

인공저류층 생성을 위한 유도진동에 관한 사전연구

전종욱[†]*, 명우호**, 김영득***

*^(주)이노지오테크놀로지 시스템개발부, **^(주)이노지오테크놀로지 지열개발부
***인덕대학 기계자동차학과

Review on the induced seismic event for artificial reservoir

Jeon Jong-Ug*, Myoung Woo-Ho**, Kim Young-Deug

**Department of system development, INNOGEO Technologies Inc., Seoul, Korea,*

***Department of geothermal development, INNOGEO Technologies Inc., Seoul, Korea*

****Department of Mechanical & Automotive Engineering, INDUK University,139-749, Seoul, Korea*

Abstract

In many cases, geothermal wells will not be opened up a geothermal reservoir under such conditions that an extraction of geothermal energy is economically viable without any further measures. Geothermal wells often have to be stimulated, in order to increase productivity. For the non-volcanic area, such as Korea, the hydraulic stimulation is necessary to complete geothermal power plant. The analysis of induced seismic event showed that the thermal resource might have a much wider extent and a much higher generation potential than previously assumed. In order to record compressional and shear waves emitted during fracture stimulation, three-component geophones are placed in a seismometer. The recorded data from one seismometer is the convolution of the source magnitude, the transmission media, and the sensitivity of the instrument.

Key words: microseismicity(미소진동), hydraulic stimulation(수리자극), monitoring well(모니터링정), geothermal reservoir(지열저류층), seismometer(지진계), transmission media(전달매질), source magnitude(진원규모)

1. 서론

점차적으로 관심이 증가하고 있는 지열발전을 위해서는 3가지 필수요소가 필요하다.

첫째로 우수한 지열자원을 들 수 있는데 이는 지층에서의 온도를 말한다. 지구내부로 깊이 들어 갈수록 지온이 상승하는 것은 누구나 알고 있는

상식이나 고온의 지열을 이용하여 발전을 하는 지열발전소가 상업적으로 건설되기 위해서는 초기에 막대하게 들어가는 시추비용을 줄여야 하는 큰 과제를 넘어야 한다. 시추비용을 줄일 수 있는 가장 현실적인 방법은 상대적으로 낮은 심도의 지표에서 고온의 열원을 발견하는 것이다.

둘째, 고온의 열원이 확인 된다하더라도 이 열원을 지속적으로 사용하기 위해서는 지열저류층의 적절한 열원이동 통로가 확보되어야 한다.

마지막으로 지열저류층의 열원 운송매체로 지열을 이송할 수 있는 열매체가 필요하다. 화산지대의 지열발전 경우에는 자연적으로 생성된 고온

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-70-8277-8754, Fax: +82-2-782-1661

E-mail: jongugjeon@gmail.com

접수일 : 2012년 4월 30일

심사일 : 1차:2012년 5월 1일, 2차:2012년 5월 21일

채택일 : 2012년 5월 25일

고압의 증기를 이용할 수 있으나 비화산지대의 경우 고온의 물을 열운송 매체로 사용하게 된다. 지열자원으로만 고려하면 화산지대뿐 아니라 어느 곳이든 깊은 곳으로 들어가면 지열발전이 가능한 열원을 찾을 수 있다. 그러나 지열 발전을 위한 필수요소 중 두 번째와 세 번째가 부족한 것이 일반적인 상황이다. 열을 이송시킬 열매체와 장심도 고온의 암반으로부터 열을 끌어올 수 있는 통로가 필요하게 된다.

본 논문에서는 인위적으로 지열저류층을 만들어 내거나 지열저류층을 자극하여 지열생산성을 높이는 방법과 비화산지대에서 인공파쇄대를 만드는 과정에서 수반되는 미세진동에 대한 사전연구를 서술한다.

2. 본 론

2.1 지열유량 확장을 위한 저류층 자극

지열 발전을 위해 지열저류층을 개발하는데 경제적인 지열저류층을 한번에 찾는 경우는 드물어 대부분의 경우 자극을 통해 지열유량의 생산성이 확장되는 경우가 많다.

지열저류층을 자극하기 위한 다양한 방법이 있으나 형식적으로 저류층 자극기술은 지열정으로 부터 영향력이 미치는 반경에 따라 나누어 생각할 수 있다.

지열정으로부터 수십미터 반경에 영향을 주어 지열생산성을 높이는 방법으로 화학적처리법(Chemical treatment)과 열적자극법(Thermal stimulation)이 있고 그 이상 수백미터에 달하는 범위에 영향을 미치는 수리자극법(Hydraulic fracturing)으로는 인공적인 파쇄대를 형성시킬 수 있다.

1970년대 초 Los Alamos 국립연구소는 Hot Dry Rock이라는 프로젝트로 지열을 이송할 열매체인 물이 유동할 수 있는 통로를 고온의 결정질 암반에 수평하게 만드는 수리자극연구를 시작하였고 이후 인공파쇄대를 형성시키려는 노력은 지속적으로 시도되어왔다. 열적자극법은 시추 후 분쇄된 암석들이 시추용 니수와 함께 지열정 주

변의 균열을 메워서 낮아진 투수성을 회복시키기 위해 사용되는 방법이나 화산지대의 지열유량을 증가시키는 데에 효과가 크게 나타나기도 했다.

화학적처리법은 유정개발에서 주로 사용되었던 방법으로 약 100년 전 석회암 지대의 유정 생산성을 높이기 위해 처음으로 사용되었다. 이 기술은 부분적으로 지열발전 기술에 적용되었는데 대부분의 경우는 탐사 후 수년이 지난 후 지열정에서 발생하는 스케일을 제거하기 위해 사용된다.

2.2 수리자극으로 인한 미소진동

불투수층인 결정질 암반에 투수성 저장소를 형성시키는 수리자극(Hydraulic stimulation)은 미소진동을 수반한다(Bommer et al^[1]; Charléty et al^[2]; Dorbath et al^[3]; Häring et al^[4]; Majer et al^[5]; Wallroth et al^[6]). 이는 지열자원 개발을 위한 인위적인 행위의 결과에 따른 유도진동(induced seismicity)으로 자연적으로 발생하는 지진과 구분된다. 미소진동은 일반적으로 규모(Magnitude) 3 미만으로 발생하나 스위스 바젤(M<3.4), 호주 쿠파분지(M<3.0)와 엘살바도르 Berlin(M<4.4)의 경우와 같이 종종 그 이상의 진동을 기록한 바가 있다(Huenges^[7]).

Table 1 Classification of seismic event by frequency

Phenomenon	Frequency (Hz)
Gravitational tides	~0.07 (periods of 4+ hours)
Earth's eigenvibrations	~0.003-0.1
Surface wave analysis	~ 0.002 - 2
Regional earthquakes	~ 0.01 - 10
Local earthquakes	~0.01-400+
Strong motion (frequency band causing structural damage during strong ground shaking)	~ 0.05 - 10
Micro seismic events	~50- 10,000
Acoustic emissions	>10,000

일반적으로 암반 내의 진동(seismic event)은 암반의 변형(deformation)에 의해 발생되기 때문에 미소진동 발생에 대한 메커니즘을 이해하는데 있어 암반의 변형은 매우 중요하다.

Majer et al^[5]은 EGS (Enhanced Geothermal System)에서 발생하는 미소진동의 발생 메커니즘에 대해 다음과 같이 설명하였다.

- 유효 응력(effective stress)의 감소: 수리자극을 위해 주입한 유체의 압력에 의해 기존의 단열(pre-existing fracture) 내에 작용하는 공극 압(pore pressure)이 증가하고 이로 인해 전단면에 작용하는 유효응력은 감소한다. 비대칭 응력장이 존재하는 곳에서 유효응력의 감소는 진동슬립(Seismic slip)을 만들어 낼 수 있다.
- 지열저장소 주변 응력장의 교란(Disturbance of stress field near geothermal reservoir): 지열수의 생산이나 재주입은 지열저류층 내의 체적변화를 야기할 수 있다. 이러한 체적변화는 지열저장소 주변의 응력장 교란을 일으킬 수 있고 지열저장소 주변 응력장이 교란을 일으킬 때 주변 단열들이 임계상태에 있다면, 이 단열들에 변형이 발생할 수 있다. 이와 유사한 예로는 광산지대에서 개발 행위로 인한 암반의 제거에 따른 국지적 응력장 교란으로 발생하는 지하공동의 붕괴를 들 수 있다.
- 지열수 순환로에서의 열응력변화: 고온암체(hot rock)로부터 열에너지를 추출하기 위해 유체를 순환시킬 때, 주입유체는 고온암체보다 온도가 낮아 단열면의 수축을 야기하고 이를 열탄성적 변형(Thermoelastic strain)이라고 한다. 이러한 단열면의 열적 수축에 의해 단열면의 마찰력이 감소하여 미끄러짐 변형(slip deformation)이 발생한다. 이러한 열적 수축 효과에 의해 일부 암반의 인장파괴(tensile failure)와 같은 비전단 변형(non-shear deformation)이 발생하기도 한다.
- 단열면의 화학적 변질(Chemical alteration of fracture surface): 지열 저장소 내에 침투한 주입수(injection water)는 단열면의 마찰계수(coefficient of friction)에 변화를 야기할 수 있는 지화학적 변화를 일으킬 수 있다.

전술한 바와 같이 EGS 개발에 따른 미소진동의 발생과 수리자극 및 지열에너지 생산 활동과의 관계는 정성적으로 설명할 수 있다. 그러나 미소진동의 발생과 EGS 개발 행위와의 관계를 정량화하는 방안은 아직 많은 연구자들을 통해 여러 방면에서 연구 중에 있다.

미소진동은 자연에서 발생하는 지진과 구별될 수 있는데 보통의 경우 50Hz이상의 진동주파수를 가지고 지진보다 작은 크기로 발생한다(Table 1). 지진이 아닌 지각의 미약한 진동으로 맥동이라 불리기도 하는 미소진동은 깨지기 쉬운 지층균열에서 응력변화 등으로 변형이 올 때 발생한다. 미소진동은 지진계를 적절히 설치하여 발생하는 파형의 크기와 움직임을 측정하여 발생한 균열의 형태와 응력에 관한 정보를 알아낼 수 있고, 파형이 도달하는 시간차를 이용하여 발생위치까지의 거리를 알아낼 수 있다.

인공적으로 혹은 자연적으로 응력의 변화가 지층의 균열을 야기시킬 수 있을 정도로 커지면 미소진동은 발생된다. 지중의 암석에 균열이 발생하면 발생지점으로부터 탄성파가 발생하여 반경방향으로 퍼지는데 이때 탄성파는 주변의 구성암석 종류 및 물성치에 영향을 받아 파형이 변화된다.

2.3 인공 지열저류층 확장을 위한 미소진동 모니터링 시스템

미소진동을 기록하기 위한 모니터링 시스템은 대상 시추 부지를 중심으로 방위, 거리 및 심도가 다른 여러 개의 모니터링정으로 구성된다. 호주 쿠퍼 분지(Cooper basin)에서 진행되고 있는 HDR (Hot Dry Rock) 프로젝트의 경우, Fig. 1에 제시된 바와 같이 8개의 모니터링정이 Habanero1 시추공을 중심으로 방사상으로 설치가 되었다. 8개의 모니터링 정은 각각 1개의 심부 모니터링정(심도 1,793m), 3개의 중심도 모니터링정과 4개의 천부 모니터링정으로 구성되어 있다. Habanero1 시추공에서 확인한 지열원의 온도는 심도 4,421m에서 약 250℃이다. 이들 모니터링정 중 심부 모니터링정에는 일본 Hijiori HDR 프로젝트에서도 사용된 150℃가량의 온도 환경에 적용할 수 있는 모니터링 장비가 사용되었다.

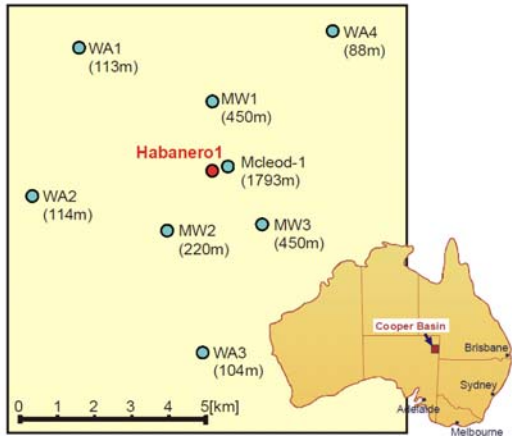


Fig. 1 Distribution of monitoring wells for HDR project in Cooper basin, Australia(Asanuma et al^[7])

모니터링 시스템은 일반적으로 전원, 지진계, 기록시스템, GPS 등으로 구성된다(Fig. 2). 지진계는 보통 3성분계로서 2개의 수평성분 지진계와 1개의 수직성분 지진계로 구성된다. 지진계를 통해 발생한 아날로그 신호는 증폭기를 통해 강화된 상태로 컨버터를 통해 디지털화되어 연구자에게 전달된다.

Fig. 2는 비화산지대인 국내에서 인공저류층을 생성하여 지열발전을 하기위해 처음으로 설치된 미소진동 모니터링 시스템의 개략도이다.

국내에서 진행 중인 ‘MW급 지열발전 상용화 프로젝트’를 위해 미소진동 모니터링 시스템을 지중과 지표에 설치하여 인공저류층을 생성하는 과정 전에 필요한 사전데이터를 수집하고 있는 중이다.

미소진동이 모니터링 시스템에 감지되었을 때 진동의 정도는 발생원의 세기, 중간매질의 종류, 지진계의 민감도에 따라 달라진다. EGS 개발에 있어서 모니터링 시스템을 설치하는 주된 목적은 수리 자극을 통해 발생하는 미소진동의 진원을 추적하여 지열 저장소의 규모를 추정하기 위함이다.

모니터링 시스템은 주입정 및 생산정을 시추하기 수개월 전에 설치되어야 한다. 그 이유는 개발 행위 전에 대상 지역에서 발생하는 자연 지진과 교통 소통 및 건설 등 인위적인 행위로 인한 진동을 모니터링하여 수리자극 및 생산 행위 도중 발

생하는 진동 중 자연 지진 및 지열 개발 행위와 관계없는 진동을 필터링하기 위함이다.

필터링은 숙련된 경험자가 대상 지역에서 기록된 기존의 지진과 자료를 참고하여 실시한다. 따라서 수리자극을 통한 지열 저장소 규모 추정 신뢰도를 높이기 위해서는 개발 행위를 실시하기 이전에 대상 지역의 지진과 자료를 최대한 많이 확보하는 것이 유리하다.

Fig. 3은 호주 쿠퍼 분지 HDR 프로젝트에서 미소진동을 모니터링한 결과이다. 좌표 내의 한 점은 미소진동의 진원을 나타내며, 이 점들의 집단인 클러스터는 수리 자극을 통해 형성된 저장소의 규모와 형태를 추정하는 근거가 된다.

2.4 미소진동파의 해석

인공 파쇄대를 형성하기 위해 수리자극이 시행될 경우 유도진동이 지속적으로 발생할 수 있다. 진동이 발생하면 파동이 진원으로부터 퍼져나가게 되는데 이때 파동의 속도는 진동 발생원인에 의해 결정되기도 하지만 전파매질의 밀도, 균열정도 등 물성치에 크게 영향을 받게 된다.

압축파인 P파는 전단파인 S파보다 빠르게 진행한다. 만일 미소진동 측정자가 전파매질의 물성치에 대해 알고 있다면 측정자는 P파와 S파가 진행되어 오면서 만들어 낸 속도차를 가지고 진원까지의 거리를 계산할 수 있게 된다.

이론적으로 2개의 수평성분과 1개의 수직성분을 측정할 수 있는 지진계를 3개 사용하면 진원의 정확한 위치까지 확인할 수 있어야 하나 진원의 진동 발생형태가 폭발이 아닌 슬립(slip)으로 나타나므로 파쇄되는 방향의 파장성분은 정확한 측정이 어려우므로 최소 4개의 지진계를 설치하여 측정을 실시한다. 일반적으로 정확한 측정을 위해서는 예상되는 미소진동 위치에서 1000 m 이내에 지진계를 설치하여야 한다.

파쇄 방향에 있지 않은 지진 측정계에서는 변형파가 측정되는데 균열이 벌어져 인장파괴가 일어나면 P파가 크게 나타날 것이고 밀리면서 전단 파괴가 일어나면 S파가 상대적으로 더 크게 나타날 것이다. 두 파간의 비를 이용하여 파쇄대의 균열양상을 예측할 수 있다.

과쇄대를 대상으로 많은 지진센서가 심어진다 면 측정된 과장의 세기와 힘의 방향을 이용하여 모멘트 텐서를 분석할 수 있게 된다. 균열의 양상을 예측하면 균열방향의 약 30~45도 정도 틀어져서 응력이 발생했다고 볼 수 있으므로 주응력 방향 또한 예측이 가능해 진다.

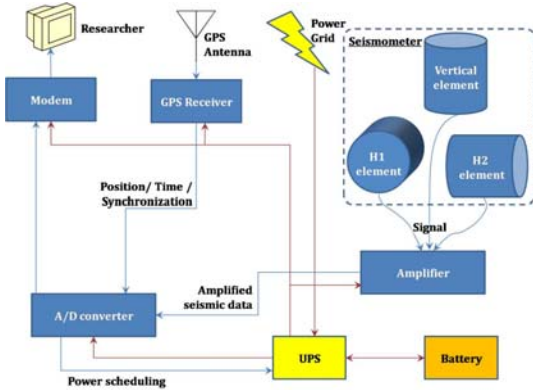


Fig. 2 Concept of monitoring system

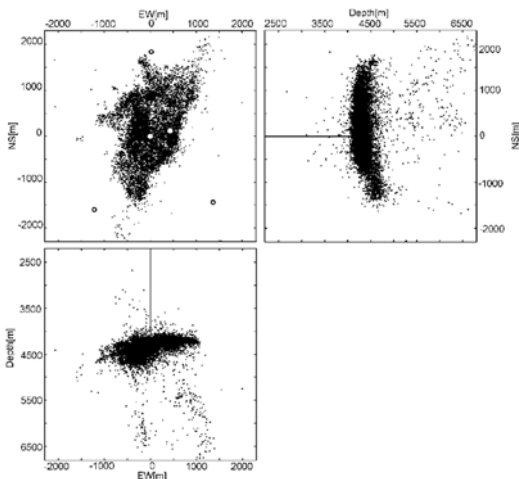


Fig. 3 The cluster of microseismic event in Cooper Basin determined by monitoring system (Asanuma et al^[7])

3. 결론

우리나라와 같은 비화산지대에서 지열에너지를 개발하여 전력을 생산하기 위한 과정으로 수리자극과 이를 모니터링하고 데이터를 분석할 수 있

는 방법에 대한 사전연구가 진행되었다.

지열유량 생산성을 높이기 위한 지열저류층 자극법이 지열정으로부터의 영향을 미치는 거리에 따라 분류될 수 있고, 크게 열적 자극법, 화학적 처리법, 수리자극법으로 나눌 수 있다. 지열정으로부터 수백미터까지 영향을 미치는 수리자극법은 비화산지대에서 지열발전을 위해 필수요소기술이다.

수리자극이 미소유도진동을 일으키는 메카니즘으로서 유효응력의 감소, 지열저장소 주변응력의 교란, 지열수 순환패스에서 열응력변화를 고려할 수 있다.

발생한 미소진동은 모니터링 후 분석되어 지열저류층이 얼마나 확장되었는지 확인할 수 있는 중요한 자료가 되며 이를 측정 분석하는 기술은 비화산지대의 지열발전기술 중 중요한 요소기술이라 할 수 있다.

후 기

“본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생에너지기술개발사업(No. 2010T100200494)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.”

참고문헌

1. Bommer, J., Oates, S., Cepeda, J., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquin, G., Rivas, J., 2006, Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology*, No. 83, pp. 287-306.
2. Charléty, J., Cuenot, N., Dorbath, L., Dorbath, C., Haessler, H., Frogneux, M., 2007, Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, No. 44, pp.1091-1105.
3. Dorbath, L., Cuenot, N., Genter, A., Frogneux, M., 2009, Seismic response of the fractured and faulted granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5km deep massive water injections. *Geophysical Journal International*, Vol. 177, pp. 653-675.

4. Häring, M., Schanz, U., Ladner, F., Dyer, B., 2008, Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, No. 37, pp. 469-495.
5. Majer, E., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., Asanuma, H., 2007, Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, Vol. 36, pp. 185-222.
6. Wallroth, T., Jupe, A., Jones, R., 1996, Characterisation of a fractured reservoir using microearthquakes induced by hydraulic injections. *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 13, No. 4, pp. 447-155.
7. Huenges, E., 2011, *Geothermal Energy Systems*. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 463p.
8. Asanuma, H., Soma, N., Kaieda, H., Kumano, Y., Izumi, T., Tezuka, K., Niitsuma, H., Wyborn, D., 2005, *Microseismic Monitoring of Hydraulic Stimulation at the Australian HDR Project in Cooper Basin*. Proceedings World Geothermal Congress 2005, 5p.