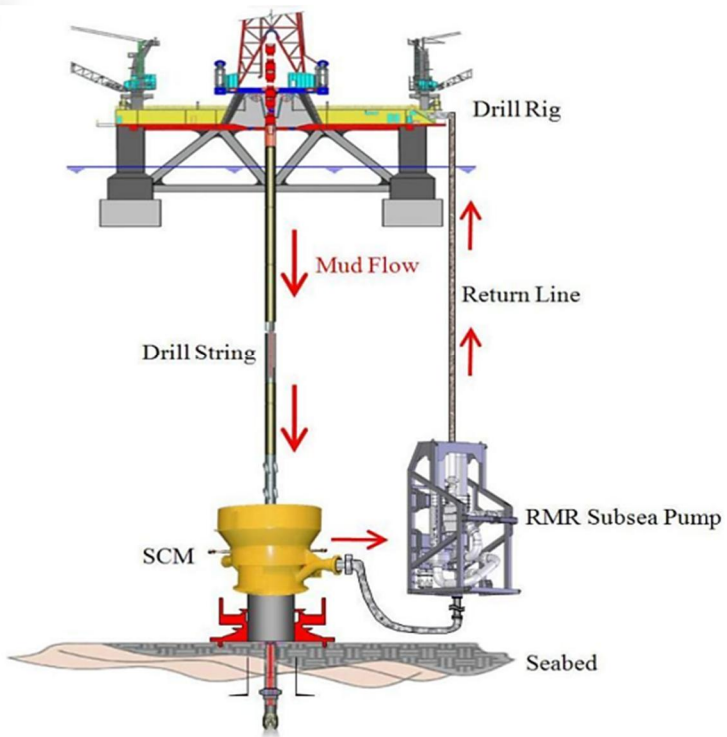


Fig. 1.2 Riserless mud recovery system  
 (IADC Dual gradient drilling workshop, 2011)

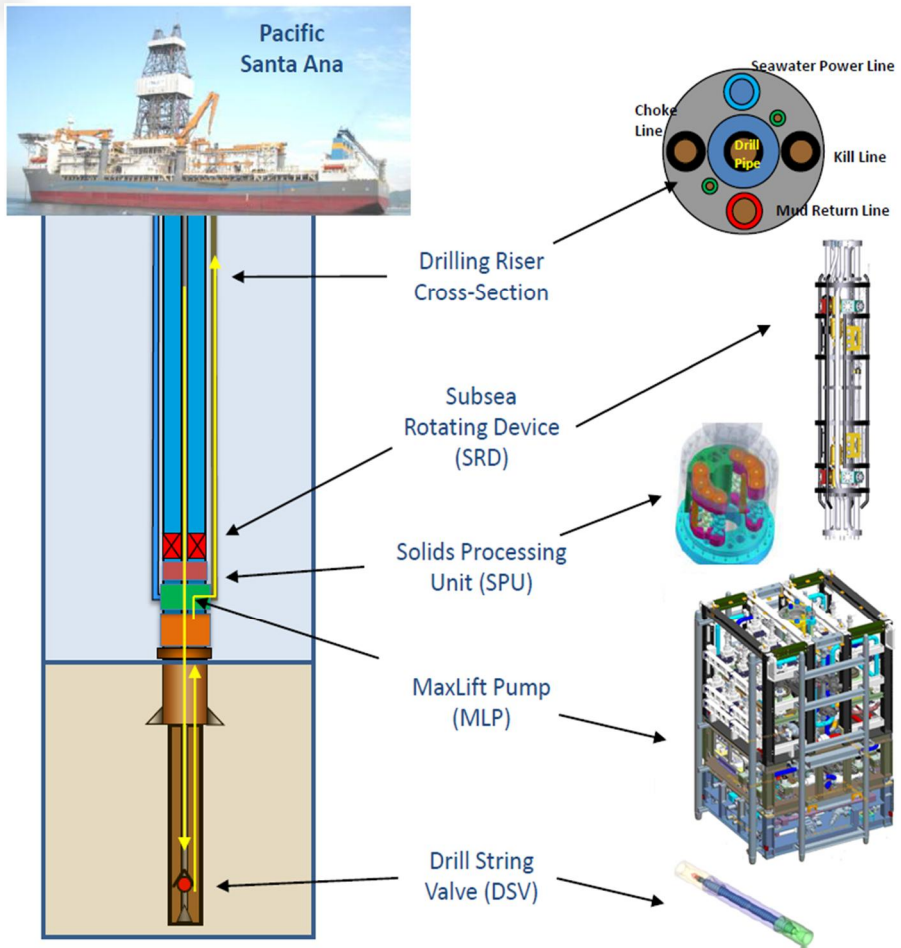


Fig. 1.3 Subsea mudlift drilling system  
(IADC Dual gradient drilling workshop, 2011)

심해심부 시추와 같이 지층의 심도가 깊어지면 온도와 압력이 증가한다. 압력이 10,000 psi, 온도가 300 °F 이상이면 고압고온(high pressure high temperature, HPHT) 환경이라 한다. 고압고온 환경에서는 수성이수의 물이 증발하거나 각종 첨가제가 물과 분리되어 이수의 기능을 할 수 없는 상황이 발생한다. 따라서 고압고온 환경에서는 수성이수(water based mud, WBM) 대신 유성이수(oil based mud, OBM)가 사용된다.

유성이수의 특징은 높은 온도안정성으로 고압고온 환경의 시추에 적합하며, 물과의 낮은 반응성으로 셰일층이나 암염층 시추에 사용될 수 있다. 수성이수에 비해 윤활성이 좋아 유정내부 마찰을 감소시켜 시추파이프가 이수막에 고착되는 현상(differential sticking)을 감소시키고 장비 부식문제도 줄일 수 있다(Table 1.2).

하지만 유성이수를 사용한 시추 시 가스킵이 유입될 경우 유성이수에 가스가 녹는 특징으로 인해 수성이수에 비해 이수부피의 증가속도가 느려 킵감지가 지연된다. 또한 유성이수는 온도, 압력, 조성에 따라 밀도가 변하기 때문에 이수의 정수압을 통해 유정압력을 조절하는데 어려움이 있다. 따라서 유성이수를 사용한 경우 정확한 모델링을 통해 가스용해도와 유성이수 밀도변화를 반영해야 한다.

Table 1.2 Advantages of oil based mud over water based mud  
(Guntis, 2011)

1	High rate of penetration
2	Long bit life
3	Excellent shale inhibition
4	Thermally stable
5	Low reservoir damage
6	High lubricity, low torque
7	Low corrosion
8	Gauge hole
9	Low fluid loss
10	Reduced chance of stuck pipe
11	High solids tolerance
12	Salt not dissolved
13	Good coring fluid



## 1.2 기존연구

이중구배시추의 유정제어방법과 유성이수 모델링에 관한 여러 연구들이 진행되었지만 각각의 한계점들이 있다.

Gault(1996)는 해저면에 펌프를 설치하여 해양라이저를 통하지 않고 별도의 이수회수라인으로 이수와 암편을 순환시키는 Riserless drilling 시스템에 대한 개념을 소개하였다. 하지만 해당 연구는 이중구배시추에 대한 개념과 기본 디자인만 제안하고, 킥을 감지하고 제어하는 유정제어에 대한 방법은 정립되지 않았다.

Choe 와 Juvkam-Wold(1998)는 이중구배 시추시스템에서 지상펌프의 순환유량과 지표면 회수유량 차이를 비교하여 킥을 감지하는 유정제어방법을 제안하였다. 또한 지표면 회수유량을 정확히 예측하기 어려운 천이과정(U-tube or fill-up) 중에 지표면 회수유량과 지상 이수부피 변화를 비교하여 킥을 감지하는 방법도 제안을 하였다. 하지만 해당 연구는 유성이수가 아닌 비압축성 수성이수만을 사용하여 유성이수를 이용한 유정제어 모델링에 적용할 수 없다.

Sung 등(2012), Lee 등(2013)은 가스용해도와 킥 혼합물의 밀도변화를 고려한 유성이수 유정제어 모델을 제안하였다. 온도와 압력에 따른 킥 혼합물의 밀도를 계산하기 위해 Peng-Robinson 상태방정식(Peng 과 Robinson, 1976)을 사용하였다. 하지만 해당 연구는 킥과 이수혼합물 구간에 대해서만 밀도변화를 고려하였고,

시추공에서 더 긴 구간을 차지하는 킱이 혼합되지 않은 이수구간의 밀도변화는 고려하지 않았다.

An 등(2015)은 Standing-Katz 상태방정식(Standing 과 Katz, 1942)을 사용하여 이수구간의 밀도변화를 고려한 유성이수 유정제어 모델을 제안하였다. No. 2 diesel oil 기반의 유성이수 밀도를 실험자료(McMordie 등, 1982)와 비교하여 이수밀도식을 선정하여 온도, 압력, 조성에 따른 이수의 밀도변화를 고려하여 킱거동을 분석하였다. 하지만 해당 연구는 전통적 시추시스템에 대한 유정제어방법을 분석하여 이중구배시추 유정제어 모델링에는 적용할 수 없다.

### 1.3 연구목적

본 연구에서는 이중구배 시추시스템에서의 유정제어 모델링과 유성이수 밀도 모델링을 결합하고자 한다. 본 연구의 주요 목적은 아래와 같다.

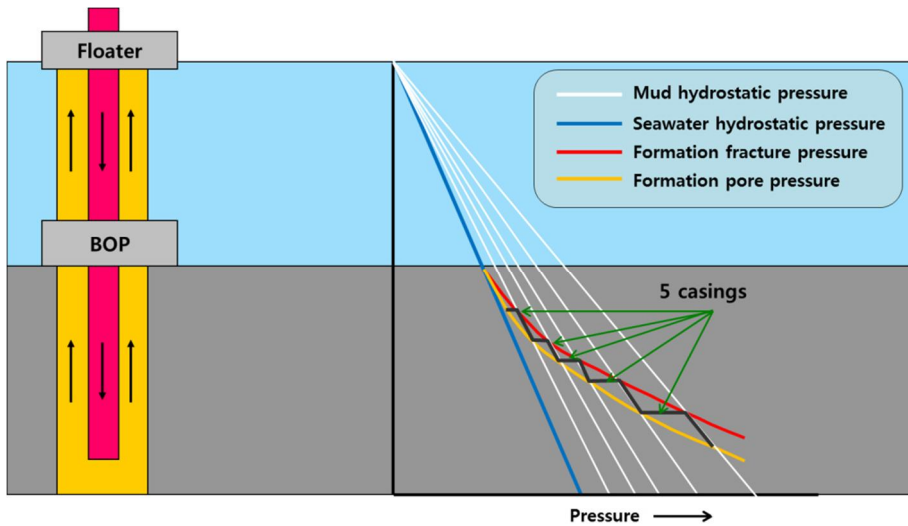
- 이중구배 시추시스템의 특징과 U-tubing 현상의 주요인자 분석
- 이중구배 시추시스템의 킥감지 방법 분석
- 온도, 압력, 조성에 따른 유성이수의 밀도변화를 고려한 유성이수 모델링
- 가스킥 용해도를 반영한 유성이수 모델링
- 상기 사항을 반영하여 수성이수와 유성이수를 사용하였을 때 이중구배 시추시스템에서의 킥감지 방법 분석

## 제 2 장 이중구배 시추시스템

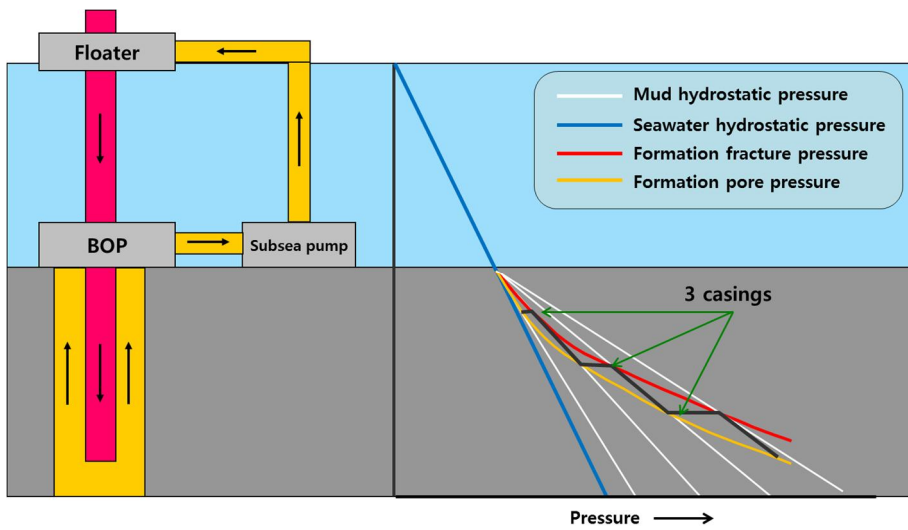
### 2.1 시스템의 특징

이중구배시추는 그 이름에서 유추할 수 있듯이 애널리스 내부의 압력구배가 두 가지의 다른 형태로 나타난다. Fig. 2.1 은 전통적인 해양라이저 시추시스템과 이중구배 시추시스템의 압력구배 차이를 나타낸다. 전통적인 해양라이저 시추시스템의 압력구배는 시추선에서 시추공 바닥까지 이수밀도에 비례하여 일정하다.

이에 반해 이중구배 시추시스템의 특징은 크게 3 가지이다. 첫 번째로 시추선에서 해저면까지의 압력구배는 해수의 밀도구배와 동일하다. 두 번째로 해저면 하부에서 시추공 바닥까지의 압력구배는 시추이수의 밀도구배와 같다. 세 번째로 해저면 펌프를 이용하여 해저면 위치의 애널리스 압력을 해수로 인한 정수압과 같은 값으로 인위적으로 조절하는 것이다. 여기서 애널리스 압력은 해저면 펌프의 흡입압력과 같다. 따라서 시추공압력을 공극압과 파쇄압 사이에 더 용이하게 유지시킬 수 있고, 케이싱 설치개수를 줄일 수 있다.



(a) Conventional drilling



(b) Dual gradient drilling

Fig. 2.1 Pressure gradient and casing points for conventional drilling and dual gradient drilling

현재까지 개발된 이중구배시추 기술은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 Pre-BOP 방식으로 BOP 설치 전 top-hole drilling 에서 이중구배시추를 적용하는 것이다. 두 번째는 Post-BOP 방식으로 BOP 설치 후의 일반적인 시추과정에서 이중구배시추를 적용하는 것이다.

Post-BOP 방식은 크게 3 가지로 나뉜다. 먼저, 첫 번째는 해저면 펌프방식(Subsea mudlift drilling)으로 해저면에 이수펌프를 설치하여 이수를 시추선까지 순환시키는 방법이다. 두 번째는 시추액 희석(dilution)방식으로 이수를 희석시켜 애놀러스의 압력구배를 낮게 만드는 것이다. 세 번째는 라이저 중간에 별도의 이수회수라인을 두고 라이저 애놀러스 내부의 이수높이를 조절하여 애놀러스의 압력을 낮추는 방법이다.

이러한 방법들을 정리해보면 이중구배시추 기술의 종류는 Fig. 2.2 와 같다. 본 연구에서는 가장 처음 현장시추에 성공하였고 오랫동안 연구가 이루어진 해저면 펌프방식을 이용하여 연구를 진행하였다.

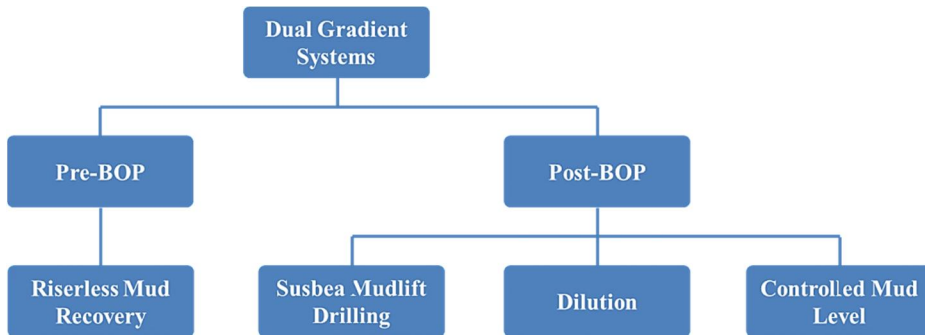


Fig. 2.2 Types of dual gradient drilling system

해저면 펌프방식의 시스템구성도는 Fig. 2.3 과 같으며 전통적인 시추방식과 비교하여 다른 구성요소들은 다음과 같다. 먼저 해저면 펌프(mud lift pump, Fig. 2.4)는 시스템의 가장 핵심적인 장치로서 애놀러스를 통해 올라온 이수와 압편을 별도의 회수라인(return line)을 통해 시추선까지 운반시키는 역할을 한다.

정상적인 시추 상황에서는 펌프는 자동모드로 동작하는데, 이 모드에서는 스스로 펌프출력을 조절하면서 펌프로 유입되는 이수압력과 배출되는 이수압력을 각각 일정하게 유지시킨다(constant pressure mode). 유정제어 상황에서는 펌프가 일정한 유량을 배출시키는 모드(constant flow rate mode)로 전환시켜 운전을 한다. 이를 통해 애놀러스 내부압력이 높아지면서 더 이상의 킥유입을 막을 수 있다.

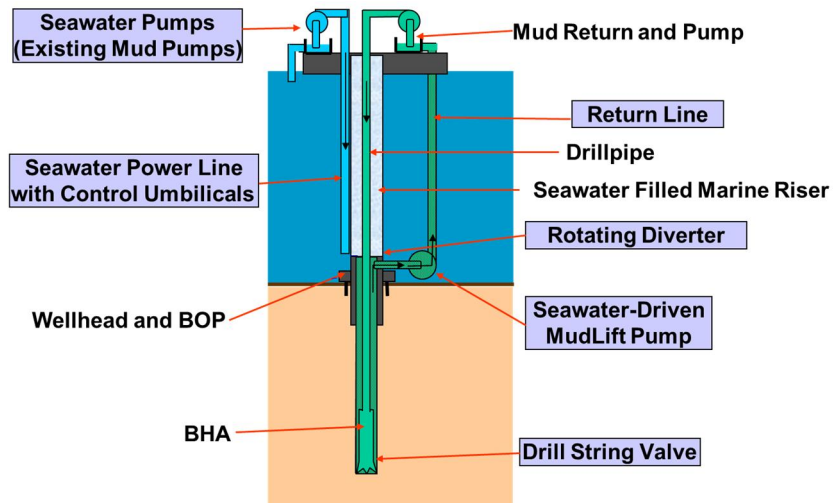


Fig. 2.3 Configuration of the subsea mudlift drilling system  
(IADC Dual gradient drilling workshop, 2011)

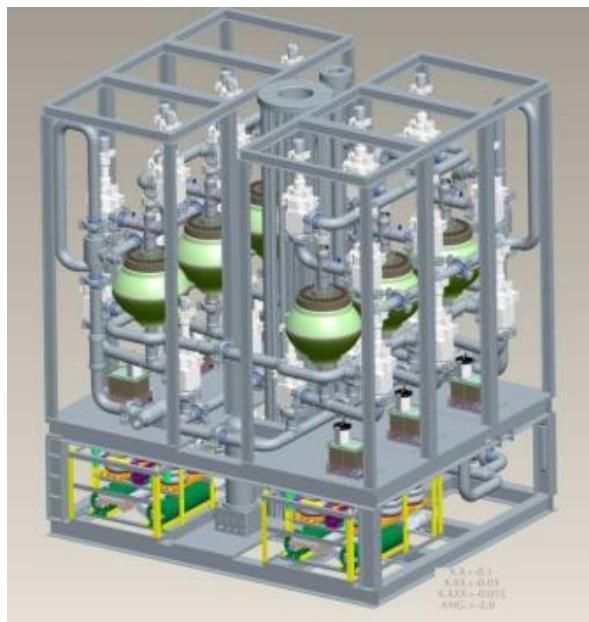


Fig. 2.4 Subsea mudlift pump (GE MaxLift 1800 pump model)  
(Stress engineering services Inc., 2011)



해저면 펌프는 해수를 작동유로 사용하는 다이어프램(diaphragm) 방식이며, 시추선에 설치된 해수펌프(seawater pumps)를 통해 지상에서 해수를 가압시켜 라이저 내 공급라인(seawater power line)을 통해 해저면 펌프에 공급한다. 펌프를 작동시키고 난 뒤의 해수는 시추선으로 회수되지 않고 바다로 배출된다.

Rotating diverter 는 애놀러스 내부의 이수를 라이저 내부의 해수와 섞이지 않게 해주는 장치로서 일반적으로 회전하는 BOP 와 유사한 형태를 가지고 있다.

Drill string valve(DSV) 역시 이중구배 시추시스템에서만 보이는 매우 특징적인 장치이다(Fig. 2.5). DSV 는 이중구배시추에서 필수적인 구성요소는 아니지만 시추작업자의 편의와 시추작업의 효율성을 위해 고안되었다. DSV 는 일차적으로 이중구배시추 작업 시에 필연적으로 발생할 수 밖에 없는 U-tubing 현상을 제어하기 위해 만들어졌다. DSV 는 스프링으로 작동되는 체크밸브(spring-loaded check valve) 방식의 밸브로서, bottom hole assembly(BHA) 상부에 설치되어 지상 이수펌프를 정지하더라도 시추파이프 내부의 이수가 애놀러스 내부로 흘러가는 유동을 막는 역할을 한다.

DSV 를 사용할 경우는 지상펌프를 정지시키고 BOP 를 닫아 시추공을 폐쇄(well shut-in)할 수 있어 전통적인 시추작업의 유정제어 방법과 동일하다. 하지만 실제 시추작업 시에는 DSV 가 고장이 나거나 제대로 작동되지 않을 경우도 있으므로, 시추작업자는 DSV 가 없는 상황에서도 유정을 제어할 수 있도록 반드시 훈련이

되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 DSV 가 없는 상황에서 킥을 감지하는 방법을 연구하였다.

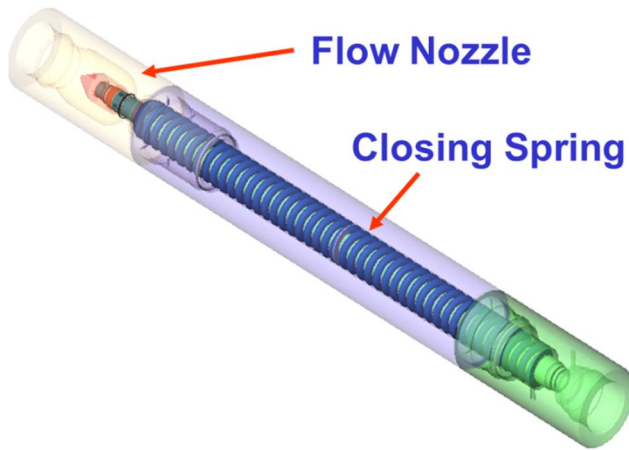


Fig. 2.5 Drill string valve  
(IADC Dual gradient drilling workshop, 2011)

## 2.2 U-tubing 현상

이중구배 시추시스템은 해저면 펌프의 흡입압력을 해수로 인한 정수압과 같은 값을 가지도록 인위적으로 조절한다. 하지만 실제 사용되는 이수밀도가 해수밀도보다 매우 높기 때문에 같은 수직깊이의 시추파이프 내부 정수압은 애놀러스 정수압보다 훨씬 크다. 따라서 지상 이수펌프를 정지했을지라도 애놀러스 압력을 계획한 대로 유지하기 위해 해저면 펌프를 통해 이수를 지상으로 계속 순환시켜야 한다. 이를 U-tubing 현상이라고 한다. 이 현상을 보다 쉽게 이해하기 위해 이중구배 시추시스템에서 유체가 지나가는 시추파이프, 드릴비트, 애놀러스를 연결하여 U-tube 로 개념화한 것이 Fig. 2.6 이다.

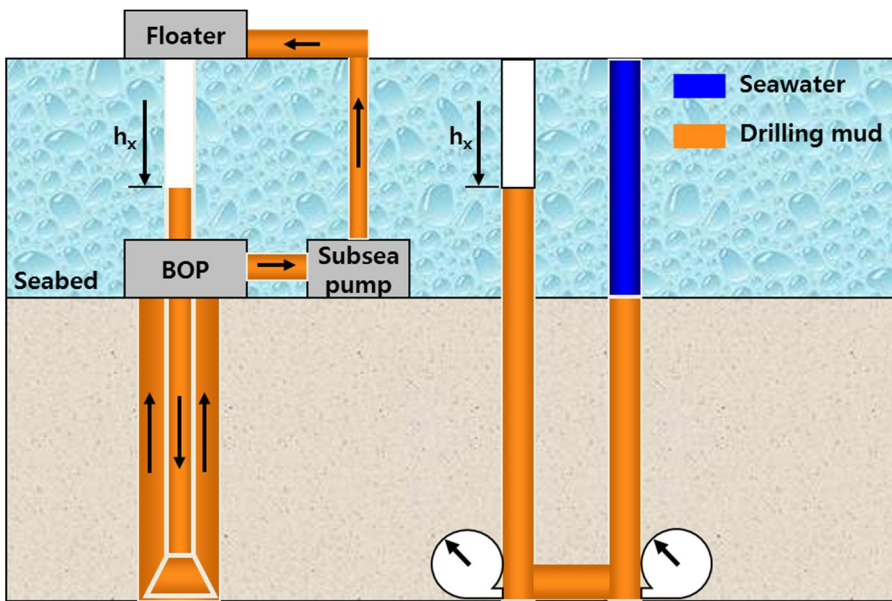


Fig. 2.6 U-tubing effect in dual gradient drilling system

U-tubing 현상은 이중구배시추의 운용상에 매우 중요한 측면을 가지고 있다. 만일 해저면 펌프의 운전이 정지되어 지상으로 이수를 순환시키지 못하면 시추파이프 내부는 이수로 가득 채워져 시추파이프 내부 이수정수압은 애놀러스 정수압보다 훨씬 높아진다. 따라서 시추공 압력이 계획된 유정압력 보다 높은 과압상태를 일으켜 지층을 파쇄시킬 위험성이 커진다.

시추파이프 내부 정수압과 애놀러스 정수압의 차이가 순환시스템 내에서 발생하는 압력손실과 해저면 펌프의 흡입압력의 합과 평형을 이룰 때까지 시추파이프 내부 이수높이는 낮아진다. 시추파이프 내부 이수높이가 최대로 낮아졌을 때 이 시스템은 동적 평형상태에 있으며 유정의 압력을 계획된 대로 유지할 수 있다. U-tubing 현상이 일어나는 과정 동안 해저면 펌프를 통해 지표면으로 회수되는 순환유량과 시추파이프 내부의 이수높이 변화량은 시스템의 동적평형식(2-1)으로 표현될 수 있다(Choe 와 Juvkam-Wold, 1998; Choe, 1999).

$$0.052\rho_m(D_w - h_x) - \Delta P_{f,ds} - \Delta P_{f,ann} - \Delta P_{bit} - \Delta P_{acc} - P_{inlet} = 0 \quad (2-1)$$

$$\Delta P_{acc} = 0.0016\rho_m \frac{v^{n+1} - v^n}{\Delta t}$$

여기서,  $\rho_m$  은 이수밀도 (ppg) ,  $D_w$  는 수심 (ft) ,  $h_x$  는 해수면으로부터 감소된 시추파이프 내부의 이수높이 (ft) ,  $\Delta P_{f,ds}$  와  $\Delta P_{f,ann}$  는 각각 시추파이프와 애놀러스 내부의 유동방향 마찰로

인한 압력손실( $psi$ ),  $\Delta P_{bit}$ 는 드릴비트 노즐을 지날 때 압력손실( $psi$ ),  $\Delta P_{acc}$ 는 유속변화로 인한 압력손실 ( $psi$ ),  $P_{inlet}$ 는 해저면 펌프의 흡입압력( $psi$ )을 나타낸다.

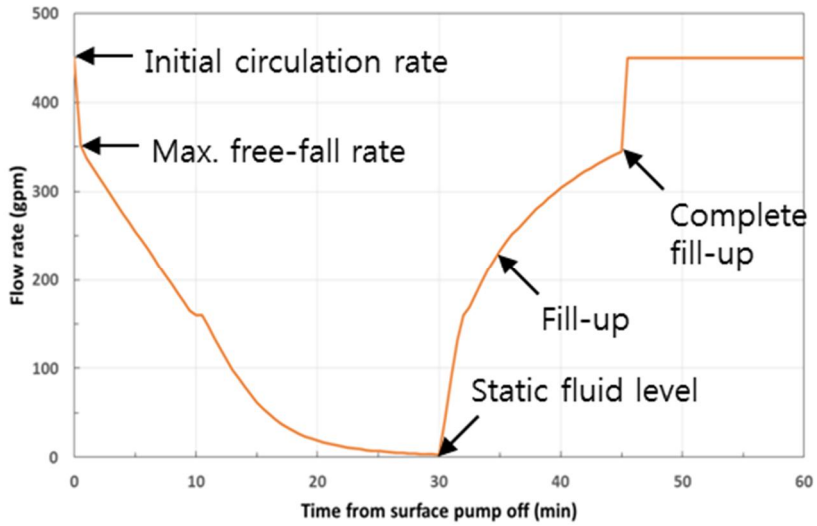
유체모델은 먹급수 모델을 사용하였으며, 이분법을 사용하여 지표면으로 회수되는 순환유량과 시추파이프 내부의 이수높이 변화량을 구하였다.

Fig. 2.7(a)은 지상 이수펌프를 정지한 이후와 시추파이프 내부의 이수높이가 최대로 내려간 후 지상 이수펌프를 재가동하여 지상으로 순환되는 지표면 회수유량을 나타낸 것이다. 지상펌프의 운전이 정지되면 외부로부터 구동력이 없어지기 때문에 시스템의 순환유량은 최대 정수압 차이가 주어질 때 순환될 수 있는 최대치로 급격히 감소하며 이를 최대 자유낙하유량(maximum free-fall rate)이라 한다. 즉, 이수가 시추파이프 내부를 가득 채우고 있는 상태에서 최대 정수압 차이가 발생하며, 정수압의 차이는 시스템 내에서 이수를 순환시키는 힘(driving force of U-tubing)이다.

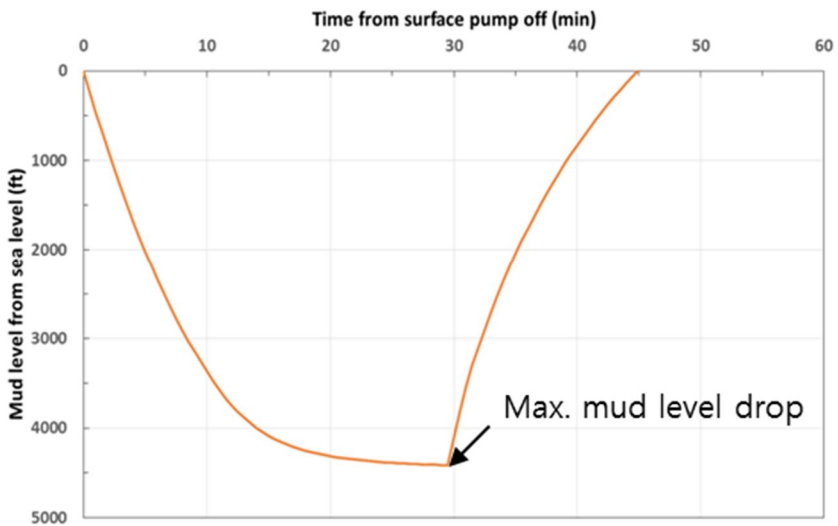
Fig. 2.7(b)은 각각의 경우에 시추파이프 내부의 이수높이 변화를 나타낸 것이다. 시추파이프 내부 이수높이 변화는 이수밀도와 수심의 함수이며 이때 최대로 감소하는 시추파이프 내부의 이수높이는 식 (2-2)로 표현될 수 있다.

$$h_{max} = D_w \left( 1 - \frac{\rho_{sw}}{\rho_m} \right) \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서 수심과 이수밀도가 증가하면 최대로 감소하는 시추파이프 내부 이수높이는 더 낮아진다. 따라서 최대 정수압 차이도 커져 시스템 내의 이수를 순환시키는 힘이 증대되어, 결과적으로 U-tubing 현상에서 지표면 회수유량도 증가된다.



(a) Flow rate



(b) Mud level inside the drill pipe

Fig. 2.7 Volumetric flow rate and mud level due to U-tubing and fill up

## 2.3 킁감지 방법

전통적인 시추시스템의 킁감지 방법은 다음과 같다. 지층으로부터 킁이 유입되면 지상으로 순환되어 나오는 이수의 유량이 상대적으로 증가하고 지상 이수부피도 함께 증가한다. 따라서 유정으로 주입되는 지상 이수펌프유량과 지표면으로 회수되는 이수유량의 차이를 비교하면 킁을 감지할 수 있다. 킁을 감지하는 또 다른 전통적인 방법은 지상 이수펌프를 정지시킨 후 순환되어 나오는 이수유량을 측정하는 것이다.

하지만 이중구배 시추시스템은 앞서 언급한 U-tubing 현상으로 인해 지상 이수펌프를 정지시켰는데도 계속해서 유정으로부터 지상으로 이수가 순환된다. 이는 전통적인 시추시스템의 경우 아주 명백한 킁의 징후가 되지만 이중구배 시추시스템에서는 U-tubing 현상으로 인해 킁감지가 용이하지 않다. Table 2.1 은 전통적인 시추시스템과 이중구배 시추시스템에서의 킁감지 방법을 비교한 것이다.



Table 2.1 Comparison of kick detection methods  
(Choe, 1999)

<b>Kick detection methods for conventional drilling</b>	<b>Valid for dual gradient drilling</b>
Pit gain	yes
Return rate increase	yes
Well flows with pump off	Masked by U-tubing effect
Fluid fill-up on trips	Masked by U-tubing effect
Drilling break	yes
Increased hook load	yes
Drop in BHP with MWD	yes
Drop in standpipe pressure	yes

시추파이프 내부 이수높이가 최대 깊이로 감소한 이후 지상 이수펌프를 재가동시켜 이수를 순환시키면 시추파이프 내부는 이수로 점차 채워지고 해지면 펌프를 통해 지상으로 순환되는 이수유량도 점차 증가한다(Fig. 2.7). 시추파이프 내부가 가득 채워져 있는 경우는 Table 2.1 과 같은 전통적인 시추시스템의 킥감지 방법으로 킥을 감지하는데 큰 어려움이 없다.

하지만 시추파이프 내부에 이수가 채워지는 천이과정 중에 킥이 발생한 경우는 지상 이수펌프의 유량과 지표면으로 회수되는 이수의 유량을 비교하여 킥을 감지하기 쉽지가 않다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 경우를 분석하기 위하여 Choe(1999)의 가스킥 유입 시나리오를 다음과 같이 사용하였다.

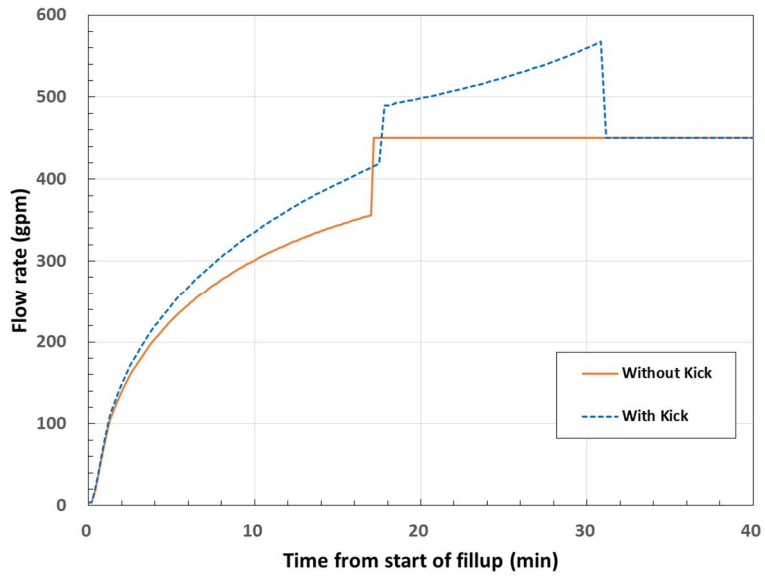
- (1) 시추파이프 내부의 이수높이가 최대 깊이로 감소하는 정적 평형상태에 도달함
- (2) 지상 이수펌프를 일정 유량으로 재가동시켜 이수를 순환시키고 해지면 펌프는 정상 운전상태인 일정 흡입압력 모드를 유지함
- (3) 지상 이수펌프의 가동과 동시에 시추를 재개
- (4) 시추를 재개함과 동시에 킁이 발생함
- (5) 30 분 후 킁유입을 감지하고 해지면 펌프의 운전을 일정 유량모드로 변경하여 더 이상의 킁유입을 막음

Fig. 2.8(a)는 킁이 발생한 경우와 킁이 발생하지 아니한 경우에 지표면으로 회수되는 이수유량을 비교한 것이다. 킁이 발생하지 않은 운전상태에서의 지표면 회수유량과 비교하였을 때 킁이 발생한 경우는 지상으로 회수되는 유량이 증가함으로 이 차이를 비교하면 킁을 감지할 수 있다.

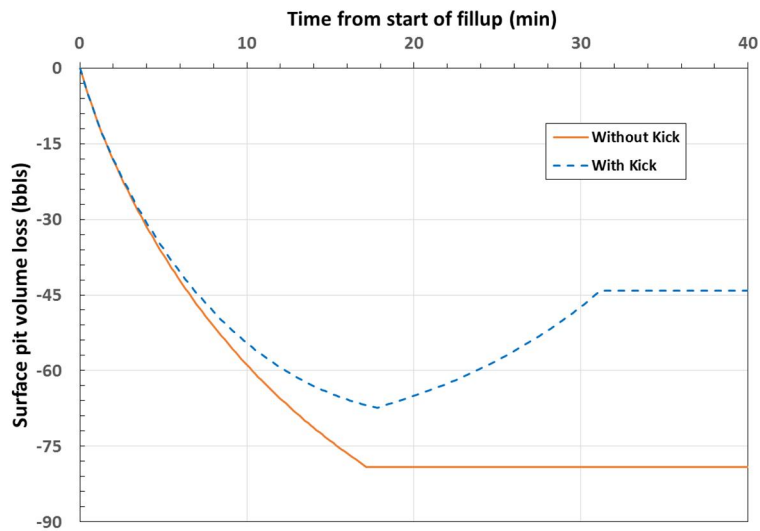
킁을 감지하는 또 다른 방법은 지상 이수부피 변화를 측정하는 것이다. Fig. 2.8(b)은 킁이 발생한 경우와 발생하지 아니한 경우에 지상 이수부피 변화를 비교한 것이다. 시추파이프 내부를 계속 채우는 동안에는 지상 이수펌프의 유량이 지표면으로 회수되는 유량보다 훨씬 크기 때문에 지상 이수부피는 계속적으로 감소한다. 시추파이프 내부를 이수로 모두 채운 이후에는 시스템의 순환체계가 정상상태가 되기 때문에 더 이상의 지상 이수부피 변화는 없다.

하지만 킱이 발생한 경우는 유입된 킱으로 인해 지상으로 회수되는 유량이 증가하여 지상 이수부피 감소량은 킱이 발생하지 않은 경우보다 적어진다. 또한 시추파이프 내부를 이수로 모두 채운 이후에는 계속된 킱유입으로 지상 이수부피가 최대 감소치를 나타낸 이후 오히려 증가하는 경향을 보인다. 따라서 지상 이수부피 감소량을 비교하면 이를 통해 킱을 감지할 수 있다.

최종적으로 천이과정 중에 킱이 발생한 경우는 지표면으로 회수되는 이수유량과 지상 이수부피 변화량을 동시에 비교 관찰하면 킱의 감지에 더 효과적이다.



(a) Surface return flow rates



(b) Surface pit volume losses

Fig. 2.8 Comparison of surface return flow rates and surface pit volume losses with and without a kick

## 제 3 장 유성이수 모델링

### 3.1 유성이수 밀도모델

유성이수를 사용한 경우, 온도, 압력, 조성에 따라 이수밀도가 변화하므로 이를 고려해야 한다. 유성이수는 기저유와 염수, 가중물질 및 각종 첨가물들로 구성되어 있는데 이 중 가장 많은 비율을 차지하고 있는 것이 기저유이다(Fig. 3.1). 기저유는 여러 종류의 탄화수소의 혼합물로서 온도, 압력, 조성에 따라 밀도가 변화한다. 특히 가스킵이 유입되면 가스가 기저유에 녹는 특징으로 인해 유성이수의 밀도가 변한다. 따라서 가스킵과 유성이수 혼합물의 부피 및 밀도를 정확히 예측하는 것은 유정제어에 매우 중요하다.

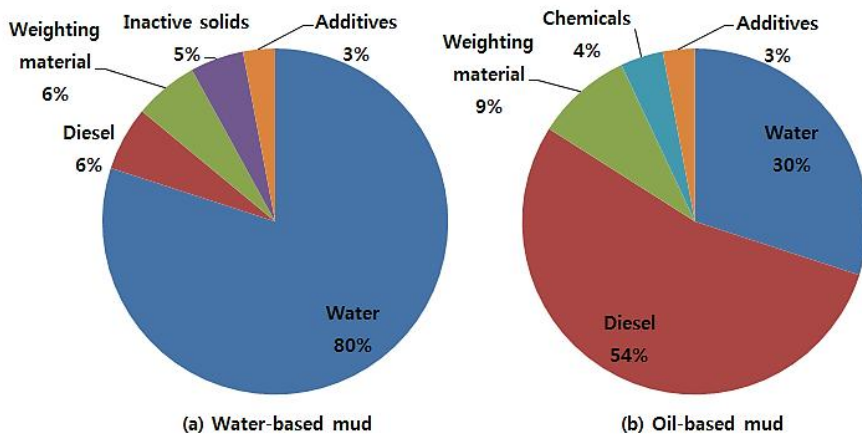


Fig. 3.1 Comparison of compositions for WBM and OBM

(해양시추공학, 최종근, 2011)

본 연구에서는 유성이수의 밀도모델을 구하기 위해 먼저 유정 내부의 이수구간을 모델링하였다. 수치해석적 안정성이 있는 Choe 와 Juvkam-Wold(1997)의 대체 이상모델을 사용하였다. 해당 모델은 킥이 유입된 상황을 고려하여 유정 내부를 상부에서부터 킥 상부 이수(단상, 1-phase), 킥과 이수의 혼합물(이상, 2-phase), 킥 하부 이수(단상), 킬(kill) 이수(단상)로 4 구간으로 분리한다(Fig. 3.2). 이상구간인 킥과 이수의 혼합물 구간을 격자로 나누어 압력과 물성을 계산한다.

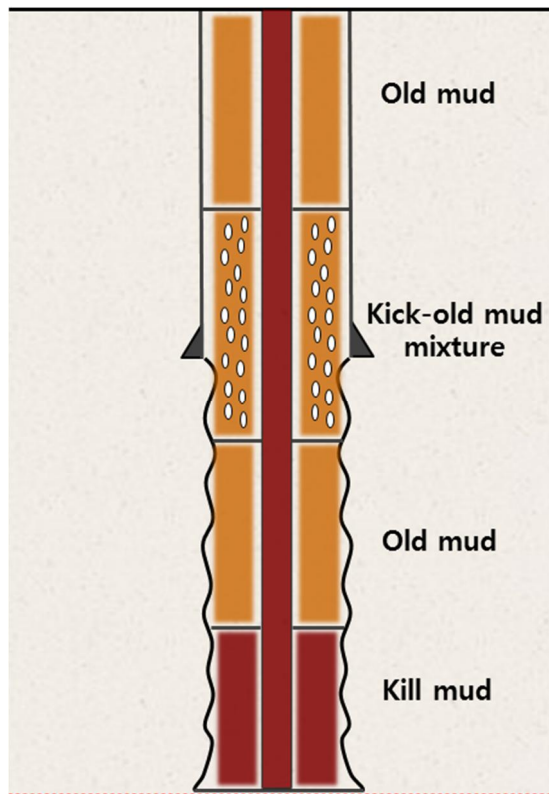


Fig. 3.2 Four sections in an annulus during well control operations

유정내부로 유입된 가스킵은 메탄으로 가정하여 킵과 이수의 혼합유무에 따른 유성이수 밀도는 식(3-1, 3-2)에서 표현될 수 있다(Hoberock 등, 1982).

가스킵이 혼합되지 않았을 때

$$\rho_{mud}(P, T) = \frac{m_{mud,i}}{V_{mud,i} + \Delta V_o} = \frac{\rho_{mud,i}}{1 + f_{o,i} \left[ \frac{\rho_{o,i}}{\rho_o(P, T)} - 1 \right]} \quad (3-1)$$

가스킵이 혼합되었을 때

$$\rho_{og\ mix}(P, T) = \frac{m_{mud,i} + m_{g,sc}}{V_{mud,i} + \Delta V_{og\ mix}} = \frac{\rho_{mud,i} + f_{o,i} R_s \rho_{g,sc}}{1 + f_{o,i} \left[ \frac{\rho_{o,i} + R_s \rho_{g,sc}}{\rho_{og\ mix}(P, T)} - 1 \right]} \quad (3-2)$$

$$\Delta V_{og\ mix} = \frac{m_{o,i} + m_{g,sc}}{\rho_{og\ mix}(P, T)} - V_{o,i}$$

여기서,  $\rho$  는 밀도 ( $ppg$ ),  $m$  은 질량 ( $lbm$ ),  $V$  는 부피 ( $gal$ ),  $\Delta V_{og\ mix}$  는 온도, 압력에 의한 기저유와 가스킵의 혼합물의 부피변화량 ( $gal$ ),  $f_{o,i}$  는 초기 이수부피에 대한 기저유의 부피비율,  $R_s$  는 용해가스 석유비 ( $scf/STB$ )이다. 아래 첨자  $o$  는 기저유,  $g, sc$  는 표준상태 ( $14.7psi, 60^\circ F$ ) 에서의 용해가스킵,  $og\ mix$  는 기저유와 가스킵의 혼합물,  $i$  는 초기상태를 의미한다.

온도, 압력, 조성에 따른 기저유의 부피 및 밀도 변화량을 구하기 위해 Standing-Katz 상태방정식(3-3)을 사용하였다 (Standing 과 Katz, 1942).

$$\rho_o(P, T) = 0.1337(\rho_{oil,sc} + \Delta\rho_P - \Delta\rho_T) \quad (3-3)$$

여기서,  $\rho_o$  는 주어진 온도, 압력 조건에서의 기저유 밀도( $ppg$ ),  $\rho_{oil,sc}$  는 표준상태 ( $14.7psi, 60^\circ F$ ) 에서의 기저유 밀도( $ppg$ ),  $\Delta\rho_P$  는 압력변화로 인한 밀도변화량 ( $lbm/ft^3$ ),  $\Delta\rho_T$  는 온도변화로 인한 밀도변화량( $lbm/ft^3$ ),  $P$ 는 압력( $psi$ ),  $T$ 는 온도( $R$ )를 의미한다.

표준상태에서의 기저유 밀도는 식(3-4)를 사용하여 계산한다.

$$\rho_{oil,sc}(P, T) = f[\rho_{C3+}, (m_{C1})_{C1+}, (m_{C1})_{C2+}, (m_{C2})_{C2+}] \quad (3-4)$$

$$\rho_{C3+} = m_{C3+}/V_{C3+}$$

$$(m_{Ci})_{Cj+} = 100(m_{Ci}/m_{Cj+}) = 100 \left( x_{Ci} M_{Ci} / \sum_{k=j}^{n_c} x_k M_k \right)$$

여기서,  $\rho_{C3+}$  는 3 가 이상의 탄화수소 혼합물 밀도 ( $lbm/ft^3$ ),  $(m_{Ci})_{Cj+}$  는  $j$  가 이상의 탄화수소 혼합물에서  $i$  가 탄화수소의 질량비율(%),  $V_{Ci}$ 는  $1lb - mol$  혼합물에서  $i$ 가 탄화수소의 부피( $ft^3/lb - mol$ ),  $m_{Ci}$ 는  $1lb - mol$  혼합물에서  $i$ 가 탄화수소의 질량( $lbm/lb - mol$ ),  $M_{Ci}$  는  $i$  가 탄화수소의 분자량 ( $lbm/lb - mol$ ),  $x_{Ci}$  는 혼합물에서  $i$ 가 탄화수소의 몰분율을 의미한다.



온도, 압력에 따른 밀도변화량은 식 (3-5, 3-6)을 사용하여 계산한다.

$$\Delta\rho_P = [0.000167 + (0.016181)10^{-0.0425\rho_{oil,sc}}]P - (10^{-8})[0.299 + (263)10^{-0.0603\rho_{oil,sc}}]P^2 \quad (3-5)$$

$$\Delta\rho_T = (T - 520)[0.0133 + 152.4(\rho_{oil,sc} + \Delta\rho_P)^{-2.45}] - (T - 520)^2[8.1(10^{-6}) - (0.0622)10^{-0.0764(\rho_{oil,sc} + \Delta\rho_P)}] \quad (3-6)$$

### 3.2 가스용해도 모델

유입된 가스킵이 유성이수에 용해된 현상을 모사하기 위해, 본 연구에서는 석유공학분야에서 혼합물의 포화물성 계산에 널리 사용되는 프로그램인 Schlumberger 의 PVTi 를 사용하였다. 기저유의 조성과 가스의 종류를 입력하면 Fig. 3.3 과 같이 온도, 압력에 따른 용해가스 그래프를 얻을 수 있다. 이 곡선의 자료들로 주어진 온도, 압력 조건에서의 용해가스 석유비 값을 근사하였다.

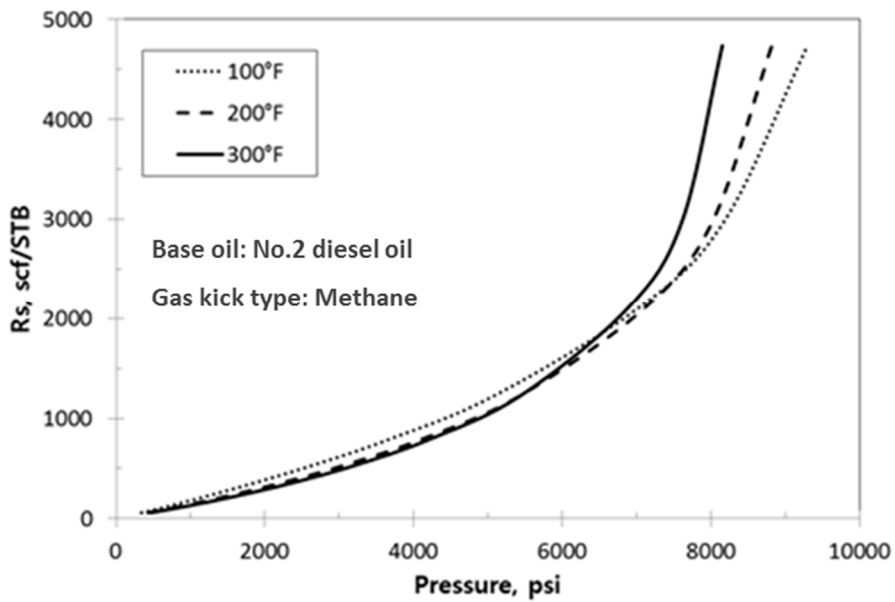


Fig. 3.3 Gas solubility curve for this study  
(Lee, 2013)

본 연구에서 사용한 기저유는 No. 2 diesel oil 이며 유입된 가스릭은 메탄으로 가정하여, 100 °F, 200 °F, 300 °F 각각의 온도 조건에서 실험식(3-7)을 추출하였다.

100 °F 일 때

$$R_s = 3.00E - 16 \times P^5 - 5.19E - 12 \times P^4 + 3.19E - 08 \times P^3 - 6.43E - 05 \times P^2 + 0.22 \times P \quad (3-7a)$$

200 °F 일 때

$$R_s = 7.00E - 16 \times P^5 - 1.19E - 11 \times P^4 + 7.16E - 08 \times P^3 - 1.55E - 04 \times P^2 + 0.25 \times P \quad (3-7b)$$

300 °F 일 때

$$R_s = 1.60E - 15 \times P^5 - 2.69E - 11 \times P^4 + 1.54E - 07 \times P^3 - 3.30E - 04 \times P^2 + 0.35 \times P \quad (3-7c)$$

여기서,  $R_s$  는 용해가스 석유비 ( $scf/STB$ ) ,  $P$  는 주어진 압력값 ( $psi$ ) 을 나타낸다. 100 °F 에서 300 °F 사이 온도의 경우는 보간법을 사용하였다.

### 3.3 가스킵 유무에 따른 유성이수 밀도변화

Hoferock 등(1982)이 제안한 유성이수 밀도식에 Standing-Katz(1942) 상대방정식을 적용한 기저유 밀도계산식을 대입하여 가스킵 용해에 따른 유성이수 밀도변화를 도출하였다. Table 3.1 과 같은 20,000 ft 수심의 해양 시추환경을 고려하였으며 시추공 하부에서 5 bbls 의 가스킵이 유입된 상황을 가정하였다. 사용된 유성이수의 구성비와 기저유인 No. 2 diesel oil 의 탄화수소비는 Table 3.2, Table 3.3 과 같다.

Table 3.1 Default input data for well geometry

<b>Variable</b>	<b>Value</b>
Well location	offshore
Well trajectory type	vertical
Water depth, ft	2,000
Total vertical depth, ft	20,000
Depth of last casing, ft	5,000
Length of HWDP, ft	1,000
Length of drill collar, ft	600
ID of last casing, inch	10
ID of open hole, inch	10
OD × ID of drill pipe, inch	5 × 4.214
OD × ID of HWDP, inch	5.5 × 3
OD × ID of drill collar, inch	7.5 × 2
ID of choke line, inch	4
ID of marine riser, inch	19
Surface pressure, psi	14.7
Surface temperature, °F	70
Formation temperature gradient, °F /100ft	1.5
Water temperature gradient, °F /100ft	-0.9

Table 3.2 Volume fraction and density for mud compositions

Element	Volume fraction, %	Density @14.7psi, 60°F, ppg
No. 2 diesel oil	74.2	6.86
30% CaCl <sub>2</sub> brine	13	10.83
Barite	12.8	35.15
OBM	100	10.96

Table 3.3 Hydrocarbon compositions of No. 2 diesel oil  
(O'Bryan 과 Bourgoyne, 1989)

Carbon number	Mole fraction, %	Mole weight, lbm/lb-mole	Carbon number	Mole fraction, %	Mole weight, lbm/lb-mole
8	0.22	108	17	8.53	237
9	0.88	121	18	4.19	251
10	3.79	134	19	2.40	263
11	10.68	147	20	1.16	275
12	13.45	161	21	0.42	291
13	13.73	175	22	0.12	305
14	16.01	190	23	0.11	318
15	15.18	206	24	0.02	331
16	9.10	222	25	0.01	344

Fig. 3.4 는 킥 유무에 따른 유성이수 밀도변화를 시추심도에 따라 보여준다. 먼저 킥이 유입되지 않은 경우는 해수면에서 해저면 바닥까지는 이수밀도가 증가하다가 해저면 하부에서는 깊이가 깊어질수록 이수밀도가 감소함을 확인할 수 있다. 기저유의 밀도는 식(3-3)과 같이 압력에 비례하고 온도에 반비례하며 이는 유성이수의 밀도변화에도 동일하게 적용된다. 시추심도가 깊어질수록 이수밀도가 감소하므로 이수밀도는 압력보다 온도에 더 민감함을 확인할 수 있다. 따라서 유성이수를 설계할 때 정확한 지층 내부 온도변화를 반영하는 것은 매우 중요하다.

킥이 유입된 경우는 수심 3,000 ft 보다 깊은 심도에서는 압력이 기포점 압력보다 높아 가스킥이 유성이수에 용해되므로 킥이 유입되지 않은 경우와 유사한 밀도변화 양상을 보인다. 하지만 3,000 ft 에서 해수면까지는 압력이 기포점 압력보다 낮아 용해가스가 자유가스로 변하면서 부피가 급격하게 팽창하여 이수밀도도 급격히 감소한다.

따라서 유성이수에 가스가 용해되는 성질 때문에 시추공 하부에 가스킥이 유입되어도 이수부피의 증가속도가 느려 초기 킥감지가 지연될 가능성이 매우 높다. 킥감지가 지연되면 압력이 기포점 압력보다 낮아지는 해수면 근처에서 가스킥이 갑작스럽게 팽창하여 유정폭발을 야기할 수 있다. 그러므로 정확한 유성이수 모델을 적용한 유정제어 모델을 이용하여 킥거동을 분석하는 것이 매우 중요하다.

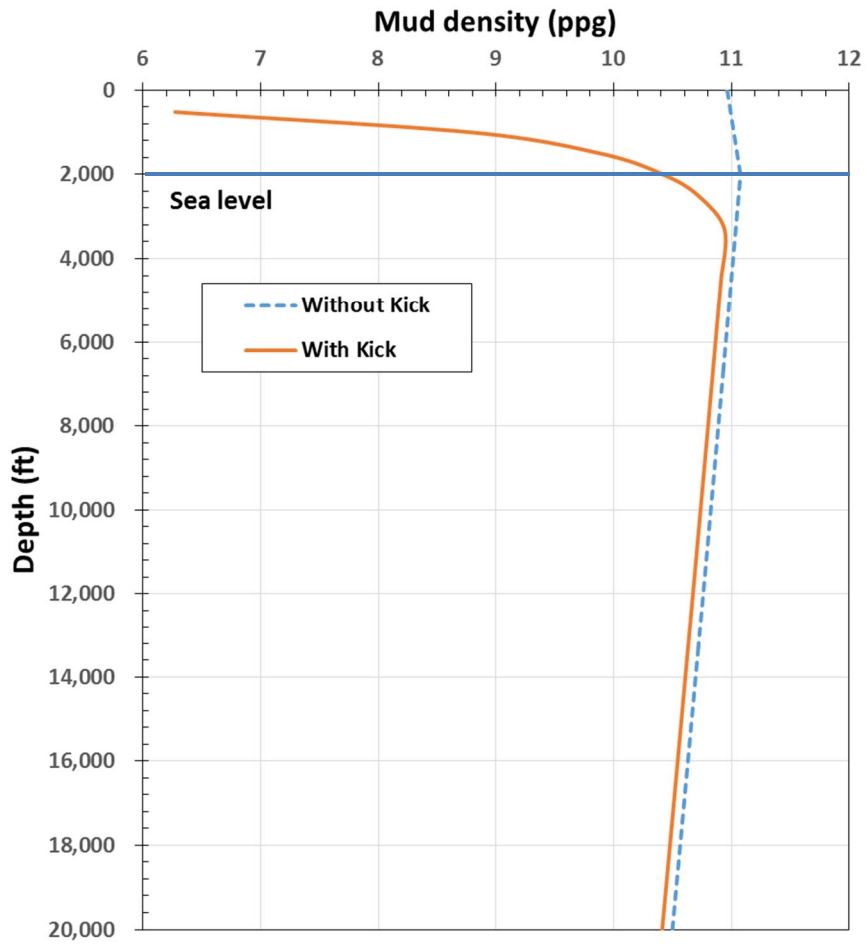


Fig. 3.4 Static OBM density with and without a kick



## 제 4 장 연구결과

### 4.1 유정형상 정보와 기본 입력자료

개발된 이중구배 시추시스템의 유성이수 유정제어 모델을 다양한 상황에 적용하여 분석하기 위해 다음과 같은 유정형상 정보와 기본 입력자료를 구성하였다(Fig. 4.1 과 Table 4.1).

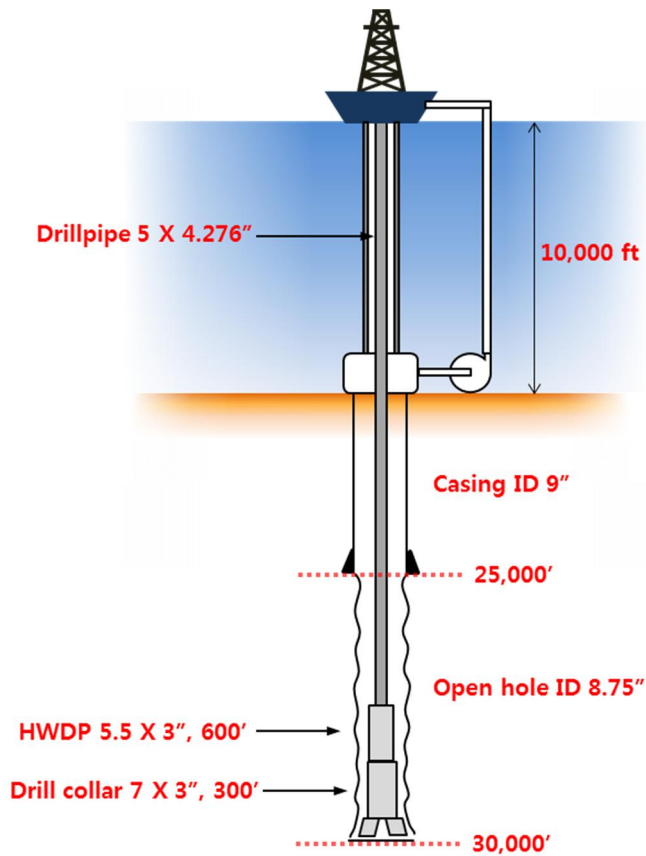


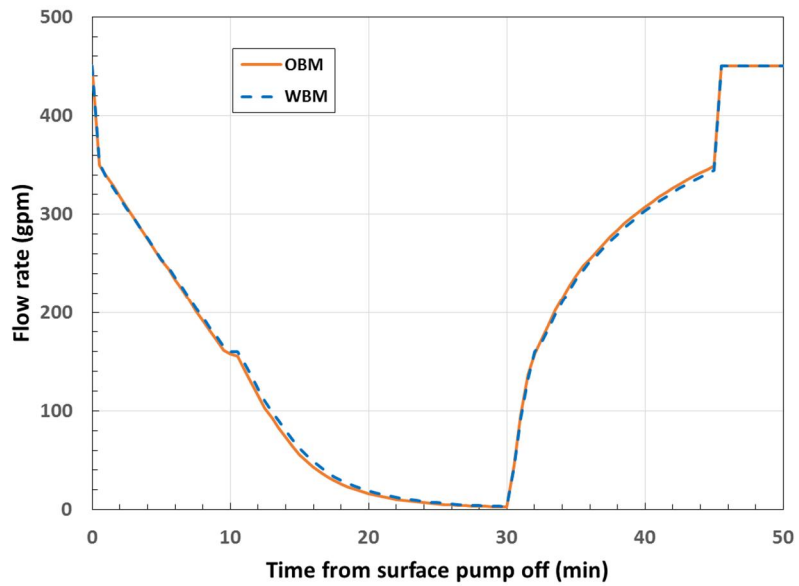
Fig. 4.1 Well geometry data for this study

Table 4.1 Default input data for this study

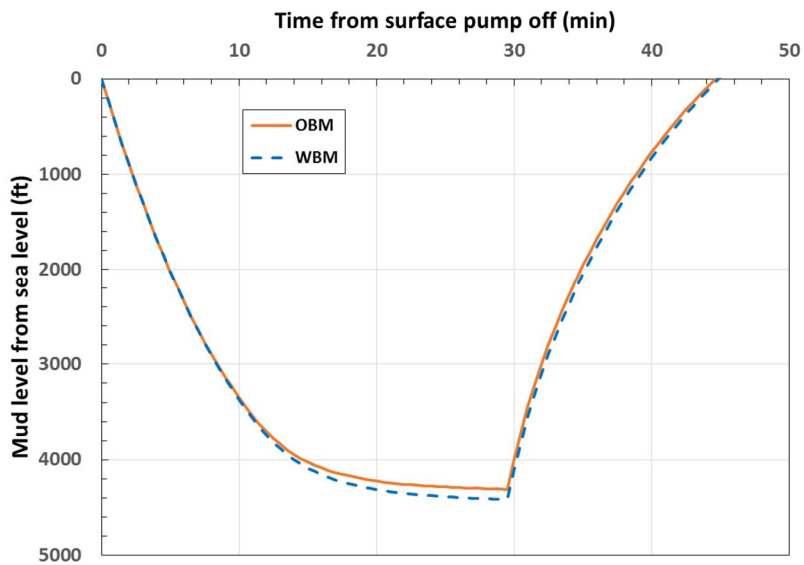
<b>Variable</b>	<b>Value</b>
Mud density, ppg	15.5
Seawater density, ppg	8.6
Fluid model	Power-law
Plastic viscosity, cp	46
Bingham yield point, lbs/100ft <sup>2</sup>	19
Number of bit nozzles	3
Bit nozzle diameter, 1/32nd, inch	14
Well vertical depth, ft	30,000
Depth of last casing seat, ft	25,000
Length of HWDP, ft	600
Length of drill collars, ft	300
ID of return line, inch	6
Circulation rate, gpm	450
Formation over pressure, psi	800
Gas specific gravity	0.65
Mud compressibility, 1/psi	6.00E-06
Surface temperature, °F	70
Temp. gradient, to 4,220 ft water depth, °F /100ft	-0.9
Temp. gradient below mud line, °F /100ft	1.0
Min. seawater temperature, °F	32
Formation permeability, md	10
Formation skin factor	2
Formation porosity, fraction	0.25
Rate of penetration, ft/hr	60

## 4.2 이수종류에 따른 U-tubing 현상 분석

가스킵이 유입되지 않은 상황을 가정하고 수성이수와 유성이수를 사용하였을 때 이수종류에 따른 U-tubing 현상을 분석하였다. 킵이 유입되지 않은 경우는 이수종류에 상관없이 지표면 회수유량, 시추파이프 내부 이수높이 변화량에는 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 킵이 발생하지 않은 상황에서는 수성이수, 유성이수 모두 U-tubing 현상에서는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다(Fig. 4.2).



(a) Flow rates



(b) Mud levels inside the drill pipe

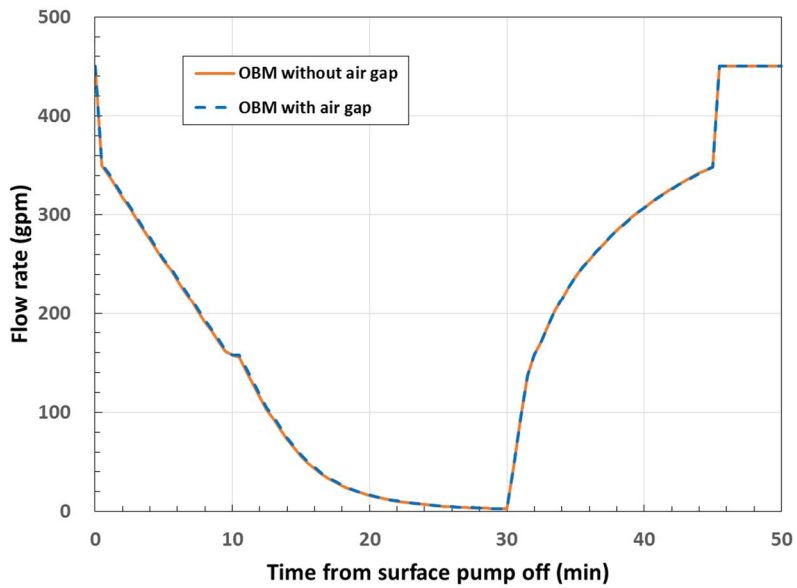
Fig. 4.2 Comparison of U-tubing and fill up with WBM and OBM

### 4.3 Air gap 높이 고려에 따른 U-tubing 현상 분석

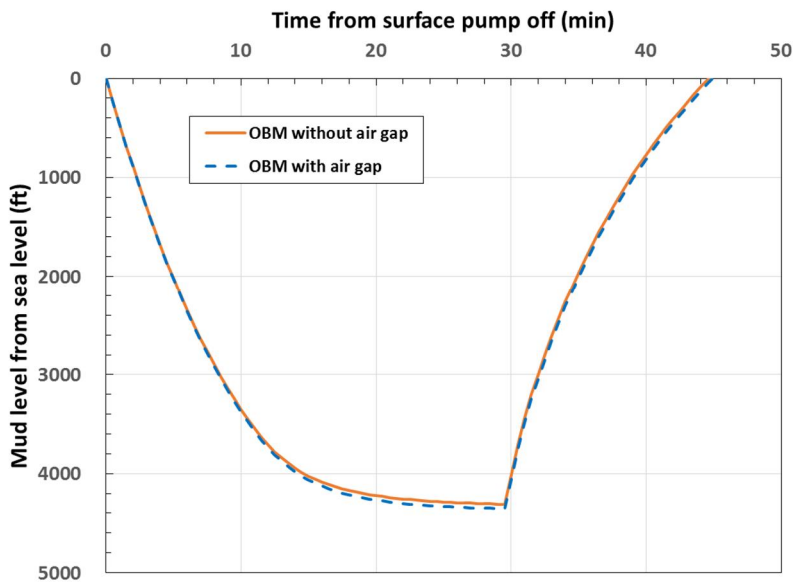
시추깊이에 air gap 높이를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 U-tubing 현상을 분석하였다. Air gap 은 시추선의 시추플로어(drillfloor)에서 해수면까지의 거리를 의미하며, air gap 높이를 반영한 경우 그만큼 시추심도와 수심이 깊어지는 효과를 가진다. Air gap 높이는 100 ft 로 분석에 반영하였다. 앞의 결과에서 이수종류에 따른 U-tubing 결과는 큰 차이가 없으므로 이번 분석에서는 유성이수만을 사용하였다.

Fig. 4.3 의 결과와 같이 air gap 높이를 고려함에 상관없이 지표면 회수유량, 시추파이프 내부 이수높이 변화량에는 큰 차이를 보이지 않았다. 식 (2-2)에서 air gap 높이 100 ft 를 반영하면 수심이 더 깊어지는 효과를 가져 시추파이프 내부 이수높이가 45 ft 더 낮아진다. 이는 전체 이수높이 감소치인 4,310 ft 대비 매우 미세한 수준이므로 air gap 높이 고려유무는 U-tubing 현상에 큰 영향을 미치지 않는다.

하지만 해저면 펌프의 운용상 측면에서 air gap 높이는 고려되어야 한다. Air gap 높이만큼 해저면 펌프의 양정이 늘어남으로 펌프 토출압력도 이 높이만큼 이수정수압이 추가되어야 한다. 그리고 높아진 토출압력으로 인해 펌프작동유의 압력을 높여 펌프의 출력도 더 키워야 한다.



(a) Flow rates



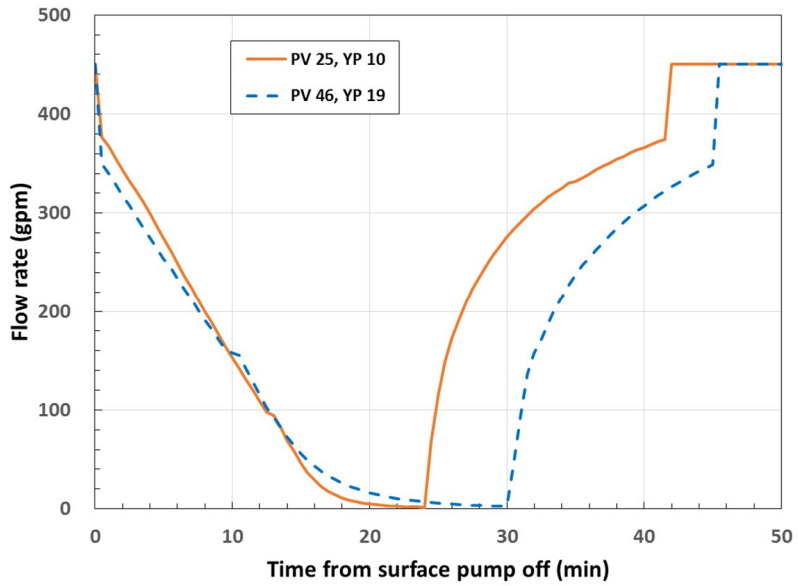
(b) Mud levels inside the drill pipe

Fig. 4.3 Comparison of U-tubing and fill up with and without air gap

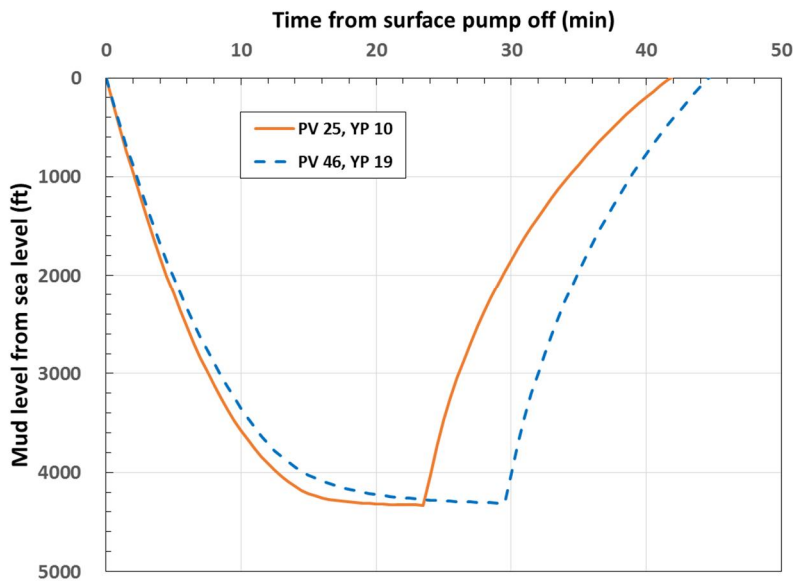
#### 4.4 이수점도에 따른 U-tubing 현상 분석

이수의 점도에 따른 U-tubing 현상에 대해 분석하였다. 사용된 이수점도는 25 cp, 10 lbs/100 ft<sup>2</sup> 과 46 cp, 19 lbs/100 ft<sup>2</sup>이다. 이수점도가 증가하면 시스템 내부유동의 마찰력이 증가함으로 이수흐름에 대한 저항력이 더 커진다. 지표면으로 회수되는 순환유량도 감소하여 점도가 낮은 경우보다 동적 평형상태에 도달하는데 시간이 더 많이 소요되어 시스템 안정화가 지연된다.

따라서 이수를 설계할 때 적절한 점도를 유지하는 것이 매우 중요하다. 하지만 시추파이프 내부의 이수 최대 감소깊이는 이수의 점도와는 상관없이 일정하다(Fig. 4.4).



(a) Flow rates



(b) Mud levels inside the drill pipe

Fig. 4.4 Comparison of U-tubing and fill up with different mud viscosities



## 4.5 지상 이수펌프 순환유량에 따른 U-tubing 현상 분석

지상 이수펌프 순환유량에 따른 U-tubing 현상을 분석하였다. 사용된 펌프유량은 250, 450, 650 gpm 세 가지이다. 먼저 Fig. 4.5(a) 결과에서 시스템의 최대 자유낙하유량은 350 gpm 이다. 지상펌프의 순환유량이 이 유량보다 클 경우(450, 650 gpm)에는 펌프유량은 U-tubing 현상에 큰 영향을 미치지 않는다.

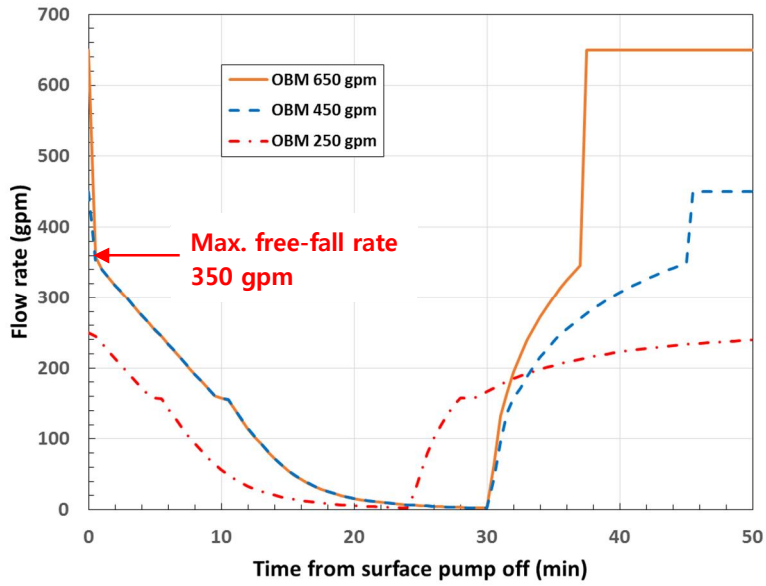
왜냐하면 지상펌프가 정지되면 이수를 순환시키는 힘은 시추파이프 내에 존재하는 최대 정수압의 차이이고 펌프를 정지하기 이전의 초기 순환유량은 그 정수압에 영향을 미치지 않기 때문이다. 450, 650 gpm 의 경우는 시추파이프 내부를 이수로 가득 채운 상태에서 운전되고 있으므로 정수압의 차이가 같아 시스템 내의 유체를 순환시키는 힘이 같다.

Fig. 4.5(a)에서 450, 650 gpm 의 지표면 회수유량 변화양상을 보면 초기에는 450, 650 gpm 이었던 유량이 350 gpm 으로 급격하게 변한 후부터는 유량이 거의 동일한 변화양상을 따라간다. 단지 가속압력손실에 따른 미미한 차이가 있다. 시추파이프 내부 이수의 최대 감소깊이는 4,310 ft 이다(Fig. 4.5(b)).

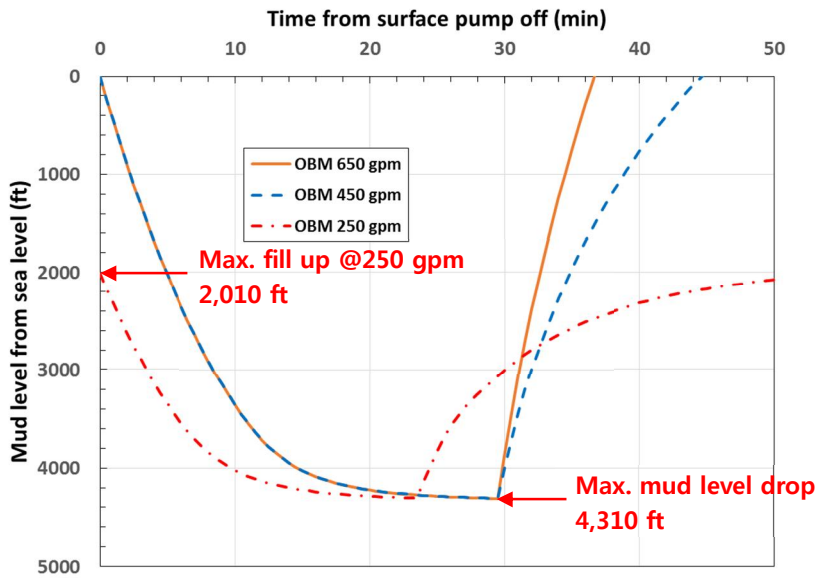
지상펌프의 초기 순환유량이 시스템의 최대 자유낙하유량보다 작을 때(250 gpm)는 U-tubing 현상에 큰 차이를 보인다. 이 유량의 경우는 시스템의 최대 자유낙하유량보다 작으므로 시추파이프 내부를 이수로 가득 채울 수 없는 상태에서 운전된다. 이는

시추파이프 내부의 정수압 차이가 줄어들음을 의미한다. 그로 인하여 시스템 내에서 이수를 순환시키는 힘도 작아지며 지표면 회수유량이 감소한다.

펌프유량이 250 gpm 인 경우 해수면에서 2,010 ft 깊이까지만 시추파이프 내부에 이수를 채울 수 있다. 이로 인한 운영상의 가장 큰 문제점은 시추파이프 내부 이수의 위치를 관측하기 어렵다는 것이다. 따라서 지상펌프유량은 시스템 최대 자유낙하 유량보다 크게 유지하는 것이 중요하다.



(a) Flow rates



(b) Mud levels inside the drill pipe

Fig. 4.5 Comparison of U-tubing and fill up with different flow rates

## 4.6 가스킵이 유입된 상황에서 유정제어 분석

이 절에서는 가스킵이 유입된 상황을 가정하고 킵을 감지하는 방법을 분석하였다. 앞의 2.3 절에 언급된 킵유입 시나리오를 따라 U-tubing 현상에서 시추파이프 내부의 이수가 최대 깊이로 감소된 이후 지상펌프를 재가동시켜 시추작업을 재개한 시점(시추파이프 내부를 이수로 채우는 천이과정)에 가스킵이 유입된 상황을 가정하였다. 수성이수와 유성이수를 사용하여 비교 분석하였다.

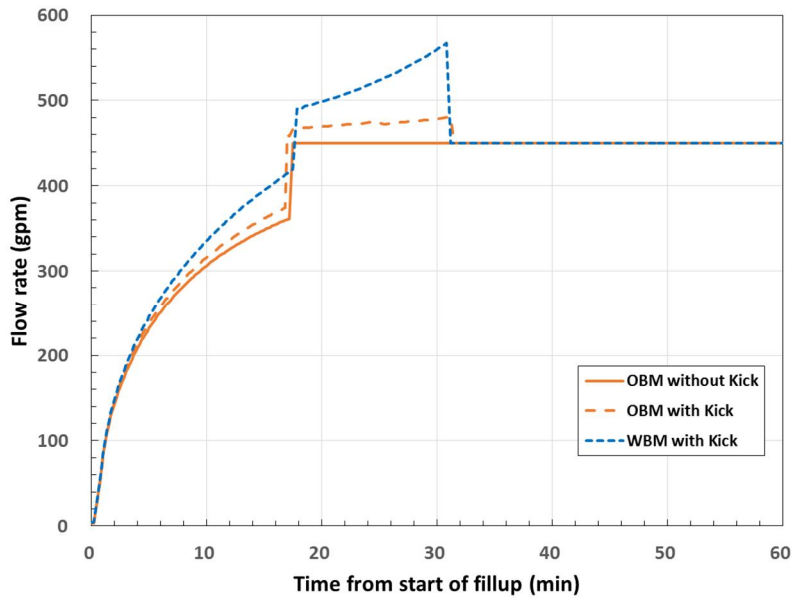
Fig. 4.6(a)는 킵이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우 지상으로 회수되는 유량의 비교이다. 킵이 발생하지 않은 경우는 지표면 회수유량이 450 gpm 으로 수렴하는 반면에 킵이 발생한 경우는 유정내부로 킵이 계속 유입됨에 따라 회수유량이 계속 증가한다. 킵이 발생한 경우는 회수유량의 증가치가 킵이 발생하지 않았을 때보다 훨씬 크다. 따라서 킵이 발생하지 않은 상태의 회수유량(previous U-tubing records without a kick)과 차이를 비교하여 킵감지가 가능하다.

Fig. 4.6(b)는 지상의 이수부피 변화량의 비교이다. 킵이 발생하지 않은 경우는 지상의 이수부피 감소량이 77 bbls(4,310ft 길이의 시추파이프 내부를 채우는데 필요한 부피)로 수렴한다. 이수가 시추파이프 내부를 모두 채운 이후에는 시스템의 순환체계가 정상상태가 되기 때문에 더 이상의 지상 이수부피 변화는 없다.

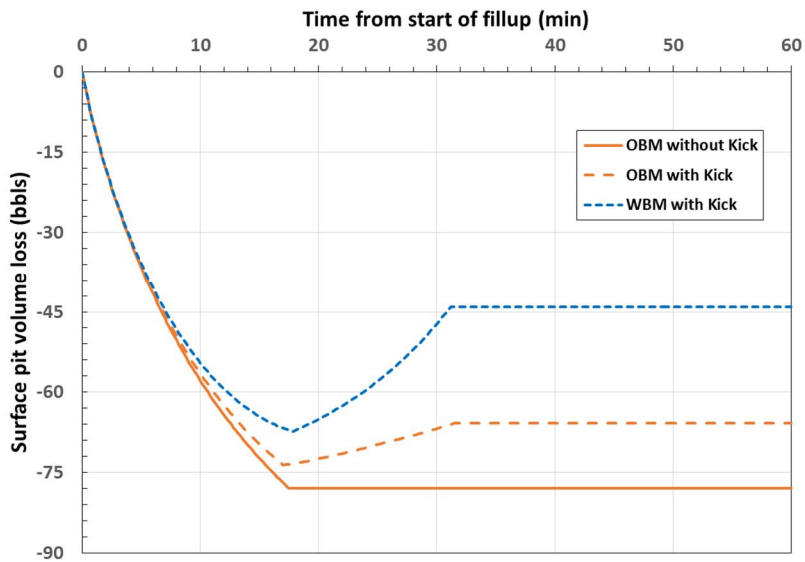
반면에 킵이 발생한 경우 초기에는 이수부피가 계속 감소하다가 시추파이프 내부를 이수로 전부 채우고 난 후에도 지층으로부터

킱이 유입되어 지상 이수부피가 계속 증가한다. 따라서 킱이 발생하지 않은 상태의 지상 이수부피 변화량과의 차이를 비교하여 킱을 감지할 수 있다. 추가적으로 지표면 회수유량과 지상 이수부피 변화를 동시에 비교하면 킱감지에 더욱 효과적이다.

유성이수의 경우는 가스용해성으로 인해 유입된 가스킱이 이수에 용해되어 이수부피 증가량이 수성이수보다 훨씬 작다. 따라서 지표면으로 회수되는 유량의 증가폭도 감소하여 킱감지가 늦어진다는 단점이 있다. 지상으로 회수되는 유량이 감소함으로 지상 이수부피 감소량은 수성이수보다 크다. 또한 시추파이프 내부를 전부 채우고 난 뒤에는 수성이수보다 더 적게 지상 이수부피를 증가시킨다. 따라서 유성이수를 사용시 유량변화의 관찰이 매우 중요하다.



(a) Surface return flow rates



(b) Mud levels inside the drill pipe

Fig. 4.6 Comparison of surface return flow rates and surface pit volume losses for WBM and OBM with and without a kick

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 유성이수를 사용한 이중구배 시추시스템에서의 U-tubing 현상을 분석하고 킁을 감지하는 유정제어 모델을 개발하였다.

1. 대체 이상모델과 Standing-Katz 밀도식을 이용하여 온도, 압력, 조성에 따른 유성이수의 밀도변화를 고려하였다. 온도, 압력에 따른 용해가스 석유비를 구해 유성이수에 가스킁이 용해되는 현상을 반영하였다.
2. 지상펌프유량, 이수점도, 이수종류, air gap 높이에 따른 U-tubing 현상을 분석하였다. 지상펌프유량이 시스템 최대 자유낙하 유량보다 작은 경우는 시추파이프 내부를 이수로 완전히 채우지 못해 시스템 내의 유체를 순환시키는 힘이 줄어들어 천이유량이 달라진다. 높은 이수점도는 지표면 회수유량을 감소시켜 시스템 안정화를 지연시킨다. 하지만 동일한 이수밀도와 점도의 조건에서는 이수종류와 air gap 의 영향은 미미하였다.
3. 지표면 회수유량과 지상 이수부피 변화량을 비교하여 킁을 감지하는 방법을 모델링 하였다. 킁이 발생하면 지표면 회수유량이 증가하고 지상 이수부피는 초기에 감소하는 경향을 보이다가 다시 증가한다. 추가적으로 지표면 회수유량과 지상 이수부피 변화를 동시에 비교하면 킁감지에 더욱 효과적이다.

4. 유입된 가스킵이 유성이수에 용해됨으로 수성이수를 사용했을 때 보다 지표면 회수유량 증가폭이 줄어들어 킵감지가 지연될 가능성이 매우 높다. 따라서 유성이수 사용시 유량변화의 관찰이 매우 중요하다.
5. 제안된 모델은 유성이수를 사용한 이중구배 시추시스템의 유정제어에 효과적으로 적용될 수 있다.

추후 필요한 연구내용은 아래와 같다.

- 본 연구에서는 지상펌프를 정지한 후 천이과정에 킵이 유입되었음을 가정하고 유정제어 방법을 연구하였다. 시추작업 도중에 킵이 유입된 상황을 가정하고 유정제어 연구범위를 확장시킬 수 있다. 이 경우도 온도, 압력, 조성에 따른 유성이수 밀도변화와 가스용해도를 고려해야 한다.
- 유성이수의 독성으로 인해 최근 해양시추는 합성이수를 사용한다. 합성이수의 물성변화, 가스용해도를 고려한 이중구배시추 유정제어에 대한 연구가 필요하다.



## 참고 문헌

성국주, 2012, “Peng-Robinson 상태방정식을 이용한 유성이수 유정제어 모델링,” 공학석사학위논문, 서울대학교.

안재우, 2016, “다양한 시추문제 모델링을 위한 웹 기반 시추 시뮬레이션 시스템,” 공학석사학위논문, 서울대학교.

이태엽, 이경복, 성국주, 최종근, 2013, “다양한 시추궤도에서의 유성이수 유정제어 모델링,” *한국자원공학회지*, 50(4), 482-489.

이태엽, 2013, “다양한 시추궤도에서의 유성이수 유정제어 모델링,” 공학석사학위논문, 서울대학교.

최종근, 1999, “해양 Riserless 시추시스템의 킥 감지 기법,” *한국자원공학회지*, 36(6), 397-403.

최종근, 2011, “해양시추공학,” 씨아이알, 개정판, 서울.

Alani, G.H. and Kennedy, H.T., 1960, “Volumes of Liquid Hydrocarbons at High Temperatures and Pressures,” *Petroleum Transactions*, Vol. 219, 288-292.

Arrouj, A., 2014, “Status on Dual Gradient Technology for Deepwater Drilling,” B.S. thesis, University of Stavanger.

An, J., Lee, K., and Choe, J., 2015, "Well Control Simulation Model of Oil-Based Muds for HPHT Wells." *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2015.

Bourgoyne, A. T., Millheim, K. K., Chenevert, M. E., and Young, F. S., 1986, "Applied Drilling Engineering," 54-75.

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. and Juvkam-Wold, H. C., 1997, "Riserless Drilling and Well Control for Deep Water Applications," *IADC International Deep Water Well Control Conference and Exhibition held in Houston, Texas*.

Choe, J. and Juvkam-Wold, H. C., 1997, "Riserless Drilling: Concepts, Applications, Advantages, Disadvantages and Limitations," *Paper CADE/CAODC*, 97-140.

Choe, J. and Juvkam-Wold, H. C., 1998, "Well Control Aspects of Riserless Drilling," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers.

Choe, J., 1999, "Analysis of Riserless Drilling and Well-Control Hydraulics," *SPE drilling & completion*, 71-81.

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

Choe, J., Schuber, J. J., and Juvkam-wold, H.C., 2004, “Analyses and Procedures for Kick Detection in Subsea Mudlift Drilling,” *IADC/SPE Drilling Conference*, Society of Petroleum Engineers.

Eggemeyer, J. C., Akins, M. E., Brainard, R. R., Judge, R. A., Peterman, C. P., Scavone, L. J., and Thethi, K. S., 2001, “Subsea Mud-Lift Drilling: Design and Implementation of a Dual Gradient Drilling System,” *Paper SPE 71359 presented at the 2001 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans.

Elieff, B. A., 2006, “Top Hole Drilling with Dual Gradient Technology to Control Shallow Hazards,” M.S. thesis, Texas A&M University, College Station.

Elieff, B., Dixit, A., Krueger, C., Shenoy, S., Nandagopalan, A., Dharmawijatno, C., Sonawane, M., Guinn, J., Thomas, G., Wiseman, L., Schubert, J., and Suh, S., “Application of Dual Gradient Technology to Top Hole Drilling,” *Final Report Minerals Management Service Project 541*.

Gault, A., 1996, “Riserless Drilling: Circumventing the Size/Cost Cycle in Deepwater,” *Offshore* 56, no. 5: 49–54.

Gonzalez, R., 2000, “Shell Drilling System,” *Presented at the DOE/MMS Deepwater Dual-Density Drilling Workshop*, Houston.

Guntis, M., 2011, “New Synthetic-based Muds Allow More Complex Wells,” *Oil & Gas Journal*, Vol. 109, No. 6, pp. 68-70.

IADC Dual Gradient Drilling Workshop, 2011, Houston.

Johansen, T., 2000, "Subsea Mud-Lift Drilling Evaluation of the Pressure Differential Problem with the Subsea Pump," M.S. thesis, Texas A&M University, College Station.

Judge, R. A., and Thethi, R., 2003, "Deploying Dual Gradient Drilling Technology on a Purpose-Built Rig for Drilling Upper Hole Sections," *Paper SPE 79808 presented at the SPE/IADC Drilling Conference*, Amsterdam, Netherlands.

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

Oskarsen, R. T., 2001, "Toolkit and Drillstring Valve for Subsea Mud-Lift Drilling," M.S. thesis, Texas A&M University, College Station.

Oluwadairo, T., 2007, "An Evaluation of Different Subsea Pump Technologies That Can Be Used to Achieve Dual-Gradient Drilling," M.S. thesis, Texas A&M University, College Station.

Peng, D. Y. and Robinson, D. B., 1976, "A New Two-Constant Equation of State," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-64.

Peterman, C., 1998, "Riserless and Mudlift Drilling—The Next Step in Deepwater Drilling," *Paper OTC 8752 presented at the Offshore Technology Conference*, Houston.

Rehm, B., Schubert, J., Haghshenas, A., Paknejad, A. S., and Hughes, J., 2009, "Managed Pressure Drilling," Elsevier Science.

Standing, M. B. and Katz, D. L., 1942, "Density of Crude Oils Saturated with Natural Gas," *Transactions of the AIME*, Vol. 146, No. 1, pp. 159-165.

Schubert, J. J., 1999, "Well Control Procedures for Riserless/Mud-Lift Drilling and Their Integration into a Well Control Training Program," Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station.

Sjoberg, G., 2000, "Deep Vision," *Presented at the DOE/MMS Deepwater Dual-Density Drilling Workshop*, Houston.

Schumacher, J. P., Dowell, J. D., Ribbeck, L. R., and Eggemeyer, J. C., 2001, "Subsea Mud-Lift Drilling: Planning and Preparation for the First Subsea Field Test of a Full-Scale Dual Gradient Drilling System at Green Canyon 136, Gulf of Mexico," *Paper SPE 71358 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans.

Smith, K. L., Gault, A. D., Witt, D. E., and Weddle, C. E., 2001, "Subsea Mud-Lift Drilling Joint Industry Project: Delivering Dual Gradient Technology to Industry," *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans.

Schubert, J. J., Juvkam-Wold, H. C., and Choe, J., 2006, “Well Control Procedures for Dual Gradient Drilling as Compared to Conventional Riser Drilling,” *SPE Paper Number 99029*. SPEDC 21, no. 4 : 287–295.

Malloy, K., 2011, “TAP-631-Risk Profile of Dual Gradient Drilling,” Stress Engineering Services, <https://www.bsee.gov/research-record/tap-631-risk-profile-dual-gradient-drilling>.

Zhang, Y., 2000, “A Hydraulics Simulator for Deep-Water Mud-Lift Drilling,” M.S. thesis, Texas A&M University, College Station.

## **ABSTRACT**

# **Well Control Modeling of Oil Based Mud for Dual Gradient Drilling System**

Jaeyong Park

Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

A well control study must be developed for practical field applications of any new deepwater drilling technology and Dual gradient drilling(DGD) is no exception. Oil based mud(OBM) is widely used in deepwater drilling industry. However, it is difficult to detect and control a kick due to its high gas solubility and change of mud density with pressures and temperatures. In this study, a well control modeling of DGD is developed and it considers the characteristics of OBM as aforementioned.

U-tubing rate is analyzed considering surface pump rate, mud viscosity, a type of muds, and air gap. The drillstring cannot be filled completely when surface pump rate is less than the maximum free fall rate. Therefore, the driving force of U-tubing decreases, and the transient flow rate shows a different trend. As the mud viscosity increases, the flow rate decreases and the time to reach system equilibrium increases as well. However, a type of muds and air gap do not affect U-tubing rate under the same conditions of the mud density and viscosity.

During the fill up, a kick can be detected if the surface return rate is higher than the previous record. Additionally monitoring the surface pit volume

change is also helpful to detect a kick. By observing the surface return rate and surface pit volume change together, we can detect a kick much better. In case of OBM, a severe time delay is expected to detect a kick because of the gas solubility, which results in small increase of return rate. Therefore, careful monitoring of flow rate is crucial for early kick detection. In addition, the suggested modeling in this thesis can be applied to a well control training for the OBM based DGD system.

**Keywords :** Dual gradient drilling, Deepwater, Offshore drilling, Oil based mud, Well control, Kick detection

**Student number :** 2015 – 21317