

EGS 지열발전 기술의 현황과 전망

민 기 복

서울대학교 에너지자원공학과 조교수

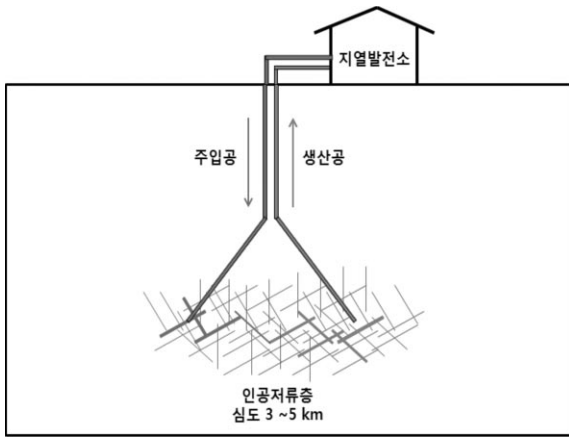
1. EGS기술이란

불안정한 석유, 가스 및 광물자원가격과 고갈성 그리고 기후변화로 인한 이산화탄소 저감의 필요성으로 인해 신재생에너지에 대한 중요성은 크다. 신재생에너지 중 하나인 지열에너지 중에서 지열발전의 경우 대부분 화산지대에서 이루어지고 있으나 최근 비화산지대에서도 가능한 지열에너지 개발 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 원고에서는 비화산지대에 적용가능한 지열발전 기술의 현황과 전망에 대해 소개하도록 한다 (민기복, 2011)¹⁾.

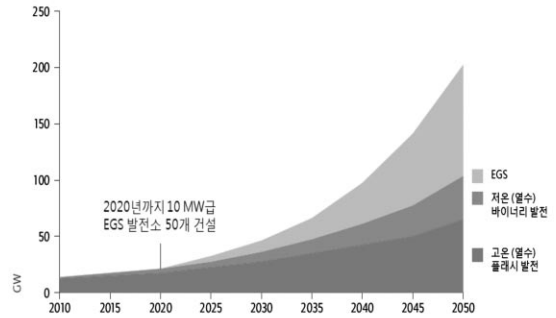
지열에너지의 3대 요소는 높은 열, 높은 투수계수 그리고 충분한 물의 존재이다. 현재까지 지열발전은 높은 지온 경사가 존재하는 화산지대에서 높은 투수계수와 충분한 물이 존재할 경우에만 가능하였다. 하지만 지열발전의 3대 요소 중 열을 제외한 암반의 투수계수와 물은 인공적으로 생성 및 주입이 가능하다. 이와 같이 인공적으로 물을 주입하고, 수압에 의해 투수율 (동일한 수압차에서 물을 흘려보내는 능력을 나타내는 암석과 같은 다공성 재료의 물리적 성질) 을 높혀, 즉, 인공적으로 저류층을 생성하여 지열에너지의 개발이 가능하게 만드는 기술을 EGS (Enhanced or

Engineered Geothermal Systems)라고 하며 미국, 호주, 유럽 등 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다(그림 1). EGS는 우리말로 ‘인공저류층 생성기술’ 혹은 ‘인공저류층 지열시스템’ 정도가 적절한 것으로 생각되나 여기서는 편의상 EGS라 부르기로 한다. 과거에는 물이 존재하지 않는 낮은 투수율의 고온 암석에 적용되는 지열에너지 기술임을 나타내기 위해 HDR (Hot Dry Rock) 혹은 HFR (Hot Fractured Rock) 등으로 불리기도 하였으나 최근에는 인위적인 수단을 통해 지열 저류층의 성능을 증진시키는 보다 광범위한 의미의 EGS라는 명칭이 더욱 널리 사용되고 있다. 특히, 최근에는 미국의 게이저 (Geysers) 지역에서 저류층에 물을 재주입하는 것과 같이 저류층에 인위적인 공학적 조치를 가하는 것이 일반적인 추세이나 본 원고에서는 물을 재주입하고, 인공으로 저류층을 생성하는 것 두 가지를 모두 실행할 때의 경우를 EGS라 국한하여 부르기로 한다. 국제에너지기구(International Energy Agency)는 2011년 발간한 지열에너지 분야 기술로드맵 (IEA, 2011) 을 통해 2050년까지 지열 발전을 통한 설비용량은 200 GW로, 이중 EGS가 50%인 100 GW를 담당해야 할 것으로 온실가스 감축량을 고려한 목표치를 삼고 있다 (그림 2).

1) 본 원고는 2011년 설비저널 10월호에 발표된 것을 수정 보완한 것이다.



[그림 1] EGS 지열발전의 모식도



[그림 2] 지열발전의 종류별 설비용량 예측값 (IEA, 2011)

특히 2020년 경에는 10 MW급 EGS 발전소 50 개 정도가 건설가능하고, 2030년경에는 EGS 발전소가 상업적으로 경쟁력이 있을 것으로 예측하고 있다.

EGS에서는 개념상으로는 주입공과 생산공 등 최소 2개 이상의 시추공이 필요하며 이 두 시추공 사이에 존재하는 암반의 투수율을 증가시키기 위해 물을 주입하여 강한 수압을 통해 균열을 발생시키거나 기존에 존재하는 균열의 간극(균열의 틈을 의미)을 증가시키게 된다. 이와 같이 강한 수압을 이용하여 암반의 투수율을 증가시키는 기법을 수리자극(Hydraulic Stimulation) 이라 한다. EGS의 시추심도는 지온경사에 따라 달라질 수 있으나 비화산지대에서도 기대할 수 있는 평균지온경사보다 다소 높은 30°C/km를 가정할 경우 5 km이상을 시추하여야 약 170°C 정도의 저류층 온도를 기대할 수 있어 최소한의 경제성을 확보할 수 있는 것으로 판단되고 있다. 앞서 그림 1에 나타나있듯이 지표에서 주입공과 생산공간의 거리는 매우 작아 지표에서 차지하는 면적이 작으나 (프랑스 솔츠 지열발전소의 경우 공간격 6 m) 5 km내외의 지하 심부에서는 경사시추를 통해 주입공과 생산공의 간격이 500여 m 내외가 되어 주입된 물이 유동과정에서 충분히 높은 온도를 확보할 수 있는 유동거리를 확보하게 된다.

2. EGS 기술의 역사 및 현황

EGS는 미국 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory) 주도로 1970년대 초에 처음으로 미국 뉴멕시코주의 화강암 지대인 펜톤 힐 (Fenton Hill)에서 현지 실험을 실시하면서 연구가 시작되었다. 두 단계로 나뉘어져 진행된 연구를 통해 지하 심부의 결정질 암반에서 두 개의 보어홀 사이에서 인공 저류층을 형성시키는 것이 가능하고, 60 kW급의 전기를 생산함으로써 EGS 개념을 통해 지열 발전의 가능성을 확인하였다(MIT, 2006). 펜톤힐에서 진행된 프로젝트에서의 보어홀은 심부 약 4 km 내외 까지 시추가 되었으며 이 후 일본의 히조리(Hijiori)와 오가치(Ogachi)지역, 영국의 로즈마노웨즈(Rosemanowes)와 프랑스의 솔츠(Soultz)지역에서도 EGS의 현지실험이 진행되었으며 2003년부터는 호주의 쿠퍼 베이슨(Cooper Basin) 지역에서 세계최대의 민간 지열에너지 기업인 지오다이나믹스(Geodynamics)에 의해 상업화를 목표로 25 MW 설비용량의 대규모 실증 사업이 진행 중이다(표 1). 일련의 실증실험을 통해 배운 사실 중 특기할 만한 것은 수압과쇄에 의한 인장파괴가 주된 인공저류층 형성의 메커니즘일 것이라는 애초의 예상과 달리 균열면에서의 전단파괴가 주된 메커

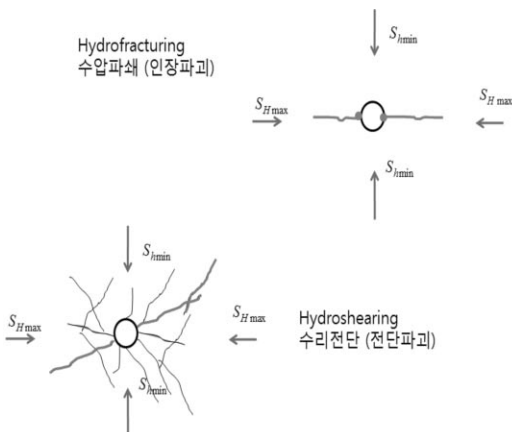
니즘인 것으로 파악이 되었다는 사실이다. 전단파괴란 암반내의 균열이 미끄러짐 현상을 일컫는 것으로 암반내의 균열면이 거칠기 때문에 미끄러짐 발생시 간극(균열의 틈)이 증가하게 되고 따라서 균열암반내로 동일 수압이 작용할 때 유동량이 커지게 되어 인공적인 저류층이 형성이 되는 것이다. 그림 3은 저류층에서 수리자극을 실시하였을 때의 수압파쇄와 수리전단의 파괴형태를 도식적으로 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 수리자극에 의한 인공저류층 형성은 현지응력 상태와 균열의 방향에 따라 크게 좌우되며 균열의 크기, 다수의 균열이 존재할 때의 상호작용, 균열근처 응력집중도의 변화, 전단변형시의 수리

전도도 변화 특성 등 신뢰성 있는 예측을 하기에 고려해야 할 요소가 많다.

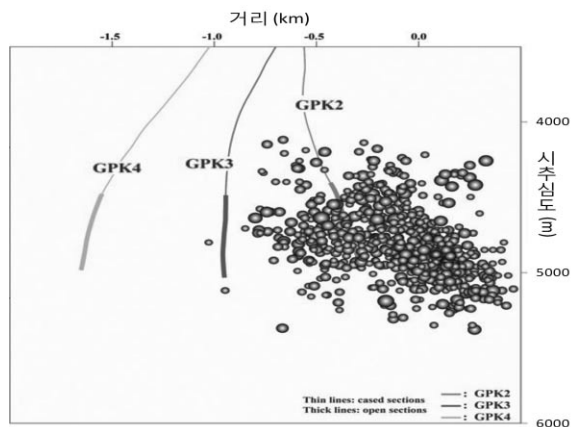
수리자극에 의한 투수율의 향상은 EGS 기술의 핵심내용으로 지표와 지중에 설치한 계측장치를 통해 측정된 미소지진을 통해 관측할 수 있으며 이 관측을 통해 향상된 투수율의 지역을 확인할 수 있다(그림 4). 그림 4는 프랑스 술츠지역에서 심도 약 5 km에서 그림에 표시되어 있는 GPK2 시추공에서 물 주입에 의한 수리자극을 실시하여 발생된 미소진동을 진도 1 이상인 경우만을 도시한 예이다. 주입기간은 약 6일이며 주입량을 초당 30 리터, 40 리터, 50리터까지 단계적으로 증가시켰으며, 이에 따라 7215개의 미소진동이 관측

<표 1> EGS 지열발전 프로젝트 현황 (Evans 와 Valley, 2005)

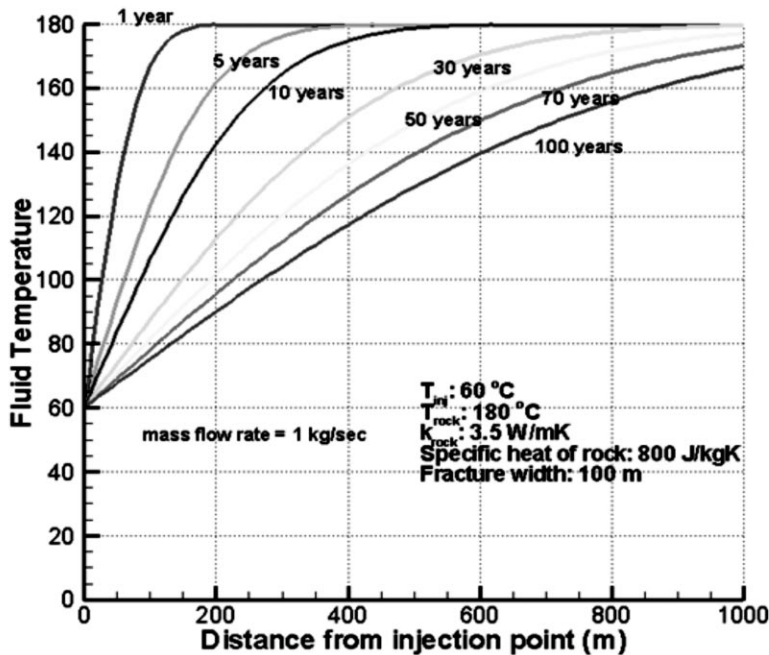
프로젝트 위치	연구개발시기	저류층의 깊이 (단계별)	최고온도
펜톤힐 (Fenton Hill), 미국	1972 ~ 1996	2.8 km/3.6 km/4.2 km	320℃
로즈마노워즈 (Rosemanowes), 영국	1978 ~ 1991	2.0 km/2.2 km	85℃
히조리, 일본	1985 ~ 2002	1.8 km/2.2 km	270℃
술츠 (Soultz), 프랑스	1987 ~ 현재	3.3 km/5.0 km	200℃
오가치, 일본	1989 ~ 2001	0.7 km/1.0 km	250℃
쿠퍼 베이슨 (Cooper Basin), 호주	2003 ~ 현재	4.2 km	240℃



[그림 3] 균열암반 내에서의 수리자극에 의한 인공저류층 형성 과정. 수리자극은 균열이 없는 암반에 발생되는 수압파쇄와 기존 균열에서의 미끄러짐과 팽창이 발생하는 수리전단으로 나눌 수 있다.



[그림 4] 술츠(Soultz) 프로젝트에서 계측된 미소지진 발생의 예(Dorbath 외, 2009)



[그림 5] 주입공으로부터의 거리에 따른 온도변화의 시간별 변화. 저류층 온도 180도에서 폭 100m의 단일절리로 60도로 주입된 용수가 1 kg/sec의 유량으로 흐른다고 가정한 경우.

되었으며 그 중 진도 1 이상은 718개, 최대 진도는 2.5였고 주입에 따른 압력은 최대 14.5 MPa(약 145기압) 까지 증가하는 것으로 보고되었다. 미소진동은 암반균열의 미끄러짐이 발생했을 때 관측되는 것이므로 이와 같은 관측을 통해 인공 저류층이 형성된 지역의 크기를 산정할 수 있어서 미소진동의 관측 및 관리는 EGS 기술의 핵심기술로 간주된다. 그림 5는 생산공과 주입공의 거리에 따른 지열수온도의 변화 추이를 생산 기간에 따라 보여주는 것으로서 온도 180 °C의 저류층에서 폭 100 m의 평평한 단일절리를 통하여 1 kg/sec의 유량으로 유체가 흐를 경우를 가정한 경우이다.

3. EGS 기술의 장단점, 환경영향 및 핵심 연구분야

지열에너지는 기타 화석연료에 비해 가격변동이

적으므로 안정된 가격에 에너지를 공급할 수 있으며 국내에서 생산되는 열을 이용하므로 순수 국산이라는 장점이 있다. 그리고 최근 큰 이슈가 되고 있는 이산화탄소 배출량도 석탄 화력발전소 대비 3 ~ 10% 이내로 훨씬 적으며 특히 열교환기를 이용하여 물보다 끓는점이 낮은 2차 유체를 사용하는 바이너리(binary) 방식의 발전기를 이용하는 경우 지하의 유체가 외부로 전혀 배출이 되지 않고 지하암반으로 재주입이 되므로 이산화탄소의 배출량이 전혀 없다. 또한 지열에너지는 햇빛이 비치는 동안만 가동하는 태양광, 바람이 일정 정도 세기가 될 때만 가동 가능한

풍력 등 기타 재생에너지에 비해 24시간 내내 가동이 가능하므로 기저부하를 제공한다는 장점이 있으며 지상에는 발전설비만 설치하면 되므로 태양광 및 풍력에너지 설비의 지표 공간 대비 5% ~ 10% 정도의 적은 지표공간을 차지한다(DiPippo, 2008). 이와 같은 장점 외에도 지열에너지를 개발하는 과정은 탐사공학, 시추공학, 석유공학, 암석역학, 지하수공학, 지구화학, 플랜트건설 등 석유, 가스 혹은 광물자원을 개발하는 요소기술이 총동원되는 지질 자원 건설분야 기술의 종합응용 분야로서 이산화탄소 지중 처분장, 고준위 지하방사성 폐기물 처분장, 지하가스저장소 건설 등 다양한 분야로의 파급효과가 큰 응용분야인 것이다. 특히, 최근 방대한 매장량으로 각광을 받고 있는 수압과쇄에 의한 셰일가스 생산의 경우 시추기술 및 수압과쇄 기술 등 핵심요소기술이 EGS 기술과 밀접한 연관을 갖고 있다. 그림 6은 셰일가스

연구개발 투자비와 세제혜택과 같은 정부정책 및 생산량의 관계를 나타낸 그림으로 1970년대 후반부터 약 15여년간의 집중적인 투자가 현재가 폭발적인 셰일가스 생산의 기반이 되었음을 보여 주고 있으며, 현재는 부족한 경제성으로 발전량이 미흡한 EGS 기술도 획기적인 투자 및 기술진보가 뒷받침될 경우 유사한 성공사례가 될 수 있음을 시사한다.

현재까지 알려진 EGS 기술의 가장 단점은 높은 탐사 비용 및 이에 수반된 리스크, 개발기간이 최소 5년 이상 장기간인 점 등이 있으며 또한 인공 저류층 형성이 발생하는 미소진동에 대한 대책 또한 EGS 기술의 성공을 위해 중요한 요인으로 꼽을 수 있다. 스위스 바젤 (Basel) 지역에서 진행된 EGS 프로젝트의 경우 2006년과 2007년에 리히터 규모 3.3의 미소지진이 유체주입에 의하여 유발되어 프로젝트가 중단된 사례도 있다 (Telegraph, 2007). 이 지역의 경우 과거 지진에 의해 큰 피해를 입은 경험이 있는 지진위험도가 상대적으로 높은 지역이고, 지열시추공이 거주지역과 바로 인접한 점이 사업중단의 원인으로 지적되고 있다. 그 외 미국 가이저(The Geysers) 지역의 경우 최대 200 mm까지의 지반침하가 발생하는 등 지열에너지 개발에 따른 지반침하 등도 발생할 수 있으나 EGS 기술의 경우 용수의 재주입이 필수적인 과정이므로 큰 문제를 발생하지 않을 것으로 예상된다.

EGS 분야의 핵심 연구분야로 다음의 내용이 제시될 수 있다(MIT, 2006).

- 인공저류층 생성 크기와 열전달이 일어나는 면적 산정 기술
- 200도 이상의 고온에서 작동하는 보어홀 내 검층 장비
- 물과 암석과의 지구화학작용에 대한 이해
- 단축된 유체 유동거리 (short circuit)에 대한 대책
- 저류층 온도 강하에 대한 대책

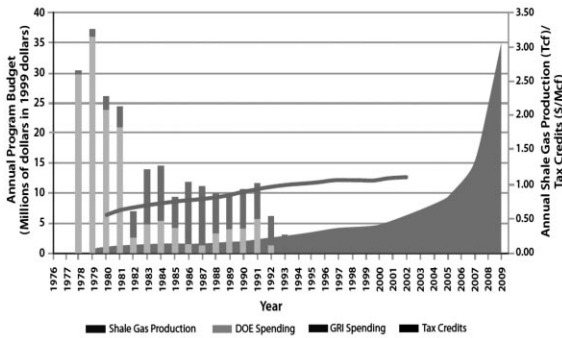
- 생성되는 균열의 부피를 조절하는 방법
- 균열 저류층 모델링 방법

위의 기술적인 어려움 이외에도 경제적으로 시추비용이 전체 EGS 비용의 30% ~ 70%까지 차지할 수 있기 때문에 이를 줄이기 위한 기술개발이 지열에너지가 경제성을 확보하기 위해서 꼭 필요하다고 할 수 있다(MIT, 2006). 통상 EGS 프로젝트에서 5 km의 지열 시추공 건설비용이 약 100 ~ 150 억원 내외인 것으로 해외 사례에 소개되어 있으나(MIT, 2006) 한국에서의 정확한 비용은 해당지역의 지질, 기술자의 숙련도, 사용 장비 등 여러 요인에 따라 변동이 있을 것으로 생각된다. 그림 7은 전통적인 열수발전 방식과 비교한 EGS 발전의 전력단가를 보여주는 것으로 평균값을 기준으로 할 때 EGS 기술이 깊은 시추심도 및 수리자극에 따른 비용 증가로 인하여 약 3배 이상 차이가 나는 것으로 알려져 있다.

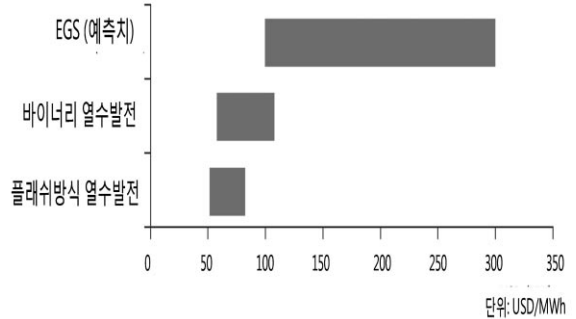
4. 맺음말

지열에너지는 다른 화석연료에 비해 이산화탄소 배출량이 월등히 적고, 국내에서 개발이 가능하다는 국산에너지라는 장점이 있고, 풍력, 태양광, 조력 등 다른 신재생 에너지에 비하여 기저부하를 제공한다는 장점이 있다. 적정수준의 연구개발투자가 이루어질 경우 2050년경 미국에서의 지열에너지 전기생산능력이 100 GW에 이를 것으로 예상(MIT, 2006)하고 있다. 현재 지열발전 전력 설비용량이 150 kW정도에 불과한 호주의 경우 최근 7 ~ 8년여 사이 지열발전에 대한 투자가 비약적으로 증가하여 2009년까지의 누적 투자량이 5000억 원대에 이르며 지열전문기업의 숫자는 48개, 그 중 10개가 호주 증권거래소(Australian Security Exchange, ASX)에 상장되어 있으며 2030년까지 총 전력설비용량 목표를 5.5 GW로 잡고 있다(Goldstein et al., 2008).

현재까지 EGS는 경제적으로는 높은 시추비용



[그림 6] 셰일가스 연구개발 투자비와 정부정책 및 셰일가스 생산량의 관계(MIT, 2011). GRI (Gas Research Institute)는 가스관련 분야 연구를 위한 비영리 연구소임.



[그림 7] 지열발전 종류별 전력단가(IEA, 2011)

이 단점이며, 기술적으로는 인공 저류층 형성 기술 및 수리자극에 따른 미소진동 대응방안 등에 대한 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다. 비화산 지대는 지열에너지 개발의 불모지로 알려져 왔으나 EGS는 이를 기술적으로 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다는 점에서 우리나라와 같이 비화산 지대에 위치하면서 대부분의 자원을 수입하는 나라에 매력적이다. 지열자원의 경우에도 화산지대에는 지온경사가 높아 지열자원이 풍부하므로 편재성이 있다고 할 수 있으나 보다 깊은 심도로 시추를 실시하게 되면 지열자원을 확보하는 것이 가능하므로 여타 광물 및 자원에 비해 편재성이 현격히 떨어진다고 할 수 있다. EGS 기술은 탐사, 지질조사, 시추, 수리자극, 플랜트 건설 등 여러 분야의 기술이 복합적으로 필요한 종합적인 응용 분야이다. 저자는 EGS 지열발전소 건설을 한국 최초의 우주발사체인 ‘나로호’ 발사에 비유하고 싶다. 성공적인 우주발사체를 위해서는 이론적인 연구나 실험실에서의 소형 연구 외에 실물크기의 실험발사가 절대적으로 중요한 단계이다. 마찬가지로 지하 3 ~ 5 km이하에서 인공저류층을 형성하여 지열발전을 하는 것은 이론적인 검토나 실험실에서의 연구 외에 현지에서의 실증연구가 절대적으로 필요하다. 25년여의 노력 끝에 EGS 지열발전을 실시중인 프랑스 술츠 프로젝트의 경우

235편의 저널논문, 712편의 학술대회 논문, 41편의 박사학위 논문이 배출될 정도로 지열 및 지하저류층공학 관련 과학기술개발의 산실이 되었다(GEIE, 2012). 그런 면에서 지난 2010년 12월 시작되어 진행중인 포항에서의 한국최초의 EGS 지열발전소 프로젝트는 한국에서의 EGS 기술발전에 획기적인 전기를 마련할 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

1. 민기복, 2011, 비화산지대 지열발전을 위한 EGS기술의 현황과 전망, 설비저널 (대한설비공학회지), 제 40권, 10호, p43-48.
2. DiPippo, 2008, Geothermal Power Generation, 2nd ed., Elsevier
3. Dorbath L, Cuenot N, Genter A, Frogneux M, 2009, Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forets (France) to 5 km deep massive water injections, Geophys. J. Int., 177, p.653-675.
4. Evans KF and Valley B, 2005, An overview of Enhanced Geothermal Systems, GEOforumCH ACTUEL, 4, p.17-24.

5. GEIE, 2012, Overview of the Soultz geothermal project, <http://www.geothermie-soultz.fr/>, 방문일: 2012년 11월24일.
6. Goldstein BA, Hill T, Long A, 2008, Australian Geothermal Implementing Agreement Annual Report - 2008, Australian Geothermal Energy Group.
7. IEA, 2011, Technology Roadmap - Geothermal Heat and Power, OECD/IEA.
8. MIT, 2006, Future of Geothermal Energy - Impact of enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century.
9. MIT, 2011, The future of natural gas ? an interdisciplinary MIT study
10. Telegraph, Green energy project gives Swiss the shakes, 2007년 2월 18일 기사. 