인공저류층 지열시스템(EGS) 연구사례: 미국 Fenton Hill과 일본 Hijiori 사례 연구 박의섭*

Case Studies of Enhanced Geothermal System: Fenton Hill in USA and Hijiori in Japan

Eui-Seob Park*

Abstract The importance of renewable energy has increased continuously due to the energy insecurity and the necessity of reducing carbon dioxide which is causing global climate change. In such a situation, the Pohang Enhanced Geothermal System (EGS) power plant project which is launched in December 2010 shall be a new opportunity for the development of EGS related technologies in Korea. In this paper, the case studies of Fenton Hill project in the USA and Hijiori project in Japan are introduced in order to help a part of the domestic EGS demonstration project. As a result, it could be helpful to minimize the trial and error of the domestic EGS project by acquiring the achievements and limitations of existing EGS projects.

Key words EGS (Enhanced Geothermal System), Fenton Hill, Hijiori, hydraulic stimulation, Microseismic cloud

초 록 최근 전 세계적으로 에너지 수급의 불안정 및 기후변화에 의한 이산화탄소 저감의 필요성으로 인하여 신재생에너지에 대한 중요성은 점차 증가하고 있다. 이러한 상황에서 지난 2010년 12월에 시작되어 진행 중인 한국 최초의 포항 인공지열 저류층 생성 기술 (Enhanced Geothermal System; EGS) 지열발전소 프로젝트는 국내 EGS 관련기술 발전에 새로운 계기가 될 것이다. 본 논문은 국내 EGS 실증사업에 일부분이라도 도움이 되고자 미국 Fenton Hill 및 일본 Hijiori 프로젝트 연구사례를 살펴보고, 이를 통해 기존 EGS 프로젝트의 성과와 한계를 습득함으로써 국내 EGS 프로젝트의 시행착오를 최소화하는데 도움이 되고자 한다.

핵심어 인공저류층 지열시스템, 펜톤 힐, 히지오리, 수리자극, 미소지진음 클라우드

1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 수급의 불안정 및 기후변화에 의한 이산화탄소 저감의 필요성으로 인하여 신재생에너지에 대한 중요성은 점차 증가하고 있다. 특히 지열에너지는 2020년 우리나라 국가온실가스 감축목표

량(BAU 대비 30%)의 50%를 담당할 것으로 기대하는 30개 중점추진기술 중 하나로 선정되었으며(에너지기술평가원, 2011), 국제에너지기구(IEA)는 2050년까지 지열발전량의 50%가 비화산지대에서 담당할 것으로 제시하였다. 이러한 비화산지대 지열발전은 심부 5 km 내외에서 인공지열 저류층 생성 기술(Enhanced Geothermal System; EGS)의 활용에 의해 가능하다.

EGS 관련 기술은 1972년 최초로 시작된 미국 Fenton Hill 프로젝트 이후 일본, 영국, 프랑스, 독일, 스위스 등 세계 여러 나라에서 비화산지대에서도 지열발전이 가능하도록 노력하는 와중에 많은 기술 및 경험이 축적되어 왔다. 특히 프랑스 Soultz EGS 프로젝트는 약 30년에 달하는 장기간의 개발을 통하여 수많은 연구 성과들이 도출되었고, 지열관련 기술개발의 산실이 되기도 하

Received: Nov. 6, 2013

Revised: Nov. 21, 2013

Accepted: Dec. 16, 2013

*Corresponding Author: Eui-Seob Park

Tel) +82428683098, Fax) +82428683416

E-Mail) espark@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

였다. 이에 반하여 국내에선 아직까지 EGS 지열발전에 관한 핵심기술 및 경험이 미약한 실정이다.

이러한 상황에서 지난 2010년 12월에 시작되어 진행 중인 한국 최초의 포항 EGS 지열발전소 프로젝트는 국내 EGS 관련기술 발전에 새로운 계기가 될 것으로 생각된다. 본 논문은 국내 EGS 실증사업에 일부분이라도 도움이 되고자 미국 Fenton Hill 및 일본 Hijiori 프로젝트 연구사례를 살펴보고, 이를 통해 기존 EGS 프로젝트의 성과와 한계를 습득함으로써 국내 EGS 프로젝트의 시행착오를 최소화하는데 도움이 되고자 하였다.

2. 미국 Fenton Hill 프로젝트

2.1 프로젝트 개요

최초의 Los Alamos HDR(Hot Dry Rock) 개발 개념

Fig. 1. (a) Location of Fenton Hill Hot Dry Rock site in the Jemez Mountains of northern New Mexico, (b) Variation of temperature and lithology with depth (Dash et al., 1981)

은 고온의 결정질 암석까지 공을 뚫은 후에 고온의 암석 내에 대규모 수직균열을 생성하기 위해 수압파쇄를 활용하고, 그 이후에 초기 공 상부로부터 일정한 거리에 있는 균열에 접근하는 두 번째 공을 뚫는 것을 의미하는데, 이는 Potter 외(1974)에 의하여 제안된 특허인 “Method of Extracting Heat from Dry Geothermal Reservoirs(U.S. Patent #3,786,858)”에서 기술된 것과 동일하다.

1970년대 초반에 U.S. Atomic Energy Commission의 지원 하에 Los Alamos는 HDR 개념의 타당성을 검증하는 현장작업을 시작하였고, 여러 번의 사전시추 및 균열시험(fracturing test)을 거친 후에 Fenton Hill 부지에 세계 최초로 HDR 순환(circulation) 시스템을 건설하기로 결정하였다. 1973년까지 약 110명의 전문가가 고용되었고, 1990년까지 소요된 전체 비용은 US\$ 1.5억 달러에 달하였다.

Fenton Hill 부지는 뉴멕시코 Rio Grande Graben 서쪽 Valles 칼데라 지역의 동쪽으로 선정되었는데, 그 이유는 강력한 화산활동으로 지열류량(heat flow)이 약 250 mW/m^2 으로 전 세계 평균값보다 약 3배 높고 지온경사가 약 65°C/km ($3.6^\circ\text{F}/100\text{ft}$)이며 결정질 기반암(화강섬록암, Granodiorite)의 상부가 심도 730 m에 위치하기 때문이다(Fig. 1).

Fenton Hill HDR 프로젝트는 크게 다음 2단계로 나뉘어졌다(Fig. 2).

(1) Phase I (1974-1979): 심도 3,000 m, 온도 약 200°C 지역에서 균열망 형성: GT-2 시추 (2,042 m, 1974. 2~9월), 공 완성(well completion)과 수압파쇄시험(1974년

Fig. 2. Schematic comparison of the Fenton Hill Phase I and Phase II systems (Pettitt, 1981)

10월초) 완료, 2,932 m 심도까지 추가 시추 (공저온도 (BHT) 180°C)

(2) Phase II (1980-1993): 심도 4,500 m 이상, 온도 270-300°C 지역에서 더 깊고 더 큰 균열망 형성: EE-I 시추 (3,064 m, 1975년 5~10월)

미국 DOE는 2001년에 Fenton Hill HDR 프로젝트를 종료하고, 축적된 경험과 지식은 북부 캘리포니아 Geysers 현장으로 이전하였다. 프로젝트가 종료된 것은 균열지역의 제한된 체적에 따른 유체생산온도의 심각한 감소, 균열을 열린 상태로 유지하는데 필요한 높은 주입압력(약 27 MPa)과 이에 상응하는 운영 문제, 높은 주입수의 손실 등으로, 상업적인 이해와 거리가 먼 것으로 간주되었기 때문이다.

2.2 초기응력

Fenton Hill 지역의 초기응력은 응력측정기술의 한계로 인하여 제대로 알려진 것이 없어, 다양한 간접적인 방법을 통하여 응력을 평가할 필요가 있었다(Burns, 1991). Felher(1989)는 Fenton Hill 지역의 응력상태를 추정하기 위하여 시도된 다양한 사례를 다음과 같이 정리하였다. Kelkar 외(1986)는 최소압축응력의 크기를

추정하고자 수압주입에 따른 압력기록을 분석하였으나, 사용된 가정의 오류로 인하여 부정확한 결과를 도출하였다. Dey(1986)는 주응력의 방향을 결정하기 위하여 EE-3a 시추코어 내의 미소균열의 방향을 분석하였으나, 코어방향 결정의 어려움과 코어내의 균열이 현지응력장의 직접적인 함수라는 가정으로 인하여 이 결과는 받아들이기에 다소 문제가 있었다. Barton 외(1988)는 EE-3a 공의 3350~3550 m에서 측정된 시추공 파괴(wellbore breakouts)의 방향을 결정하고자 시추공 텔레뷰어 자료를 분석하였고, Zoback 외(1985)의 모델을 이용하여 최소압축응력은 수평이고, N104°E 방향임을 밝혔다. 이 결과는 Burns에 의한 미소지진음의 단층면 해(fault plane solutions) 기법으로 구한 것과 일치한다. 또한 Burns는 수직응력이 최대주응력임을 밝혔다.

또한 Ito와 Hayashi(2003)는 초기응력의 직접적인 측정 자료가 없어, 균열압반의 유동경로 형성에 관한 초기응력의 영향을 검토하고, 이로부터 현지주응력의 방향 및 크기를 추정하는 방법을 제안하였다. 이에 의하면 현지 응력과 공극압은 심도에 비례하고 심도에 따른 수직응력 S_v 의 증가율은 26 MPa/km 이고, 공극압(P_p)은 정수압으로 가정한 상태에서 Fehler(1989)가 언급한

Table 1. Estimation of Stress state in Fenton Hill site (Ito and Hayashi, 2003)

Stress Regime		Normal Fault
Magnitude of Stresses at the Mean Depth of Microseismic Cloud, MPa	Maximum	94 (SV)
	Intermediate	65 (SH)
	Minimum	55 (Sh)
Azimuth of Maximum Horizontal Stress		N14°E

Fig. 3. (a) Mohr diagram showing the state of in situ stress at Fenton Hill, where the circles drawn by solid and dashed lines correspond to different pore pressures. (b) Great circles showing representative orientations of the critically-stressed fractures estimated from the in situ stress state. (Ito and Hayashi, 2003)

심도 3,000 m의 응력상태로부터 평가된 값은 다음 Table 1과 Fig. 3과 같다.

2.3 수리자극

(1) Phase I

Fenton Hill 프로젝트의 초기 개념인 GT-2공과 EE-1 공 사이에 수압파쇄로 인한 균열망이 제대로 형성되지 않았다. 1977년에 GT-2A공 2,500 m 지점에서 두 차례의 수압파쇄가 시도되었으나 이 또한 부적합한 것으로 결정되어 1977년 5월에 GT-2A공 하부를 시멘팅하였다. 이후 GT-2A공 2,530 m 지점에서 새롭게 GT-2B공을 시추하였고, 2,673m 지점에서 EE-1공과 연결이 이

루어졌다. 두 공사이의 평균 간격은 대략 100 m 이었다 (Fig. 4).

(2) Phase II

1979년 4월에 EE-2와 EE-3공을 수직면에 35°각도로 방향 시추하였고, 이 둘은 서로 수직으로 380 m 이격되어 있다. 더 깊은 EE-2공은 심도 4,390 m에서 공저온도(BHT)가 327°C에 달하였다. 1982~84년에 다양한 심도에서 수압파쇄를 시도하였고 균열성장 과정을 미소 파괴음 측정을 통하여 관측하였으나, 원하는 방향으로 균열이 성장하지 않아 두 공 사이에 연결성이 부적합하였다. 이러한 결과는 지층의 더 깊은 지점에서 응력장의 예상치 못한 이동으로 야기된 것으로 결론지어졌다. 이에 1985년에 상부 EE-3공의 2,830 m 지점에서 빗나가게 시추하여 심도 4,018 m에서 공저온도가 265°C에 달하였고, EE-3A공으로 재명명하였다. 이 공의 연결성은 대규모 시험에 적합한 것으로 나타났다 (Fig. 5).

Fig. 4. Elevation and conceptual view of wells EE-1, GT-2, GT-2A, and GT-2B at the Fenton Hill site during Phase I testing (MIT, 2006)

Fig. 5. Elevation and fracture view of wells EE-2, EE-3 and EE-3A at the Fenton Hill site (MIT, 2006; Brown, 1995)

(3) 운영자료

Phase I과 II 단계에서 운영된 주요 자료의 값은 다음 Table 2와 같다.

2.4 미소진동

Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, HDR 저류층의 대부분은 1983년 12월에 수행된 massive hydraulic fracturing (MHF) 시험에서 48 MPa의 평균 주입압력에 의하여 초기에 형성되었고, 이후 1986년 중반에 시행된 처음 30일간 유동시험(flow test) 도중 32 MPa까지 올라가

는 주입압력에 의하여 남쪽과 동쪽방향으로 확장되었다(Dash, 1989). 수리 자극된 영역의 체적은 약 130백만 m^3 이고, 미소지진음의 포락선으로부터 결정되었다. 그러나 10~27 MPa의 더 낮은 순환 또는 시험 압력 상태에서 저류층의 유동이 적합하게 연결된 부분은 단지 약 16백만 m^3 로 보인다. 그림에서 보는 바와 같이 저류층은 북-남 방향으로 대략 1,000 m의 길이와 350 m의 폭을 가지고 있고, 두께는 650 m이다.

Fig. 6(b)는 압력 자극의 초기 단계에서 수행된 MHF 시험에서 주입된 유체의 체적과 확장된 저류층의 seismic volume간의 상관관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는

Table 2. Major parameters obtained during the operation of Phase I and II (modified from Brown, 2009)

Parameter	Phase I (1980. 3~1980.12)		Phase I (1986~1995)	
	Value	Comments	Value	Comments
Injection Pressure, MPa (psi)	9.7 (1400)	Declined near end of test	26.9 (3900) 31.5 (4570)	LTFT ¹⁾ ICFT ²⁾
Injection Flow, L/s (gpm)	6.3 (100)	Final	6.3 (100)	LTFT
Production Flow, L/s (gpm)	5.9 (93)	Final	13.5 (214) 5.9 (93)	ICFT LTFT
Thermal Power, MW	3	Average	10 4	ICFT LTFT
Backpressure, MPa (psi)	1.4 (200)	Average	3.3 (1400)	LTFT
Production Temp. °C	158	Average	190	ICFT
Flow Impedance, psi/gpm	13	Average	19	ICFT
Water Loss, L/s (gpm)	0.2 (2)	Final	0.15 (2)	Pre LTFT at 15 MPa

주) ¹⁾Long-Term Flow Test(LTFT)

²⁾Initial Closed-loop Flow Test(ICFT)

(a)

(b)

Fig. 6. (a) Distributions of seismic events during the MHF (Massive Hydraulic Fracturing) test and during the ICFT(Initial Closed-Loop Flow Test), (b) Linear relationship between seismic reservoir volume and volume of injected fluid, as determined from micro seismic event location data during the MHF Test. (Brown, 1995)

바와 같이, 더 큰 HDR 저류층을 생성하기 위해서는 더 긴 기간 동안 높은 압력으로 주입해야만 하는데, 이는 저류층의 체적이 주입된 유량에 직접적으로 비례하기 때문이다.

2.5 시사점

Fenton Hill 프로젝트의 중요한 결론은, 효율적인 HDR 지열 저류층은 첫 번째 시추공으로부터 우선 생성되어야 하고, 그 이후 타원형의 저류층 영역의 장축 경계에 근접하여 두 개의 생산공을 시추하는 방식으로 이루어져야 한다는 것이다. 왜냐하면 처음부터 시추공들을 뚫고, 그 다음에 수리 가압(hydraulic pressurization)으로 공들을 연결하여 효율적인 시스템을 생성하는 것은 거의 불가능하기 때문이다.

저류층 생산성(reservoir productivity)은 HDR 기술 개발에 관련하여 가장 심각한 주제이고, 근접-시추공 배출 임피던스(near-wellbore outlet impedance)와 불가피하게 연결되어 있다. 이 임피던스는 견고하게 닫힌 유동출구를 팽창시키는 높은 압력으로 생산정을 운영함으로써 상당히 감소시킬 수 있다.

Fenton Hill HDR 저류층 시험과 개발에서 얻은 중요한 관찰은, 절리 암반의 특성은 변화하기 쉽고, 예측불가능하다는 것이다. 예를 들어, Phase I 저류층의 절리-확장 압력(joint-extension pressure)은 약 13.8 MPa (2,000 psi)이고, Phase II 저류층의 절리-확장 압력은 37.9 MPa (5,500 psi)로 상당히 차이가 난다. 이런 압력은 시추공 관찰 또는 지표면으로부터 관찰할 수 없는 내부적으로 연결된 절리 구조에 의하여 좌우된다는 것이다. 비록 미소지진을 관찰이 HDR 저류층 개발을 이해하는데 필수적일지라도, 주된 유동 경로를 제공하는 절리의 열림과 실제적으로 관련된 유발지진의 메커니즘을 이해하고 판별하는 분야에서의 연구가 매우 필요하다.

HDR 시스템은 인공 지열시스템이므로, 다음 항목의 조절이 가능하다는 점을 염두에 둘 필요가 있다.

- 1) 시추 심도를 선택하는 생산 온도 (production temperature);
- 2) 주입된 유량에 의한 저류층의 크기(size of the reservoir);
- 3) 절리 저류층 유동 상황과 근접-시추공 배출 임피던스 (jointed reservoir flow situation and nearwellbore outlet impedance)에 의해 주로 기록되는 압력, 유량 등의 주입 조건(injection conditions of pressure and flow rate);
- 4) 저류층 초과압력(reservoir overpressure) (절리-확장

압력(joint-extension pressure) 이상)의 정도를 규정하는, 운영 중에 허용되는 저류층 성장의 크기(amount of reservoir growth allowed during operation);

- 5) 배출 임피던스를 조절하는 생산정 배압 (production well backpressure);
- 6) 최적 생산을 위한 생산정의 개수와 위치 (number and placement of production wells for optimum productivity).

3. 일본 Hijiori 프로젝트

3.1 프로젝트 개요

일본의 신에너지산업기술종합개발기구(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)는 1981~1986년까지 미국 Fenton Hill 프로젝트 개발에 공동연구로 참여하였다. 이러한 연구에 근거하여, NEDO는 Fenton Hill 프로젝트에서 개발된 HDR 기술을 일본의 지질조건에 적용할 수 있는지 결정하기 위하여 Hijiori에서 연구를 수행하였다. 이를 위해 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry; METI)의 Japanese New Sunshine Project 지원 하에, NEDO

Fig. 7. (a) Location of the Hijiori HDR test site, (b) 3-dimensional view of HDR geological condition (Tenma et al., 2008; Tezuka, 2007)

	FY86	FY87	FY88	FY89	FY90	FY91	FY92	FY93	FY94	FY95	FY96
1,800-m-deep reservoir depth : $\pm 1,800$ m temperature $\pm 250^\circ\text{C}$	Hydraulic fracturing created a man-made reservoir	Drilled HDR - 1 to 1,805 m communicated to the SKG - 2	Circulation test for 2 weeks Deepen HDR - 1 to 2,205 m Set PBR	Drilled HDR - 2 to 1,910 m Circulation test for 29 days 40% 4.5 MW thermal	Drilled HDR - 3 to 1,907 m communicated to the SKG - 2	Circulation test for 90 days 7.8% 8.5 MW thermal					
2,200-m-deep reservoir depth : $\pm 2,200$ m temperature $\pm 270^\circ\text{C}$							Hydraulic fracturing created a man-made reservoir	Deepen HDR - 3 to 2,303 m communicated to the HDR - 1	Sidetracked & Deepen HDR - 2 communicated to the HDR - 1	Preliminary circulation test for 25 days 40% 8-9 MW thermal	Circulation for reduce the flow impedance
	SKGQ	SKG-2 HDR-1	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-1	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKGQ HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKGQ HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3	SKG-2 HDR-1 HDR-2 HDR-3

Fig. 8. History of the Hijiori HDR test site (Ikawa et al., 1996)

Fig. 9. Concept and vertical section of the Hijiori HDR System (Tenma et al., 2008; MIT, 2006)

는 1984~2002년까지 Hijiori 지역에서 고온 암체(hot dry rock) 내에 열-회수 시스템(heat-extraction system)을 생성하는 현지 시험을 수행하였다.

Hijiori 연구부지는 대규모 Pleistocene Gassan 화산의 측면에 있는 작은 Hijiori 칼데라의 남측 경계부로 선정되었는데, 그 이유는 최근 화산활동으로 높은 지열구배를 가지고 있고, 광범위하게 조사되었기 때문이다. 대상 저류층의 기반암은 화강섬록암(granodiorite)으로, 심도 1,450 m 하부에 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

Hijiori HDR 프로젝트는 크게 두 단계의 저류층을 형성하는 것으로 진행되었다. 심도 1,800 m, 온도 250°C 의 천부 저류층과 심도 2,200 m, 온도 270°C 의 심부 저류층(Fig. 8~9).

(1) 천부 저류층

1989~1991년에 천부 저류층의 시추작업이 진행되었는데, 하나의 주입공(SKG-2)과 세 개의 생산공(HDR-1, 2 & 3)이다. HDR-1을 제외한 모든 시추공의 심도는 약 1,800 m이고, HDR-1은 심도 2,151 m에서 종료되었다. 심도 1,550~1,800 m에서 기존 균열이 모든 공과 교차하였다(Swenson 외, 1999). 심도 1,500 m에서 온도는 225°C 이상이고, 1,800 m에서 최대 온도는 250°C 에 근접하였다. 심도 1,800 m에서 시추공 간의 거리는 최대한 작게 유지되었는데, SKG-2를 기준으로 HDR-1은 약 40 m, HDR-2는 약 50 m, 그리고 HDR-3는 약 55 m 각각 떨어져 있다(Tenma 외, 2001).

(2) 심부 저류층

심부 저류층은 1991~1995년에 걸쳐 HDR-2(추가 시

추 이후 HDR-2a로 명칭)과 HDR-3를 더 깊게 시추하여 최종 2,200 m에 도달하였고, HDR-1은 심부 저류층의 주입공으로 사용하였다. 심도 약 2,200 m에서 기존 균열들이 모든 공과 교차하였고, HDR-1을 기준으로 HDR-2a는 약 80 m, HDR-3는 약 130 m 각각 이격되어 있다.

3.2 초기응력

Hijiori 부지의 국부적 지각운동은 혼수 섬의 축을 따라 압축으로 작용할지라도, 칼데라 가장자리의 응력 체계는 매우 복잡하다. 이는 칼데라 붕괴(caldera collapse)와 관련 있는 링 균열(ring fractures)과 함께 주요 단층은 짧은 거리를 통해 수직 및 수평적으로 응력 변화를 일으키기 때문이다.

주응력의 방향은 인공 균열의 전파 방향을 조절하는 주된 요소 중의 하나이므로, Hijiori HDR 부지의 초기 응력 상태는 다양한 방법으로 광범위하게 조사되었다: Hijiori 지질조사(NEDO, 1992), HDR-2 & 3의 시추공 영상촬영(BHTV)에 의한 기존 균열 관찰(NEDO, 1992), 코어 시료의 현미경관찰에 의한 전단균열의 맵핑(NEDO, 1992), 코어 시료의 편차 변형률 곡선방법(Differential Strain Curve Analysis, DSCA), BHTV 이미지에서 관찰된 시추유도균열 자료의 역해석(Okabe 외, 1995), 미소지진음 중복 분석(doublet analysis)으로 보완된 진앙 메커니즘(focal mechanism) 분석 (Tezuka와 Niitsuma, 2000)과 Yamaguchi 외(1996)에 의한 상기 결과들의 요약 등이다 (Table 3). Oikawa와 Yamaguchi(2000)에 의해 수행된 DSCA 방법에 의하면, 천부 저류층에서 최

Table 3. Various stress investigation of Hijiori reservoir(Oikawa and Yamaguchi, 2000)

Phenomena/Method	Type	Earth stress direction		
		Max.	Int.	Min.
Movement of earth crust in northern area of Japan	Horizontal plane	E-W	-	N-S
Lineament observation around Hijiori area	Horizontal plane	E-W	-	N-S
State of geological layer	Horizontal plane	E-W	-	N-S
Mapping of AE events occurred around reservoir	3-D	E-W~ENE-WSW	-	N-S~NNW-SSE
Focal mechanism solution of AE events	3-D	N79E	Vertical	N189E
Mapping of injection/production point of wells	3-D	-	-	N166E20S
Fractures observed in wells by BHTV	3-D	-	-	N-S
Mapping of extension fractures observed on cores	3-D	-	-	N-S
Measurement of earth stress using cores by AE method*	Horizontal plane	N68.5W	-	N21.5E
Mapping of shear fractures observed on cores	3-D	Vertical	NW-SE	NE-SW
	3-D	NE-SW	NW-SE	Vertical
	3-D	Vertical	NE-SW	NW-SE

* Cores were oriented by fracture observation

Fig. 10. Stress inversion results obtained from combined use of the 1988, 1989 and 1995 focal mechanism data. (a) Orientations of three principal stresses (b) Stress ratio(Sasaki and Kaieda, 2000)

소 주응력은 NNE-SSW 또는 N-S 방향이고, 최대 주응력은 E-W 또는 ESE-WNW 방향이고 수평면에 약 30° 각도로 경사진 것으로 밝혀졌다.

이상과 같은 다양한 방법으로 구해진 Hijiori HDR 부지의 응력 상태는, 최대 및 최소 주응력이 각각 E-W와 N-S 방향으로 나타났다. 또한 Sasaki와 Kaieda(2000)는 Hijiori HDR 부지에서 수행된 여러 차례의 수압파쇄 및 순환시험 도중에 관측된 미소지진음의 진앙 메커니즘 해를 역해석하여 다른 연구와 거의 동일한 현저응력 결과를 도출하였다고 언급하였다(Fig. 10).

3.3 수리지각

Table 4에 언급된 수압파쇄 시험은 1988년에 2,000 m³의 물을 SKG-2 공에 주입하는 것으로 시작되었고, 수리지각은 1, 2, 4와 6 m³/min의 비율로 4 단계로 진행되었다. 이후 1989년에 30일간의 순환시험(circulation test)이 수행되었다. 회수된 물과 지표수를 혼합하여 SKG-2공으로 1-2 m³/min (17-34 kg/s)로 주입하였고, 증기(steam)와 고온수는 HDR-2과 HDR-3 공에서 생산되었다. 시험 도중, 총 44,500 m³의 물이 주입된 반면,

13,000 m³의 물이 생산되었다. 시험 결과, 주입공과 두 개의 생산공 간의 수리 연결성은 양호하나, 주입수의 70% 이상이 저류층 내로 손실되었다. 그러나 시험기간은 짧았고, 저류층은 전체 순환 기간 동안 계속 성장하였다.

부지내 주된 균열 방향은 동-서(east-west)이고, 북쪽 에 높은 경사각을 가진다 (Tenma 외, 2008). 주된 수리 자극은 HDR-1 공에서 총 2,115톤의 물을 12 시간 동안 세 단계의 유량(1, 2, 4 tons/min)으로 주입하면서 수행되었다(Sasaki and Kaieda, 2002). 주입유량과 well-head pressure의 시간이력은 Fig. 11에 나타나 있다. 저류층 암반엔 이미 자연적으로 열린 절리들이 많이 존재하기 때문에, 수리지각을 통해 큰 균열을 만들지 않는 것이 주된 의도였다. 만약 더 큰 균열이 생성된다면, 연속적인 순환시험 도중에 물 회수율은 낮아질 것이다. 따라서 HDR-1공 주변 지역만 자극하기 위하여 짧은 기간에 큰 유량이 적용되었다.

1996년에 장기간 시험을 위하여 추가 자극과 단기간 시험을 수행하였다. HDR-3과 심부 저류층의 주입공 HDR-1의 연결성을 키우고 유체 손실량을 줄이기 위하

Table 4. Outline of experiments at the Hijiori HDR site (Sasaki and Kaieda, 2002)

Year	Type of experiment	Injection well	Injection interval (m)	Maximum of flow rate (m ³ /min)	Total injection volume (m ³)	Production well
1988	hydraulic fracturing	SKG-2	1,788-1,802	6	1,961	
1989	circulation	SKG-2	1,788-1,802	2	45,921	HDR-1,-2
1992	hydraulic fracturing	HDR-1	2,151-2,205	4	2,115	
1995	circulation	HDR-1	2,151-2,205	2	51,500	HDR-2,-3

Fig. 11. Water injection flow rate, well-head pressure and observed microseismic events rate during the 1992 hydraulic stimulation at Hijiori (Kaieda et al., 2010)

Shallow Reservoir Creation	
Injection Well:	SKG-1
Injection Depth:	1790-1800m
Max. Inj. Rate:	6.0m ³ /min
Max.W.H.P:	16MPa
Total Inj. Vol.:	1080m ³
*using 7" casing	
*calibration shooting at 1800m	

Deep Reservoir Creation	
Injection Well:	HDR-1
Injection Depth:	2151-2205m
Max. Inj. Rate:	4.3m ³ /min
Max.W.H.P:	22MPa
Total Inj. Vol.:	2115m ³
*using PBR	
*calibration shooting at 2200m

Fig. 12. Reservoir creation and fracture characterization(Tezuka, 2007)

여, HDR-3에서 생산하고 HDR-2a에서 배압(back pressure)을 유지하는 한편, HDR-1은 주입공으로 사용하였다. 연결성(connectivity)에 뚜렷한 개선이 없는 반면, 저류층 내의 압력을 변경하면 수리자극의 결과에 영향을 미칠 수 있다는 것을 시험을 통하여 확인하였고, 이 분야는 추가 연구가 필요한 것으로 언급되었다.

Fig. 12는 수리자극에 의하여 생성된 천부와 심부 저류층의 미소 지진음을 각각 보여주는데, 그림에서 노란색은 천부 저류층 단계에서 생성된 균열을 의미하고, 빨간색은 심부 저류층 단계에서 생성된 것을 말한다. 그림을 통해 저류층에 형성된 균열이 동-서 방향으로 고각도로 기울어진 구조임을 알 수 있다.

2000~2002년에는 심부 및 천부 저류층의 장기간 시험이 진행되었다(Schroeder 외, 1998; Tenma 외, 2000; 2001). 심부 저류층의 1년짜리 순환시험은 36℃의 물을 HDR-1공으로 15-20 kg/s로 주입하였다. 시험의 2 단계에서는 SKG-2공으로의 주입을 통하여 천부 및 심부 저류층의 시험을 수행하였다. 이로 인하여 증기와 고온수가 HDR-2a공에선 약 163 ℃, 5 kg/s로, HDR-3공에선 172℃, 4 kg/sec으로 생산되었다.

전체 열에너지 생산은 약 8 MW에 달하였고, 시험 말기에는 130 kWe 바이너리 발전전소(binary power plant)를 운영하는데 사용되었다. 시험 분석에 의하면, 열에너지 생산은 심부 및 천부 저류층 모두에서 나왔다(Kuriyagawa와 Tenma, 1999). 시험 도중, 시추공 내의 스케일(scale) 문제는 생산정의 청소(clean-out)를 필요로 하였다. 주입 유량이 약 16 kg/s로 일정하게 유지되면서, 유동을 유지하는데 필요한 압력은 8.4 MPa에서

7.0 MPa로 시험 과정에서 감소하였다. HDR-2a와 HDR-3의 전체 생산 유량은 8.7 kg/s로 45%의 손실률을 보였다(Okabe 외, 2000).

HDR-2a 공은 장기간 유동 시험도중에 초기 온도인 163℃에서 100℃로 급격하게 냉각되었고, 이러한 급격한 온도 하락으로 인하여 시험은 중단되었다. 온도 변화는 측정값이 수치모델링의 예측값보다 크게 나타났다(Yamaguchi 외, 2000).

3.4 미소진동

미소지진 활동은 수리자극 개시 이후 4시간 동안 매우 낮게 나타나, 이 기간 동안 어떠한 미소 지진사례도 관찰되지 않았다. 관찰된 미소지진의 최대 규모(Magnitude)는 0.3으로 결정되었고, 다른 지진들의 규모도 -1.0보다 작았다. 총 107개의 미소 지진사례가 기록되었고, 진앙은 HDR-1 공으로부터 100 m 이내의 남쪽 영역에 분포하였으며, 이후 진앙 분포는 동쪽으로 연장되었다. 최종적으로 진앙 분포는 HDR-1 공으로부터 남쪽 150 m, 동쪽 500 m 가량 이동하였다. 이러한 진앙 연장 방향은 자연 절리의 주향 우세 방향과 거의 일치한다. 또한 진앙 분포 심도는 약 400 m까지 확장되었고, 진앙 분포 지역 범위는 700 m × 150 m (horizontal) × 400 m(depth)인 것으로 판단되었다(Sasaki 외, 2000). 심부 저류층은 1992년에 HDR-1공의 심도 2,200 m 지점에서 길이 50 m의 열린 시추공으로 총 2,115 m³의 물을 약 2 MPa의 압력으로 주입하여 생성하였다(NEDO, 1993). 이를 통하여 약 45,000,000 m³의 체적에 달하는 타원형의 미소지진음 클라운드를 형성하였다(Tezuka,

Fig. 13. (a) Locations of SKG-2, HDR-1, HDR-2, and HDR-3 wells at the Hijiori HDR site. (b) Epicentral distributions of microseismic events associated with (1) the 1988 hydraulic fracturing experiment, (2) the 1989 circulation test, (3) the 1992 hydraulic fracturing experiment, and (4) the 1995 circulation test, respectively. Symbols are proportional to size of microseismic events. (Sasaki and Kaieda, 2002)

1997).

Fig. 13은 Hijiori 부지내의 시추공 위치와 수압파쇄 및 순환시험을 통해 얻어진 미소지진을 이벤트의 분포를 보여주고 있다. Fig. 13(b)에서 원의 크기는 미소지진 이벤트의 크기에 비례한다.

1988~1992년에 걸친 수압파쇄시험과 관련된 미소지진음의 주향은 최대 수평주응력 방향과 거의 평행하게 나타났는데, 이는 신선암의 인장 균열은 수압파쇄에 의하여 새롭게 생성되었다는 것을 의미한다. 그러나 지진 이벤트의 수직 방향과 동-서 주향은 근본적으로 Hijiori 칼데라의 남쪽 칼데라 링-단층과 같은 면(coplanar)에 놓여 있는데, 이는 미소지진음 이벤트가 전단파괴에 의하여 유발되었다 할지라도 기존 균열이 다시 열리고 최대수평주응력 방향으로 발전하였다는 것을 알려준다.

Hijiori HDR 부지의 수압 유도 균열(hydraulically induced fracture)에 가장 적합한 메커니즘은 화산 지진 더미(volcanic earthquake swarms)를 위한 Hill의 모델(Hill, 1977)을 사용하여 설명할 수 있다. Hill의 모델에 의하면, 수압파쇄 자체는 관측 가능한 미소지진음 이벤트와 직접 관련이 없을지라도 주된 수압파쇄 주변의 암반에서 발생하는 기존 균열의 전단파괴를 유발할 수 있다는 것이다. 전단 파괴에 의한 미소지진음 이벤트는 대체로 높은 공극유체압력(pore fluid pressure)에 의한 것이다.

3.5 시사점

Hijiori HDR 프로젝트를 통하여 얻은 중요한 결론으로는, 하나의 공을 시추하고, 수리 자극하면서 얻은 미소지진음을 맵핑한 이후에 미소지진음 클라우드(Microseismic Clouds)까지 시추하는 방법이 두 개 또는 그 이상의 공을 시추하고 수리자극된 균열과 연결하는 방법보다 낫다는 점이다(Okabe 외, 2000).

Fig. 14는 미소지진음 클라우드가 항상 일정한 형태

Fig. 14. Seismic clouds due to different geological structure of three sites (Abdalla, 2008)

로 나타나는 것이 아니라 해당 부지의 균열특성과 현지 응력에 따라 달리 형성될 수 있음을 보여준다. 따라서 수리 자극이후에 시추되는 공의 위치 및 방향은 발생된 미소지진을 클라우드의 형태에 맞게 조정되어야 함을 알 수 있다.

다음은 Hijiori 프로젝트에서 얻은 주요 결과들이다.

- 저류층은 순환 시험동안 성장을 계속했다.
- 기존 균열로 이미 공들이 연결되었고 특히 공간 이격 거리가 작을 경우, 수리 자극을 수행하면 짧은 순환(short circuit)을 야기하는 연결로 나타날 수 있다.
- 심부 순환시험에서 음향 방출(AE) 위치는 자극된 균열 또는 응력장이 시추공으로부터 멀리 떨어져 방향이 변화된다는 것을 의미한다.
- 천부 저류층의 AE 위치로부터 구한 선 구조는 자극 중에 발견한 선 구조의 방향과 평행하나, 순환시험 중에 공에서 멀리 떨어진 음향 방출은 새로운 방향을 보였다.
- 만약 응력 방향이 저류층의 한 부분에서 다른 부분으로 변경되면, 자극된 균열이 어떤 방향으로, 어디로 성장할지 그리고 어디가 가장 투수성이 좋은지 예측하는 것은 거의 불가능하다.
- 현재의 기술로는, 시추 전에 응력장을 예측하고, 시추 공에선 멀리 떨어진 응력장을 이해하는 것은 매우 어렵다.

Hijiori 프로젝트는 또한 응력장 뿐만 아니라 자연 균열 시스템을 이해하는 것이 얼마나 중요한지 보여주었다. Fenton Hill과 Hijiori 프로젝트 모두 화산 칼데라(volcanic caldera)의 가장자리에 있었는데, 이러한 지역의 지질, 응력 조건 및 암석의 균열 이력은 매우 복잡하다. 따라서 온도 구배가 매우 높은 경우엔 원하는 온도에 도달하기 위해서 공을 비교적 얕은 심도까지 시추하여도 되기 때문에, 대규모 열에너지 저류층에 대한 접근 및 EGS 프로젝트의 경제성을 매우 양호하게 만든다.

4. 결 론

지난 2010년 12월부터 국내에서 최초로 수행되는 포항 EGS 지열발전소 프로젝트는 한국의 지열에너지 활용 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 하지만 아직까지 인공저류층 지열발전에 관한 국내 핵심기술 및 경험이 미약하여 대부분 외국에 의존하고 있는 실정이다. 이에 미국 Fenton Hill 및 일본 Hijiori 프로젝트 연구사례를 살펴보고, 이를 통해 기존 EGS 프로젝트의 성과와 한계를 습득함으로써 국내 EGS 프로젝트의 시행차

이를 최소화하는데 도움이 되고자 하였다.

미국 Fenton Hill 프로젝트의 주요 결론은, 효율적인 지열 인공 저류층은 초기 시추공을 활용하여 먼저 생성하고, 그 이후 타원형의 저류층 영역의 장축 경계에 근접하여 시추한 두 개의 생산공에 의하여 연결되어야 한다는 것이다. 왜냐하면 처음부터 모든 주입 및 생산공들을 뚫고, 그 다음에 수리 가압(hydraulic pressurization)을 통해 공들을 연결하는 방식은 효율적인 시스템을 생성하는 것이 거의 불가능하기 때문이다. 또한 저류층 시험과 개발에서 얻은 중요한 결론은 절리 암반의 특성은 변화하기 쉽고, 예측불가능하다는 것이다. 따라서 시추공 또는 지표면에서 관찰할 수 없는 내부적으로 연결된 절리 구조를 정확히 파악하고, 이로부터 주된 유동 경로를 제공하는 절리의 열림과 실제적으로 관련된 유도 지진의 메커니즘을 이해하고 판별하는 분야의 연구가 매우 필요하다.

일본 Hijiori 프로젝트의 주요 결론도 Fenton Hill과 동일하게, 하나의 공을 시추하고 이를 수리 자극하여 얻은 미소지진을 맵핑한 이후에 미소지진을 클라우드로까지 시추하는 방법이 두 개 또는 그 이상의 공을 시추하고 수리 자극된 균열과 연결하는 방법보다 낫다는 점을 말하고 있다. 또한 현지 응력뿐만 아니라 자연 균열 시스템을 이해하는 것이 얼마나 중요한지 보여주었다.

Fenton Hill과 Hijiori 프로젝트 모두 화산 칼데라의 가장자리에 위치하는 이유는, 매우 높은 온도 구배를 갖고 있어 목표 온도에 도달하는데 비교적 천부의 공을 뚫어도 되고, 이로 인해 열에너지의 대규모 저류층에 대한 접근 및 프로젝트의 경제성을 더 좋게 만들기 때문이다.

결론적으로 성공적인 EGS 프로젝트를 위해서는 단일 시추공을 이용하여 수리자극을 실시하고, 형성된 균열망을 연결하는 생산공을 시추하는 방법이 합리적이라고 판단된다. 또한 균열망 생성과 관련된 심부 암반의 열-수리-역학적 물성과 현지응력 상태뿐만 아니라 기존 균열을 정확히 파악하는 것이 중요하다고 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 ‘지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP2012-001)’의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Korea Institute of Energy Technology Evaluation and

- Planning, 2011, Strategic Roadmap of Greenhouse gas reduction technology.
2. Abedalla, H., 2008, Hot Dry Rock, Bakkalaurea Thesis. p. 29.
 3. Barton, C.A., Zoback, M.D. and Burns, K.L., 1988, "In-situ stress orientation and magnitude at the FENTON geothermal site, New Mexico, Determined from wellbore breakouts", US Department of Energy Publications. Paper 87.
 4. Brown, D., 1995, "The US Hot Dry Rock Program-20 Years of Experience in Reservoir Testing," Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, vol. 4, pp.2607-2611.
 5. Brown, D., 2009, "Hot dry rock geothermal energy: Important lessons from Fenton Hill", Proceedings of 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Feb 9-11, 2009. SGP-TR-187.
 6. Burns, K.L., 1991, "Orientation of minimum principal stress in the hot dry rock geothermal reservoir at FENTON HILL", NEW MEXICO, Geothermal Resources Council 1991 Annual Meeting, Oct. 6-9, Reno, Nevada
 7. Dash, Z.V., Murphy, H.D. and Cremer, G.M., 1981, Hot Dry Rock Geothermal Reservoir Testing: 1978 to 1980, Los Alamos National Laboratory Status Report LA-9080-SR.
 8. Dash, Z.V. Ed., 1989, An Initial Closed-Loop Flow Test of the Fenton Hill Phase HDR Reservoir, Los Alamos National Laboratory report LA-11498-HDR.
 9. Dey, T.N., 1986, "State of stress in a hot dry rock reservoir at Fenton Hill, NM", EOS, 67. pp.1206.
 10. Fehler, M.C., 1989, "Stress Control of Seismicity Patterns Observed during Hydraulic Fracturing Experiments at the Fenton Hill Hot Dry Rock Geothermal Energy Site, New Mexico", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 26(3/4), pp.211-219.
 11. Hill, D.P., 1977, "A model for earthquake swarm", J. Geophysics. Res. Vo. 82, pp.1437-1352.
 12. Ikawa, T., Tenma, N., Nagat, M. and Sato, Y., 1996, The creation of the 2,200-m-deep reservoir at HIJIORI HDR test site, Proceedings 18th NZ Geothermal Workshop 1996, pp.103-108.
 13. Ito, T. and Hayashi, K., 2003, "Role of Stress-controlled Flow Pathways in HDR Geothermal Reservoirs", Pure and applied geophysics, vol.160, pp.1103-1124.
 14. kaieda, H., Sasaki, S. and Wyborn D., 2010, "Comparison of characteristics of micro-earthquakes observed during hydraulic stimulation operations in Ogachi, Hijiori and Cooper basin HDR projects, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
 15. Kelkar, S., Murphy H. and Dash Z., 1986, "Earth stress measurements in deep granitic rock". Rock mech. key to energy production. Proc. 27 U.S. Symp. Rock Mech., Society of Mining Engrs. pp.259-266.
 16. Kuriyagawa, M. and Tenma, N., 1999, "Development of hot dry rock technology at the Hijiori test site", Geothermics Vol. 28, pp.627-636.
 17. MIT, 2006, The future of Geothermal Energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. An assessment by an MIT-led interdisciplinary panel. Massachusetts Institute of Technology, 2006.
 18. NEDO : "Summary of Hot Dry Rock Geothermal Power Project", FY1991, FY1994 and FY1996.
 19. Oikawa, Y. and Yamaguchi, T., 2000, "Experimental study on stress measurement using rock core in HDR fields", Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 24, pp.149-154.
 20. Okabe, T., Shinohara, N., Takasugi, S. and Hayashi, K., 1995, "stress analysis of induced fractures by inversion method (part 2)-Application of field data", proc. 92nd SEGJ Conference, pp.11-15.
 21. Okabe, T., Kiriara, K., Hayashi, K., Karasawa, K. Swenson, D. and Schroeder, R., 2000, "Analysis in Preparation for Hijiori Long Term Circulation Test." Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan.
 22. Pettitt, R., 1981, "Development on man-made geothermal reservoirs", speciality conference on energy in the man-built environment: The next decade, August 3-5, 1981, Vail, CO. Conf-810808-4, pp. 9.
 23. Potter, R.M., Robinson, E.S. and M.C. Smith, 1974, "Method of Extracting Heat from Dry Geothermal Reservoirs," U.S. Patent #3,786,858.
 24. Schroeder, R., Swenson, D., Shinohara, N., Okabe, T., Takasugi, S. and Hayashi, K., 1998, "Strategies for the Hijiori Long Term Flow Test." Proc. 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Calif.
 25. Sasaki S. and Kaieda, H., 2000, "Determination of stress state at the Hijiori HDR site from focal mechanism", Proceedings Wrold Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan.
 26. Sasaki S. and Kaieda, H., 2002, "Determination of stress state from focal mechanism of microseismic events induced during hydraulic injection at the Hijiori Hot Dry Rock site", Pure and Applied Geophysics, Vol. 159, pp. 489-516.
 27. Swenson, D., Schroeder, R., Shinohara, N., and Okabe, T., 1999, "Analyses of the Hijiori Long Term Circulation Test," Proc. 24th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, Jan. 25-27, Paper No. SGP-TR-162.
 28. Tenma, N., Yamaguchi, T., Tezuka, K. and Karasawa, H., 2000, "A Study of the Pressure-Flow Response of the Hijiori Reservoir at the Hijiori HDR Test Site." Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan.
 29. Tenma, N., Yamaguchi, T., Oikawa, Y. and Zyvoloski, G., 2001, "Comparison of the Deep and the Shallow Reservoirs at the Hijiori HDR Test Site using FEHM Code." Proc. 26th Stanford Geothermal Workshop, CA.
 30. Tenma, N., Yamaguchi, T. and Zyvoloski, G., 2008, "

- The Hijiori Hot Dry Rock test site, Japan Evaluation and optimization of heat extraction from at two-layered reservoir" Geothermics, Vol. 37 pp. 19-52
31. Tezuka, K., 2007, "Japanese EGS experience and modeling efforts - a review of Hijiori HDR project", ENGINE Workshop 2, Exploring high temperature reservoirs: new challenges for geothermal energy, Volterra, Italy, April 1-4, 2007.
 32. Tezuka, K. and Niitsuma, H., 2000, "Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot Dry Rock Reservoir, Engineering Geology, Vol. 56, pp. 47-62.
 33. Yamaguchi, S., Akibayashi, S., Rokugawa, S., Fujinaga, Y., Tenma, N. and Sato, Y., 2000, "The numerical modeling study of the Hijiori HDR test site." Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 3975-3980.
 34. Yamaguchi, T., Oikawa, Y., Matsunaga, I. and Sato, Y., 1996, "Estimation of in situ stress state at Hijiori test site", Proc. 3rd international HDR Forum, pp.13-14.
 35. Zoback, M.D., Moos, D. and Mastin, L., 1985, "Well bore breakouts and in situ stress", Journal of geophysical research, Vol. 90, pp. 5523-5530.

박 의 섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3098

E-mail: espark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 심지총활용연구센터 지하공간연구팀 책임연구원