

집중기획

EGS를 위한
시추기술의 중요성

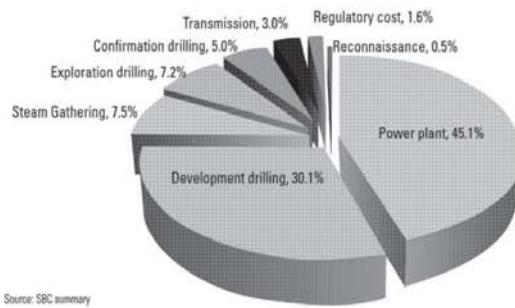
서론

인공저류층 생성(EGS: Enhanced Geothermal System) 기술을 이용한 심부지열발전에서 시추작업(drilling)은 전체 생산비용의 25~40%를 차지한다. 그림 1은 Schlumberger(2009)에서 평가한 지열발전 개발에 따른 주요 공정별 예상 비용의 비율을 나타내고 있다. 이와 같이 시추작업은 초기개발비용이 많이 들어가는 EGS 지열발전의 경제성을 좌우하게 되는 매우 중요한 공정이다. 시추공정에서 발생하는 비용을 줄이기 위해서는 다음의 두 가지 이슈를 효율적으로 관리하여야 한다. 첫째, 시추효율(drilling efficiency)을 높이는 것이다. 시추효율을 표현하는 가장 간편한 인자는 시추속도(ROP: Rate of Penetration)이다. 두 번째는 작업운영효율(operational efficiency)을 높이는 것이다. 작업운영효율은 시추작업 이외에 소요되는 시간, 즉 비시추시간(flat time)을 최소화함으로써 높일 수 있다. 인공지열저류층생성을 위해 지하 수 km 까지 시추가 이루어지게 되는 경우 심도에 따라 시추속도가 급격히 감소하게 된다. 이러한 시추속도 저하의 원인으로는 심부로 갈수록 지질학적 조건(고온, 고압 등)이 시추작업에 불리하게 형성되기 때문이다. 이로 인해 비트(bit)의 급격한 마모가 발생하게 되며 시추속도가 감소하게 된다. 또한, 심부로 들어갈수록 비트 교체 및 기타 작업을 위한 비시추시간이 상부

김광엽

한국건설기술연구원 기반시설연구본부

kimky@kict.re.kr



[그림 1] 심부지열발전 주요 비용발생 항목(Schlumberger, 2009)

에 비해 상대적으로 길어지는 것도 작업운영효율에 불리하게 작용할 수 밖에 없다. 따라서, 시추속도를 높이고 비시추시간을 줄이는 것이 전체 시추공정의 효율을 높이고 심부지열발전의 경제성 확보를 위한 핵심적인 사항이라 할 수 있다. 본 고에서는 이러한 시추공정에서 시간과 비용에 영향을 미치는 요소들과 시추성능의 평가방법에 대해 소개하고자 한다.

시추성능 영향인자

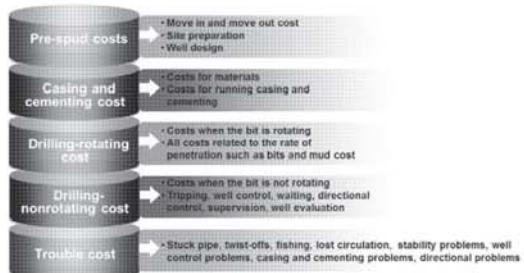
시추성능 영향인자 분류

충분한 조사를 통해 지열발전을 위한 부지가 선



[그림 2] 시추 비용과 시간에 영향을 미치는 요소(Kaiser, 2009)

정되고 시추공 조사 등을 통해 지열정 시추를 위한 모든 사전작업이 마무리 되면 조사된 내용을 기초로 하여 시추작업을 위해 필요한 다양한 변수들의 결정과정이 필요하게 된다. 앞서 언급하였듯이 이러한 의사결정은 반드시 경제성을 고려하여 결정하여야 한다. 시추비용과 시간에 영향을 미치는 요소는 그림 2와 같다. 이러한 영향인자들은 크게 제어가능한 인자(controllable parameters)와 제어불가능한 인자(uncontrollable parameters)로 구별하여 생각할 수 있다. 예를 들어 지반상태(geological conditions 등), 시장상태(market condition), 현지조사정보(site characteristics, formation evaluation 등), 환경조건(environmental condition)과 같은 인자들은 제어불가능한 인자이다. 즉, 이러한 인자들은 시추작업 중에 작업자가 변경을 할 수 없으므로 다른 제어가능한 인자-시추특성(drilling characteristics), 시추정 정보(well characteristics) 등-를 최적화 하는 것이 필요하다. 그림 3은 시추관련 공정에서 발생하는 비용들에 대한 항목들을 나타낸 것이다. 시추준비작업(pre-spud), 케이싱과 시멘팅, 시추(굴착(rotating) 또는 미굴착(non-rotating)), 문제 발생시 처리의 큰 5가지 범주에 대해서 비용발생 항목들을 고려한 것이다. 시추공정만을 고려하였을 시에도 굴착과 미굴착의 두



[그림 3] 시추관련 공정에 대한 비용발생 항목(MIT, 2006)

가지로 구분하여 고려하는 것에 유의할 필요가 있다. 실제로 시추작업은 비트가 암반을 굴착하여 굴진이 이루어지는 과정과 비트교체 등의 이유로 굴진이 멈추어지는 두 가지 공정으로 크게 이루어지기 때문이다. 각각의 경우가 모두 시추비용에 큰 영향을 미치게 되므로 각각의 영향인자에 대한 고려가 필수적이다.

시추속도 최적화를 위한 고려사항

시추성능을 증대시키기 위해서는 시추속도를 향상시켜야 한다. 앞서 언급하였듯이 ROP은 시추속도를 의미하는데 단위시간당 굴착한 시추깊이로 계산되며 통상(m/h)의 단위로 표현된다.

시추 성능의 향상을 위해서는 최적 ROP을 유지하는 것이 가장 중요하다. 최적 ROP은 ROP에 영향을 미치는 인자들의 조합을 적절하게 유지 혹은 변경하여 안정성을 확보한 상태에서 경제성을 극대화시킬 수 있는 ROP을 의미한다. 따라서 시추 성능의 향상은 ROP의 향상과 비례할 수 밖에 없다. 또한 ROP의 증가는 공사기간 단축으로 이어지며, 공사비용이 감소되는 효과를 얻을 수 있다(Bilgesu et al, 1997).

그림 4는 시추속도의 최적화를 위해 고려해야 하는 항목들을 나타낸 것이다. 영향인자 중 시추중 엔지니어가 제어 가능한 인자들은 WOB(Weight on

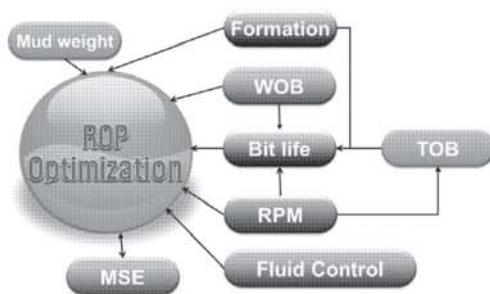
Bit), 회전속도(RPM), 회전토크(TOE), 시추머드 밀도(Mud Weight), 시추액 조절(Drilling fluid control), 비트 등이 있으며, 기계적 효율을 점검하기 위한 MSE(Mechanical Specific Energy), SSA(Stick Slip Analysis) 등이 있다.

WOB와 RPM

WOB는 비트에 작용하는 수직 하중으로 정의되어진다. 일반적으로 심도가 증가하면서 사용되는 드릴파이프(drill pipe) 개수가 증가함에 따라 WOB는 증가되어진다. RPM은 트리콘 비트를 사용하는 회전식 시추(rotary drilling)에서 비트의 회전속도를 의미한다. WOB와 RPM은 시추 엔지니어가 가장 중점을 두고 관리하는 항목으로서 리그의 기계적인 측면에서 시추속도에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 이러한 이유 때문에 적절한 WOB와 RPM의 조합을 유지하는 것이 시추성능을 극대화하기 위해 매우 중요하다. WOB와 RPM의 최적 조합을 통해 시추성능을 평가하고 극대화하기 위한 수단으로서 시추전시험(drill-off test)이 널리 활용되고 있다. 시추전시험은 RPM을 유지한 상태에서 WOB를 변화시켜며 ROP를 측정하여 이를 도식화함으로써 최적의 ROP를 산출하기 위한 RPM과 WOB의 조합을 찾아가는 방식이다. 일반적으로 시추전시험은 다음의 경우에 수행하는 것이 제안되어지고 있다.

- 비트가 시추를 처음 시작하는 경우
- 새로운 지층을 만났을 경우
- ROP가 감소하는 경우

ROP가 감소할 때 실시하는 이유는 비트가 마모되었을 가능성이 있기 때문이며, 새로운 층과 마주칠 때는 암반의 특성에 따라 최적 조합이 변하기 때문이다.



[그림 4] 시추속도 최적화에 대한 영향인자

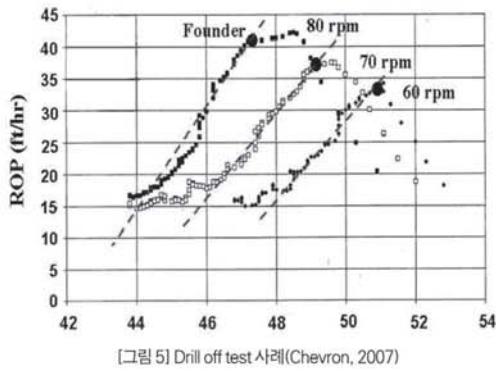


그림 5와 같이 ROP는 WOB가 증가함에 따라 선형적으로 증가하다가 비선형으로 바뀌게 되고 다시 감소하게 되는 경향을 나타낸다. 이 경우 비선형으로 바뀌게 되기 직전의 WOB가 최적 ROP를 위한 설정값이 된다.

WOB를 결정할 때 이외에도 다음의 두 가지 요소를 고려하여야 한다.

- 작동비용(operating cost)의 최소화
- 드릴파이프의 임계버클링 하중(CBL: critical buckling load)

비용을 최소화하기 위한 WOB값이 시추속도를 극대화 하는 값은 아니지만 경제적으로 효율적인 시추라는 관점에서 반드시 고려해야 한다. 또한 WOB를 증가시키다 보면 드릴파이프가 CBL보다 더 큰 압축하중을 받게 될 수도 있으며, 이 때 베클링이 발생하게 된다. 따라서 CBL보다 낮은 상태의 종방향 하중 상태를 유지하도록 WOB값의 상한을 지속적으로 관리해야 한다.

RPM도 경제적 시추관점에서 최적화된 값을 도출해야 한다. 또한,

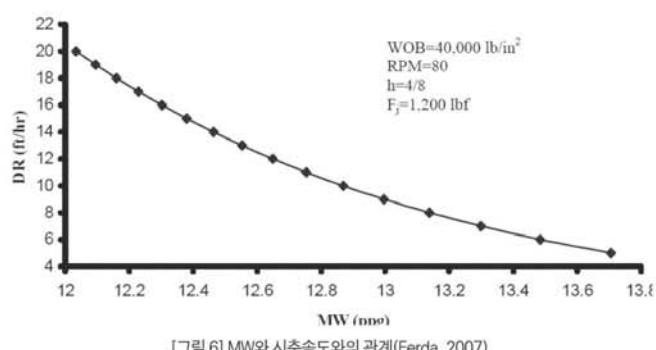
RPM을 너무 높게 하였을 경우 드릴 파이프에 나선형 베클링(helical buckling)을 일으킬 수 있으므로 조심하여야 한다.

시추머드 밀도(mud weight)

리그의 제어부분, 즉 WOB와 RPM이 시추엔지니어가 시추성능 최적화를 위해 신경을 가장 많이 쓰는 요소라면, 시추액 제어부분에서 엔지니어가 가장 중요하게 관리해야 할 요소는 시추머드 밀도(Mud Weight, 이하 MW)와 주입압력이다. ROP는 일반적으로 등순환밀도(ECD: Equivalent Circulating Density)가 감소하면 증가하게 된다. ECD를 감소하기 위해서는 MW를 가능한 낮게 유지하거나 시추액의 점도(viscosity)를 낮춰야 한다(Freda, 2007). 그림 6에서 보는 바와 같이 MW가 1ppg 떨어질 경우 시추속도는 약 2배가량 증가됨을 알 수 있다.

MW가 낮을수록 ROP 향상에 도움이 되지만, 너무 낮추었을 경우에 다음의 두가지 문제가 발생할 수 있다.

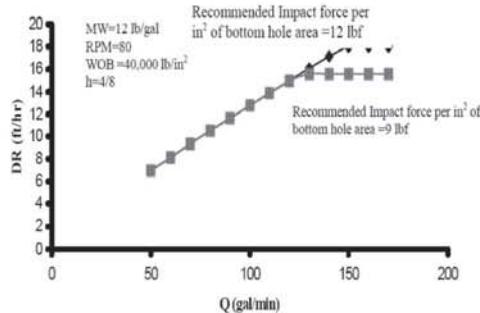
- 지층에 포함되어 있는 유체가 시추공으로 침투 할 수 있음(kick 현상)
- 시추공 붕괴 위험(formation instability)



따라서, 머드 엔지니어는 이러한 두가지 문제를 발생시키지 않는 안전한 범위내에서 MW의 최소화를 유지해야 한다.

시추액 유량(drilling flow rate)

그림 7과 같이 시추액 유량(flow rate)이 증가함에 따라 ROP은 증가하게 된다. 하지만, 시추액 유량이 증가해도 더 이상 ROP가 증가되지 않게 되는 값이 존재한다. 이러한 현상은 시추액이 시추시 비트에 의한 암편 등을 효과적으로 제거하여 시추공 바닥이 깨끗한 상태를 유지하게 될 경우 추가적인 유량의 증가가 ROP를 더 이상 증가시키지 않기 때문에 발생한다. 그림 7에서 보면 비트의 노즐을 통해 시추공 바닥면에 작용하는 시추액의 면적당 충격량(impact force)의 차이에 따른 결과는 충격량이 작은 경우에 먼저 수렴하는 형태를 나타내고 있다.



[그림 7] Flow rate의 영향(Freda, 2007)

2.6 MSE(mechanical specific engergy)

MSE는 암석을 시추할 때 필요한 단위부피 당 에너지의 양으로 정의된다(Teale, 1964). 측정된 parameter를 이용하여 식(1)과 같이 계산이 된다. MSE는 드릴링과정에서 장비의 효율성을 확인할 때 사용되어지며, 가능하면 MSE는 낮게(ROP는 높게)

유지하도록 노력해야 한다. 또한 MSE는 지층의 압축강도와 상관관계가 높기 때문에 지층의 강도 예측에도 활용되어질 수 있다. MSE의 예기치 않은 변화가 나타나면, 암반의 특성이나 시추작업 효율의 변화가 나타난 것으로 볼 수 있다(Rashidi et al., 2008).

$$\text{MSE} = 0.35 \times \frac{\text{WOB}}{\text{AB}} + \frac{120 \times \text{T} \times \text{RPM}}{\text{AB} \times \text{ROP}} \quad (1)$$

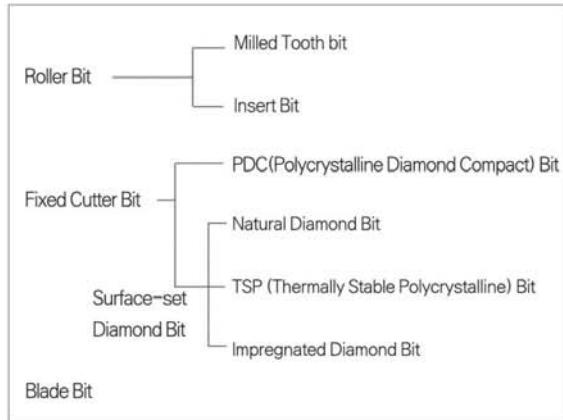
- ROP= Rate of penetration(ft/hr)
- EMM=Mechanical efficiency(%)
- WOB=Weight on bit
- RPM=Revolution per minute
- T=Torque(ft-lbs)
- D=bit diameter
- AB=Area of bit(square inches)

시추용 비트

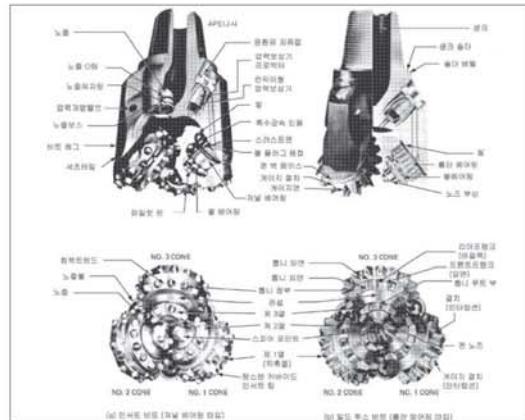
비트의 종류

현재 석유 및 천연가스 개발과 지열에 사용되는 시추 비트는 회전기구의 유무에 따라 Roller bit와 Fixed Cutter bit 2종류로 나눌 수 있다(그림 8 참조). 일반적인 Roller bit는 Roller cone bit, Three cone bit, Tricone bit 등으로 불리며 베어링을 사이에 두고 자유롭게 회전할 수 있는 3개의 콘을 갖고 있다. Fixed cutter bit는 회전부분이 없는 비트로 Solid bit, Drag bit라고 부르기도 한다. 이 밖에도 Solid bit의 한 종류인 Blade bit가 있지만 현재는 거의 사용하지 않고 있다.

일반적으로 석유시추에 이용되는 Roller cone bit인 트리콘 비트와 PDC(Polycrystalline Diamond Compact) 비트가 지열정 시추시 많이 사용되고 있다.



[그림 8] ADC의 분류를 기초로 한 회전식 시추 비트의 종류



[그림 9] Roller Bit 구조와 부분 명칭(Hughes, 1976)

Roller Cone Bit의 구조는 칼끝의 종류에 따라 Milled Tooth Bit와 Insert Bit의 두 가지로 나누어진다 (그림 9 참조). Milled Tooth Bit는 원추형의 철재에서 깎아내는 기계가공으로 톱니 끝의 재질에 따라 Steel Roller Bit, Steel Tooth Bit로 불리기도 한다. Insert Bit는 텡스텐 카바이드 합금재의 조각을 콘에 박아 넣는 타입으로 Chip Insert Bit, Tungsten Carbide Insert(TCI) Bit 등으로 불린다.

비트 콘에 배치된 칼끝은 톱니바퀴와 같은 모양이기 때문에 톱니(tooth)라고 표현하며, 비트의 회전에 따라 콘이 회전되어 톱니 하나하나가 암석에 충격을 받아 부서진다. 콘은 정확한 원추형태가 아니며 각 치열이 다른 원추 각을 갖고 있기 때문에 효과적인 굴착이 가능하다.

비트의 수명과 마모도

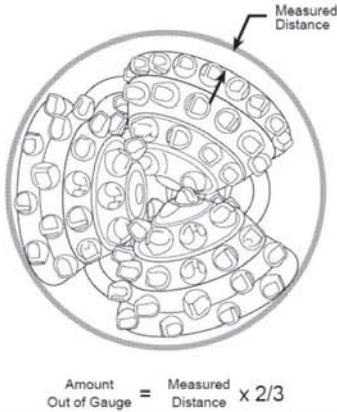
비트의 수명은 시추 비용 및 시간에 매우 중요한 영향인자이다. 비트의 교체주기(bit life)가 길어지면 비트의 교체시간(trip time)이 짧아져 공사 시간 및 공사비용을 줄일 수 있다. 또한 비트의 수명이 길어지면 재료비가 감소되는 효과까지 볼 수 있다.

비트의 수명과 마모도에 영향을 주는 인자는 비트의 재료적, 구조적 성능과 엔지니어에 의해서 결정되는 WOB, RPM 등이다. WOB가 너무 클 경우 비트의 인서트는 마모가 많이 진행되지 않았음에도 베어링이 망가짐에 따라 교체해야 할 수 있으며, RPM의 속도를 증가할 경우 비트 마모가 활성화되어 수명이 짧아지는 경우가 발생한다.

비트의 교체 원인

비트는 수명이 다되거나 마모가 발생할 경우 혹은 베어링이나 다른 문제가 생겼을 때 교체를 해야 한다. 비트의 교체 원인은 크게 베어링, tooth, gage 등 의 마모 혹은 파괴로 인하여 발생한다.

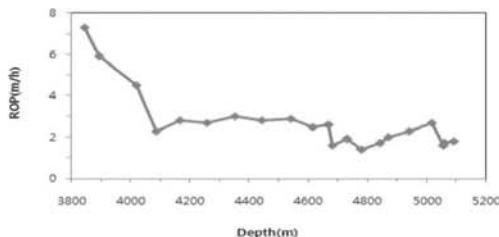
베어링에 의한 교체는 주로 비트의 걸림이나 노즐의 막힘에 의하여 발생되는데, 그 원인은 암질의 파편으로 인하여 드래그(drag)가 되거나 베어링 안에 고착되어 커터가 걸리는 경우에 일반적으로 발생한다. 베어링에 의한 교체를 줄이는 방법으로는 시추액 유량을 높여 시추공 바닥의 암편제거(cleaning) 능력을 높여야 하며, 이를 위해 센터 노즐을 사용하는 방법등이 있다.



[그림 10] 게이지 마모량 측정(IADC, 2007)

tooth에 의한 교체는 마모에 의한 교체가 주를 이루며, 코어링 마모, 인서트 칩 파손 등과 같은 이유로 교체가 이루어진다. 코어링 마모의 경우에는 비트 중심부의 tooth가 마모 손상되어 발생하며, 비트 중심부에서 마모가 시작되어 효율적인 시추가 불가능해진다.

gage에 의한 교체는 아래 그림과 같은 측정법을 사용할 수 있다. 링게이지를 커터게이지면 두 곳에 맞대고 다른 한 개의 게이지면과 링의 간격을 그림과 같이 계측하여 측정한다. 이 값의 2/3을 게이지 마모량으로 기록한다. 게이지에 의한 교체 원인은 비트 게이지가 마모되는 현상과 높은 연마성 지층에서 고회전 또는 장시간 굴착한 경우에 발생된다.



[그림 11] Soultz-GPK2의 심도에 따른 ROP

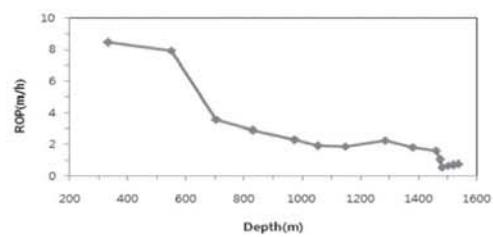
심부지열정 시추속도 사례

마지막으로 EGS방식으로 개발된 심부지열발전 사례인 프랑스 Soultz의 시추정 두 곳에 대한 시추정 보고서(Socomine, 1999, 2000)를 기반으로 시추심도에 따른 시추속도를 분석해 보았다. 분석된 시추정은 GPK2와 OPS4이다. 그림 11은 GPK2 시추정의 3876 m - 5084 m 까지 시추속도에 대한 결과이며, 그림 12는 OPS4 시추정의 300 m - 1537 m 구간의 시추 속도를 나타낸 것이다.

심도가 깊어질수록 비트의 시추 깊이가 줄어들며 ROP가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 심부로 들어갈수록 시추비용이 급격히 증가하게 됨을 의미 한다.

결론

EGS는 태양광발전 및 풍력발전과 달리 기저부하를 담당할 수 있으며, 환경적인 측면에서 매우 유리하다. 하지만 초기 비용이 많이 든다는 문제점을 안고 있다. 특히 시공과정에서 플랜트를 제외하면 시추 비용이 가장 큰 비용을 차지한다. 이러한 이유로 선진국을 중심으로 시추 비용을 줄이기 위한 기술개발에 막대한 연구비를 투자하고 있다. 앞에서 언급하였듯이 시추비용을 줄일 수 있는 방법은 크게 시추성능 향상



[그림 12] Soultz-OPS4의 심도에 따른 ROP

을 통한 공사 시간 단축 및 효율적인 시추를 하는 방법과 비트의 수명 및 성능을 향상시켜 시추의 재료비 및 공사 기간을 단축하는 방법이 있다.

국내에서도 포항지역에 EGS 방식의 지열발전 개발이 정부 R&D 예산과 민간자본이 공동 투자되어 시작되었다. 아직 심부시추에 대한 국내 기술이 전무한 상태이기 때문에 선진기술의 도입이 불가피한 실정이다. 하지만 포항 프로젝트를 통해 충분한 경험을 축적하고 국내에서 자체 기술확보가 용이한 부분부터 기술개발에 대한 지속적인 투자가 이루어진다면 심부지열발전의 경제성 확보가 더욱 용이할 것이다. 미래형 청정에너지원인 심부지열원의 활용을 위한 사회적 관심, 정부의 정책적 투자, 제도적 뒷받침, 기초 원천 핵심기술확보 등을 통해 심부지열 활용기술에 대한 국가경쟁력을 높이기를 기대한다.

참고문헌

1. Bilgesu, H.I., Tetrick, L.T., Almis, U., Mohaghegh, S., Ameri, S. (1997), A New Approach for the Prediction of Rate of Penetration (ROP) Values, Society of Petroleum Engineers, SPE 39231, pp. 175-179.
2. Chevron (2007), Drilling Optimization with Mechanical Specific Energy, <http://www.spegc.org>
3. Ferda, A. (2007), Drilling Rate at the Technical Limit, International Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 1, No.1, pp. 99-118.
4. Hughes Tool Co. (1976), Tricone Bit Handbook.
5. IADC (2007), Drilling Manual-11th Edition-Redesigned, pp. 1-19.
6. Kaiser, M.J. (2009), Modeling the Time and Cost to Drill an Offshore Well, Energy, Vol. 34, pp. 1097-1112.
7. Massachusetts Institute of Technology (2006), The Future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century, <http://geothermal.inel.gov>
8. Rashidi, B., Hareland, G., Nygaard, R. (2008), Real-time Drill Bit Wear Prediction by Combining Rock Energy and Drilling Strength Concepts, Society of Petroleum Engineers, SPE 117109-PP.
9. Schlumberger (2008), Improving the Economics of Geothermal Development through an Oil and Gas Industry Approach, <http://sbc.slb.com>.
10. Baumgartner, J., Gerard, A., Baria, R. (1999), GPK2 Re-entry and Deeping-A Technical Note, Soultz Geothermal Energy Project.
11. Gandy, T., Baumgartner, J., Gerard, A., Vix, P. (2000), OPS4 Final Drilling Report, Soultz Geothermal Energy Project.
12. Teale, R. (1964), The Concept of Specific Energy in Rock Drilling, International Journal Rock Mech, & Mining Sci, Vol. 2, pp. 57-73. 