시추비트의 마모도를 고려한 라운드 트립 발생 예측 시뮬레이터 개발

이승수, 김광염*, 신휴성

Development of Round Trip Occurrence Simulator Considering
Tooth Wear of Drill Bit

Seung Soo Lee, Kwang Yeom Kim*, Hyu-Soung Shin

Abstract After the introduction of geothermal power generation technology based on engineering reservoir creation that can be applied on non-volcanic region, industrial need for studies on the efficient and economic execution of costly deep-depth drilling work becomes manifest increasingly. However, since it is very difficult to predict duration and cost of boring work with acceptable reliability because of many uncertain events during the execution, efficient and organized work management for drilling is not easily achievable. Especially, the round trip that discretely occurs because of the abrasion of bit takes more time as the depth goes deeper and it has a great impact on the work performance. Therefore, a technology that can simulate the occurrence timing and depth of round trip in advance and therefore optimize them is essentially required. This study divided the abrasion state of bit into eight steps for simulation cases and developed a forecast algorithm, i.e., TOSA which can analyze the depth and timing of round trip occurrence. A methodology that can divide a unit section for simulation has been suggested; while the Bourgoyne and Young model has been used for the forecast of drilling rates and bit abrasion extent by section. Lastly, the designed algorithm has been systemized for the convenience of the user.

Key words Geothermal power generation, Drilling, Rate of penetration, Round trip, Simulator

초 록 비화산지대에서도 적용 가능한 인공저류층 생성방식의 지열발전기술의 등장으로 막대한 비용이 소요되는 대심도 시추공사를 효율적이고 경제적으로 수행하기 위한 연구개발의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 시추공사는 수행과정에서 수많은 불확실한 사건이 발생하여 공기와 비용을 신뢰적으로 예측하기가 매우 어렵기 때문에 계획적이고 효율적으로 공사를 관리하기가 어려운 실정이다. 특히, 비트의 마모로 인해 이산적으로 발생하는 시추장비의 라운드 트립(round trip)은 심도가 깊어질수록 소요시간이 증가하여 공사 성능에 영향을 많이 끼치는 요소로서 발생시점과 깊이를 사전에 평가하여 최적화할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 비트의 마모상태를 총 8단계로 구분하여 마모단계별 라운드 트립이 발생하는 깊이와 시점을 분석할 수 있는 예측 알고리즘(TOSA)을 개발하였다. 시뮬레이션을 위한 단위구간을 분할할 수 있는 방법론을 제시하였으며, 구간별 시추속도 및 비트의 마모도 예측을 위한 방법으로 Bourgoyne and Young의 모델을 활용하였다. 마지막으로 사용자 편의성을 고려하여 개발된 알고리즘을 시스템화 하였다.

핵심어 지열발전, 시추공사, 시추속도, 라운드 트립, 시뮬레이터

Received: Nov. 21, 2013

Revised: Dec. 17, 2013

Accepted: Dec. 19, 2013

*Corresponding Author: Kwang Yeom Kim

Tel) +82319100225, Fax) +82319100235

E-Mail) kimky@kict.re.kr

Korea Institute of Construction Technology, Daehwa-dong
283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do,
411-712, Korea

1. 서 론

최근, 전 세계적으로 화석에너지 고갈에 대한 우려 및 환경에 대한 관심이 집중되면서 계절과 날씨 등에 영향을 받지 않고 지속적으로 일정량의 전기를 생산할 수 있는 지열발전에 대한 관심이 커지고 있다. 특히, 비화산지대에서도 적용 가능한 인공 지열 저류층 생성기술

(enhanced geothermal system; EGS)이 개발되어 2050년까지 전 세계적으로 200 GW의 지열발전이 가능할 것으로 전망하고 있다(International Energy Agency, 2011).

EGS기술은 비화산지대에서 고온의 지하 지열자원을 확보하기 위하여 지하 수 km의 대심도 시추공사를 요구한다. EGS 프로젝트에서 시추공사는 전체 프로젝트 총 소요비용의 약 50~70%를 차지하며, 이중 케이싱, 시멘팅 등 여타 공종을 제외하고 순수한 굴착(drilling activity)만 고려하더라도 총 시추공사비용의 약 25~40%와 총 작업소요시간의 약 40% 이상을 차지하기 때문에 프로젝트 계획 및 관리 시 중점관리요소라 할 수 있다(Amy, 2009). 따라서 시추공사를 경제적이고 효율적으로 수행하기 위한 노력이 끊임없이 진행되어왔다.

과거 1950년대에서부터 수행된 시추공사의 성능을 최적화하기 위한 관련 연구수행 내용을 살펴보면, 1950년대부터 1970년대까지는 대부분 주어진 조건에서 시추속도(rate of penetration; ROP)와 WOB(weight on bit), RPM(revolution per minute)과 같은 시추제어인자에 대한 성능을 예측/관리할 수 있는 기초연구를 수행하는데 목적이 있었다(Fig. 1). 그 중 대표적인 연구로써 Maurer(1962)는 WOB, RPM, 비트(bit) 직경 및 암석강도와 관련된 변수를 조절하여 암석을 천공하고, 이때 생성되는 시추잔해물의 양을 분석하여 롤러콘비트(roller-cone bit)의 시추속도를 최적화할 수 있는 이론적인 함수를 제시하였다. Galle and Woods(1963)는 시추시 WOB와 RPM의 최적의 조합을 유도할 수 있는 그래프를 작성하고, 시추비용을 개략적으로 산정할 수 있는 방법론을 제시하여 연구내용에 대한 경제적 효과를 입증하였다. Bourgoyne and Young(1974)은 암반의 강도, 비트의 마모도, RPM, WOB, 지반의 암밀상태, 시추공 하부의 압력 차 등 총 8가지 영향인자를 고려하여 시추속도를 산정할 수 있는 수치적 모델을 개발하고,

주어진 시공조건에서 최적의 WOB, RPM, 비트의 예상 마모상태 등을 산정할 수 있는 방법론을 제시하였다. 또한, 8가지의 영향인자의 시추속도에 대한 영향정도는 과거 현장데이터를 기반으로 다중회귀분석(multiple regression method)을 실시하여 산출하였다. Bourgoyne and Young의 시추속도 산정 및 시추제어인자의 최적화 방법(이하 BYM)은 과거 연구된 수많은 내용 가운데 가장 신뢰성이 높은 방법으로 평가받고 있다(Bahari and Baradaran, 2007). 이후, 1980년대부터는 첨단 IT 기술이 급격히 발전되면서 실시간 현장데이터 인터페이스 기술인 MWD(measurement while drilling), LWD(logging while drilling)와 같은 시스템이 등장하여 실시간 시추성능 최적화 시스템 개발을 위한 연구가 많이 진행되었다. 국내의 경우, 국외에 비하여 연구가 더디게 진행되고 있지만 TBM(Tunnel Boring Machine) 굴착과정에서의 굴진성능을 예측하기 위한 노력이 진행되어 왔으며(Lee & Choi, 2003), 최근 EGS 프로젝트의 도입과정에서 시추성능의 최적화의 중요성을 인지하여 BYM 방법론을 활용하여 시추성능을 평가하는 연구가 수행되었다(Kim *et al.*, 2013).

그러나 이러한 연구사례들은 시추의 속도만을 고려하여 최적화시킬 수 있는 제어정보를 생산하고 운영하기 위한 방법의 고안에 초점이 맞추어 있었다. 시추공사는 시추속도뿐만 아니라 시추액 유실(lost circulation), 파이프 및 BHA(bottom hole assembly)와 같은 시추도구의 파손, 시추장비의 고장과 같은 잠재적 문제인자가 불확실하게 발생되고, 비트의 마모로 인한 교체작업이 이산적으로 발생되기 때문에 종합적인 성능을 신뢰적으로 예측하여 설계하기가 어렵다. 특히, 비트의 마모가 진행됨에 따라서 이를 교체하기 위하여 지중의 시추 파이프라인을 지상으로 인발하고 교체 후, 재 인입하는 ‘라운드 트립(round trip)’이라는 일련의 공사절차는 시추공사에서 약 22%의 공기를 소요하는 작업으로서

Fig. 1. Research history for drilling optimization(Eren, 2010)

EGS 발전과 같이 지하 수 km에 이르는 심도가 깊은 공사일수록 프로젝트의 성능에 큰 영향을 미치게 되기 때문에 시추속도와 함께 비트의 마모로 인한 라운드 트립의 발생을 모두 고려하여 최적화하여야 할 것이다 (Polsky *et al.*, 2008).

시추현장에서 비트의 마모의 진행에 따른 라운드 트립 발생시점의 판단은 시추 엔지니어의 경험에 바탕을 둔 직관적 판단에 따라 결정한다. 라운드 트립의 발생 빈도를 줄이기 위하여 비트의 마모를 최대한 많이 진행 시킨다면, 시추속도가 감소할 수 있고, 시추속도를 최적화하기 위하여 비트의 마모가 적은 상태에서 라운드 트립을 수행한다면 심도가 깊은 지점의 경우 라운드 트립 과정에서 시간이 오래 걸리기 때문에 발생 빈도수의 증가로 오히려 공기 및 소요비용을 증가시킬 우려가 있다. 따라서 사전에 비트의 마모단계에 대한 시나리오에 따라 라운드 트립이 발생할 수 있는 모든 경우의 수를 산출할 수 있는 알고리즘을 설계하고, 분석을 능동적으로 수행할 수 있는 시뮬레이터를 개발하여 시스템화 할 수 있다면, 기획단계에서 성능을 최적화 할 수 있는 케이스로 공정과 비용을 설계할 수 있어 계획적이고 효율적인 시추공사를 수행할 수 있을 것이다.

2. 연구의 범위 및 방법

일반적인 프로젝트의 성능은 소요공기와 비용으로 가늠할 수 있으며, 시추공사의 경우 리그장비의 임대료와 인건비 등의 비중이 매우 크기 때문에 공기의 단축이 비용을 절감시킬 수 있는 가장 효율적인 방안이라 할 수 있다. 프로젝트 수행 전 시추공사의 성능을 최적화하여 설계하기 위해서는 시추속도와 라운드 트립의 발생시점을 예측할 수 있는 기술을 확보하여 소요되는 공기가 최소화될 수 있도록 설계해야 한다. 두 가지 기술 모두 비트의 마모도와 상관관계가 있는데, 비트의 마모가 진행될수록 시추속도는 저하되며(Bourgoyne and Young, 1974), 라운드 트립의 경우 비트의 마모 상태를 예측하여 교체기준을 마련함으로써 발생시점을 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 라운드 트립이 발생할

수 있는 비트의 마모상태를 몇 가지 범주로 구분하고, 지열정을 시뮬레이션단위 구간으로 분할 할 수 있는 방법을 제시하여 시뮬레이션 수행단위를 생성하였다. 또한, 생성된 구간별 BYM을 활용하여 시추속도를 산정하고, 정의된 마모상태별 비트가용시간 산정함수를 응용하여 지정된 마모상태까지 굴착 가능한 깊이를 예측함으로써, 시뮬레이션단위 구간 내 라운드 트립이 발생할 수 있는 모든 시점을 시뮬레이션 할 수 있는 알고리즘과 시스템을 개발하는 것을 목표로 하였다.

Fig. 2는 본 연구의 세부적인 연구수행 체계 및 방법에 대한 내용이다.

시뮬레이션을 위해서는 가장 먼저, 라운드 트립이 발생될 경우의 비트의 마모상태에 대하여 0~100% 범주 내에서 시뮬레이션 케이스를 설정하여야 한다. IADC (International Association of Drilling Contractors)의 경우 사용된 비트에 관련된 마모상태(bit record)를 기록할 때 8단계 상태판단기준(IADC, 2007)을 활용하기 때문에 8개의 케이스를 설정하였다(Fig. 3).

그리고 BYM을 활용하기 위해서는 시추속도와 주어진 비트마모를 기초로 한 시뮬레이션 케이스에 따른 비

Fig. 2. Research Strategy

Fig. 3. Schematic definition of bit dull grading unit (IADC, 2007)

트가용시간을 산정하는 과정에서 WOB, RPM에 대한 사전 예측이 필요하다. 또한 과거 유사환경에서의 시추 데이터를 기반으로 지반이 비트의 마모에 영향을 주는 정도를 상수화한 지반마모상수(formation abrasiveness constant, τ_H)와 WOB, RPM의 시추제어변수와 비트의 마모도와의 상관관계를 나타내는 비트마모상수(tooth wear parameter, J_t)를 산출해야 한다. 이러한 변수들은 지열정 설계구간, 지반의 물성, 비트의 물성 등에 따라 산출되는 값이 크게 달라지기 때문에 유사한 조건의 시뮬레이션단위 구간을 분할하여 분할된 구간별로 시뮬레이션 변수가 입력될 수 있도록 하였다.

비트의 마모에 대한 시뮬레이션 케이스를 설정하고 분할된 시뮬레이션단위 구간별로 변수를 입력하면, BYM에 따라 WOB, RPM, 시추속도, 비트가용시간을 산정할 수 있는 데, 각 구간별 시추속도와 비트의 마모에 대한 시뮬레이션 케이스별 비트가용시간을 활용하여 라운드 트립이 발생하는 지점을 예측할 수 있는 비트의 굴착가능깊이를 산정할 수 있을 것이다.

이러한 원리를 바탕으로 사용자가 지열정에 대한 설계변수를 입력하면 시뮬레이션단위 구간을 분할하고, 적용된 비트의 마모에 대한 시뮬레이션 케이스와 단위 구간별 라운드 트립의 발생위치 및 시점을 능동적으로 시뮬레이션 할 수 있는 시스템을 개발하기 위하여 알고리즘을 설계하였으며, Visual Basic 프로그램 언어를 활용하여 인터페이스와 모듈을 작성하여 시스템을 완성하였다. 마지막으로 2010년 12월에 착수된 EGS 기반 포항 지열프로젝트 현장의 데이터를 활용하여 본 시

스템에 적용해 보았으며, 시스템의 분석내용과 실제 현장에서의 수행데이터를 비교해 보았다.

본 연구를 통해 개발된 라운드 트립 발생 예측 시뮬레이터는 향후 시추공사의 성능을 보다 신뢰적으로 예측 가능하게 함으로써, 프로젝트 기획과정에서 타당성 분석은 물론, 신뢰적인 공정/비용 설계를 계획할 수 있어 효율적으로 진도관리하기 위함이다.

3. 라운드 트립 발생 시뮬레이션 알고리즘 (round trip occurrence simulation algorithm) 설계

3.1 Bourgoyne and Young's 모델

Bourgoyne and Young은 1974년 과거 데이터를 기반으로 시추속도를 최적화하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음 Fig. 4와 같이 8가지 영향요소를 고려하여 시추속도를 산정할 수 있는 모델을 개발하였다.

시추속도에 영향을 주는 인자는 지반의 강도(F1), 깊이 따른 압밀도(F2), 압밀된 지층에서 공극압의 정도(F3), 시추공 하부에서의 유체압력과 공극압의 차(F4), WOB(F5), RPM(F6), 비트의 마모도(F7), 그리고 유체의 역학적 특성(F8)으로 정의하였다. F1~F8까지의 식을 구성하고 있는 a1~a8은 각 영향인자에 대한 중요도 계수로써 과거 누적된 시추데이터를 활용하여 다중회귀분석을 통해 산정한다. 본 연구에서는 Bourgoyne and Young(1974)이 연구를 통하여 적정 값으로 제시한 영향인자 값(a1: 3.78, a2: 0.00017, a3: 0.0002, a4: 0.00043, a5: 0.43, a6: 0.21, a7: 0.41, a8: 0.16)을 활용

Fig. 4. Calculation method for ROP of drilling in terms of influential parameters (Bourgoyne and Young, 1974)

Table 1. Calculation of influence factors for BYM (Bourgoyne and Young, 1974)

Influence factor	Function	Description
Tooth wear parameter (J_2)	$= \left[\frac{(\frac{W}{d})_{\max} - (\frac{W}{d})}{(\frac{W}{d})_{\max} - 4} \right] * \left(\frac{60}{N} \right)^{H_1} * \left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> - $(\frac{W}{d})_{\max}$ = bit weight per diameter where teeth fails instantaneously (BYM) - H_1, H_2 = bit parameter (BYM) - N = RPM (field data) - $(\frac{W}{d})_{\max}$ = bit weight per diameter (field data)
Formation abrasiveness constant (τ_h)	$= \frac{t_b}{J_2 * h + H_2 * (\frac{h^2}{2})}$	<ul style="list-style-type: none"> - t_b = bit rotation time (field data) - h = fractional tooth height worn away (field data)
WOB [$(W/d)_{opt}$]	$= \frac{a5 * H_1 * (\frac{W}{d})_{\max} + a6 * (\frac{W}{d})_t}{a5 * H_1 + a6}$	<ul style="list-style-type: none"> - $a5, a6$ = Coefficient - $(\frac{W}{d})_t$ = threshold bit weight at which the bit starts to drill (material property)
RPM [$(N)_{opt}$]	$= 60 * \left[\frac{\tau_H * \left(\frac{(\frac{W}{d})_{\max} - (\frac{W}{d})_{opt}}{(\frac{W}{d})_{\max} - 4} \right)}{t_b} \right]$	
Predicted Bit rotation time (t_b)	$= J_2 * \tau_H * (h + H_2 * \frac{h^2}{2})$	<ul style="list-style-type: none"> - h = fractional tooth height worn away (parameter)

하였다.

Bourgoyne and Young(1974)은 다음 Table 1과 같이 시추속도의 최적화와 함께 시추속도의 주요 제어인자인 WOB, RPM의 최적화 모델을 제시하여 실제 현장에 사용된 값과 비교할 수 있도록 하였고, 과거 시추데이터를 활용하여 지반마모상수(τ_H)와 비트마모상수(J_2)를 계산하고, 이를 활용하여 지정된 비트 마모도에 이를 때까지의 시추시간이라 할 수 있는 비트가용시간(predicted bit rotation time; t_b)을 산정할 수 있는 함수를 완성하였다. 비트의 종류와 제원에 따른 형상 및 물성에 대한 상수 값인 H_1 과 H_2 의 변수설정 방법 등 보다 구체적인 사항에 대해서는 Bourgoyne and Young (1974)의 연구내용에 자세히 언급되어 있다.

3.2 BYM을 활용한 라운드 트립 발생 시뮬레이션 알고리즘 설계내용

라운드 트립의 발생시점을 예측할 수 있는 시뮬레이터를 개발하기 위해서는 방법론을 개발하고 시스템화하기 위한 논리적 알고리즘을 설계해야 한다. 본 연구에서는 라운드 트립이 발생하는 비트마모에 대한 시뮬레이션 케이스를 설정하고, 지열정 설계내용을 시뮬레이션 수행단위 구간으로 분할할 수 있는 방법을 개발하여 시뮬레이션 수행조건을 부여할 수 있도록 하였다. Fig. 5는 시뮬레이션단위 구간을 분할하는 방법론에 대

한 내용이다.

먼저, 시뮬레이션을 통한 발생시점의 예측은 설계정보를 통해 필연적으로 라운드 트립이 발생하는 지점 사이를 형성하는 구간 내에서 수행될 수 있도록 지열정 설계구간 변경지점과 비트의 설계내용이 바뀌는 지점을 기준으로 선 분할 되도록 하였다. Fig. 5의 분할된 2, 4의 지점은 지열정의 설계구간이 변경되는 부분이고, 2, 3, 4, 5 지점은 비트의 설계가 변경되는 부분으로서 필연적으로 라운드 트립이 발생하는 지점이라 할 수 있다. 그리고 시뮬레이션은 각 수행단위 구간별로 BYM을 적용하여 WOB와 RPM을 예측하고, 이를 활용하여 시추속도와 비트의 마모상태에 대한 시뮬레이션 케이스별 비트가용시간을 산정하여 굴착가능깊이를 판단한다. 따라서 각 시뮬레이션단위 구간은 WOB, RPM 등 시추성능이 동일 또는 유사할 수 있도록 조건을 부여하여야 하므로 성능에 가장 민감한 지반의 물성이 변하는 지점을 기준으로 2차 분할되도록 하였다. Fig. 5의 1번 분할과 같은 경우, 지열정 설계구간이나 활용되는 비트의 종류가 변하지 않지만 지반의 물성이 변화되어 분할된 사례이다.

이와 같이 사전 정보를 통해 시뮬레이션단위 구간을 분할하면, 각 구간별로 라운드 트립의 발생시점을 예측하기 위하여 BYM을 활용하여 다음 Fig. 6의 개념에 따라 시뮬레이션 되도록 하였다.

Fig. 5. Schematic of partitioning unit section for simulation

Fig. 6. Simulation method for Round trip occurring depth

분할된 각 구간에서 시뮬레이션을 수행할 때, Fig. 6(a)와 같이 연속되는 두 구간사이의 경계면이 필연적으로 라운드 트립이 발생되는 지점일 경우와 Fig. 6(b)와 같이 경계면에서 필연적인 라운드 트립이 발생하지 않고 두 구간의 비트의 설계내용이 동일하여 연속하여 시추가 가능할 경우가 존재한다. Fig. 6(a)의 경우 각 구간에서 라운드 트립의 발생 깊이는 해당 구간의 ROP값과 비트가용시간을 곱하여 굴착가능범위를 산출하고 이와 같은 과정을 반복하여 일정 시뮬레이션 케이스에서 구간 내 trip이 발생할 수 있는 모든 지점을 예측할 수 있다. 그러나 Fig. 6(b)의 경우 section 1의 두 번째 라운드 트립 발생 예측지점을 기준으로 세 번째 예측과정을 반복할 때 시뮬레이션 케이스(비트의 마모도 $(h)=0.125(12.5\%)$)에 따른 굴착가능범위가 section 2의

일정 깊이까지 커버가 가능하다. section 1과 section 2의 활용 비트의 설계내용이 동일하기 때문에 경계면에서 라운드 트립을 발생시키지 않고 연속적인 굴착을 수행하여야 경제적이고 효율적인 시추가 될 것이다. 그러나 두 구간의 지반의 물성을 비롯한 설계변수가 상이함으로 인하여 산정되는 시추성능이 다르기 때문에 각 구간에서의 시추성능을 반영한 굴착가능거리를 산정해야 한다. 따라서 section 1에서 굴착 후 마모된 비트의 양(h_0)을 Table 1의 t_b 를 산정하는 함수식을 통해 산정하고, 이후 section 2에서 사용할 수 있는 비트마모량($h_1=0.125-h_0$)에 대한 굴착가능범위를 산정하여 라운드 트립 발생지점을 예측해야 할 것이다.

그런데 section 1과 section 2의 비트의 설계내용이 동일하여 Fig. 6(b)와 같이 처리함으로써 효율성을 증대

Fig. 7. Schematic design for round trip occurrence simulation algorithm(TOSA)

할 수 있더라도, 만약 section 1의 시뮬레이션 케이스가 3($h=0.375$)이고 section 1의 마지막 구간을 모두 굴착한 뒤의 마모된 비트의 양이 0.25일 때, section 2의 시뮬레이션 케이스가 1($h=0.125$)인 경우에는 이미 비트의 마모량이 케이스 1의 범주보다 많은 양을 소모하였기 때문에 경계구간을 라운드 트립이 발생하는 지점으로 판단해야 알고리즘 설계시 오류가 발생되지 않을 것이다.

이와 같은 내용을 바탕으로 시추공사에서 비트의 마모로 인한 라운드 트립의 발생지점을 시뮬레이션 할 수 있는 알고리즘(Round Trip Occurrence Simulation Algorithm (TOSA)을 설계하였으며, 다음 Fig. 7과 같다.

TOSA 알고리즘은 Fig. 7의 내용과 같이 ① 시뮬레이션단위 구간 분할, ② 주어진 환경에서 시뮬레이션 케이스에 따른 굴착가능거리 산출, ③ 연속되는 시뮬레이션단위 구간의 경계면에서 시추수행의 유무 판단, ④ 연속되는 시뮬레이션단위 구간의 경계면에서 필연적으

로 라운드 트립을 수행하지 않고 시추가 지속되어도 될 때, 앞의 구간에서 연속되는 비트 마모도 상태와 현재 구간에서 적용되는 시뮬레이션 케이스 조건과의 적합여부의 판단 및 처리의 크게 4가지의 논리적 구성으로 설계되었다.

시뮬레이션단위 구간 분할은 지열정 설계구간, 지반의 물성, 비트의 설계내용에 따라 분할이 수행되며, 분할된 구간별로 본 알고리즘의 연산에 필요한 정보가 입력되고, BYM에 따라 WOB, RPM 등의 필요한 항목의 값이 생성된다. ROP 산정의 경우, BYM의 시추속도 산정에 영향을 미치는 지반 물성, WOB, RPM, 시추공 하부의 압력차 등, 영향인자의 등급이 분할된 구간별로 동일하다고 가정하였다. 단, 심도가 깊어질수록 성능에 반비례하는 특성을 가지고 있기 때문에, 본 연구에서는 각 라운드 트립의 산정 횟수마다 시작점의 깊이를 기준으로 ROP를 산출하여 해당 시뮬레이션에 적용되도록 하였다. 또한, 시추속도 산정과정에서 비트의 마모도에

대한 입력 값은 수행되고 있는 시뮬레이션 케이스 범주의 중간 값을 활용하여 평균 속도로 계산되도록 하였다 (시뮬레이션 case 1의 경우 0~0.125의 범주이므로 0.125/2). 이와 같이 시뮬레이션단위 구간별로 시추성능에 관련된 변수(WOB, RPM, 비트의 마모도)가 동일하게 적용되기 때문에 시뮬레이션단위 구간이 세분화될수록 보다 정확한 성능예측이 가능해질 것이다. 따라서 향후 계측/탐사기술의 발전과 충분한 지반시추DB의 축적을 통해 사전에 세분화된 지반의 물성정보를 확보하고 지열정 설계를 수행한다면, 본 알고리즘을 통해 보다 정확한 예측이 가능해질 것이다.

굴착가능거리의 산출은 각 구간에서의 시뮬레이션 케이스에 따른 비트가용시간과 산정된 ROP의 값을 통해 산출되도록 하였는데, 산출된 값을 굴착 시작점의 깊이와 더하여 현재 시뮬레이션 조건에서 굴착가능수직깊이를 산출할 수 있도록 하였다. 방향정(directional well)을 대상으로 하였을 경우, 굴착가능거리는 실수직심도(TVD; true vertical depth)로 계산되지 않고 지열정의 측정심도(MD; measured depth)로 환산되어야 하나, 본 연구에서는 수직정(vertical well)에 적합한 BYM을 활용하였기 때문에 적용범위를 수직정에 한정하였다. 만약, 방향정에 BYM을 적용하기 위해서는 경사각을 고려한 WOB와 시추용액의 청소효율 등을 반영하여 모델을 적용하여야 할 것이다(Eren, 2010).

Fig. 6에서 설명한바와 같이 연속되는 두 시뮬레이션 단위 구간이 동일한 비트로 설계되어 있을 경우, 경계면에서 필연적인 라운드 트립을 발생시키지 않고 연속하여 시추가 진행될 수 있도록 Fig. 7의 (3)과 같은 알고리즘을 구성하였다. 시뮬레이션단위 구간을 분할하면서, 구성하는 모든 경계면이 필연적 라운드 트립이 발생하는 지점인지에 대한 속성을 최초 판단하고, 시추과정에서 굴착가능거리가 해당 구간의 최종 깊이를 벗어날 경우 시스템은 경계면의 속성을 고려하여 연속유무를 판단을 할 것이다. 경계면의 속성이 필연적인 라운드 트립 발생지점이라면, 시스템은 굴착가능거리를 시뮬레이션 지점에서부터 경계면까지의 거리로 인식하게 된다. 만약, 경계면에서 연속적인 굴착이 가능하다고 판단되면, 경계면까지 굴착가능거리를 대상으로 비트의 마모량을 산정하고, Fig. 7의 (4)와 같이 다음 구간에 적용된 시뮬레이션 케이스의 비트마모한계(maximum bit wear; hm)값과 비교를 수행하여 2차적으로 연속굴착여부를 판단할 수 있도록 하였다(Fig. 6의 설명내용 참조).

이러한 논리적 구성을 통해 설계된 TOSA 알고리즘은 시스템화를 통하여 분할된 시뮬레이션단위 구간과 사용자가 설정할 수 있는 8단계 시뮬레이션 케이스를

대상으로 생성될 수 있는 모든 경우의 수에 대하여 비트의 마모로 인한 라운드 트립의 발생지점을 예측할 수 있을 것이다. 또한, 해석된 각 시나리오별 라운드 트립 발생지점, 시추시간과 함께 발생지점에서 소요가 예측되는 라운드 트립 시간을 산정한다면, 최적화된 시추성능을 설계함으로써 경제적이고 효율적인 시추공사를 계획할 수 있을 것이다.

4. 라운드 트립 발생 시뮬레이션 시스템(round trip occurrence simulation system) 개발 및 검증

4.1 시스템 개발사항

Round trip occurrence simulation system(이하 TOSS)는 TOSA의 설계내용을 바탕으로 Visual basic 프로그래밍 언어를 활용하여 개발한 모듈이다. 시스템에 지열프로젝트 관련 정보를 입력하면 TOSA의 논리적 구성에 따라 시뮬레이션 단위구간을 자동으로 생성하고, 구간별 시뮬레이션 케이스에 따른 라운드 트립의 발생지점을 예측한다.

다음 Fig. 8과 같이 시추공사 관련 정보를 4개의 인터페이스로 구분하여 입력하도록 하였다. 입력정보는 크게 프로젝트정보, 지열정 설계정보, 지반물성정보 및 시뮬레이션단위 구간정보로 인터페이스가 구성되었다. 프로젝트정보 입력창은 시추공사가 수행되는 부지정보, 회사, 투입인력, 지열정의 위치, 리그정보, 지열발전형태 등 일반적인 정보가 입력되고, 지열정 설계정보 입력창은 수직정을 대상으로 conductor hole, surface hole, intermediate hole, production hole에 대한 각 구간의 직경, 깊이, 케이싱, 시추도구제원 등에 대한 내용을 입력한다. 지반물성정보 입력 창은 계측/탐사 혹은 기존의 시추 데이터로부터 분석된 내용에 따라 지반의 종류, 깊이정보, 비트의 설계(IADC Code), 비트의 제원, 그리고 WOB, RPM 및 ROP의 예측에 활용되는 비트의 제원에 따른 형상 및 물성에 대한 상수 값(H1, H2, H3 등)을 Bourgoyne and Young(1974)이 제시한 내용에 따라 입력하도록 하였다. 마지막으로 시뮬레이션단위 구간에 대한 정보입력 창에서는 앞선 세 가지의 정보입력 창에 입력된 정보에 따라 시뮬레이션단위 구간이 자동으로 분할되어 각 구간별 시작깊이와 종료깊이가 표시된다. 그리고 각 구간별로 시추용액 밀도, 펌프압 등의 설계정보와 과거 환경조건이 유사한 시추데이터 정보(bit record)를 입력하면, 자동으로 지반마모상수(formation abrasiveness constant; τ_H)와 비트의 마모도와외의 상관관계를 나타내는 비트마모상수(tooth wear parameter; J_2)가 자동으로 계산되며, 이를 바탕으로 각

Project Information

Project General Information

No.	Name	Field Address	Ordering Organization	Major Drilling Company	Subcontract Company	Geothermal Types	Field Director	Descr.
1	P1	2	3	4	5	6	7	8
2	P2	2	3	4	5	6	7	8

Well Information

No.	Name	Well Type	Location	Drilling Operator	Surface Coordinate Latitude Longitude	Coordinate Grid North East	Ground Elevation	Rig Name	Rig Company	Rig Capacity
1	W1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	W2	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Well Head Information

No.	Well Head Comment	Specification	Description
1	1	1	1
2	2	2	2

Well Design Information

Vertical Well

Design Hole	Conductor Hole	Intermediate Hole	Production Hole
Design Section Number	1	2	3
Start Depth	98.43	1082.68	7874.02
Finish Depth	98.43	1082.68	7874.02
Hole Diameter	24	17.5	12.25

Well Design Based Information

No.	Name	Length	Inner Diameter	Outer Diameter	Weight	Non D	Lap Length	Drill Pipe Information	Drill Collar Information
Conductor Hole	1	Conductor C	32.8	21	24	133	98.43	Inductor C	7
Surface Hole	2	Surface C	32.8	13.375	17.5	72	984.25	Surface DC	7
Intermediate Hole	3	Intermediate C	32.8	9.625	12.25	68	8521.34	Intermediate I	11
Production Hole	4	Production C	32.8	9.625	11.25		1980.5	Production C	11

Simulation Unit Section Information

No.	Start Depth	Finish Depth	Stone Pressure grade(h)	Mud Type	Mud Weight	Mud Density	Pump Output	Apparent Viscosity	N	HT	N	Yield	Drill Pipe	HT	H2	H3	h
1	0	98.43	7.5	starry	9	9	700	21	41.87	0.375	55	0.29	7	1.9	7	1	2.9
2	98.43	1082.68	8	starry	9	9	650	21	41.87	0.375	55	0.29	7	1.9	7	1	2.9
3	1082.68	1247.82	9	starry	9.5	9.5	500	21	136.22	0.375	55	0.88	7	1.5	1	0.02	2.9
4	1247.82	1412.08	10	starry	10	10	400	21	118.24	0.375	55	1.44	10	1.5	1	0.02	2.9
5	1412.08	1576.34	11	starry	11	11	300	21	98.03	0.375	55	1.88	11	1.5	1	0.02	2.9
6	1576.34	1740.60	12	starry	12	12	200	21	146.25	0.375	55	2.70	12	1.5	1	0.02	2.9
7	1740.60	1904.86	13	starry	13	13	100	21	108.5	0.375	55	3.3	13	1.5	1	0.02	2.9
8	1904.86	2069.12	14	starry	14	14	50	21	108.5	0.375	55	3.3	14	1.5	1	0.02	2.9

Fig. 8. Graphical User Interface for data input in TOSS

Discrete Event Predictor

Drilling Case Evaluation

Well Designation : P1 | W1

● Discrete Event Simulation Setting

Simulation Case Setting

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Bit Dullness Boundary(%/100)	0 ~ 0.125	0 ~ 0.250	0 ~ 0.375	0 ~ 0.500	0 ~ 0.625	0 ~ 0.750	0 ~ 0.875	0 ~ 1.000
Bit Dullness W/om Away(h)	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.000

Simulation case setting & Simulation unit section designation

Simulation results

● Discrete Event Simulation Results

Simulation Case	Section Number	Simulation Number	Start Depth	Finish Depth	WOB(w/db)	RPM	Bit Rotating Time(h)	Unexpected Trip Depth(h)	Expected Trip Depth(h)
1	Case1	1	0	98.4	5.4859002169197	62.276597761655	1.787	98.4	98.4
2	Case1	2	98.4	1640.4	7.6467532467532	123.319637372	26.226	1640.4	1640.4
3	Case1	3	1640.4	3000	3.7857142857142	5166.1979925273	46.039	3000	3000
4	Case1	4	3000	4000	4.4859002169197	62.276597761655	49.094	3107.405	4000
5	Case1	5	4000	4000	5.4859002169197	62.276597761655	50.731	3214.81	4000
6	Case1	6	4000	4000	6.4859002169197	62.276597761655	52.363	3322.215	4000
7	Case1	7	4000	4000	7.4859002169197	62.276597761655	54.006	3429.62	4000
8	Case1	8	4000	4000	8.4859002169197	62.276597761655	55.643	3537.025	4000
9	Case1	9	4000	4000	9.4859002169197	62.276597761655	57.28	3644.43	4000
10	Case1	10	4000	4000	10.4859002169197	62.276597761655	58.918	3751.835	4000
11	Case1	11	4000	4000	11.4859002169197	62.276597761655	60.555	3859.24	4000
12	Case1	12	4000	4000	12.4859002169197	62.276597761655	62.192	3966.645	4000
13	Case1	13	4000	7874	13.4859002169197	62.276597761655	63.829	4074.045	7874
14	Case1	14	7874	8000	14.4859002169197	62.276597761655	65.466	4181.445	8000
15	Case1	15	8000	8000	15.4859002169197	62.276597761655	67.103	4288.845	8000
16	Case1	16	8000	8000	16.4859002169197	62.276597761655	68.74	4396.245	8000
17	Case1	17	8000	8000	17.4859002169197	62.276597761655	70.377	4503.645	8000
18	Case1	18	8000	8000	18.4859002169197	62.276597761655	72.014	4611.045	8000
19	Case1	19	8000	8000	19.4859002169197	62.276597761655	73.651	4718.445	8000
20	Case1	20	8000	8000	20.4859002169197	62.276597761655	75.288	4825.845	8000
21	Case1	21	8000	8000	21.4859002169197	62.276597761655	76.925	4933.245	8000

Fig. 9. Round trip occurrence simulation and analysis module

구간별 최적의 WOB, RPM 값이 산출되고, 라운드 트립 발생 모사시마다 적용되는 평균 ROP가 결정되게 된다.

TOSA의 수행을 위한 입력변수가 모두 생성되면, 다음 Fig. 9와 같이 분석모듈을 통해 시뮬레이션이 수행된다. 사용자는 최초 1~8 범위내의 시뮬레이션 케이스의 범위를 설정하고, 분석하고자 하는 시뮬레이션단위 구간의 범위 혹은 개별 구간을 지정하여 시뮬레이션 조건을 생성한다. 이후, 시뮬레이팅 버튼을 누르면 TOSA의 논리 프로세스에 따라 자동으로 시뮬레이션이 수행되며, 화면의 내용과 같이 결과 값(구간 및 케이스별로 적용된 WOB, RPM 값, 그리고 분석된 비트가용시간, 라운드 트립의 발생지점)이 도출되어진다. 사용자는 이를 통해 각 시뮬레이션이 수행된 구간 및 케이스별로 데이터를 집계하여 총 시추시간과 라운드 트립의 발생 예측지점에 데이터를 취득할 수 있으며, 이때 일정 심도에서 수행되는 라운드 트립에 대한 예상 소요시간을 평가하고 각 구간 및 케이스별 예측 시추시간(drilling time)을 산출함으로써 소요시간이 최소화 되는 즉,

시추성능이 최적화된 굴착시나리오를 완성할 수 있다.

4.2 Case study

본 연구를 통하여 설계된 알고리즘(TOSA)과 개발된 시스템(TOSS)의 기능과 신뢰성에 대한 검증을 수행하기 위하여 실제 시추현장의 설계내용과 시추데이터를 바탕으로 개발된 시스템을 활용하여 시뮬레이션을 수행하고 결과값을 비교·분석하였다. 활용된 현장데이터는 국내에서 2010년 12월에 포항에서 착수된 EGS 파일럿 프로젝트의 시추공사과정에서 기록된 비트 기록(bit record)과 성능기록표를 활용하였다. 비교 구간은 surface hole (39~330 m)과 intermediate hole의 일부 구간 (330~1350 m)이며, TOSS를 통해 시뮬레이션단위 구간을 분할하고 소요정보를 입력하였다. 입력된 정보를 기반으로 시뮬레이션단위 구간별 WOB, RPM을 예측하고 실제 bit record에 기록된 내용과 비교한 것은 다음 Table 2와 같다. Table의 내용 중 비트의 IADC코드는 각 구간에 활용된 비트의 종류를 나타내며, 첫 번

Table 2. Geothermal well information at each simulation unit section

Design	No.	Start depth (m)	Finish depth (m)	Formation	Bit (IADC)	WOB/d _b (mean) (klb/in.)		RPM(mean)	
						TOSS	Field	TOSS	Field
Surface hole	1	30	210	Claystone	115	5.6	2~6	79.7	50~80
	2	210	330	Tuff	435	5.3	4~6	47.5	50~60
Intermediate hole	3	330	740	Sandstone	447	7.7	6~10	50.7	50~65
	4	740	1350	Sandy Claystone	447	7.7	8~12	50.0	45~65

Fig. 10. Result of simulation for optimum case decision compared with field record

째 문자는 지반의 강도에 따른 비트의 재질(steel tooth bit, tungsten carbide insert bit)을 구분하고, 두 번째 문자는 지반의 강도를 보다 세분화(1,2,3,4; 4가 가장 강도가 높은 지반의 물성을 의미)하여 나타내며, 세 번째 문자는 비트의 타입(bearing/seal type, special gauge wear protection)에 따라 구분되어 코드가 부여된다(IADC, 2007).

시뮬레이션단위 구간은 총 4개의 구간으로 분할되었으며, 각 구간별 TOSS를 통해 WOB와 RPM을 예측한 결과, 실제 현장에서 시추를 제어하였던 범위를 크게 벗어나지 않았다. 입력하였던 현장 데이터가 예측된 결과를 비교하는 값으로 사용되기 때문으로 판단된다. 그러나 일부 구간의 WOB와 RPM의 예측 값이 현장 데이터와 차이가 발생한 이유는 BYM이 Table 1에서 확인한 바와 같이 WOB와 RPM의 최적화 예측모델을 제시하면서, 과거 시추데이터의 다중회귀분석을 통해 산출하는 $a_1 \sim a_8$ 까지의 영향계수 값을 반영하는 데, 본 연구에서는 Bourgoynne and Young(1974)이 제시된 값을 입력하였기 때문이다. 따라서 향후 국내 실정에 맞는 많은 시추데이터를 확보하고, 이를 통해 적절한 영향계수를 산정한다면, 최적화된 예측 값을 도출할 수 있을 것이다.

마지막으로 본 연구의 최종목표인 라운드 트립 발생에 대한 시뮬레이션을 수행하여 최적화된 구간별 시뮬레이션 케이스를 도출하였다. 또한 실제 현장에서 비트의 마모로 인하여 발생한 라운드 트립의 발생지점을 비교하였으며, 분석결과는 Fig. 10과 같다.

시뮬레이션 수행결과를 통해 최적화된 케이스를 도출한 결과, 전 구간의 비트가용시간만을 살펴보면, 예측된 성능이 464.68시간, 현장의 실제성능이 489.23시간으로서 본 연구방법을 통한 최적화된 예측성능이 24.55 hr 덜 소요될 수 있는 것으로 분석되었다. 각 구간별 성능에 대한 변수를 산정하기 위한 통계데이터를 현장데이터로 입력하였기 때문에 큰 오차는 보이지 않았으나, 1, 2 구간에서는 예측된 시추성능이 높게 나타났고, 3, 4구간에서는 현장의 비트레코드에 비하여 높은 시뮬레이션 케이스가 적용되어 전반적인 시추성능이 낮게 도출되었다. 이는 Bourgoynne and Young(1974)이 적정값으로 제시한 $a_1 \sim a_8$ 의 계수값을 적용하였고, 현장의 비트레코드와 시스템에서의 적용된 시뮬레이션 케이스가 상이함에 따라 발생된 결과라 할 수 있다. 그리고 필연적으로 라운드 트립이 수행되는 지점을 제외하고, 1구간과 2구간에서는 시뮬레이션 결과와 현장데이터 모두 라운드 트립이 발생되지 않고 시추공사가 진행되었다. 그러나 3구간과 4구간에서는 실제 현장의 경우 746 m

와 1054 m 지점에서 비트의 마모에 따른 라운드 트립이 발생되었는데 시뮬레이션 결과에 따른 최적화된 케이스에서는 1034.05 m 지점에서만 라운드 트립 발생이 예측되었다. Thonhauser(2004)가 라운드 트립이 일반적으로 평균 5 m/min의 속도로 인입과 인발이 수행된다는 점을 고려하면, 시뮬레이션 결과에서는 6.89 hr, 실제 현장데이터는 12.00 hr가 소요되기 때문에 시뮬레이션 결과에 따른 시추를 수행할 경우 총 29.66 hr의 공기가 단축될 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 Thonhauser(2004)가 제안한 라운드 트립의 평균속도는 인입과 인발속도만을 포함한 것으로서 BHA의 교체 및 정비시간을 포함하면 더욱 시뮬레이션 결과가 유리할 것으로 판단된다.

본 적용 케이스는 짧은 시추구간에 시범적으로 적용한 사례이며, 여러 가정사항이 반영되어 있기 때문에 결과에서 나타난 예측성능에 대한 신뢰도를 논하기는 어렵다. 본 논문은 기존 연구와 새로운 개념의 도입을 통해 시추성능을 평가하기 위한 방법론을 제안하고자 하였다.

5. 결 론

대심도 시추공사에서 시추중 발생하는 라운드 트립은 비트의 교체 등을 위해 불가피한 과정이다. 라운드 트립은 공기에 직접적인 영향을 미치기 때문에 시추비용의 최소화라는 목표를 달성하기 위해서는 최적의 라운드 트립 시점을 결정하는 것이 매우 중요하다. 라운드 트립은 최적 비트 교체시점과 직접적으로 영향이 있기 때문에, 시추가 진행되면서 비트의 마모도에 따른 시추속도의 변화를 지표로 한 성능평가를 기반으로 라운드 트립 발생 시점이 결정되도록 하였다. 실제 수 km 이상 시추심도가 발생할 때는 라운드 트립에 소요되는 시간이 수일이 걸리기도 하는 만큼 현장에서의 비트교체에 대한 시점을 결정하는 것은 전체 프로젝트의 경제성에 큰 영향을 미치게 된다. 국내에도 지열발전뿐만 아니라 다른 여러 산업분야에서 대심도 시추작업이 증가할 것으로 예상되고 있다. 대심도 시추기술이 부족한 국내 현실에서 시추데이터를 활용한 성능평가와 최적 운영 변수 결정 등에 대한 연구는 매우 중요하다. 특히 라운드 트립과 같이 전체 시추성능에 큰 영향을 미치는 요소는 사전에 최적화된 성능설계를 수행하여야만, 정확하고 신뢰적인 프로젝트의 타당성을 검토할 수 있을 뿐만 아니라, 시추과정에서 효율적인 진도관리를 수행할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 Bourgoynne and Young 모델을 활용하

여 시추속도와 함께 비트의 마모도를 고려하여 라운드 트립의 발생지점을 예측할 수 있는 방법론을 개발하여 알고리즘을 설계하고 시스템의 개발을 목표로 연구를 수행하였으며, 이에 대한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 비트의 마모도에 따른 라운드 트립의 발생지점을 IADC의 비트 마모도 측정기준에 따라 8단계로 구분하여 시뮬레이션 케이스를 설정하였다.
2. 구간별 시추성능과 비트의 단위 마모량이 유사 또는 동일한 조건을 부여하여 시뮬레이션을 수행하기 위하여 지열정 설계내용, 지반의 물성, 비트의 설계내용을 참조하여 시뮬레이션단위 구간을 설정하는 방법론을 제시하였다.
3. Bourgoyne and Young의 모델을 활용하여 시뮬레이션 케이스 및 구간별 시추속도와 라운드 트립의 발생정보를 예측할 수 있는 시뮬레이션 알고리즘을 설계하고 시스템을 개발하였다.
4. 국내의 EGS 프로젝트 현장 데이터를 개발된 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 실제 현장 데이터와 라운드 트립의 발생을 시뮬레이션 한 결과 중, 최적화된 케이스의 결과를 비교하여 분석해 보았다.

개발된 알고리즘 및 시스템은 기존의 사례데이터를 기반으로 산정되는 영향계수와 사전에 조사/예측된 설계정보를 기반으로 시뮬레이션이 수행되기 때문에 앞으로 대심도 시추를 통해서 수많은 사례의 데이터의 누적을 통해 시스템을 검증하여 보완해 나가야 할 것이며, 이를 통해 보다 신뢰적인 결과를 산출할 수 있을 것이다. 마지막으로 시추 프로젝트의 기획단계에서의 성능설계뿐만 아니라, 실시간 시추데이터 통신기술의 적용을 통해 라운드 트립을 고려한 최적의 시추성능이 발현될 수 있는 실시간 시추제어정보를 생산하여 경제적이고 효율적인 시공관리기술로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원 지식경제 기술혁신사업인 ‘MW급 지열발전 상용화 기술 개발’ 과제(과제번호 : 2012T100201733)의 일환으로 수행되었습니다. 현장에서 시추작업을 진행하고 데이터 획득 및 분석에

도움을 주신 BESTEC 감독관들, 한국지질자원연구원 송윤호 박사님, 넥스지오 연구진들께 감사드립니다.

References

1. Bahari, A., Baradaran, A.S., 2007, Truss region approach to find constants of Bourgoyne and Young penetration rate, Proceedings of the J. SPE 107520, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference (LACPEC, 2007), Buenos Aires, Argentina.
2. Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S., 1974, A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection, Society of Petroleum Engineers Journal 4238, August, pp. 371-384.
3. Eren T., 2010, Real-time Optimization of Drilling Parameters during Drilling Operations, Ph.D. Dissertation, Petroleum and Natural Gas Engineering Department, Middle East Technical University, Turkey.
4. Galle E.M., Woods A.B., 1963, Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits, Drill. And Prod. Prac., API, pp. 48-73.
5. International Association of Drilling Contractors, 2007, Drilling Manual 11th edition, International Association of Drilling, USA.
6. International Energy Agency, 2011, Technology roadmap: Geothermal heat and power, IEA, http://www.iea.org/papers/geothermal_roadmap.pdf.
7. Kim, K.Y., Kang, T.H., Lee, S.S., Shin, H.S., 2013, Introduction of Real-time Management Technology for Optimizing Drilling Influential Factors, Proceedings of Annual Conference of Korean Society for Rock Mechanics, pp. 15-18.
8. Lee, S.W., Choi, S.W., 2003, Modelling for TBM Performance Prediction, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 13, No. 6, pp. 260-269.
9. Maurer W.C., 1962, The Perfect-Cleaning Theory of Rotary Drilling, Journal of Pet. Tech, November, pp. 1270-1274.
10. Polsky, Y., Capuano J.L., Finger, J., Michael, H., Knudsen, S., Chip, A.J., Mansure, Raymond, D. and Swanson, R., 2008, Enhanced Geothermal Systems Well Construction Technology Evaluation Report, Sandia National Laboratories, USA.
11. Amy, L., 2009, Improving the economics of geothermal development through and oil and gas industry approach, Schlumberger Business Consulting, http://www.sbc.slb.com/Our_Work/Energy_Topics/~media/Files/Point%20of%20View%20Docs/Improving_the_Economics_of_Geothermal_Development.ashx.

이 승 수

2006년 경희대학교 공과대학 토목공학과 공학사
2009년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학석사

Tel: 031-995-0824

E-mail: sslee@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구
소 Geo인프라연구실 석사후연구원

신 휴 성

1994년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1996년 한양대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2001년 영국 Univ. of Wales Swansea 토목공학과 공학박사

Tel: 031-910-0651

E-mail: hyushin@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구
소 Geo-인프라연구실 연구위원

김 광 염

1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1999년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
2007년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 031-910-0225

E-mail: kimky@kict.re.kr

현재 한국건설기술연구원 SOC성능연구
소 Geo인프라연구실 수석연구원