

## 방향성 시추를 위한 RSS 기술특성 및 적용사례 분석

조민우<sup>1)</sup> · 장호창<sup>1)</sup> · 유인항<sup>2)</sup> · 이정환<sup>1)\*</sup>

### Investigation on the Technical Characteristics and Test Cases of RSS for Directional Drilling

Minwoo Cho, Hochang Jang, Inhang Yoo and Jeonghwan Lee\*

(Received 22 August 2014; Final version Received 6 January 2015; Accepted 26 February 2015)

**Abstract** : The rotary steerable system(RSS) is technically capable of controlling a direction during drilling by changing angle of bits or applying lateral force. The RSS has an advantage which is reducing the drilling time due to its high rate of penetration(ROP). RSS has been widely applied to develop oil and gas reservoir, as well as unconventional resources such as shale gas. This study presents technical characteristics about mechanism of the RSS operating and introduces laboratory experimental cases and field projects. Laboratory tests show that it is possible to predict directional behavior of RSS. Furhemore, field projects show that the drilling time is reduced by the increasing ROP since slide was not required. The results in the directional behavior by various concrete strength and bit characteristics can be used to build and apply to a directional drilling plan for oil and gas field development.

**Key words** : RSS, ROP, Shale gas, Directional drilling, Drilling time

**요약** : RSS(rotary steerable system)는 시추 비트의 각을 변화시키거나 횡력을 가하여 즉각적인 방향제어가 가능한 기술로써, 높은 굴진율로 시추시간을 단축시켜 시추비용을 절감할 수 있다는 장점을 갖고 있어 대규모의 유·가스전 개발뿐만 아니라 셰일가스 등의 비전통자원개발에 널리 적용되고 있다. 본 연구에서는 RSS의 작동 메커니즘에 관한 기술적 특징에 대해 고찰하고 시추 시험을 수행한 실험실 및 현장 프로젝트 사례를 소개하였다. 실험실 시험사례를 통해 RSS의 방향성 거동 예측이 가능함을 확인하였으며, 현장 적용사례 분석 결과 슬라이드 없이 작업해 굴진율이 증가함으로써 시추시간이 단축됨을 확인하였다. 다양한 콘크리트 강도와 비트 특성에 따른 방향성 거동 분석 결과는 향후 국내외 유전 개발 시 RSS를 이용한 방향성 시추 계획 수립 및 적용에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** : 회전제어시스템(RSS), 굴진율(ROP), 셰일가스, 방향성 시추, 시추시간

## 서론

회전제어시스템(rotary steerable system, RSS)은 방향성 시추를 수행하기 위해 개발된 기술이며, 기존 회전식 시추 기술에서 시추공의 방향을 제어하기 위해 이수 모터를 사용하는 것과는 달리 방향성 시추에 특화된 시추 공저장비(bottom hole assembly, BHA)를 사용함으로써

방향성 시추에 걸리는 시간을 단축할 수 있는 기술이다.

기존 회전식 시추에서 인위적으로 시추공의 편향(deflection)을 유도하여 목표지점까지 도달하기 위한 방향성 시추를 수행하기 위해서는 시추공을 굴절시키려는 심도부터 시추동(drillstring)에 회전력을 가하지 않고 비트만을 회전시키는 이른바 슬라이드(slide)가 수행되어야 한다(Kang *et al.*, 1990). 슬라이드를 수행하기 위해서는 툴페이스(tool face)를 유지해야 하며, 이를 위해 비트에 낮은 하중을 가하기 때문에 굴진율이 저하되고 슬라이드가 장시간 지속될 시 고착현상(stuck)이 발생할 수 있다. 또한, 슬라이드를 수행한 후 다시 회전식 시추를 수행하는 것을 반복하는 과정에서 시추 궤적이 비틀리게 되므로 비효율적이다(Downton *et al.*, 2000). RSS는 슬라이드를

1) 전남대학교 에너지자원공학과

2) ㈜한진디엔비

\*Corresponding Author(이정환)

E-mail; jhwan@jnu.ac.kr

Address; Dept. of Energy & Resources engineering, College of Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea

수행하지 않고도 수직 시추에서 방향성 시추로의 전환이 연속적으로 일어나기 때문에 많은 비용과 시간을 절감할 수 있다. 또한, 지표에서 시추동에 힘을 바로 전달할 수 있기 때문에 이수를 이용하여 비트를 회전시키는 것보다 강한 회전력을 전달시킬 수 있으며, 회전력을 직접적으로 제어할 수 있다.

성공적인 시추는 시추공의 경사와 주향을 정확히 분석하고 예측하여 목표지점까지 설계된 궤도에 맞게 시추하는 것이다(Choi, 1990). 그러나 RSS 개발 초기에는 목표지점까지 설계된 궤도로 시추되지 않는 문제점이 있어 일부 파일럿 프로젝트에만 이용되었고, 장치 비용이 커서 영국의 북해 유전이나 멕시코의 걸프만 유전과 같이 대규모의 저류층에서만 적용될 수 있었다. 기존 방향성 시추의 작업시간을 단축할 수 있는 장점과 최근 셰일가스 및 오일 등 비전통자원의 개발이 활발하게 진행되기 때문에 RSS에 대한 많은 연구개발이 수행되었고, 현재는 충분히 높은 신뢰성을 확보하여 상용화 단계에 이르렀다(Park *et al.*, 2013; Ruszka, 2003). RSS는 시추공벽을 고르게 시추하여 유정완결에 앞서 시추공벽을 다듬는데 필요한 장비운용을 최소화할 수 있으며, 지층평가(formation evaluation)에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있기 때문에 RSS에 대한 수요는 앞으로 더욱 증가할 것으로 전망된다(Menand *et al.*, 2012). 이에 본 연구에서는 RSS의 작동 메커니즘인 푸시 비트와 포인트 비트에 관한 기술적 특징에 대해 고찰하고 시추시험을 수행한 실험실 및 현장 프로젝트 사례를 소개함으로써 향후 국내외 유전 개발 시 RSS를 이용한 방향성 시추의 계획 수립 및 적용에 활용하고자 한다.

## RSS 기술특성

RSS는 시추 비트의 각을 변화시키거나 횡력(side force)을 가하여 즉각적으로 시추공의 방향을 제어할 수 있는 기술로써 센서모듈을 이용하여 센서 데이터를 지상의 장비로 보내 시추 목표점과의 상대 위치를 구할 수 있게 하며 목표지점과의 상대위치에 따른 경로계획에 따라 방향성 시추를 진행하게 된다(Shin *et al.*, 2012). 시추공의 방향을 제어한다는 것은 시추공의 궤적이 수직축으로부터 벗어나게 하는 편차(deviation)를 만드는 것으로 RSS는 편차를 발생시키는 작동 메커니즘에 따라 포인트 비트(point-the-bit)와 푸시 비트(push-the-bit) 타입으로 분류할 수 있다.

포인트 비트 타입은 Fig. 1(a)와 같이 비트의 기울기(bit tilt)를 제어함으로써 시추공의 편차를 발생시키며, 비트의 기울기를 제어하기 위해 동력을 전달하는 전동축(shaft)을 굴절시키는 방법을 이용한다(Peach, 2007). 회전하고 있는 전동축을 굴절시키기 위해서는 전동축이 회전의 중심을 벗어나도록 해야 하는데, 이러한 편심운동을 발생시키기 위해 슬리브(sleeve) 내의 편심고리(eccentric ring)를 이용하여 전동축을 굴절시키고 비트의 기울기를 제어한다. 전동축을 굴절시키는 과정에서 전동축의 회전력이 슬리브에 영향을 미치지 않도록 슬리브와 전동축 사이에 베어링을 설치해야 한다(Barton *et al.*, 2006).

푸시 비트는 시추 비트에 횡력을 가하여 굴진방향을 제어하는 방법으로 Fig. 1(b)와 같이 BHA에 달려있는 패드를 이용하여 시추공벽에 미는 힘을 가하게 되면, 미는 힘의 반대 방향으로 시추 비트가 힘을 가하게 된다. 따라서 방향성 시추과정에서 시추 비트의 방향과 굴진

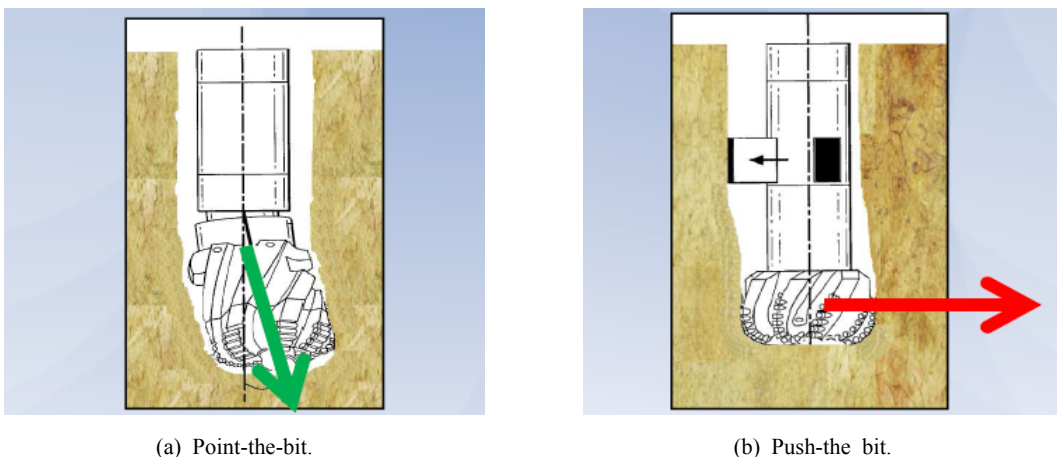


Fig. 1. Type of steering mechanism in RSS(Menand, 2012).

방향이 일치하지 않기 때문에 시추공의 크기가 설계한 것보다 커지기도 하며, 시추공벽이 매끈하게 절단되지 않기 때문에 케이싱을 수행하기 전 시추공벽을 다듬기 위한 이수순환에 많은 시간이 소요된다(Kinn, 2000).

푸시 비트를 이용한 RSS는 Fig. 2와 같이 바이어스 유닛(bias unit)과 제어 유닛(control unit)으로 구성되어 있고, BHA에서 차지하는 길이는 3.8 m로 비교적 간단하다. 바이어스 유닛은 시추 비트 바로 위에 위치하며, 시추동이 회전하는 도중 시추 궤적의 방향성을 제어하기 위해 비트에 힘을 가하는 역할을 한다. 바이어스 유닛 위에 위치한 제어 유닛은 자가 발전 전기장치(self-powered electronics)와 각종 센서로 구성되어 있으며, 설계된 궤적에 맞게 시추할 수 있도록 바이어스 유닛을 제어하는 역할을 한다.

바이어스 유닛이 시추 비트에 힘을 전달하는 방법은 다음과 같다. Fig. 3과 같이 바이어스 유닛 외부에는 3개의 작동기(actuator)라 불리는 힌지 패드(hinged pad)가 있는데 디스크 밸브(disk valve)를 이용하여 힌지 패드의 각 피스톤 챔버(piston chamber)에 순차적으로 이수를 통과시키면, 힌지 패드가 차례로 작동되기 때문에 회전하는 도중에도 시추공벽 내의 일정한 지점에 계속해서 힘을 가할 수 있다.

시추 비트의 방향성 거동에 미치는 영향인자로는 조종성(steerability)과 이동 경향(walking tendency)이 있다. 비트의 조종성(bit steerability, BS)은 횡력과 축력을 동시에 받고 있는 비트가 편차를 발생시키며 측면으로 굴진할 수 있는 능력을 의미하며, 식 (1)과 같이 축 방향에 대한 횡 방향 굴진능력으로 나타낼 수 있다. Fig. 4와 같이 횡 방향 굴진능력은 한 번의 회전에서 횡력 대비 수평방향으로 발생한 변위로 나타내며, 축 방향 굴진능력도 마찬가지로 한 번의 회전에서 비트 무게(weight on bit, WOB) 대비 수직방향으로 발생한 변위를 의미한다.

$$BS = \frac{\text{Lateral Drillability}}{\text{Axial Drillability}} \quad (1)$$

이동 경향은 비트의 이동 각도(bit walk angle)를 통해 파악할 수 있는데, 이동 각도는 비트에 가한 횡력의 방향과 비트의 수평변위가 일어나는 방향이 이루는 각으로 정의된다. 이동 각도가 0보다 작은 경우에는 횡력의 방향을 기준으로 했을 때 수평변위의 방향이 왼쪽에 위치하므로 이동 경향이 왼쪽을 향하고 있는 것을 나타낸다. 이와 반대로 이동 각도가 0보다 큰 경우에는 이동 경향이 오른쪽을 향하고 있는 것을 예측할 수 있으며, 0인 경

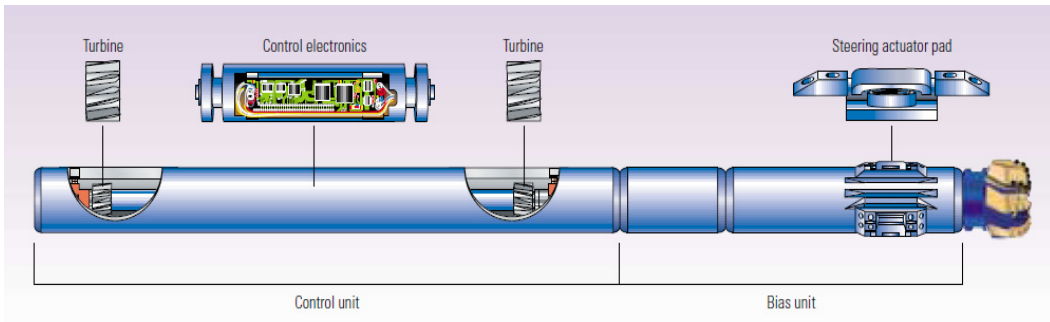


Fig. 2. Push-the-bit rotary steerable system(Downton et al., 2000).

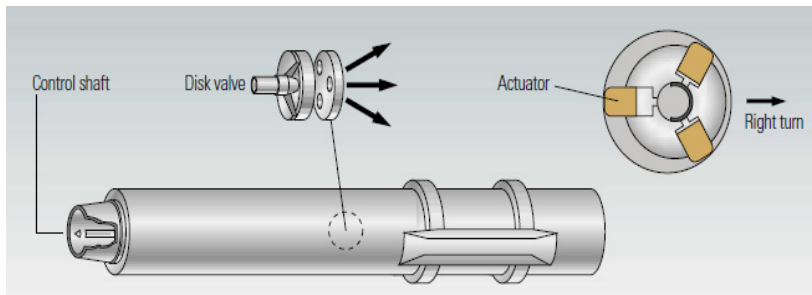


Fig. 3. Principle of bias unit(Downton et al., 2000).

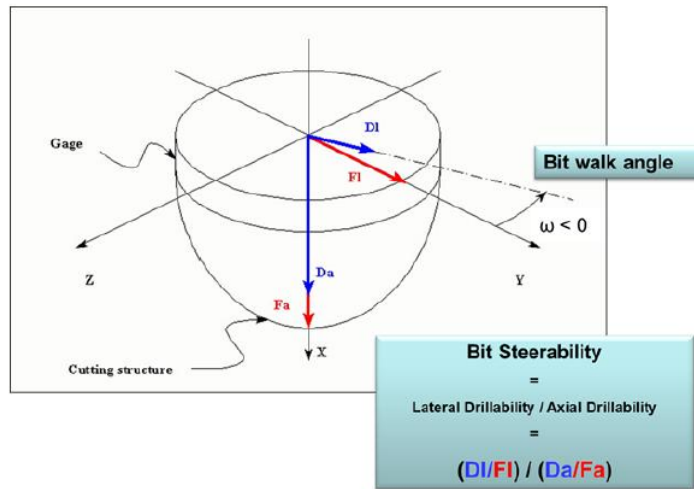


Fig. 4. Bit steerability and walk angle(Dl : lateral displacement, Da : axial displacement, Fl : lateral or side force, Fa : axial force or weight on bit)(Menand *et al.*, 2012).

우에는 횡력의 방향과 수평변위 방향이 일치하는 것으로 비트의 이동 경향이 중립(neutral)임을 알 수 있다.

그러나 포인트 비트나 푸시 비트 방법을 적용할 때 나타나는 시추공의 변위는 각 메커니즘의 독립적인 영향에 의해 나타나는 것이 아니라 하나의 메커니즘이 지배적인 영향을 미치면서 동시에 다른 메커니즘이나 암석의 경도 등이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 방향성 거동을 예측하는 것이 쉽지 않다.

### RSS 기술 적용사례 분석

#### RSS 실험실 시험사례

##### BHA 거동 예측

Stroud 등(2003)은 RSS를 이용하여 Table 1과 같이 다양한 내압강도로 배합한 콘크리트 블록을 시추하는 동

안 BHA의 거동을 파악하는 시험을 총 48회 수행하였고 시추공 상태는 물리검층 장비로 측정하였다. 각 세부 시험에서 시추 방향성 및 경사 제어, 시추공 크기 확장, 푸시 비트와 포인트 비트 방법의 차이를 확인하였으며, 이를 통해 다양한 조건 하에서 BHA의 거동을 파악하였고 편차율 및 오버게이지(overgage)를 예측하는 컴퓨터 모델을 개선하였다.

각 시험에서 사용된 콘크리트 블록은 BHA 지지대, 수압 모터, 수압 펌프 등으로 구성된 수평 시추리그(horizontal drilling simulation rig)와 함께 수평으로 나열하였으며, 블록의 크기를 높이 8 ft, 너비 5 ft로 설정하여 직경 6 inch 시추공을 12개까지 시추 가능하도록 설계하였다. 또한, 시험에 사용된 RSS는 실제 현장에서 사용되는 설계요소 값을 반영하여 설계하였으며, RSS의 기초 설계는 Table 2와 같다.

Table 1. Concrete block composition

Block	Composition
1	High-strength concrete with river rock aggregate throughout(9,500 psi)
2	High-strength concrete with granite aggregate throughout
3	High-strength concrete with river rock aggregate in the upper part and granite aggregate in the low part of the block
4	High-strength concrete with river rock aggregate for the first 40 ft and low-strength concrete(3500 psi) with no aggregate for the second 40 ft
5	Low-strength concrete with no aggregate for the 40 ft and high-strength concrete with river rock aggregate for the second 40 ft

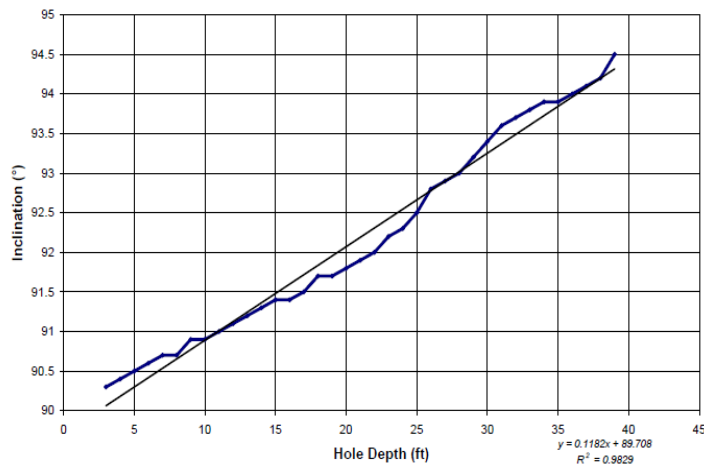
**Table 2.** Design for the slim hole RSS

Hole size (inch)	6~6 3/8	
Deviation rate (deg/100 ft)	> 5	
Rotary speed range (rpm)	80~150	
Flow range (gal/min)	0~300	
Mud density	No restrictions	
Two phase drilling fluid(% gas fraction by volume)	Up to 25	
Bit pressure drop	No restriction	
Maximum weight on bit (lb)	25,000	
Maximum operating torque (ft-lb)	7,500	
Overpull (lb)	reusable	100,000
	survival	250,000
Temperature (°C)	165	
Hydrostatic pressure (psi)	22,500	
Power	Hydraulic pump driven by drill string rotation	
Hydraulic medium	High grade synthetic oil	

저강도에서 고강도로 변화하는 콘크리트 블록을 시추하는 동안 나타나는 비트 경사각 경향 분석 시험을 수행하기 위해 RSS의 툴페이스(toolface)와 편향은 각각 0°와 100%로 설정하였다. 초기 굴진율(rate of penetration, ROP)은 8 ft/min이었으나 고강도 콘크리트에서 3 ft/min으로 감소하였다. 시험이 수행되는 동안 툴페이스와 편향을 일정하게 유지하였으며, 시추 비트는 45 ft를 지난 지점에서 블록의 윗부분으로 돌출되었다. 시추공 돌출부는 시추 시작점에서 위쪽으로 24 inch, 오른쪽으로 5 inch 떨어진 곳에 위치하며, 시추공의 편차율 및 오버게

이지는 각각 11.4°/100 ft, 0.040~0.060 inch로 측정되었다. 콘크리트 블록을 통해 측정된 경사는 Fig. 5와 같이 이전에 수행된 시험에서 물리검층 장비로 측정한 경사와 매우 유사한 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

이후 RSS의 방향 제어를 검증하기 위한 시험을 실시하였으며, 이때 툴페이스는 177°, 편향은 40%로 설정하여 -3°/100 ft의 편차율을 유지하였다. 첫 번째 시험과 같이 저강도 콘크리트를 시추하는 동안 굴진율은 8 ft/min이었으나 고강도 콘크리트에서 3 ft/min으로 감소한 것을 확인하였다. RSS는 툴페이스와 편향을 계속해



**Fig. 5.** Wireline survey of drilling simulation test(Stroud *et al.*, 2003).

서 유지하였으며, 시추 비트는 80 ft를 지나 마지막 블록에서 돌출되었다. 시추공 돌출부는 시추 시작점에서 아래쪽으로 17 inch, 왼쪽으로 8 inch 떨어진 곳에 위치하며, 시추공의 편차율 및 오버게이지는  $-2.80^{\circ}/100$  ft,  $0.040\sim 0.060$  inch로 측정되었다.

또한,  $5^{\circ}/100$  ft의 편차율을 얻기 위한 시험에서는 기존의 시추공을 우회하는 시추 시험을 실시하였다. 3D 모델을 통해 시추궤적이 매우 작은 오차범위 이내에서  $5^{\circ}/100$  ft의 편차율을 유지하는 것을 확인하였다. 시추공

돌출부는 시추 시작점에서 위쪽으로 24 inch, 오른쪽으로 24 inch 떨어진 곳에 위치하며, 시추공의 편차율 및 오버게이지는  $5^{\circ}/100$  ft,  $0.040\sim 0.060$  inch로 측정되었다. 편차율과 오버게이지를 예측하는 컴퓨터 모델의 계산 값인 Table 3과 각 시험에서 측정된 값을 비교한 결과 매우 유사한 값을 얻을 수 있었으며 이를 통해 BHA의 거동을 예측할 수 있음을 확인하였다.

다음으로 푸시 비트와 포인트 비트를 비교하기 위한 시험을 수행하였다. 포인트 비트를 푸시 비트로 전환하

**Table 3.** BHA analysis prediction

	Test 1	Test 2	Test 3
Over gauge (inch)	Deviation rate ( $^{\circ}/100$ ft)	Deviation rate ( $^{\circ}/100$ ft)	Deviation rate ( $^{\circ}/100$ ft)
0.020	16.32	-5.63	7.44
0.040	13.14	-2.60	6.18
0.060	9.49	0.88	4.47

**Table 4.** Summary of results

Hole No.	RSS tool face( $^{\circ}$ )	RSS def. (inch)	BHA analysis prediction	Actual deviation		Average borehole size(inch)	Comments
				Based on survey data(inc. only)	Based on exit point		
1	0	0.150	7.26(6.00"hole)	6.03	5.95	6.036"	Bit exited top of block at 55ft.
			6.34(6.02"hole)				
			5.41(6.04"hole)				
2	0	0.150	5.97(6.00"hole)	3.88	4.23	6.036"	Bit exited top of block at 66ft. No flex collar.
			5.50(6.02"hole)				
			5.24(6.04"hole)				
3	0	0.150	7.12(6.00"hole)	4.51	4.39	6.070"	Bit exited top of block at 64ft. No bit stabilization
			6.30(6.02"hole)				
			5.47(6.04"hole)				
4	0	0	-1.21(6.00"hole)	-0.18	-0.39	6.025"	Bias unit 0.040" deflected on breakout springs
			-1.30(6.02"hole)				
			-1.40(6.04"hole)				
5	180	0.150	-6.94(6.00"hole)	-6.86	-6.86	6.026"	Drilled through granite interface
			-4.68(6.02"hole)				
			-2.43(6.04"hole)				
6	45	0.150	7.26(6.00"hole)	4.58	4.09	6.045"	Built and turned to the right
			6.34(6.02"hole)				
			5.41(6.04"hole)				
7	0	0	-1.84(6.00"hole)	-1.99	-2.06	6.072"	Driveshaft rigidly maintained in center
			-1.94(6.02"hole)				
			-2.03(6.04"hole)				

기 위해 비트 근처의 안정기(stabilizer)를 제거하였고, 각 방법은 11°/100 ft의 편차율로 동일하게 설정하였다. 그 결과, 푸시 비트를 사용한 시추공의 직경이 더 컸으며 시추공벽이 고르지 못하다는 것을 확인하였다. 푸시 비트의 경우 오버 게이지가 0.300 inch까지 증가한 반면에 포인트 비트 방법의 경우 시추 공벽이 매끈하였으며 좀처럼 0.060 inch의 오버 게이지를 초과하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 높은 오버 게이지와 시추 공벽이 고르지 못함에도 푸시 비트는 포인트 비트와 비슷한 편차율을 보였다.

2001년에 RSS의 제어가능성 및 예측가능성을 확인하기 위해 포인트 비트를 이용하여 시험을 실시하여 Table 4와 같은 결과값을 도출하였다. 결과 분석을 통해 BHA 구성성분이 모두 갖춰진 경우 컴퓨터 모델을 통해 도출된 결과 값과 실제 시험의 값이 유사함을 확인하였다. 또한, RSS의 다양한 톨페이스에서도 실제 시험과 컴퓨터 모델의 값이 유사함을 통해 BHA의 거동이 예측 가능함을 확인하였다. 최종적으로 Stroud 등(2003)은 다양한 콘크리트 블록을 이용한 시추 시험을 통해 RSS의 방향 제어 가능성 및 시추공벽의 상태와 초기설정을 유지하는데 있어 포인트 비트 방법이 푸시 비트 방법보다 효과적임을 확인하였다. 또한, 푸시 비트 방법은 상대적으로 높은 횡력 때문에 진동이 많이 발생하고 비트의 수명이 단축되는 단점을 가지고 있기 때문에 포인트 비트 방법이 목표 지점까지의 시추를 예측하고 제어하기가 용이함을

확인하였다.

**RSS 안정성 시험**

RSS의 복합적인 사용과 다양한 유정에 적용하기 위해 서는 시추 비트의 특성을 파악하고 설계하는 것이 매우 중요하다. Barton 등(2006)은 비트의 역학적 특성에 따른 RSS 변화 양상을 확인하기 위해 포인트 비트 방법을 사용하여 시험을 진행하였다.

RSS공법에서 비트가 안정적이어야 방향성을 유지할 수 있으며, 진동 발생을 최소화하고 비트 손상을 방지할 수 있다. 따라서 Barton 등(2006)은 BHA와 서브(sub) 내부에 포함된 DDDR(downhole dynamic data recorder)를 통해 실시간으로 시추공 내부의 측면 안정성을 평가하였다.

Table 5에 정리된 IADC 코드 S434, S442의 두 가지 종류의 비트가 사용되었고 각 비트에 따라 안정성을 평가하였다. 비트 모두 12 1/4 inch PDC 비트지만 S434는 일반적인 게이지 패드를 이용하는 반면, S442는 360도 고리 게이지를 사용하며 고리 게이지는 측면으로의 움직임을 제한하고 비트의 수평변위가 적기 때문에 게이지 길이가 비교적 짧아도 높은 측면 안정성을 나타내는 특징이 있다.

비트의 특성에 따른 RSS의 방향성을 평가하기 위해 높이 8 ft, 너비 5 ft, 총 길이 80 ft인 경암 콘크리트 블록에 수평 시추리그로 총 4번에 걸쳐 시험하였다. 첫 번째 시추공(test hole A)은 S434 비트를 사용하며, Table 6과

**Table 5.** Bit characteristics

Feature	Test Bit 1	Test Bit 2
IADC code	S434	S442
Diameter	12.25 inch	12.25 inch
Body material	Steel	Steel
Blades	8	8
Primary cutter size	0.5 inch	0.3 inch
Makeup length	1.14 ft	0.75 ft
JSA	33.1 inch <sup>2</sup>	31.5 inch <sup>2</sup>
Gauge length	3.25 inch	2 inch
Gauge geometry	Straight	Full ring
Nozzles	8 variable	8 variable

**Table 6.** Drilling parameters, test hole A

Start Depth (ft)	End Depth (ft)	WOB (lb)	Rotary Speed (RPM)	Flow Rate(GPM)
0	27.7	20,000	100	450
27.7	47			480

같은 시추 변수를 이용하여 시험을 수행하였다. 시추공 직경은 12.265~12.275 inch 범위를 보였으며, 5.1°/100 ft의 편차율을 보였다. 굴진율은 180~260 ft/hr의 범위에서 평균적으로 209 ft/hr의 속도로 나타났다. 시추 과정 중 압편이 증가할수록 굴진율이 감소했기 때문에 압편을 제거하기 위해 더 많은 양의 이수 주입이 필요하고, Fig. 6(a)와 같이 DDDR로부터 얻은 RPMd값을 통해 스틱 슬립(stick-slip)현상이 반복됨을 확인하였다.

두 번째 시추공(test hole B)은 S434 비트를 사용하며, Table 7과 같은 시추 변수를 이용하여 시험을 수행하였다. 시추 비트는 57 ft를 시추한 뒤 시추공 시작점보다 실제수직심도(true vertical depth, TVD)가 1.32 ft 높은 곳에서 돌출되었고 공의 직경과 편차율은 각각 12.250~12.350 inch와 5.4°/100 ft였다. 굴진율은 125~180 ft/hr이었으며, 평균적으로 143 ft/hr의 굴진율을 나타냈다. Fig. 6(b)와 같이 측정된 RPMd값은 첫 번째 시험과 유사한 경향을 나타냈으나 약 5.2 시간 지점에서 높은 스틱 슬립이 일어났고, 이때 횡방향 가속도가 높음을 알 수 있었다. 전체 횡방향 가속도는 첫 번째 시험보다 낮았는데 이는 DDDR의 위치가 안정기 위쪽에 위치하여, 직접적으로 비트에 붙어 있지 않아 안정기가 비트에서 발생된 횡방향 진동을 완화시켰기 때문이다.

세 번째 시추공(test hole C)은 S442 비트가 이용되었고 게이지는 완전 고리 형태이며, Table 8과 같은 시추 변수를 이용하여 시험을 수행하였다. 시추 비트는 콘크

리트 블록 전체를 통과하였으며, 돌출된 지점은 시추 시작점보다 2.10 ft가 높았고, 공의 직경은 12.250~12.300 inch이며, 편차율은 5.1°/100 ft였다. 굴진율은 12~45 ft/hr로 낮았으며, 평균적으로 19 ft/hr의 속도를 나타내었고, Fig. 6(c)와 같이 RPMd의 변화를 통해 스틱 슬립 현상이 빈번하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 고리 형태의 게이지가 강한 스틱 슬립을 발생시키고, 시추공과 게이지 링(ring)간의 접촉면적이 넓어 횡방향 진동이 낮아짐을 확인하였다.

네 번째 시추공(test hole D)은 세 번째 시추공과 마찬가지로 S442 비트로 시추하였지만 비트의 게이지를 부분 고리 형태로 개조하여 사용하였으며, Table 9와 같은 시추 변수를 이용하여 시험을 수행하였다. 시추 비트가 최종 돌출된 지점은 시추 시작점보다 2.10 ft가 높았고, 측정된 시추공의 직경은 12.250~12.255 inch이며 편차율은 5.1°/100 ft로 나타났다. 굴진율은 20~50 ft/hr였으며, 평균적으로 36 ft/hr의 속도를 나타냈다. 스틱 슬립 현상이 감소한 것을 확인할 수 있었으며, RPMd 또한 전체적으로 감소한 것을 확인하였다(Fig. 6(d)). RPMd의 감소는 개조된 비트만을 사용하여 나타난 효과라고는 판단하기 어려우나 개조된 비트를 적용할 경우 수력 펌프 출력의 증가, WOB의 감소 등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 스틱 슬립 현상이 감소함을 확인하였다.

Barton 등(2006)의 시험 결과에 의하면, 스틱 슬립은 횡방향 가속도와 직접적인 연관성이 있는 것으로 나타났

**Table 7.** Drilling parameters, test hole B

Start Depth (ft)	End Depth (ft)	WOB (lb)	Rotary Speed (RPM)	Flow Rate(GPM)
0	18.7	20,000	100	480
18.7	24.6			510
24.6	33.9			456
33.9	57			510

**Table 8.** Drilling parameters, test hole C

Start Depth (ft)	End Depth (ft)	WOB (lb)	Rotary Speed (RPM)	Flow Rate(GPM)
0	17.8	12,000	105	500
17.8	43.6	15,000		
43.6	61.3	17,000		
61.3	79.5	18,000		

**Table 9.** Dilling parameters, test hole D

Start Depth (ft)	End Depth (ft)	WOB (lb)	Rotary Speed (RPM)	Flow Rate(GAM)
0	33	16,000	140	510



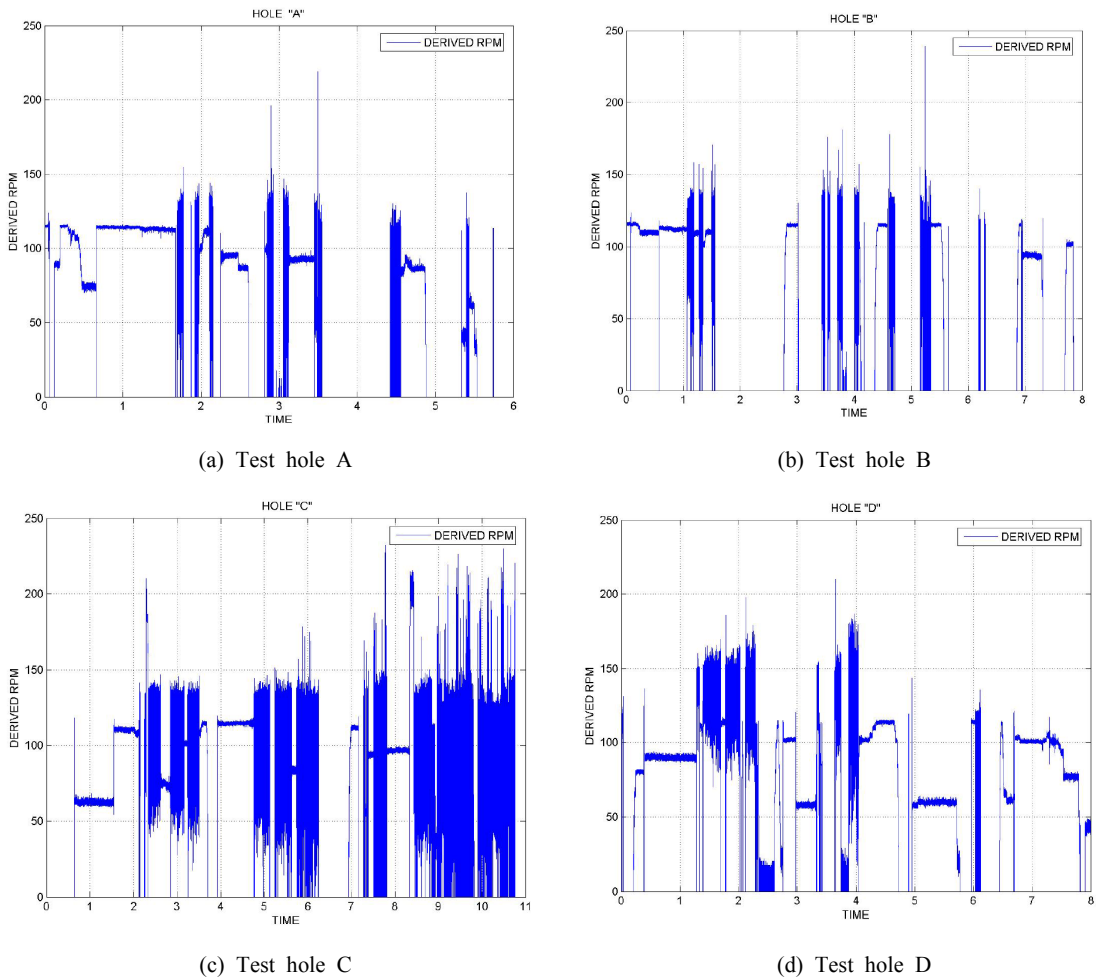


Fig. 6. RPMd plot for test hole(barton *et al.*, 2006).

다. RPM이 높은 경우 스틱 슬립이 1차적으로 발생하게 되면, 2차적으로 횡방향 진동이 발생하는데 이 경우, 비트가 한 번 회전하는 동안 지층을 절삭하는 굴착 깊이가 증가하게 되고 이로 인해 다시 스틱 슬립이 발생할 가능성이 높아진다. 이와 같이 스틱 슬립이 반복해서 발생하는 경우 시추공의 크기가 일정하지 않게 되며, 결과적으로 잘못된 방향으로 시추 궤적이 형성될 것으로 판단된다.

**RSS 현장 적용사례**

**U.A.E 아부다비 육상 유전**

RSS는 육해상 유전 개발을 위해 U.A.E, 이집트, 사우디아라비아, 이란, 리비아 등 중동 지역에서에서 최근들어 널리 쓰이고 있는 시추 방법이다. 이 중 U.A.E의 아부다비 육상 유전은 12 1/4 inch RSS를 이용하여 기존

시추 방법의 기술적 한계를 극복한 대표적인 사례이다. 아부다비는 서쪽으로 페르시안 만과 접해 있고, 프로젝트가 진행되었던 곳은 아부다비의 인근 서쪽지역에 위치한다.

아부다비 유전의 생산을 위해 탄산염암과 셰일로 이루어진 Fiqa층부터 Thamama층을 시추해야 하는데 이 중 Nahr Umr층은 매우 얇은 셰일로 겹겹이 이루어져 이수모터를 사용할 경우 굴착 중 경사각이 떨어지는 현상이 발생하여 각도 유지를 위해 슬라이드에 많은 시간이 소요되었다. 이러한 문제를 극복하기 위해 비트에 높은 하중을 가할 수 있고 비트를 계속 회전시키면서 경사각을 유지할 수 있는 RSS를 사용하여 시추를 수행하였으며, RSS는 Schlumberger사의 PowerDrive 900을 사용하였다. WOB는 40,000~45,000 lb의 범위에서 조절되었으

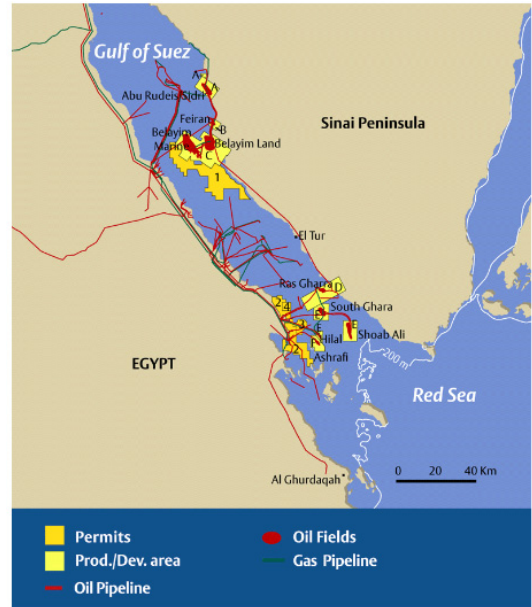
며, 회전 속도는 스틱 슬립 현상이 발생하지 않도록 매우 높게 설계하였다. 시추에 사용된 PDC 비트는 National Oil Well사의 5개의 블레이드로 구성된 16 mm 커터의 RSX192가 사용되었다. 세일층을 시추할 때 굴진율은 62 ft/hr의 평균 굴진율을 보였으며, 순간 최고 굴진율은 250 ft/hr을 기록하였다.

Fig. 7은 평균 굴진율이 유지될 때 전체 범위의 시추 경향을 나타낸다. 임계 굴진율 이상을 얻기 위해 이수의 주입율은 1000 GPM을 유지해야 함을 알 수 있다. 결과적으로 아부다비 유전에 분포하는 세일층 등의 이유로 기존의 방법으로 시추가 어려웠던 부분을 RSS를 통해 원활하게 시추를 수행할 수 있었다. 또한, 55~60의 경사각과 굴진율이 250 ft/hr 일 때, 환체공간의 압력 측정을 통해 RSS를 적용 후 압편 제거 능력을 확인하였고 이를 통해 왕복시간(tripping time)이 감소하는 것을 확인하였다(Pratten *et al.*, 2003).

**이집트 Belayim Marine 해상 유전**

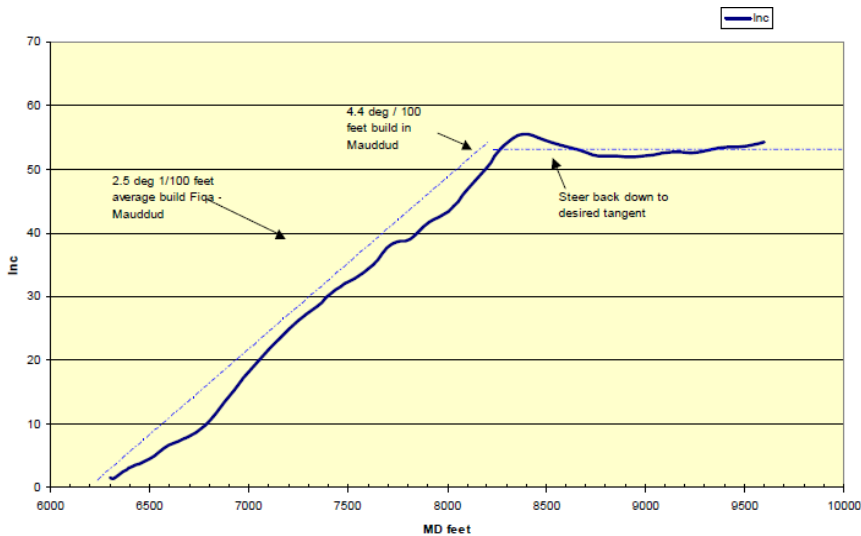
수에즈만의 해상 유전인 Belayim Marine은 1961년도에 발견되어 Petrobel사에 의해 운영되고 있는 지역이다 (Fig. 8). 이 중 113M-86 유전의 생산 개선을 위해 Schlumberger사의 RSS인 PowerDrive vorteX를 적용하였다.

세일과 모래의 혼합층에서 많은 양의 이수 손실 및 고착현상이 발생할 수 있고 굴착 중 지층 손상 문제가 발생하였기 때문에 기존의 이수모터를 사용하는 대신 RSS를 이용한 방향성 시추를 통해 새로운 생산정을 개발하여 이를 해결하고자 하였다. 세일과 모래 혼합층을 포함



**Fig. 8.** Location of oil and gas fields in Gulf of Suez(Fact book, 2014).

한 2,730 m를 시추하는데 기존 시추 방법보다 굴진율이 47% 향상되어 약 10일 정도의 시간을 절감하였다. 이에 2004년 당시 600,000 USD에 해당되는 비용의 감소 효과를 보았으며, 계획한 시추궤도와 매우 유사하게 시추할 수 있었다(Copercini *et al.*, 2004).



**Fig. 7.** 12 1/4 inch build profile onshore Abu Dhabi(Pratten *et al.*, 2003).

## 결론 및 제언

본 연구에서는 방향성 시추를 위한 RSS의 작동 메커니즘인 푸시 비트와 포인트 비트 특징에 대해 고찰하였으며, 실험실 시험사례 및 현장 적용사례를 소개하였다.

RSS는 작동 메커니즘에 따라 시추 비트의 기울기를 제어하는 포인트 비트와 시추 비트에 횡력을 가하여 굴진방향을 제어하는 포인트 비트가 있다. 이러한 시추 비트의 방향성 거동에 미치는 영향인자로는 횡력과 축력을 동시에 받고 있는 비트가 편차를 발생 시키며 측면으로 굴진할 수 있는 능력을 의미하는 조중성과 비트에 가한 횡력의 방향과 비트의 수평변위가 일어나는 방향이 이루는 각인 이동 경향이 있다.

실험실 시험사례를 통해 다양한 콘크리트 블록에서 RSS를 이용한 시추가 방향성 예측 및 경사 제어 가능성을 확인할 수 있었으며, 푸시 비트 방법이 상대적으로 높은 횡압력으로 진동이 많이 발생하기 때문에 포인트 비트 방법이 푸시 비트 방법 보다 제어하기 용이함을 확인하였다. 또한, RSS의 방향성 유지를 위해서는 비트 안정성이 필요하며 정확한 궤적을 형성하기 위해 스틱 슬립을 억제해야 함을 확인하였다.

RSS의 현장 적용사례 중 하나인 U.A.E 아부다비 육상 유전의 경우 기존의 회전식 시추 기술인 이수모터를 대신하여 RSS를 적용한 결과 굴진율 향상과 원활한 시추를 수행할 수 있었다. 또한, 이집트 Belayim Marine 해상 유전에서는 기존의 이수모터를 사용하여 세일과 모래 혼합층을 시추 시 이수 손실이 발생할 확률이 높아 RSS를 적용한 결과 굴진율이 47% 향상되었고 시추 작업기간을 10일 정도 단축할 수 있었다.

본 연구에서 고찰된 RSS의 포인트 비트와 푸시 비트의 작동메커니즘과 비트의 특성 및 콘크리트 강도에 따른 BHA 거동 등의 실험실 시험사례와 얇은 세일층 및 세일과 모래 혼합층에서 사용된 RSS의 현장 적용사례는 향후 국내외 유전 개발 시 RSS를 이용한 방향성 시추 계획 수립 및 적용에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## References

Barton, S.P., Lockley, J., Stroud, D. and Peach, S.R., 2006, "Coupling of Downhole Dynamics Recorder Enhances System-Matched Approach to Drill Bit Design and Application With a Specific Rotary Steerable System," *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, San Antonio, Texas, USA, Sep. 24-27, SPE 102182.

Choi, W., 1990, "A Study on the Prediction of Hole Trajectory in Oilwell Drilling," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 27, No. 3, pp. 193-200.

Copercini, P., Soliman, F., Gamal, M.E., Longstreet, W., Rodd, J., Sarssam, M., McCourt, L., Persad, B. and Williams, M., 2004, "Powering Up to Drill Down," *Oilfield Review*, Vol. 16, Issues 4, pp. 4-9.

Downton, G., Hendricks, A., Klausen, T. and Pafitis, D., 2000, "New Directions in Rotary Steerable Drilling," *Oilfield Review*, Vol. 12, Issues 1, pp. 18-29.

Fact Book 2007, 2014.07.11, [www.eni.com](http://www.eni.com).

Kang, J., Choe, J. and Han, K., 1990, "A Numerical Analysis on Deviatin Control of Directional Hole," *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 27, No. 4, pp. 290-297.

Kinn, S., Allen, P. and Slater, M., 2000, "Use of a Rotary Steerable Tool at the Valhall Field, Norway," *IADC/SPE Drilling Conference*, Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, USA, Feb. 23-25, SPE 59217.

Menand, S., 2012, *Latest Advancements in Drillstring Mechanics: BHA & Buckling Modeling*, Drillsan.

Menand, S., Simon, C., Gerbaud, L., Ben Hamida, M., Denoix, H.J., Cuillier, B., Gaombalet, J., Amghar, Y. and Sinardet, H., 2012, "PDC Bit Steerability Modeling and Testing for Push-the-bit and Point-the-bit RSS," *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, San Diego, California, USA, Mar. 6-8, SPE 151283.

Park, B., Kim, J., Park, J., Shin, J. and Myung, H., 2013, "Hybrid 4-Pad Rotary Steerable System for Directional Drilling of Unconventional Resources," *Proc. of the 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Jeju, Korea, Oct. 31-Nov. 2, pp.659-660.

Peach, S., 2007, "Rotary Steerable Systems Prove Value Offshore Indonesia, Offshore Libya, in Gulf of Mexico," *Drilling Contractor*, [http://www.drillingcontractor.org/dcp/dc-marapr07/DC\\_Mar07\\_peach.pdf](http://www.drillingcontractor.org/dcp/dc-marapr07/DC_Mar07_peach.pdf).

Pratten, C., El Kholy, K., Naganathan, S. and Sharaf, E., 2003, "Rotary Steerable System Applications in the Middle East," *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Abu Dhabi, U.A.E, Oct. 20-22, SPE 85285.

Ruszka, J., 2003, "Rotary Steerable Drilling Technology Matures," *Drilling Contractor*, <http://www.drillingcontractor.org/dcp/2003/dc-julyaug03/July3-Rotary.pdf>.

Shin, C., Lee, S., Kwon, S., Park, D. and Lee, Y., 2012, "A Classification and a Survey on the Core Technology

for Shale Gas Development,” J. of the Korean Society for Geosystem Engineering, Vol. 49, No. 3, pp. 395-410.  
 Stroud, D., Russell, M. and Peach, S., 2003, “Development of the Industry’s First Slimhole Point-the-Bit Rotary

Steerable System,” *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, Denver, Colorado, USA, Oct. 5-8, SPE 84449.



### 조민우

2011년 전남대학교 건설지구환경공학부  
 공학사

현재 전남대학교 에너지자원공학과 석유천연가스공학 석사과정  
 (E-mail; cmw7756@naver.com)

### 장호창

현재 전남대학교 에너지자원공학과 석유천연가스공학 박사과정  
 (本學會誌 第51卷 第4号 參照)

### 이정환

현재 전남대학교 공과대학 에너지자원공학과 교수  
 (本學會誌 第51卷 第4号 參照)



### 유인항

1986년 한양대학교 자원공학과 공학사  
 1988년 한양대학교 자원공학과 석사  
 1996년 한양대학교 자원공학과 박사

현재 (주)한진디엔비 기술연구소장  
 (E-mail; cbm@hanjindnb.com)