EGS 지열발전과 저류층 수리자극 기술

민기복*, 송윤호, 윤운상

EGS Power Generation and Hydraulic Stimulation

Ki-Bok Min*, Yoonho Song, Woon-Sang Yoon

Abstract While geothermal energy provides the only base-load power among renewable energy sources, its development has been carried out predominantly in volcanic area. EGS (Enhanced Geothermal System) is a ubiquitous technology that can allow the geothermal power generation virtually in any area. This manuscript introduces the current state-of-the-art of EGS development in the world and presents the hydraulic stimulation technology and associated microseismicity which are key technical component in EGS. Finally this paper suggests the key research areas required in Korea for further development of EGS.

Key words Geothermal energy, EGS (Enhanced Geothermal System), Hydraulic stimulation, Hydraulic fracturing, Hydraulic shearing

초 록 지열에너지는 기저부하를 제공하는 신재생에너지이나 현재까지 화산지대에만 대부분의 지열발전이 이루어져 왔다. 인공저류층 지열시스템 (Enhanced Geothermal System, EGS)는 비화산지대의 지열발전을 가능하게 할 개념으로 알려져 있으며 수리자극(hydraulic stimulation)이 핵심기술이다. 본 논문은 EGS지열발전의 개발 현황을 소개하고, 수압파쇄와 수리전단이 주 메커니즘인 수리자극의 핵심원리, 설계변수 및 수리자극에 수반되어 발생하는 미소진동의 원리 및 관측기술을 소개한다. 한국에서의 EGS 지열발전을 위하여 필요한 과제를 소개하여 향후 기술개발의 방향을 제시한다.

핵심어 지열에너지, 인공 저류층 지열시스템, 수리자극, 수압파쇄, 수리전단

1. 서 론

지열에너지는 생애주기(life cycle) 면에서 봤을 때 화석연료에 비해 이산화탄소 배출량이 월등히 적고, 국내에서 개발이 가능한 국산에너지이며 풍력, 태양광, 조력 등 다른 신재생에너지에 비하여 기저부하를 제공한다는 장점이 있다. 지열발전의 경우 대부분 화산지대에서 이루어지고 있으나 비화산지대에서도 지열발전이 이루어진다면 지속가능한 에너지 확보에 획기적인 역할을

할 것이다. 하지만 비화산지대에 적용되는 EGS(Enhanced Geothermal System¹⁾) 기술은 성공적인 수리자극에 의한 투수율 향상을 전제로 하고 있으며 아직 이에 대한 체계적인 이론정립이 이루어지지 않고 있다. 특히, 수리자극(hydraulic stimulation)에 따른 미소진동 발생은 수용성 향상을 위한 중요한 고려요인으로 EGS 기술의 확장을 위한 주요 과제라 할 수 있다. 본 기술보고는 EGS 핵심기술인 수리자극과 이에 따른 미소진동 해석 기술을 소개하고, 국내에서 EGS지열발전을 이루기 위한 과제를 제시하는 데 목적이 있다.

Received: Nov. 19, 2013

Revised: Nov. 28, 2013

Accepted: Dec. 17, 2013

*Corresponding Author: Ki-Bok Min

Tel) +8228809074, Fax) +8228718938

E-Mail) kbmin@snu.ac.kr

Seoul National University, 599 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul, Korea

1.1 지열에너지 및 지열발전 개발

지열에너지란 지각을 구성하고 있는 토양, 암반 및 지

1) EGS는 우리말로 ‘인공 저류층 생성기술’ 혹은 ‘인공 저류층 지열시스템’으로 번역되나 본 원고에서는 편의상 EGS라 부르기로 한다.

하수가 갖고 있는 열에너지 자원으로 정의할 수 있으며 지열에너지의 발생 원인은 섭씨 6,000 도에 달하는 내핵을 포함한 지구내부의 높은 열이 열전달에 의해 외부로 방출되는 열과 지각에서의 방사성 동위원소의 붕괴 열로 설명되고 통상 후자가 더 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Beardsmore and Cull, 2001).

지열에너지는 이용 방식에 따라 열을 직접 이용하는 형태(direct utilization)와 전기로 전환하여 이용하는 지열발전(geothermal power generation)으로 나눌 수 있다. 직접이용은 설치용량 기준 약 50 GW가 전세계에 설치되어 있고 지열히트펌프, 온천 및 수영장, 지역난방, 온실 등에 활용되고 있으며 사용량 기준으로 지열히트펌프가 약 절반을 차지한다(Lund et al., 2011). 지열발전은 1904년 이탈리아 라데렐로(Larderello) 지역에서 최초의 지열발전이 성공한 이래 2010년 현재 전세계적으로 총 526개의 지열발전소가 있으며 총 설치용량은 10.7 GW로 평균적인 원자력 발전소의 설치용량을 1 GW로 보았을 때 약 10기의 원자력 발전소에 해당하는 양이 지열발전으로 이루어지고 있다고 비유할 수 있다(Bertani, 2010; DiPippo, 2008).

통상 지열에너지의 3대 요소는 높은 열, 높은 투수계수 그리고 충분한 지하 유체의 존재로 정리된다. 현재까지 지열발전은 지온 경사가 높은 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 주입된 수압에 의해 암반 내 새로운 균열을 형성하거나 기존균열을 팽창시켜 투수율을 높이고, 즉, 인공저류층을 형성하여 지열에너지의 개발이 가능하게 만드는 기술을 EGS라고 하며 미국, 호주, 유럽 등 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다(Fig. 1). 과거에는 지열수가 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 가이저(Geysers) 지역에서 저류층에 물을 재주입하는 것과 같이 저류층에 인위적인 공학적 조치를 가하는 것이 일반적인 추세이나 본 논문에서는 물을 재주입하고, 인공으로 저류층을 생성하는 것 두 가지를 모두 실행할 때의 경우를 EGS라 국한하여 부르기로 한다.

국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)는 2011년 발간한 지열에너지 분야 기술로드맵(IEA,

Fig. 1. Geothermal Power Generation by Enhanced Geothermal System (EGS) (Ekneligoda and Min, 2013)

Fig. 2. Growth of geothermal power capacities by technology (Modified from IEA, 2011)

2011)을 통해 2050년까지 지열발전을 통한 설비용량은 200 GW로, 이중 EGS가 50%인 100 GW를 담당해야 할 것으로 온실가스 감축량을 고려한 목표치를 삼고 있다(Fig. 2). 특히 2020년 경에는 10 MW급 EGS발전소 50개 정도가 건설됨을 전제로, 2030년경에는 EGS발전소가 상업적으로 경쟁력이 있을 것으로 예측하고 있다.

우리나라의 경우 온천 등의 이용은 오래전부터 존재해왔으나 최근에는 지열히트펌프의 비약적인 보급으로 2008년 기준 105 MW가 보급되어 있다(송윤호 외, 2006; Song et al., 2010). 현재 한국에서는 지열발전은 실현되고 있지 않으며 오랜 논의 끝에 2010년말부터 정부연구개발사업으로 5년 예정으로 진행되고 있는 ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발 사업’이 지열발전을 실현하기 위한 국내 최초의 시도라고 할 수 있다(송윤호 외, 2010; 윤운상 외, 2011; Min et al., 2013).

1.2 EGS 지열발전

EGS는 미국 로스알라모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory) 주도로 1970년대 초에 처음으로

뉴멕시코주의 화강암 지대인 펜튼힐(Fenton Hill)에서 현지 실험을 실시하면서 연구가 시작되었다. 두 단계로 나뉘어져 진행된 연구를 통해 지하 심부의 결정질 암반 내 두 개의 시추공 사이에서 인공 저류층을 형성시키는 것이 가능하고, Fig. 3에 보는 바와 같이 60 kW급의 전기를 생산함으로써 EGS개념을 통해 지열 발전의 가능성을 확인하였다(MIT, 2006). 펜튼힐에서 진행된 프로젝트에서의 시추공은 심부 약 4 km 내외까지 시추되었고, 이 후 일본의 히지오리(Hijiori)와 오가치(Ogachi)지역, 영국의 로즈마노웨즈(Rosemanowes)와 프랑스의 술츠(Soultz)지역에서도 EGS의 현지실험이 진행되었으며 2003년부터는 호주의 쿠퍼 베이슨(Cooper Basin) 지역에서 세계최대의 민간 지열에너지 기업인 지오다이나믹스(Geodynamics)에 의해 상업화를 목표로 실증사업이 진행 중이다(Table 1, Fig. 4).

Fig. 3. The first EGS power generation at Fenton Hill, USA (Feb, 1980, fluid temperature: 150°C, R-114 binary cycle, electricity capacity: 60 kWe, Armstead and Tester, 1987)

Fig. 4. World EGS pilot sites. Fenton Hill(upper left, 1991, Hriscu, 2012), Rosemanowes(upper center, RH15 borehole, Parker, 1989), Hijiori Caldera(upper right, MIT, 2006), Soultz(upper right below Hijiori, Genter et al., 2010), Basel(Bottom left, Geothermal Explorers, 2006), Cooper Basin(bottom center, Habanero 4 borehole, taken in 2011), Pohang EGS site(taken in 2012)

Table 1. EGS projects overview (Evans and Valley, 2005)

project	period	reservoir depth (stages)	maximum temperature
Fenton Hill, USA	1972 - 1996	2.8 km/3.6 km/4.2 km	320°C
Rosemanowes, UK	1978 - 1991	2.0 km/ 2.2 km	85°C
Hijiori, Japan	1985 - 2002	1.8 km/2.2 km	270°C
Soultz, France	1987 - present	3.3 km/5.0 km	200°C
Ogachi, Japan	1989 - 2001	0.7 km/1.0 km	250°C
Cooper Basin, Australia	2003 - present	4.2 km	240°C

Fig. 5. Demonstration of hydraulic stimulation in fractured reservoir(Min, 2011)

Fig. 5는 균열암반으로 이루어진 저류층에서 수리자극을 실시하였을 때 유동방향이 증가하는 현상을 개별 요소법 수치해석을 통하여 나타내 주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 수리자극에 의한 인공 저류층 형성은 현지응력 상태와 균열의 방향에 따라 크게 좌우되며 균열의 크기, 다수의 균열이 존재할 때의 상호작용, 균열 근처 응력집중도의 변화, 전단변형시의 수리전도도 변화 특성 등 신뢰성 있는 예측을 하기에 고려해야 할 요소가 많다.

EGS는 경제적으로는 높은 시추비용이 단점이며, 기술적으로는 인공 저류층 형성 기술 및 수리자극에 따른 미소진동 대응방안 등에 대한 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다. 비화산지대는 지열에너지 개발의 불모지로 알려져 왔으나 EGS는 이를 기술적으로 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다는 점에서 우리나라와 같이 비화산지대에 위치하면서 대부분의 에너지자원을 수입하는 나라에 매력적이다. 지열자원의 경우에도 화산지대에 개발이 집중되어 있으나 보다 깊은 심도로 시추를 하게 되면 지열자원을 확보할 수 있으므로 여타 화석연료에 비해 편재성의 문제에서 비교적 자유롭다고 할 수 있다.

2. EGS 지열저류층 수리자극의 이론

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(aperture)을 증가시키게 된다. 이와 같이 강한 수압을 이용하여 암반의 투수율을 증가시키는 기법을 수리자극이라 한다. 본 장에서는 수리자극의 원리와 인공 저류층 형성을 위한 설계변수에 대해서 기술한다.

Fig. 6. Two types of hydraulic stimulation: hydraulic fracturing and hydraulic shearing (Min, 2012)

2.1 수리전단(Hydroshearing)과 수압파쇄(Hydraulic Fracturing)

수리자극은 통상 두 개의 메커니즘에 의해 실현이 되며 파괴 형태에 따라 절리면의 전단파괴와 이에 따른 절리간극의 증가(팽창)가 유체유동의 증가에 기여하는 메커니즘을 수리전단(hydroshearing, Cladouhos et al., 2009) 이라하고, 무결암의 인장파괴에 따른 균열의 형성과 이를 통해 유체유동을 확보하는 메커니즘을 수압파쇄(hydraulic fracturing or hydrofracturing)라 한다 (Fig. 6).

미국 펜튼힐을 위시한 일련의 EGS 실증실험을 통해 배운 사실 중 가장 주목할 사실 중 하나는 수압파쇄에 의한 인장파괴가 주된 인공 저류층 형성의 메커니즘일 것이란 애초의 예상과 달리 균열면에서의 전단파괴가 주된 메커니즘인 것으로 파악이 되었다는 사실이다. 전단파괴란 암반내의 균열이 미끄러지는 현상을 일컫는 것으로 암반내의 균열면이 거칠기 때문에 미끄러짐 발생시 간극(aperture)이 증가하게 되고 따라서 균열암반

Fig. 7. Shearing and dilation of a fracture due to the increase of injection pressure

내로 동일 수압이 작용할 때 유동량이 커지게 되어 인공적인 저류층이 형성이 되는 것이다. Fig. 7은 저류층에서 수리자극을 실시하였을 때의 수압파쇄와 수리전단의 파괴형태를 도식적으로 보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 수리자극에 의한 인공 저류층 형성은 현지응력 상태와 균열의 방향에 따라 크게 좌우되며 균열의 크기, 다수의 균열이 존재할 때의 상호작용, 균열 근처 응력집중도의 변화, 전단변형시의 수리전도도 변화 특성 등 신뢰성 있는 예측을 하기에 고려해야 할 요소가 많다.

수압파쇄의 경우 저류층 투수율 향상, 초기응력 측정, 저류층 관리 등의 이유로 1940년대부터 석유, 광산 및 토목환경 산업에서 이용되어 오던 기술이며 특히 최근 셰일가스 생산의 급격한 증가의 핵심요소기술이다(천대성과 이태중, 2013). Fig. 8은 ‘hydraulic fracturing’ 혹은 ‘hydrofracturing’이 논문의 제목, 초록, 주제어에 포함된 SCIE (Science citation index expanded, Thomson Reuters, 2013)에 수록된 학술지 논문의 추이를 나타낸 것으로 1953년부터 2012년까지 지난 60여년간 총 1,384편의 논문이 발표되었으며 이 중 절반 이상이 최근 10년간 발표되어 수압파쇄 분야에서 최근 활발한 연구가 진행되는 것을 알 수 있다.

실제 수리자극을 통한 인공 저류층 형성시에는 특정한 하나의 메커니즘만에 의존하기 보다는 수리전단과 수압파쇄 메커니즘이 결합된 형태로 진행되는 것으로 이해함이 타당할 것이다. 특히 최근 연구에 의하면 순수 수리전단의 조건으로 1) 닫힌 자연균열의 저장성, 2) 자연균열의 초기 투수율, 3) 자연균열의 연결도, 4) 자연균열의 최적 방향, 5) 자연균열의 팽창, 6) 적절하게

Fig. 8. Number of international journal papers related to hydraulic fracturing

향상된 투수율 등 여섯 가지의 조건이 성립될 때만 순수 수리전단에 의한 인공 저류층 형성이 가능할 것으로 보고하고 있다(McClure and Horne, 2013).

수리자극에 의한 투수율의 향상은 EGS기술의 핵심 내용으로 지표와 지중에 설치한 계측장치를 통해 측정된 미소지진을 통해 관측할 수 있으며 이 관측을 통해 향상된 투수율의 분포 범위를 확인할 수 있다. 미소지진은 암반균열의 미끄러짐이 발생했을 때 관측되는 것이므로 이와 같은 관측을 통해 인공 저류층이 형성된 지역의 크기를 추정할 수 있어서 미소지진의 관측 및 관리는 EGS기술의 핵심기술로 간주된다.

2.2 인공 저류층 형성을 위한 수리자극 설계변수

인공 저류층 형성을 위한 수리자극 설계변수는 성능변수, 기본변수 및 운영변수 등으로 구분할 수 있다(Richards et al., 1994).

성능변수(performance parameters)는 지열발전량 및 지속성에 직접적인 영향을 미치는 변수를 말하며 저류층 온도 및 온도강하와 같은 열적 성능(thermal performance), 수리적 임피던스(hydraulic impedance) 혹은 주입율(injectivity), 유량(flow rates), 주입수 손실율(water loss) 혹은 회수율(water recovery) 등이 주요 설계 변수라 할 수 있다. 발전기에서 생산되는 전기는 유체의 온도와 유량에 거의 비례하므로 온도는 그 자체로써 열적 성능이 될 수 있다. 또한 온도강하는 특히 지열발전의 지속성을 위해서 중요한 인자라 할 수 있으며 영국 로즈마노웨즈 프로젝트의 경우 연간 1도 하강을 온도 강하의 목표로 삼았다. 수리적 임피던스는 주입압력을 주입유량으로 나눈 값으로 단위 유량의 생산을 위

해 소요되는 주입압력을 의미한다. 통상 $\text{MPa}/(\text{kg}/\text{s})$ 로 표기하며 로즈마노웨츠의 경우 목표치로 $0.1 \text{ MPa}/(\text{kg}/\text{s})$ 를 삼았다. 반대로 주입률은 단위 주입압력에 따른 주입유량을 나타낸 값으로 단위는 $(\text{kg}/\text{sec})/\text{MPa}$ 이다. 유량 또한 지열발전량에 비례하므로 중요한 성능변수이다. 손실율은 손실된 유체의 양을 주입량으로 나눈 값으로 로즈마노웨츠의 경우 목표치를 90%로 삼았다. 회수율은 생산된 유체의 양을 주입된 유체의 양으로 나눈 값이다.

기본변수는 성능변수 외에 저류층의 특성 및 시추공 관련 변수를 일컬으며 지질, 저류층 크기, 초기응력, 절리방향, 빈도, 스위프 효율(sweep efficiency) 등과 같은 저류층 특성과 공간적, 시추궤적 등 시추공학 관련 변수 등이 포함되며, 주입압력 등은 운영변수(operational parameters)에 해당된다. 여기서 스위프 효율은 전체 저류층 면적 혹은 체적 중 유동 및 열전달에 기여하는 비율을 나타내며 화강암의 경우 통상 50% 이하이며, 유동집중화 현상으로 인해 10% 정도의 면적에서 대부분의 유동이 발생하는 것으로 알려져 있다(Richards et al., 1994).

위에 언급한 저류층 특성은 성능변수를 결정하는 중요한 변수로서 인공 저류층 부지조사단계 및 수리자극의 과정에서 저류층 특성화를 통해 신뢰성 있는 정보를 획득해야 한다. 공간적 및 시추궤적 등의 시추공 관련 변수들도 성능변수에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 기본 변수를 통하여 저류층의 조건이 결정이 되고, 시추가 완결되었다고 하더라도 지열 저류층의 운영시에도 저류층의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다.

3. 수리자극에 의한 미소진동(Microseismicity)

수리자극은 새로운 유체 이동통로의 생성과정에서 미약한 탄성파 에너지(seismic energy)를 발생시키게 된다. 이러한 에너지는 자연적으로 발생하는 지진파와 유사하게 지하를 전파해가며 극히 일부는 지표에서 사람이 느낄 수 있는 수준의 진동을 야기하기도 한다. 이와 같이 수리자극에 의해 발생하는 변위에 의한 탄성파 에너지의 전파와 관계된 기술 분야를 최근 미소진동(microseismicity)으로 통칭하고 있으며, 이는 저류층의 생성 및 확산과 관련한 메카니즘을 이해하고 수리자극을 제어하는데 필수적으로 동원된다.

3.1 미소진동의 원리 및 관측

사전적인 의미의 미소진동은 파도나 바람 등의 자연적인 원인이나, 수압파쇄 등의 인공적인 원인에 의해

야기되는 아주 미세한 땅의 진동으로 정의되며, 인공적인 원인에 의한 것은 AE (acoustic emission, 음향방출)로 부르기도 한다. 이는 우리나라 말로 미소진동 또는 미소지진으로 번역할 수 있는데, ‘미소지진’은 micro-earthquake라는 원어에 대응시킬 수 있다. 공학적인 관심이 되는 미소진동은 거의 대부분 인공적인 원인에 의해 발생하며, 구조물의 피해를 야기하는 자연 지진에 비해 고주파수 대역을 보이기 때문에 ‘미소진동’으로 분리하여 표현하는 것이 타당하다고 판단된다. 한편, 인공적인 원인에 의해 발생한다는 점에서 유발지진(induced seismicity)이라는 용어도 사용되고 있고 학계에서는 많은 경우에 서로 혼용되고 있다. EGS 지열발전에서 발생하는 탄성파 에너지는 그 세기가 미약하여 규모(Moment magnitude)가 대부분 2.0이하이기 때문에 사회적으로 받아들이는 통념상 미소진동으로 표현하기로 한다(송윤호 외, 2012).

수리자극에 의한 지하의 투수율 증가는 앞서 설명한 대로 인장파괴를 야기하는 수압파쇄와 전단파괴 또는 기존 균열의 미끄러짐(shearing)을 유도하는 수리전단의 메카니즘에 의한 것으로 나눌 수 있다. 이러한 두 메카니즘은 때때로 복합적으로 나타나기도 하지만, 결정질 암반에서 기존 균열망의 활성화를 통해 투수율의 증가 또는 저류층의 생성을 기본 원리로 하는 EGS에서 미소진동 발생의 주 메카니즘은 전단(shearing) 작용에 의한 것이다. 이는 단층면을 따른 변위에 의해 발생하는 자연지진과 매우 유사한데, 단 수리자극에 의해 미소진동이 발생하는 파단면(rupture area)의 크기 및 변위는 자연적인 지진에 비해 매우 작기 때문에 진동의 세기가 약하며 주파수가 높은 것이 특징이다. 한편, 단층의 생성 메카니즘 및 이를 따른 변위의 방향은 지하의 응력 분포에 의해 결정되는데(Fig. 9), 관측된 지진자료의 P-파 초동으로 부터 인장(tensional) 및 압축(pressure) 영역을 비치볼(beach ball)의 형태로 표시하는 것이 기본적인 단층면 해(fault plane solution)이다.

지하 매질 내에서 파동은 전파거리가 증가함에 따라 주파수 성분이 감소하게 되는데, 특히 지표 근처에서는 풍화암이나 퇴적층에 의해 고주파수 성분의 감쇠가 더 두드러진다. 따라서 미소진동을 정확히 탐지하기 위해서는 통상적으로 시추공 내에 3성분 가속도계(accelerometer)를 설치하게 된다. 가속도계의 주파수 범위는 통상적으로 수 $\text{Hz} \sim 500 \text{ Hz}$ 를 기본으로 하며 경우에 따라서 $0.1 \text{ Hz} \sim 100 \text{ kHz}$ 의 광대역을 사용하기도 하나 이는 측정 대상, 시추공 심도 및 주변 환경에 따른 잡음 수준과도 관계된다. 1970년대까지는 기술적인 제약에 의해 단일 성분 즉, 미소진동에 의해 변화하는 시추공

Fig. 9. Interrelationship between stress, fault and seismic event. (a) stress regime and fault, (b) schematic diagram of earthquake with respect to the displacement along strike slip fault (modified from www.learninggeoscience.net/free/0071). Fault plane solution determines the tensile and compressional area based on polarity of P-wave first arrival

내 유체 압력을 측정하는 하이드로폰(hydrophone)을 이용하기도 하였으나 최근에는 수백 m 깊이 시추공 내에서 서로 다른 3방향 성분의 측정이 통상적으로 이루어지고 있다.

진동의 정확한 측정 못지않게 모든 관측소에서의 자료를 실시간으로 동시에 관측하는 체계를 구축하는 것이 미소진동 관측에서는 중요한 문제인데, 이는 미소진동 자료의 실시간 분석을 통해 수리자극 과정 즉, 압력과 주입량 및 지속 기간을 제어해야 할 필요가 있기 때문이다. 일반적인 지진 관측망에 비해 미소진동 관측망은 고주파수 신호를 대상으로 하기 때문에 자료의 전송량이 대단히 많아지므로 가능하면 전용 인터넷망을 사용하는 것이 추천되며 또한 만약의 경우를 대비하여 각 관측소별로 일정량의 자체 저장장치도 갖추어야 한다. 수리자극에 의해 활성화되는 미소 균열의 크기 및 물리적 특성이 크게 변함에 따라 신호 크기의 많은 변화를 고려하여 24 비트(bit) A/D 변환도 필수적으로 요구된다. 우리나라에서의 EGS 지열발전 프로젝트와 관련한 미소진동 관측망의 구성은 송운호 등(2012)에 자세히 서술되어 있다.

미소진동 관측소의 위치는 첫째, 보다 정밀도가 높은 신호를 취득하기 위해서는 가능한 한 예상되는 진원 즉, 저류층에 가깝게, 둘째, 넓은 공간 분포(spatial coverage)를 통해 시간에 따라 변화하는 진원의 정확한 위치 결정을 위해서는 광범위하게 위치해야 하는 서로 상충되는 조건을 고려해서 결정해야만 한다. 위 두 가지를 동시에 만족하기 위해서는 가능한 한 많은 수의 관측소를 설치해야 하지만 이는 비용 및 기술적 측면에서 쉽지 않은 일이다. P-파 및 S-파 전파속도를 알고 있는 균일

한 암반에서는 이론적으로 3 지점에서의 단일성분 관측만으로 진원의 위치를 알 수 있게 된다. 그러나 전단면(shear plane)을 따른 변위에 의해 발생하는 지진은 압축응력과 인장응력의 경계면 즉, 단층면과 보조면을 따르는 방향으로 파동이 전파되지 않게 되며, 지하 심부의 응력 분포를 정확히 알기 전에는 경계면의 방향을 알 수 없다(Fig. 9) 이러한 이유로, 최근 발표된 EGS 관련 유발지진의 규약(Majer et al., 2012)에 따르면 미소진동 발생원의 위치 및 진원 메카니즘의 규명, 그리고 저류층의 변동 상황의 정확한 관측을 위해 시추공 3성분 관측소가 반경 5 km 이내에 최소한 8개가 위치해야 한다고 추천하고 있다.

3.2 미소진동 측정 자료의 기본적 해석: 진원 위치 추정

관측된 미소진동 자료의 처리 및 해석 과정은 기본적으로 자연 지진 관측의 경우와 같다. 단, 시추공을 이용한 3성분 관측이 주를 이루고 주파수가 높으며 매우 미약한 신호를 대상으로 한다는 것과 짧은 기간(통상 1주일 이내) 동안의 수리자극 수행에 수천~수만개의 이벤트(event)가 발생하기 때문에, 수리자극의 제어를 위해서는 많은 자료의 실시간 자동 처리 시스템이 구축되어야 한다. 자료 해석의 출발점은 미소진동을 발생시킨 진원의 위치 추정이다. 그 다음으로 여러 관측소의 측정자료를 이용해 단층면 하나 모멘트 텐서(moment tensor) 역산을 수행하여 미소진동을 발생시킨 메카니즘을 분석하고 미소진동의 규모를 계산하며, 최종적으로 모멘트로부터 균열의 발생 크기까지도 추정할 수 있다.

지하 암반이 균일하고 등방성일 때, P-파와 S-파의 전

파속도를 정확히 알고 있다면 이론적으로 진원의 위치는 하나의 3성분 센서로부터 알 수 있다. 즉, 3성분 센서에서 기록된 P-파 신호를 이용해 hodogram을 작성하면 매질의 입자운동 방향을 알 수 있으므로 진원의 방향을 구하고, P-파와 S-파의 도달시간 차이로 부터 거리를 계산함으로써 진원의 위치를 구하게 된다. 그러나 어떠한 경우에도 지하 매질은 균질하지 않고 때로는 이방성을 띠게 되며, 매질의 경계면도 일정하지 않으므로 지하 매질 내 P-파와 S-파 속도 분포를 3차원적으로 정확히 파악하는 것은 매우 어려운 문제이다. 더욱이, 모든 측정은 필연적으로 인위적 또는 기계적 잡음을 포함하게 되므로 P-파 및 S-파의 도달시간을 정확히 추출(또는 발췌, picking)하는 것은 결코 쉬운 문제가 아니다. 또한 3성분을 측정하지 않는 경우에는 파동의 도달방향도 알 수 없다. 따라서 많은 경우 3개 이상의 관측자료로부터 P-파 및 S-파 도달 시간을 추출한 후, 미리가정한 속도구조 모델을 이용하여 진원의 위치를 추정하고 계산된 도달시간과 측정된 도달시간 차이의 제곱합이 최소화되도록 반복적으로 계산을 수행하는 최소자승법(least-square method)에 기초한 방법들을 사용한다.

이러한 위치 추정은 필연적으로 오차를 수반하게 되는데 가장 중요한 오차 요인으로 부정확한 초동발췌(first arrival peaking)와 부정확한 속도구조 모델을 들 수 있으며, 전자는 무작위 오차를, 후자는 상관된 오차를 야기한다. 잡음이 포함되어 있는 신호에서 P-파 및 S-파 초동을 추출하게 될 경우 필연적으로 오차가 개입되는데 특히, 수리자극시의 미소진동은 단시간내에 수천개~수만개의 미소진동 신호를 발생시키므로 자동추출을 통해 가능한 한 실시간으로 진원의 위치를 추정하게 되면 수십 미터 이상의 위치 오차를 야기하게 된다. 초동발췌 오차에 의한 위치 추정 오류는 소위 상대 위치추정(relative location)을 통해 상당부분 감소시킬 수 있다. 즉, 신호가 뚜렷하게 관찰되어 위치추정에 오차가 미미하다고 생각되는 이벤트를 정하고 이로부터 도달되는 신호와 인접한 신호의 도달시간 차이만을 이용해서 진원의 위치를 계산하게 된다. Fig. 10은 진원추적의 한 예로 미국 캘리포니아주 Coso 지열지대에서 수행한 수압자극 시험에서 발생한 미소진동의 위치 추정 결과를 보여주는데, 상대 위치추정은 무작위 오차를 대부분 제거시켜 일정한 방향성을 갖고 저류층이 활성화되는 것을 잘 나타내고 있다(Foulger and Julian, 2011).

이와 같이 상대 위치추정 방법은 위치추정의 무작위 오차를 줄이고 해상도를 극적으로 향상시키지만 근본적으로 정확도를 높이는 방법이 될 수는 없는데, 이는

Fig. 10. Microseismic event observed at Coso Geothermal site in California, USA. Two figures show the source location with (right) and without (left) relative location method (Foulger and Julian, 2011). The size of the boxes are $2 \times 2 \times 2$ km, and this figures show that the error associated with source location can be as much as 500 m

속도구조 모델의 오차로부터 자유로울 수 없기 때문이다. 즉, 아무리 일관적으로 정확하게 P-파 및 S-파의 도달시간을 추출했다고 해도 지하의 속도구조 모델이 부정확하면 계산된 도달시간이 상당한 오류를 포함하게 되고 따라서 진원의 위치를 잘 못 추정할 수밖에 없기 때문이다. 따라서, 미소진동 관측을 통한 저류층 모니터링의 성공 여부는 적절한 관측시스템 구성과 대상 지하의 정확한 속도구조 모델 확보에 달려있다.

3.3 미소진동 측정 자료의 진전된 해석: “Beyond dots in a box”

수리자극이 진행됨에 따른 미소진동 진원의 위치 영상화만으로도 저류층의 변화 양상에 대한 모니터링이 가능하나 발생 메커니즘 즉, 어떠한 방식으로 균열이 생성되고 있는 지에 대한 정보를 알 수는 없다. 미소진동 발생 메커니즘을 해석하는 출발점은 P-파 초동의 극성을 이용해 인장축(최소 주응력)과 압축축(최대 주응력) 범위를 비치볼 형태로 나타냄으로써 변위가 발생한 양상(응력 분포) 및 방향을 추정하는 단층면 해 방법이며 이는 지진자료 해석에서도 기본적으로 동원되고 있는 방법이다(Fig. 9 참조). 단층면을 따른 발진기구(focal mechanism) 또는 단층면 해는 그 단층을 야기한 응력 상태를 알 수 있는 유용한 방법이다. 그러나, Fig. 9에서 나타난 바와 같이 주향이동단층의 경우에도 단층면과 90° 각을 이루는 보조면을 구별할 수 없는 애매모호함이 존재한다. 또한 잡음이 섞여있는 자료로 비치볼을 작성할 때 인장범위와 압축범위를 뚜렷이 구별할 수 없어 여러 개의 해가 가능할 뿐만 아니라, 진동이 단순히 파단면을 따른 변위에 의해 발생하지 않았을 경우에는 적용자체가 불가능해지는 문제가 있다.

지진 및 미소진동은 지하 매질 내 부피변화, 파단면을

Fig. 11. Basic faulting mechanisms and their representations in beach ball (Baig and Urbancic, 2010)

따른 변위, 새로운 균열의 생성이나 유체의 주입 등 다양한 원인에 의해 발생하게 되는데, 이러한 물리적 현상은 모멘트 텐서의 개념을 통하여 정리될 수 있다. 지하의 모든 변위는 작용면과 작용방향에 따라 9성분을 갖는 모멘트 텐서로 나타낼 수 있는데, 이는 대칭인 텐서여서 실제로는 6개의 성분으로 규정되며 탄성과 모멘트, 파쇄(또는 변위)의 방향, 그리고 서로 다른 파쇄 메커니즘의 상대적 크기를 알 수 있다. Fig. 11은 서로 다른 모멘트 텐서를 야기하는 지하의 파쇄 메커니즘을 도식적으로 나타낸 것이며 각각에 의해 전파되는 P-파 관측자료를 이용하여 비치볼 형태로 발진기구를 나타낸 것이다. 이와 같이 미소진동을 야기하는 지하 매질 내 모든 파쇄 현상은 모멘트 텐서 역산을 통해 규명될 수 있기 때문에 최근의 미소진동 관측 자료의 해석은 궁극적으로 이를 지향하고 있다.

3.4 미소진동 활용의 전망 및 과제

미소진동의 관측은 수리자극에 의한 저류층 생성 및 확산 과정을 실시간, 정량적으로 모니터링하는 유일한 방법이다. 뿐만 아니라 만약에 발생할지도 모르는 피해 수준의 유발지진 위험성을 분석하는 지진위해성(seismic hazard) 평가를 위해서도 미소진동 관측망의 운영은 필수적인 과정이며 이는 단지 시추공내 가속도계 뿐만이 아니라 지표 3성분 광대역 지진계 운영을 포함한다. 미소진동 관측의 또 다른 중요한 목적은 실시간 해석을 통해 수리자극 과정을 제어하는 것이다. 즉, 유체 주입량 및 주입압력으로 적절히 조절함으로써 지나치게 큰 규모의 진동 발생을 예방하는 것이 가능해진다.

미소진동 관측의 성패는 적절한 관측망 구성과 함께 대상 지하구조의 정확한 속도구조 모델 확보에 결정적으로 좌우된다. 또한, 가능한 한 고해상도로 지하 파쇄

대의 영상을 사전에 확보하는 것이 중요하다. 3차원 탄성과 반사법 탐사는 지하구조의 3차원적 속도구조를 확보하는 유용한 기술이지만 비용이 매우 많이 소요될 뿐만 아니라 우리나라와 같이 지형이 많이 변화하고 측선의 접근이 어려운 곳이 많은 경우에 쉽게 적용할 수 없다. 또한 지표 탐사로는 결정질 암반내 파쇄대에 대한 분해능을 확보할 수 없는 경우가 많다. 따라서, 시추공을 이용한 수직 탄성과 탐사(Vertical Seismic Profiling; VSP)나 시추공간 탐사가 필요하지만, 탐사용 심부 시추공을 확보한다는 것 또한 현실적으로 어려운 문제이다. 물론 인근에 적절한 시추공이 있다면 여기에 폭발성 음원 등을 이용해 송신원을 발생시키고 미소진동 관측망에서 측정된 자료를 이용해 그 심도 범위까지의 속도구조를 규명할 수 있으며, 이는 시추공 3성분 가속도계의 방향을 결정하는 보정자료(calibration shot)로도 매우 유용하나 기존 시추공의 심도가 제약 요인이다. 이에 대한 대안의 하나로 시추공 굴착시 발생하는 비트의 진동에너지를 송신원으로 이용해 RVSP(Reverse VSP)탐사를 수행하는 seismic-while-drilling 방법이 유용한 대안이 될 수 있다. 단지, 송신원을 별도로 조절하는 VSP나 RVSP 탐사와 달리 신호대 잡음비가 현저히 낮은 단점을 적절한 자료처리를 통해 얼마나 극복하느냐가 숙제이다.

미소진동은 수리자극의 효과를 실시간, 정량적으로 규명하는 유일한 방법이지만, 암반내 유체 통로 즉, 저류층에 대한 모든 정보를 제공하지는 않음을 유의해야 한다. 즉, 이미 유체의 통로 역할을 하는 투수성 파쇄대의 경우에는 수리자극에 의해 투수율이 어느정도 증가한다고 해도 탄성과 에너지를 발생시키지 않을 가능성이 높다. 따라서, 기술적 및 경제적으로 유용한 저류층 구조가 관찰되지 않을 위험성이 존재하는 것이다. 이러

한 위험성은 사전에 시추공을 이용한 탐사를 통해 파쇄대를 고해상도로 영상화함으로써 낮출 수 있지만 항상 가능하지는 않다. 투수성 파쇄대는 자체적으로 탄성파 에너지를 발생시키지는 않더라도 고주파수 탄성파의 반사면으로 작용하기 때문에, 인접한 균열에서 발생한 미소진동을 송신원으로 하는 반사파 영상화를 통해 규명이 가능해지고 Soultz 등지에서도 이러한 해석이 시도된 바 있다. 또한 온도-압력-유속(TPS) 검측은 시추공내로 유입 또는 유출하는 유체에 대한 직접적 정보를 제공하기 때문에 미소진동 반사법 영상화 결과와 함께 해석하게 되면 저류층 특성화의 궁극적 목표인 정량적 수리 정보의 규명으로 이어질 수 있으므로 미소진동 활용의 최종 과제가 될 것이다. 어떠한 경우에도 하나의 기술만으로 우리에게 필요한 모든 정보를 획득할 수 없음은 엄연한 현실이다.

4. EGS 성공을 위한 과제

2006년 MIT 에서 주관하여 발간한 EGS 관련 보고서는 핵심 연구분야로 다음의 내용을 제시하고 있다 (MIT, 2006).

- 인공 저류층 생성 크기와 열전달이 일어나는 면적 산정 기술
- 200°C 이상의 고온에서 작동하는 보어홀 내 검측 장비
- 물과 암석과의 지구화학적 상호작용에 대한 이해
- 단축된 유체 유동거리(short circuit)에 대한 대책
- 저류층 온도 강하에 대한 대책
- 생성되는 균열의 부피를 조절하는 방법
- 균열 저류층 모델링 방법

석유 가스개발의 역사가 오래되고, 산업이 활성화된 나라에 비하여 국내에서는 위에 제시한 기술의 역사가 일천하여, 자원개발 및 방사성 폐기물 지하처분장 등에서 적용되는 균열 저류층 수리역학 거동 모사 기술, 세일가스 수압파쇄기술, 이산화탄소 지중 저장 등 관련 지질환경 응용분야와의 밀접한 협력하에 기술개발이 이루어져야 한다. EGS 지열발전 프로젝트의 성공 즉, 우수한 비용-편익효과는 곧 가능한 한 높은 온도와 많은 양의 지열유체 순환시스템을 확보함을 의미한다. 정해진 지역에서 온도는 시추공의 깊이에 따라 정해지지만 유체 순환량은 기술적으로 충분히 증가시킬 수 있는 양이므로, 결국 EGS 프로젝트는 수리자극을 통한 저류층 생성으로 그 성패가 정해진다. 한편, 개발 초기에는 순환유체의 양이 주관심이 되겠으나 장기적인 관점 즉, 생애주기 경제성 분석 측면에서 보면 적어도 30년간 지

속적으로 생산가능한 에너지(온도와 유량)가 중요하다. 지나치게 많은 순환은 자칫 급격한 온도강하를 야기해 저류층과 발전 플랜트의 수명을 단축시키는 장애 요인이 될 우려가 있기 때문이다. 그렇다면 지속가능한 개발량은 어떻게 정해져야 할까? 이는 정확한 저류층 특성화에 기초한 모델링을 통해서만 가능해지며 전 세계적으로 주요 연구개발 대상이다.

지열 프로젝트는 높은 초기투자비, 상당히 긴 프로젝트 기간과 더불어 광범위한 기술 요소가 단계적 및 복합적으로 적용되는 것으로 특징된다. 따라서 각 기술분야 전문가들이 적시에 필요한 작업을 투입할 수 있도록 효과적인 운영체계(management scheme)가 작동되는 것이 필수적으로 요구된다. 이러한 관리체계는 공정별 진행 상황 및 결과에 대한 정보가 적시에 공유됨을 기본조건으로 하기 때문에 명확한 조직체계 구성 및 운영이 무엇보다 중요함은 아무리 강조해도 지나침이 없을 것이다.

4.1 저류층 특성화(reservoir characterization)

EGS 발전 프로젝트 타당성 조사의 한 단계인 부지 선정에서부터 시추공 굴착 및 수리자극, 그리고 순환 시스템 구성까지 동원되는 모든 지구과학적 및 공학적 조사의 궁극적 목표는 저류층 특성화이다. 저류층 특성화란 대상이 되는 지하 저류층의 기하학적, 물리적 및 화학적 특성을 정량적으로 규명하는 모든 기술분야를 망라하며 또한 이러한 특성이 시간에 따라 달라지기 때문에 모니터링까지를 포함하는 개념이 되어야 한다. 따라서 가능한 한 모든 지구물리학적, 지구화학적 및 역학적 조사 및 시험이 수행되어야 하는데, 특히 지오메카닉스와 관련하여 응력측정, 저류층 모니터링 및 저류층 균열특성화에 대하여 언급한다.

지하의 응력분포는 수리자극에 의해 생성되는 저류층의 크기와 방향을 결정짓는 가장 중요한 변수이며 시추공의 궤적 또한 방향제어 시추가 아닐 경우에 응력에 영향을 받게 된다. 또한 심도에 따라 각 방향 주응력의 상대적 크기가 변화할 수 있기 때문에 심도에 따른 응력측정도 필요하다. 응력의 측정은 통상 수압파쇄시험을 통해 이루어지지만 우리나라에서 1 km 이상 심도에서의 응력 측정은 이루어진 바 없고 적절한 시험 장치도 갖추어져 있지 않다. 따라서 조속히 3 km 심도 구간 또는 그 이상에서 적용 가능한 응력 측정 장치를 갖추어 동시에 공벽관찰 등을 통한 간접적인 방법을 통해 응력모델을 구축하여야 한다. 3방향 주응력 중에서 수직 주응력은 밀도검층 자료의 심도에 대한 적분을 통해서 얻어질 수 있기 때문에 밀도검층은 필수 수행 검층

항목에 포함되어야 한다. 현 상황에서 적용할 수 있는 간접적인 응력 측정 방법으로 리크오프테스트(leak-off test)와 시추공 영상화 검층이 있다. 케이싱 및 시멘팅 후에 시추공 내구성(integrity)을 조사하기 위한 리크오프테스트는 최소 주응력 값을 제공해 줄 수 있기 때문에 중간 케이싱(intermediate casing) 후에 필히 리크오프테스트를 수행하여야 할 것이다. 이는 추가의 비용 없이도 충분히 적용가능한 방법이다. 한편 통상적으로 초음파 텔레뷰어(acoustic televiewer)를 이용한 시추공 영상화 검층은 공벽파괴(borehole breakout, BO)나 시추에 따른 인장파괴(drilling induced tensile fracture, DITF)의 관찰을 가능하게 한다. BO는 최소 주응력 방향을, DITF는 최대 주응력 방향을 지시하기 때문에 리크오프테스트 결과와 함께 응력분포에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다. 단, 시추공 영상화 검층은 필히 케이싱 이전에 실시되어야 함을 유의해야 한다.

수리자극에 의해 생성되고 확산되는 저류층 모니터링을 위한 미소진동 관측의 중요성에 대해서는 앞서 다룬 바 있지만 불확실성의 감소를 위해서 다른 물리량의 모니터링 작업도 동시에 수행할 필요가 있다. 지하에 주입된 유체(물)의 흐름은 그 자체로 전해질의 이동이기 때문에 지표에서 측정 가능한 전위 분포를 야기할 수 있다. 유체 흐름에 의한 전위분포는 보통 자연전위(Self Potential; SP) 또는 유동전위(Streaming Potential)로 불리는데 지표에서 넓은 범위에 걸쳐 전위전극을 설치하고 시간별로 그 변화를 모니터링하게 된다. SP의 크기는 유체 흐름뿐만 아니라 지하의 전기전도도 분포의 함수이기도 하기 때문에 수리자극 실시 전에 자기지전류(magnetotelluric; MT) 탐사를 통해 지하의 3차원 전기전도도 분포를 영상화하는 것이 필요하다. 또한 SP의 배경값은 강우나 기후 여건, 그리고 기타 수리지질적 요인에 따라 변화하기 때문에 수리자극 실시 훨씬 전에 미리 모니터링에 착수해야 할 것이다. 수리자극에 의한 저류층 활성화는 단지 전기전도도뿐만 아니라 탄성파 전파속도도 변화시키게 된다. 이는 곧, 미리 지하구조의 3차원적 속도구조 모델을 확보했다하더라도 저류층의 물성변화에 의해 특정부분의 속도구조가 변화함으로써 결과적으로 미소진동 진원 위치 추정에 주요한 오차 요인으로 작용할 수 있음을 의미한다. 따라서 지진파 토모그래피와 같은 방법을 미소진동 관측자료에 적용하여 속도분포의 시간적 변화를 규명하는 시도도 유용할 것인데, 이때 토모그래피에 이용할 진원의 위치 자체가 정확하지 않은 모순이 있으므로 상당한 주의가 필요하다. 가능한 해결책으로는 다른 물리량 즉, SP나 MT 탐사 결과 및 검층 자료(예를 들어 PTS 검층)와의 복합역

산 등을 통한 정량적 저류층 특성화 기술의 개발을 들 수 있으며, 시간에 따른 변화를 정량적으로 규명해야 한다는 점에서 4차원 영상화 기술개발이 과제가 된다.

지열 저류층의 수리자극은 기존균열을 통한 수리전단에 의존하는 메커니즘이므로 현지 균열의 상태에 큰 영향을 받는다. 근본적으로 지하암반내의 균열특성화는 직접적인 방법은 지표에서의 노두조사, 시추공을 통한 공벽관찰 밖에 없으며, 수리자극을 통한 미소진동 관측을 통한 간접적인 조사가 진행될 수 있다.

4.2 열-수리-역학-화학적 거동 연동 모델링

통상적으로 지열개발을 위해서는 저류층의 장기거동에 대한 예측이 필요하며 이에 따라 수치해석을 통한 모델링이 필수적이다. 지열생산은 저류층에서의 열전달, 균열 혹은 다공성매질에서의 유체의 유동, 저류층의 변위 및 응력변화, 저류층의 화학적 작용 등을 모두 결합하여 해석하는 연동해석이 필요하며 주된 관찰대상에 따라 열-수리(TH), 열-수리-화학(THC), 열-수리-역학(THM) 또는 열-수리-역학-화학적(THMC) 연동해석이 실시된다. 이중 연동해석에 따른 투수율과 같은 물성변화는 경험적 수식에 의존하는 것이 불가피하며, 장기거동에 따른 물성변화 예측에 대한 불확실성으로 인해 실험실 혹은 현지실험을 통한 보정작업이 필수적이다. 또한 균열을 명시적으로 모델링하여 유체 유동, 열, 역학적인 거동을 모두 모사하는 프로그램은 아직 EGS 실증현장에서 성공적으로 적용된 사례가 없으며 화학적 거동에 따른 물성변화는 대한 해석은 실험적 자료가 부족하여 연구가 필요한 실정이다. 궁극적으로 수리자극에 의한 저류층 발달을 정량적으로 모사하기 위해서는 역학적 변위가 탄성과 에너지의 형태로 전파해나가는 과정의 모델링이 필요한데, 이는 THM 모델에 파동방정식 모델링이 결합되어야 하므로 아직까지도 해결해야 할 많은 과제가 있고 현재 일부 연구기관에서의 주 연구 개발 과제이다. THMC 모델링은 탐사 및 모니터링 자료에 의해 특성화된 저류층 변수에 기초하여 수십년 이상의 장기거동을 예측할 수 있어야 하며, 초기 몇 년간의 측정자료를 이용해 보정(calibration)하여 수치모델의 신뢰성을 향상시켜야 한다.

4.3 인접 분야와의 파급효과를 극대화

지열에너지를 개발하는 과정은 탐사공학, 시추공학, 석유공학, 암석역학, 지하수공학, 지구화학, 플랜트건설 등 석유, 가스 혹은 광물자원을 개발하는 요소기술이 총동원되는 지질 자원 건설분야 기술의 종합응용분야로서 이산화탄소 지중 처분장, 지하 고준위 방사성 폐

Fig. 12. The relationship between R&D spending and shale gas production (MIT, 2011)

Fig. 13. Schematic diagram of mechanisms for inducing earthquakes (Ellsworth, 2013)

기물 처분장, 지하가스저장소 건설 등 다양한 분야로의 파급효과가 큰 응용분야이다. 특히, 최근 방대한 매장량으로 각광을 받고 있는 수압파쇄에 의한 셰일가스 생산의 경우 시추기술 및 수압파쇄 기술 등 핵심요소기술이 EGS 기술과 밀접한 연관을 갖고 있다. Fig. 12는 셰일가스 연구개발 투자비와 세제혜택과 같은 정부정책 및 생산량의 관계를 나타낸 그림으로 1970년대 후반부터 약 15여년간의 집중적인 투자가 현재의 폭발적인 셰일가스 생산의 기반이 되었음을 보여주고 있으며, EGS기술도 획기적인 투자 및 기술진보가 뒷받침될 경우 유사한 성공사례가 될 수 있음을 시사한다.

또한 저류층에서의 석유가스 생산 혹은 유체주입과 지진의 연관성에 대한 많은 관측 자료는 둘 간의 밀접한 연관성을 나타내어주고 있으며 이와 관련된 경험은

지열 저류층에서의 수리자극에도 중요한 시사점을 준다고 할 수 있다(Healy et al., 1968; Ellsworth, 2013). Fig. 13은 단층에서의 간극수압을 직접적으로 증가시키거나 단층에 작용하는 수직 및 전단응력을 변화시켜서 지진이 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

4.4 EGS 실증 사례 학습 및 경험적 기술(know-how) 획득

인공 저류층 형성을 위한 수리자극 기술은 하나의 상품이 아니라 저류층에 대한 이해를 바탕으로 제품, 인력, 시스템이 결합된 통합기술로 인식하고 장기간에 걸친 지속적인 노력이 필요하다. EGS 지열 개발의 성공적 목적 달성을 위해서는 주입정 및 생산정 간의 최적 간격 및 궤적선정, 수리자극의 설계를 위한 관련 매개

변수의 결정과 시행과정의 안정성을 확보할 수 있는 경험적 기술과 핵심 요소 기술의 확보가 필수적이다. 대심도 암반을 대상으로 하는 EGS 지열분야 기술들은 경험적인 요인과 반복적인 현장 적용을 통해 습득되고 축적되는 부분들이 많다. 이러한 현장 의존적 기술적 특성으로 인해 관련 요소 기술들의 대부분이 EGS, 석유/가스 개발정 설계 및 시공 경험이 미국, 호주 및 서유럽 선진국들의 소수의 엔지니어와 연구자들에 의해 체계적인 문서화 없이 경험적 기술로 보유하고 있기 때문에 고급 핵심기술에 대한 접근과 습득이 매우 어려운 것이 현실이다. 이러한 기술적 장벽을 극복하고 지열에너지 개발 분야에서 비교 우위 기술력의 확보와 잠재적 수요 창출을 위해서는 산업체와 학교 및 연구기관의 유기적 연계를 통해 개념 위주의 피상적 정성적 접근이 아닌 지구물리학, 암반공학, 수리유체역학, 저류층 공학 등 관련 학문분야의 전문지식이 상호 융합된 공학적 전문성에 바탕을 둔 실체적이고 정량적인 결과물을 도출할 수 있는 연구와 노력이 필요하며 지난 40년간의 실증연구 사례에 대한 심도 깊은 조사가 요구된다. 특히 설계 및 시공 관련 일련의 핵심기술들 중 개발에 장시간과 큰 비용이 소요되는 하드웨어 시스템 기술보다는 지열 개발의 성패를 좌우하며 고부가가치의 설계와 운영에 관련된 소프트 엔지니어링(Soft engineering) 기술력 확보에 가중치를 둔 연구와 적극적인 투자가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

특히, 시추 및 수리자극 분야는 지하 저류층 거동 예측의 어려움 등으로 인해 계획단계와 실행단계의 예산이 큰 차이가 나는 경우가 흔히 있다. 최근 완성된 호주 쿠퍼 베이슨의 Habanero 4 시추공의 경우 총 비용이 5,200만 호주달러 (약 550억원)에 달한 것으로 알려지고 있다(Ward, 2013). 이는 통상 알려진 100-150억원 (MIT, 2006)에 비하여 매우 큰 차이가 난다. 한국에서 현재 진행되고 있거나 향후 진행될 EGS 시추 및 수리자극 실행 경험을 통해서 지열자원 개발에 수반된 불확실성에 대한 경험을 축적하고, 최적의 시추 및 수리자극을 실행할 수 있는 방안을 확보하여야 할 것이다.

5. 결 언

EGS지열발전소 건설은 한국 최초의 우주발사체인 '나로호' 발사에 비유할 수 있다. 성공적인 우주발사체를 위해서는 이론적인 연구나 실험실에서의 소형 연구 외에 실험크기의 실험발사가 필수적인 단계이다. 마찬가지로 지하 3-5 km 이하에서 인공 저류층을 형성하여 지열발전을 하는 것은 이론적인 검토나 실험실에서의

연구 외에 현지에서의 실증연구가 절대적으로 필요하다. EGS는 1972년 시작된 미국 펜트힐 프로젝트 이후 일본, 영국, 프랑스, 독일, 스위스, 스웨덴 등 세계 많은 나라에서 비화산지대에서도 지열발전이 가능한 기술로 EGS 기술을 실현시키기 위해 많은 노력을 해 왔다. 25년여의 노력 끝에 EGS지열발전을 실시중인 프랑스 술츠 프로젝트의 경우 235편의 저널논문, 700편의 학술대회 논문, 41편의 박사학위 논문이 배출될 정도로 지열 및 지하 저류층공학 관련 과학기술개발의 산실이 되었다(Genter, 2011). 그런 면에서 지난 2010년 12월 시작되어 진행중인 포항에서의 한국최초의 EGS 지열발전소 프로젝트는 한국에서의 EGS기술발전에 획기적인 전기를 마련해야 한다. 미국에서의 펜트힐에서 60 kWe의 전기를 생산한 것이 1980년이며 (Fig. 4), 프랑스 술츠에서 3-400 kWe 급의 전기를 지속적으로 생산하기 시작한 것이 2008년 6월이다(Genter et al., 2010). 지난 3-40여년간 비약적인 성장과 파급효과를 발생시킨 측면이 있지만 다른 한편으로 EGS지열발전 상용화를 이룰 수 있는 돌파기술(breakthrough technology)이 확보되기 위해서는 많은 연구 개발이 필요한 것이 사실이다. 아무쪼록 본 논문 및 본 특별호에 실린 논문이 EGS 실증사업의 성과와 한계를 체득하여 시행착오를 최소화하여 국내에서 진행되는 EGS 실증사업 연구개발의 초석이 되기 바란다.

사 사

이 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제번호: 2012T100201733)로 이에 감사드린다. 또한, EGS성공을 위한 과제에 대한 지오제니 컨설턴트 배성호박사의 조언에 감사드린다.

References

1. Min, K.-B., 2011, State of the art in EGS technology for non-volcanic geothermal power generation, Magazine of SAREK, 40(10), 43-48.
2. Min, K.-B., 2012, State of the art in EGS geothermal power generation, Geothermal Energy Journal, 8(4), 20-26.
3. Song, Y., Kim, H.C. and Lee, S.-K., 2006, Geothermal research and development in Korea, Eco. Environ. Geol., 39(4), 485-494.
4. Song, Y. et al., 2010, Research on deep geothermal energy exploitation - EGS potential in Korea, KIGAM report to KNOC.
5. Song, Y., Park, M., Jeon, J., Lee J.M., Cho, C.-S. and Lee, T.J., 2012, Construction of a microseismicity observation

- network with borehole accelerometers for monitoring geothermal reservoir, *J Kor Soc Geosys Eng*, 49(4), 487-497.
6. Yoon, W.-S., Song, Y., Lee, T.J., Kim, K.-Y., Min, K.-B., Cho, Y.-H. and Jeon, J., 2011, Research background and plan of enhanced geothermal system project for MW power generation in Korea, *Tunnel & Underground Space*, *J Kor Soc Rock Mech*, 21(1), 11-19.
 7. Cheon, D.-S. and Lee, T.J., 2013, Hydraulic fracturing technology for oil and gas production, *Tunnel & Underground Space*, *J Kor Soc Rock Mech*, 23(6),
 8. Armstead, H. C. H and Tester, J. W., 1987, *Heat Mining - A new source of energy*, E. & F.N. SPON
 9. Baig, A., and Urbancic, T., 2010, Microseismic moment tensors: A path to understanding frac growth, *The Leading Edge*, 29, 320-324.
 10. Beardsmore, G. R. and Cull, J. P., 2001, *Crustal heat flow-A guide to measurement and modelling*, Cambridge University Press.
 11. Bertani R., 2010, *Geothermal Power Generation in the world-2005-2010 Update Report*, Proc World Geothermal Congress, Paper No.8. Bali, Indonesia.
 12. Cladouhos, T., Petty, S., Larson, B., Llovenitti, J., Livesay, B., Baria, R. 2009, *Toward More Efficient Heat Mining: A Planned Enhanced Geothermal System Demonstration Project*, *GRC Transactions* 33; 165-70.
 13. DiPippo, R., 2008, *Geothermal power plants-Principles, applications, case studies and environmental impact*, Elsevier.
 14. Ekneligoda, T. C. and Min, K.-B., 2013, Determination of optimum parameters of doublet system in a horizontally fractured geothermal reservoir, *Renewable Energy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.003>.
 15. Ellsworth, W. L., 2013, Injection-Induced Earthquakes, *Science*, 341(6142):1225942. DOI:10.1126/science.1225942.
 16. Evans, K. F. and Valley, B., 2005, An overview of Enhanced Geothermal Systems, *GEOforumCH ACTUEL*, 4, p.17-24.
 17. Foulger, G. R., and Julian, B. R., 2011, Earthquakes and errors: Methods for industrial applications, *Geophysics*, 76, WC5-WC15.
 18. Genter, A., X. Goerke, J.-J. Graff, N. Cuenot, G. Krall, M. Schindler, and G. Ravier., 2010, Current Status of the Egs Soutz Geothermal Project (France). Proc World Geothermal Congress, Paper No.3124. Bali, Indonesia.
 19. Genter, A., 2011, Overview of the scientific and technical research program done at Soutz during geothermal exploitation, Soutz Geothermal Conference, Soutz-sous-Forêts, France, p.10 & presentation file.
 20. Geothermal Explorers, 2006, *Projekt Deep Heat Mining* Basel, Anlage 2-4, 24, 25, 28, Switzerland, 1-4, 48-52.
 21. Healy, J. H., Rubey, W. W., Griggs, D. T. and Raleigh C. B., 1968, The Denver earthquakes-disposal of waste fluids by injection into a deep well has triggered earthquakes near Denver, Colorado, *Science*, 161(3848), 1301-1310.
 22. Hrisco VT (ed), 2012, *Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy*, Springer.
 23. IEA, 2011, *Technology Roadmap - Geothermal Heat and Power*, OECD/IEA.
 24. Lund, J. W., Freeston, D. H. and Boyd T. L., 2011, Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, *Geothermics* 40(3): 159-80.
 25. Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J., and Wong, I., 2012, Protocol for addressing induced seismicity associated with Enhanced Geothermal System, US Department of Energy, DOE/EE-0662.
 26. McClure, M. and Horne R., 2012, The effect of fault zone development on induced seismicity, Proc. 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA.
 27. Min, K.-B., Jeon, S., Kim, H., Jung J.-W., Xie, L., Ekneligoda, T., Kim, K. Y., Kim H.-G., Bae, S., Lee, T. J., Song, Y., Park, E.-S. and Yoon W.-S., 2013, The Geomechanical study in Pohang Enhanced Geothermal System (EGS) Project in Korea, 6th Int. Symp. on In-situ Rock Stress, Sendai, Japan, RS2013-1158.
 28. MIT, 2006, *Future of Geothermal Energy - Impact of enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*.
 29. MIT, 2011, *The future of natural gas-an interdisciplinary MIT study*.
 30. Parker R.H. (ed), 1989, *Hot Dry Rock Geothermal Energy-Phase 2B Final Report of the Camborne School of Mine Project*, Vol.1 & 2, Pergamon Press.
 31. Richards, H. G., Parker, R. H., Green, A. S. P., Jones, R. H., Nicholls, J. D. M., Nicol, D. A. C., Randall, M. M., Richards, S., Stewart, R. C., Willisrichards, J., 1994, The Performance and Characteristics of the Experimental Hot Dry Rock Geothermal Reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988), *Geothermics* 23(2): 73-109.
 32. Song, Y., Kim, H.-C. and Lee T.J., 2010, Geothermal Development in Korea: Country Update 2005-2009, Proc World Geothermal Congress, Paper No.121. Bali, Indonesia.
 33. Thomson Reuters, 2013, <http://apps.webofknowledge.com/>, 방문일: 2013년 11월 16일.
 34. Ward, G., 2013, Habanero EGS Project – Successful Demonstration of deep granite hosted EGS, Presentation at Seoul National University.

민 기 복

1994년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 자원공학과 공학석사
 2004년 스웨덴 왕립공과대학(Royal Institute of Technology) 공학박사

Tel: 02-880-9074

E-mail: kbmin@snu.ac.kr

현재 서울대학교 에너지자원공학과
 부교수

송 윤 호

1985년 서울대학교 공과대학 자원공학과
 공학사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학석사

1992년 서울대학교 대학원 자원공학과
 공학박사

Tel: 042-868-3175

E-mail: song@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지열자원연구
 팀 책임연구원

윤 윤 상

1991년 서울대학교 자연과학대학 지질
 과학과 이학사

1994년 서울대학교 대학원 지질과학과
 이학석사

2003년 서울대학교 대학원 지구환경과
 학부 이학박사

Tel: 02-448-6953

E-mail: gaia@nexgeo.com

현재 주식회사 넥스지오 대표이사