

EGS 실증연구사례 - 영국 Rosemanowes 프로젝트와 호주 Cooper Basin 프로젝트

민기복, 린마오 시, 김한나, 이재원*

EGS field case studies – UK Rosemanowes and Australian Cooper Basin projects

Ki-Bok Min, Linmao Xie, Hanna Kim, Jaewon Lee*

Abstract In order to generate electricity from geothermal energy for non-volcanic region, the concept of enhanced geothermal system (EGS) is introduced which forms an artificial reservoir by injecting high pressure fluid to 5 km deep and circulating geothermal fluid through the reservoir. Demonstration studies have been conducted in various countries and regions for determining the feasibility of EGS. In this technical note, experiences, errors, and implications of EGS demonstration projects in UK Rosemanowes and Australia Cooper Basin which have been carried out since 2002 are introduced to be used for the EGS demonstration project in Korea.

Key words Geothermal energy, EGS (Enhanced Geothermal System), Rosemanowes, Cooper basin

초 록 심부 5 km 내외에 고압의 유체 주입에 의하여 인공저류층을 형성한 후 지열유체를 순환 생산하여 지열발전을 하는 인공저류층 지열시스템의 실현 가능성을 판단하기 위해 다양한 지역에서 인공저류층 지열시스템 실증연구가 진행되고 있다. 본 기술보고는 영국 Rosemanowes 에서 진행된 EGS 실증연구와 호주 Cooper Basin에서 2002년 이래 진행되고 있는 EGS 적용 사례를 소개하여 해당 지역에서 진행된 연구의 경험, 오류, 시사점 등을 정리하고, 향후 한국에서의 실증연구에 활용하고자 작성되었다.

핵심어 지열에너지, 인공저류층 지열시스템, Rosemanowes, Cooper basin

1. 서 론

지열발전은 기후의 영향을 받지 않고 24시간 가동이 가능하여 기저부하를 제공할 수 있는 유일한 신재생에너지이다. 하지만 약 10 GW에 이르는 지열발전 설치용량은 화산지대에 집중되어 있어 비화산지대에서도 활용이 가능하도록 만드는 것이 전 지구적인 주요 과제라 할 수 있다. 이에 따라 심부 5 km 내외에 고압의 유체 주입에 의하여 인공저류층을 형성하고 지열유체를 생

산하여 지열발전을 하는 인공저류층 지열시스템(혹은 인공저류층 생성기술, Enhanced Geothermal System, EGS) 기술이 1970년대부터 고온건조암체(Hot Dry Rock) 개념으로 도입되었다. EGS의 실현 가능성에 대해 많은 실증연구가 진행되어 왔으며, 특히 저류층 암반의 불확실성, 불균질성, 이방성, 균열 특성화의 어려움 등을 극복하기 위한 심부에서 진행되는 실증연구가 EGS개념 검증의 핵심임은 두말할 나위가 없으며 이에 따라 미국, 일본, 영국, 프랑스, 호주 등 여러 나라에서는 EGS실증연구를 실시하였다. 현재 한국에서는 포항에서 국내 최초로 EGS실증연구가 진행되고 있으며(윤운상 외, 2011) 최소한의 시행오차로 연구 개발을 진행하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 특히 암반을 대상으로 하는 공학은 기계, 전자, 화학공업 산업과 달리 단일 제품으로 기술이 구현되는 것이 아니라 매우 다양한 특성을 띠는 현지 암반을 대상으로 기술을 적용함에 따라 특정 지역에서 적용된 기술을 외부로 전파하는 데에 큰 어려

Received: Feb. 11, 2014

Revised: Feb. 21, 2014

Accepted: Feb. 21, 2014

***Corresponding Author:** Jaewon Lee

Tel) +8228807234, Fax) +8228770925

E-Mail) sodg3135@snu.ac.kr

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

움이 있다. 즉, 특정 지질조건에서 성공적으로 적용된 기술이 다른 지역에서 같은 결과를 얻는다는 보장이 없고, 여러 지질조건에서의 적용사례를 바탕으로 보편적인 이론을 도출하는 것은 많은 사람들의 노력이 요구되는 어려운 작업이다. 본 기술보고는 영국 Rosemanowes에서 진행된 EGS 실증연구와 호주 Cooper Basin에서 2002년 이래 진행되고 있는 EGS 적용 사례를 소개하여 해당 지역에서 진행된 연구의 경험, 오류, 시사점 등을 정리하고, 향후 국내에서 진행될 EGS 연구에 도움이 될 목적으로 작성되었다.

2. 영국 Rosemanowes 프로젝트

2.1 프로젝트 개괄

Rosemanowes 프로젝트는 1977년에 시작되어 1991

년까지 영국의 서남부 끝단의 Rosemanowes 지역에서 진행된 EGS 실증연구이다(Fig. 1). 실증현장은 9 km 심도에 이르는 화강암 저반(granite batholith)의 형태로 존재하는 Carnmenellis 화강암에 위치하고 있다. 지표부근에는 반상이나 약 2 km 부근부터 등립질(equigranular)의 특징을 띤다. 현장부근의 지온경사는 35°C/km 정도이며, 열류량은 120 mW/m²였다. 인근에 대규모 단층대는 없으며 퇴적층이 없어 미소진동 등의 계측에 유리한 것으로 생각되었다. Table 1에 나타난 바와 같이 Rosemanowes 프로젝트는 캄본 광산대학(Camborne School of Mine, CSM)에서 주관하여 진행되었으며 주요 지원기관은 영국 정부(1980년-1991년)이며, CEC(commission of European activities)에서도 지원을 하였다(1980년-1986년). 본 프로젝트는 지열발전의 전 단계로 최대 2.6 km의 시추공을 세 개 시추하여 수리자극을 실시하였으며, 지온은 2.6 km에서 100°C로 측정되었다.

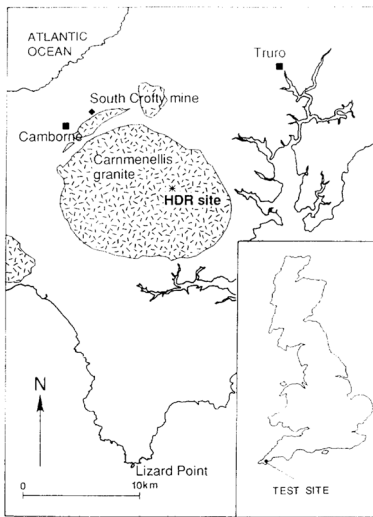


Fig. 1. Location and Geology of Rosemanowes project (Richards et al., 1994)

Table 1. Overview of UK Rosemanowes Project

Duration	1977 - 1991
Boreholes	RH11 (2.0 km) RH12 (2.0 km) RH15 (2.6 km)
Reservoir Temperature	100 °C (2.6 km)
Managing /Funding organization	Camborne School of Mines (CSM)/UK Department of Energy
Rock type	Granite
Current Status	Discussion going on to re-start the project

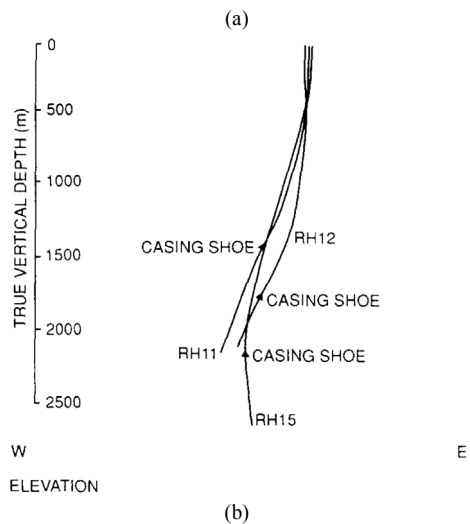
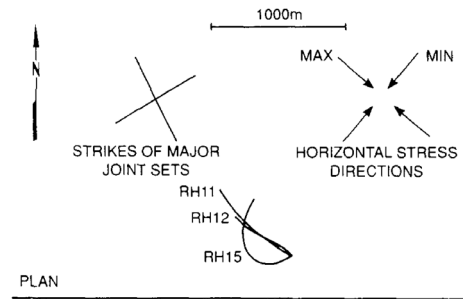


Fig. 2. Strikes of major joint sets, in-situ stress direction (a) Plan view, (b) Section view (Richards et al., 1994)

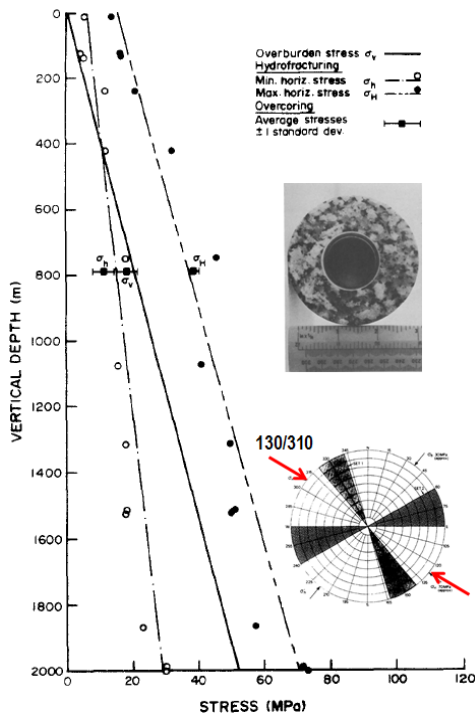


Fig. 3. In-situ stress at Rosemanowes site (Pine et al., 1983a, b). Arrow means in-situ stress direction.

2.2 저류층 특성화 및 초기응력

초기응력은 RH12 시추공 2 km 심도에서 실시한 수압파쇄시험, 약 10 km 떨어진 South Crofty 광산 790 m 심도에서의 CSIRO cell과 USBM cell을 이용한 오버코어링 응력측정을 바탕으로 산정되었다(Fig. 2 & Fig. 3). 측정결과 최대 수평응력과 최소수평응력의 비가 2.4로 응력의 이방성이 크고, 주향이동 단층 응력장에 속하는 것으로 나타났다.

절리의 특성화는 시추공에서의 시추공 텔레뷰어를 이

용하여 실시되었으며 두 개의 수직 절리군과 한 개의 수평 절리군이 있는 것으로 파악되었다. 평균 절리간격은 1.5-6.0 m 정도이며 최대 절리간격은 12 m에서 36 m에 이르는 것으로 나타났다(Richards et al., 1994). 수평절리군은 지표부근에서는 밀도가 높으나 심도가 깊어지면서 감소한다. 전체 저류층 면적 혹은 체적 중 유동 및 열전달에 기여하는 비율을 나타내는 스위프 효율 (sweep efficiency)은 약 50% 정도로 추정되었다.

2.3 수리지극 실시 현황

수리지극의 실시현황을 단계별로 나누어 설명하면 아래와 같다.

Phase 2A 시험(1980-1983)에서는 임피던스 1.5 MPa/(kg/s), 용수손실을 70-75%를 나타내었다. 본 시험에서의 특기할 만한 중요한 사실은 RH12 시추공에서의 주입결과 당초의 예상과는 달리 RH11 시추공으로의 연결이 되지 않고, 아래방향으로 인공저류층이 형성되었다는 점이며 이를 관통하기 위한 추가 시추가 계획되었다(Pine and Batchelor, 1984). 아래방향으로의 인공저류층 형성에 관한 자세한 논의는 앞서 인용한 Pine과 Batchelor(1984)에 소개되어 있다(Fig. 4).

Phase 2B 시험(1983-1986)에서는 추가적으로 나선형으로 2.6 km 심도의 세 번째 시추공을 시추하였다. 나선형으로 시추한 이유는 전 단계에서 생성된 인공저류층을 관통하여 시추공 간 연결도를 높이기 위함이었다. 하지만 수리지극 결과 여전히 높은 손실율을 보였으며 이를 고려하여 점성도가 높은 점성유체를 주입하였다. 점성유체를 사용한 결과 RH12와 RH15 시추공 사이 저류층의 임피던스는 1.0 MPa/(kg/s)이며, 손실율은 약 20%였다. 이때 두 시추공 사이의 최소 간격은 133 m였다.

Phase 2C 시험(1986-1988)에서는 처음으로 다운홀 펌프를 설치하여 지열수를 생산하여 회수율이 약 80-

Table 2. Hydraulic stimulation at different stages in Rosemanowes project (Parker, 1999)

Stage	Duration	Main research
Phase 1	1977 - 1980	4 boreholes (depth 300 m) hydraulic and blasting stimulations
Phase 2A	1980 - 1983	two 2 km deep boreholes (production hole: RH11, injection hole: RH12) Impedance: 1.5 MPa/(kg/s), water loss: 75%
Phase 2B	1983 - 1986	RH15 (production hole, 2.6 km depth), injection of viscous fluid, Impedance:1.0 MPa/(kg/s),water loss: 20%
Phase 2C	1986 - 1988	Flowpath Characterisation Experiment (FCE) Downhole pump
Phase 3	1988 - 1991	reservoir manipulation to improve thermal performance

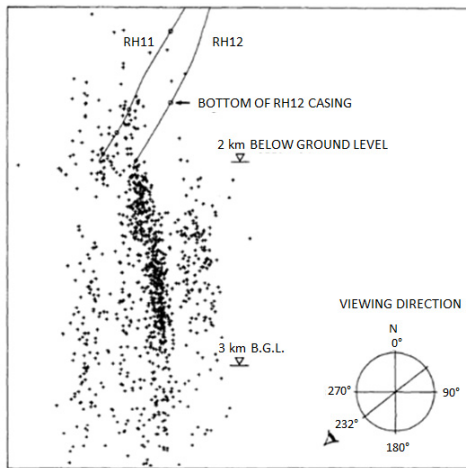


Fig. 4. Downward migration of shearing in fractured reservoir (Pine and Batchelor, 1984)

85% 정도 향상되었으나 순환시험 중 회수율은 다시 원래대로 복귀하였다(Fig. 5). 하지만 공벽주변의 절리가 달히는 현상이 발생하여 임피던스는 오히려 0.61에서 0.82 MPa/(kg/s)로 증가하였다. 추적자시험은 플루오레세인 나트륨(Na-fluorescein)과 브롬(Bromine)을 이용하여 총 29회 실시되었고, 주기 1시간의 반복주입시험이 총 100시간 실시되었다. 특기할 점은 이 단계에서는 유량을 21.5 kg/s로 고정하여 저류층의 거동을 장기간 관찰하여 한달에 약 1°C 정도의 온도 하강이 관찰되었다는 점이다.

Phase 3 시험(1988-1991)에서는 상업 발전을 위한 Prototype을 확립하는 것을 목표로 진행되었다. 처음으로 프로판트(proppant) 주입시험이 실시되어 모래 55 톤

을 주입하였으며 이 결과 임피던스는 약 0.5 MPa/(kg/s) 정도로 줄고, 회수율 또한 증가하였으나 열적 성능은 오히려 감소한 것으로 알려진다. 또한 온도 강하의 원인인 숏서킷(short circuit)현상을 막기 위하여 저류량 구간 생산시험(Low Flow Zone Production Test, LFZPT)를 실시하였으나 주목할 만한 결과는 없었다. 상업적 발전을 위하여 6 km 심도의 지열저류층 개발계획을 제시하였으나 영국정부에서는 ‘해당지역의 지온경사가 높지 않고, 인공저류층 생성기술은 미성숙되었고, 경제성이 낮으며, 현단계에서는 유럽에서 진행되는 솔츠지역에 집중하는 것이 낫다’는 이유로 지원중단을 결정하였다(Harrisson 과 Symons, 1991).

2.4 시사점

Rosemanowes 프로젝트는 비록 2.6 km 미만의 낮은 심도에서 적용이 되었으나 EGS 연구성과 측면에서 중요한 몇 가지 시사점을 남겼다.

먼저 생산공과 주입공의 위치선정 측면에서 인공저류층의 형성 방향은 초기응력 및 절리 분포와 밀접히 연관되어 있으나 이를 생산공 시추전에 이론적으로 예측하는 것은 위험하며 주입공에서의 주입시험 후 인공저류층의 형성 방향을 기준으로 생산공의 궤적을 결정해야 한다는 점이다. 또한 주입수로써의 점성유체의 활용 가능성을 시험하여 손실율을 줄일 수 있는 방법으로 점성유체가 활용되었으며 인공저류층 성능변수, 기본변수, 운영변수 등의 개념이 확립되었다. 한편 실증연구 참여진에 의해 Altcom Ltd, Calidus Engineering Ltd, Geoscience Ltd, Neopartners Ltd, Semore Seismics, EGS Energy, Leob Aron & Co, MIL-TECH UK Ltd 등의 많은 기업들이 설립되어 석유개발, 광산개발, 지질

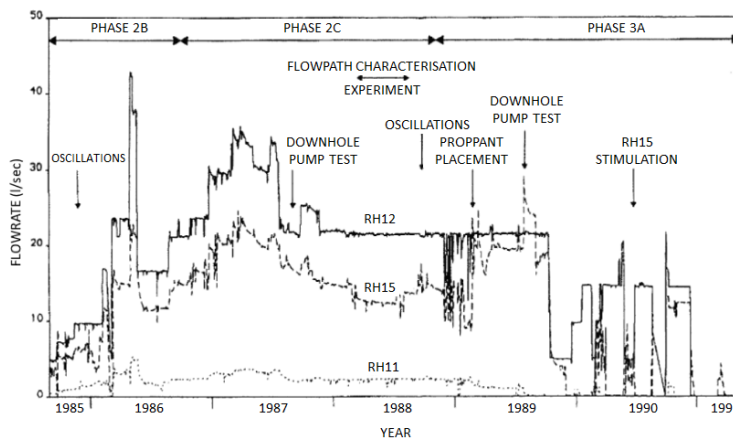


Fig. 5. Long term flowrate changes due to hydraulic stimulation (Parker, 1999)

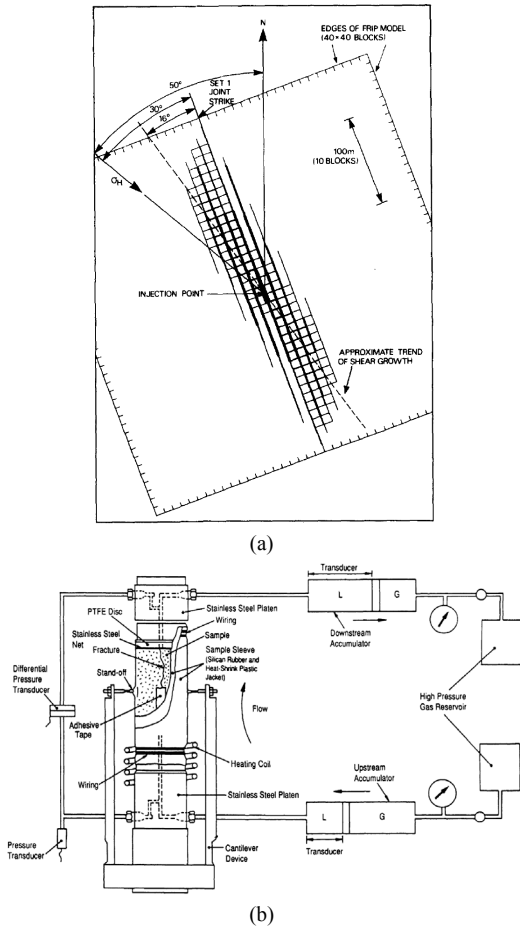


Fig. 6. Geomechanics research from Rosemanowes project. (a) DEM modeling of shearing of joints at Rosemanowes (Pine and Bachelor, 1984), (b) Schematics of coupled thermal-hydro-mechanical test on Carmmenellis granite at Rosemanowes (Zhao and Brown, 1992)

공학, 환경공학 분야의 기술개발에 기여하였다(Baria, 2012). 또한 암반공학분야에서는 균열압반의 수리역학적 거동을 모사하는 수치해석 모델이 개발되어 현재 널리 활용되고 있는 Itasca Consulting Group의 UDEC 프로그램 개발에 큰 기여를 하였다(Pine and Cundall, 1985). 특히, 이 프로젝트에서 실행된 기초연구는 단일 절리에서의 열-수리-역학적 거동에 대한 이해에 큰 기여를 한 것으로 평가되고 있다(Fig. 6).

3. Cooper Basin 프로젝트

3.1 프로젝트 개요

Cooper basin은 심도 3.5-4.5 km에 위치한 화강암 위에 대부분 세일과 석탄층으로 이루어진 퇴적암으로 이루어져있다. 화강암에는 상대적으로 다량의 방사성 원소(포타슘, 토륨, 우라늄)가 포함되어 있으며, 이로 인해 열생산율(heat productivity)이 7-10 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 으로 높다. 약 9천만년동안 쌓인 화강암 기반암의 온도는 최소 220°C에 이른다(Wyborn, 2010).

2002년 프로젝트가 시작된 이래 지난 십여 년 동안, Geodynamics사는 총 6개의 공을 시추하였다(Fig. 7, Table 3). 2008년까지 3개 공(Habanero 1, 2, 3공)이 고온의 화강암 기반암에 도달하도록 굴착하는데 성공하였으며, 수리자극을 통하여 폭 약 1.5 km, 깊이 약 3 km의 인공 저류층이 생성되었다(Chen, 2010). 2009년 3월부터 계획을 착수하여, Habanero 1공을 주입공으로 하고 Habanero 3공을 생산공으로 하는 유체 순환을 수행하였다(Geodynamics, 2009). 이후 1 MW 발전소가 설립되었고, 발전소와 Innamincka 지역 사이에 송전선이 설치되었으나, Habanero 3공에 예기치 못한 시추공 붕괴 사고가 발생함에 따라 전력을 생산할 수 없게 되

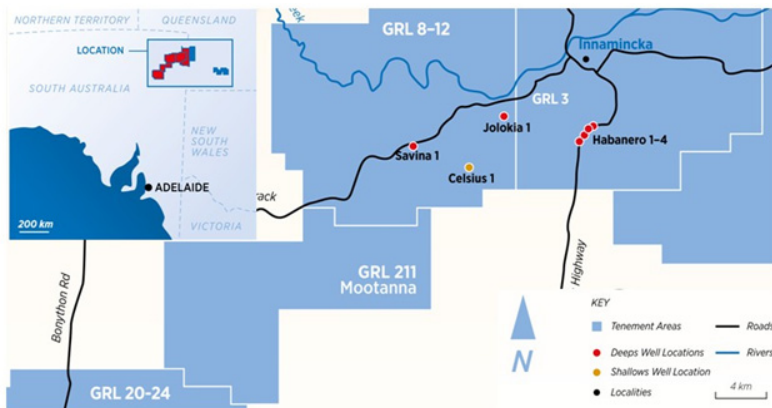


Fig. 7. Location of boreholes in Cooper Basin project (Geodynamics, 2012a)

Table 3. Overview of boreholes at Cooper Basin (Geodynamics, 2012a)

	Habanero 1	Habanero 2	Habanero 3	Jolikia 1	Savina 1	Habanero 4
Start of drilling	2003	2004	2008	2008	2009	2012
depth (m)	4421*	4459*	4200*	4911*	3700*	4204*
size of open hole (")	6	6	8.5	8.5	8.5	8.5
Temperature (°C)	243*	244*	242*	278*	NA	241*
Hydraulic stimulation	executed	executed	executed	executed	hold	executed
current status	ready for use	closed	casing failure	further treatment needed	well suspended	completed

*: Geodynamic (2012a) and Geoffrey Ward (2013)

었다(Geodynamics, 2009). 그 후, Habanero 3공을 대체하기 위해 Habanero 4공을 2012년에 완공하게 되었으며, 2주간의 수리자극이 시행되었다(Geodynamics, 2012b). Habanero 1공과 Habanero 4공 사이에 doublet closed loop 시스템을 구축하여 기존의 1 MW 발전소를 사용하는 것을 목표로 하고 있으며 2013년 4월16일 전력생산에 성공하여 시험운전을 실시하였다. 이 밖에도 Geodynamic사는 Jolokia와 Savina 공을 시추하였으나, 2010년에 실시한 수리자극 결과, 기대에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.2 초기응력

Innmincka 지역의 화강암 암반의 응력장은 호주 대륙의 응력장과 같은 오버트러스트(overthrust) 초기응력 상태이며, 최대수평응력의 방향은 대략 E-W 방향인 것으로 추정된다(Wyborn, 2010). Cooper basin은 호주 육상 최대의 유,가스전으로 알려져 있을 뿐만 아니라 지열자원도 매우 풍부하다. 석유와 가스개발을 위해 시추한 역사가 긴 만큼 상당한 양의 현장자료가 존재하며, 이를 바탕으로 Reynold et al. (2004)는 화강암반 상부인 심도 약 3.5 km 까지의 초기응력을 추정하였다. 심도 3.7-5.0 km 화강암반에서의 초기응력 및 공극압력은 공벽 파괴, 수리 해석, 압력직접측정 등을 통해 다음과 같이 추정하였다(Chen, 2010).

$$\sigma_{Hmax}/\sigma_{Hmin}/\sigma_V \cong 1.6/1.1/1.0 \quad (1)$$

$$\sigma_V \cong 0.0257z - 10.0 \quad (2)$$

$$P \cong 0.017z + 3.0 \quad (3)$$

여기서 P는 공극압(pore fluid pressure)을 의미한다. 심부 화강암반에서는 약 34.4 MPa의 과압(overpressure)

상태가 관측되었으므로, Cooper Basin은 고온건조암체(hot dry rock)가 아닌 고온균열암체(hot fractured rock) 범주에 포함된다(Wyborn, 2010).

3.3 수리자극

시추와 물리검층을 통한 조사 결과 Cooper Basin 내에 존재하는 절리들은 수평하게 동서방향으로 발달해 있으며, 오버트러스트(overthrust) 초기응력 상태를 고려할 경우 암반이 미끄러지기 용이할 것으로 예측되었다.

Cooper Basin의 시추공의 수리자극에 관한 내용은 Table 4와 같이 정리할 수 있다.

Habanero 1공의 경우 2003년과 2005년에 각각 한 번씩 총 2회의 수리자극을 실시하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 2003년과 2005년에 수행된 수리 자극에서의 주입량(injection rate)과 정두 압력(wellhead pressure), 미소진동 횟수(event rate)를 보여주고 있다.

2003년과 2005년의 Habanero 1공 수리자극, 2008년의 Habanero 3공 수리자극을 통해 주 절리(main fracture)를 자극하였고, 2005년에는 Habanero 2공의 수리자극을 통하여 상부 절리를 자극하였다. 수리자극으로 인해 약

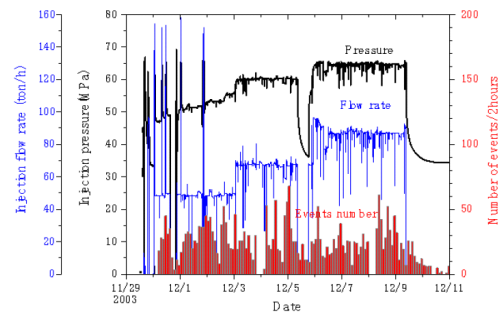


Fig. 8. Injection rate, wellhead pressure and event rates at Habanero 1 hydraulic stimulation in 2003 (Kaieda et al., 2010)

Table 4. Hydraulic Stimulation at Cooper Basin project

borehole	Time (year)	injected volume (m ³)	area of artificial reservoir (km ²)	number of microseismic events	referenece
Habanero 1	2003	20000*	2.5*	28011*	Fig.8
Habanero 2	2005	7000*	0.4*	1283*	upper fracture stimulated
Habanero 1	2005	20000*	4.0*	16454*	Fig.9
Habanero 3	2008	2200*	0.2*	452*	local stimulation
Jolokia 1	2010	not available	not available	not available	not successful
Habanero 4	2012	34000#	not available	24000#	results being assessed

*: Chen & Wyborn (2009), #: Bendall et al. (2003)

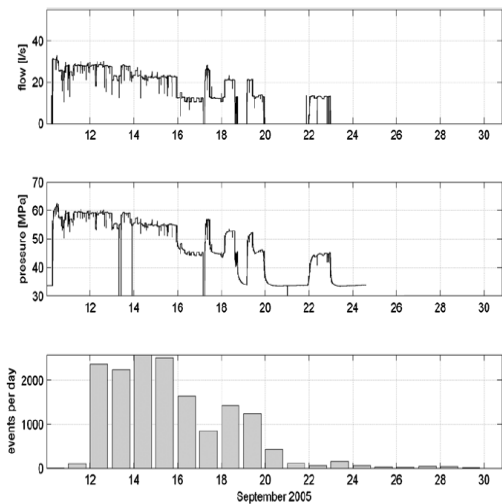


Fig. 9. Injection rate, wellhead pressure and event rates at Habanero 1 hydraulic stimulation in 2005 (Baisch et al., 2009)

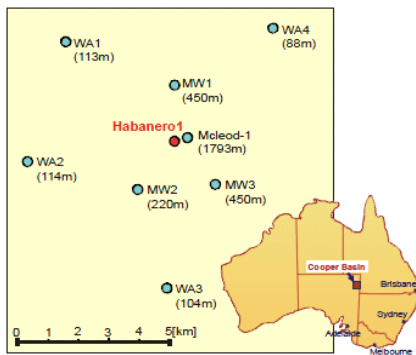


Fig. 10. Monitoring network of microseismicity at Cooper Basin (Asanuma et al., 2009)

4.5 km²의 인공저류층이 형성된 것으로 추정되었고, Habanero 1공(주입공)과 Habanero 3공(생산공)을 이용하여 6주간의 closed loop circulation을 실시하였다. 2005년 8월에는 Habanero 2공에서 화학적 자극(chemical stimulation)을 실시하였고(Geodynamics, 2005), Habanero 1공에서는 소규모의 천공 주입(perforation injection)을 실시하였다(Geodynamics, 2003).

오버트러스트(overthrust) 응력장에도 불구하고, Jolokia 공의 경우는 가파르게 기울어진 절리만이 자극을 받아 투수층이 잘 발달하지 못하여 결과가 성공적이지 못하였다(Geodynamics, 2011).

3.4 미소진동

미소진동 측정은 Fig. 10과 같이 서로 다른 깊이의 8개소에서 이루어졌으며, 3성분 지오폰(geophone)을 이용하여 측정하였다. 미소진동 측정과 분석은 Geodynamics사와 일본 도호쿠대학에서 담당하였다. Habanero 1공의 경우, 2003년과 2005년에 수리자극을 실시하였는데 이로 인해 상당한 크기의 미소진동이 관측되었다(Table 4 참고). 미소진동 발생 영역은 350 m의 심도에 걸쳐 수평방향으로 분포되어 있는데(Fig. 11), 이는 자연 절리와 오버트러스트(overthrust) 상태인 응력장의 영향으로 여겨진다. 두 번째 수행된 수리자극에 의해 수평방향의 절리가 확장되고 이로 인해 공의 연결성이 향상되었다. 수리자극이 진행되는 동안, 미소진동 발생횟수는 최대 2000회/일 이상, 강도는 3.7로 보고되었다(Baish et al. 2009). Habanero 4공은 2012년에 수리자극을 수행하였는데, 이 때 24,000회가 넘는 미소진동이 관측되었다. Habanero 4공의 수리자극 결과에 관해서는 아직도 평가 중에 있다. Jolokia 1공의 경우는 Habanero 지역의 공들과는 달리 진원지가 수직으로 분포되어 미소진동 횟수가 적게 관측되었다.

3.5 시사점

Habanero 지역의 경우, 수리자극에 유리하게 발달한 자연절리와 응력장 덕분에 수리자극의 결과가 사전 연구를 통해 예상했던 결과와 비슷하게 나타났다. 따라서 지역적 특성에 관한 자료가 충분하다면, 수리자극을 통한 EGS 인공저류층의 생성에 관한 결과를 미리 예측해 볼 수 있을 것이다.

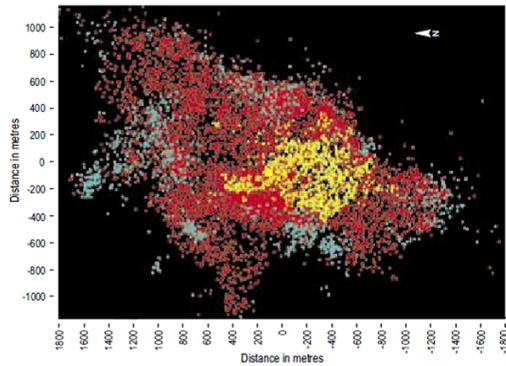
Jolokia 1공은 Habanero 지역으로부터 불과 서쪽으로 약 10 km 떨어져 있고 Habanero와 비슷한 응력장임에도 불구하고, 수리자극의 결과가 성공적이지 못하였다. 이는 수리자극 메커니즘은 결코 단순하지 않다는 것과 지역적 특성에 관한 연구가 반드시 수행되어야 함을 보여준다 할 수 있다.

Cooper Basin은 높은 과압 상태였는데, 수리자극 수행 시 현지 압력의 영향도 필수적으로 연구되어야 할 것 있다. 또한, Habanero 3공에서 시추공 손실이 발생

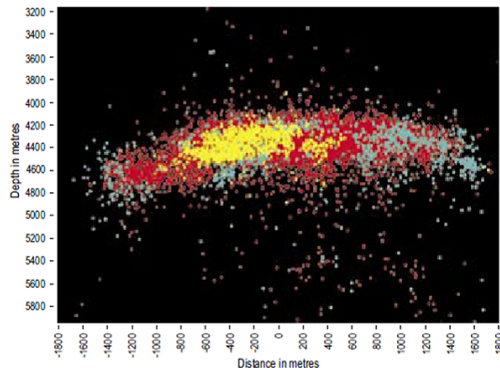
한 사례를 바탕으로 시추와 수리자극 수행 시 세심한 관리가 필요하다.

최근 완성된 호주 Cooper Basin의 Habanero 4 시추공의 경우 총 비용이 5,200 만 호주달러(약 550억원)에 달한 것으로 알려지고 있다(Ward, 2013). 이는 통상 알려진 100-150억원에 비하여 매우 큰 차이가 나며, 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

Habanero 3 시추공의 파손(blow-out)의 경우 사고 직후에는 원인이 이산화탄소(CO₂)와 황화수소(H₂S)의 수소 취성화(hydrogen embrittlement)가 원인으로 지목되었으나 2년 여 간의 조사 후 생산중의 반복적인 고온중으로 인한 애널러스(annulus)에서의 시멘트 양생불량에 따른 응력부식 크랙(stress corrosion cracking)이 원인인 것으로 알려지고 있다. 이러한 문제의 재발을 막기 위해서 Habanero 4에서는 역시멘팅(reverse cementing) 방법을 사용하여 지표면의 시멘팅이 높은 온도의 저류층을 통과할 필요가 없도록 하였다.



(a)



(b)

Fig. 11. Distribution of microseismicity (Geodynamics, 2004), (a) Plan view of hydraulically stimulated zone (colours represent various phases of the programme), (b) North/South section showing hydraulically stimulated zone

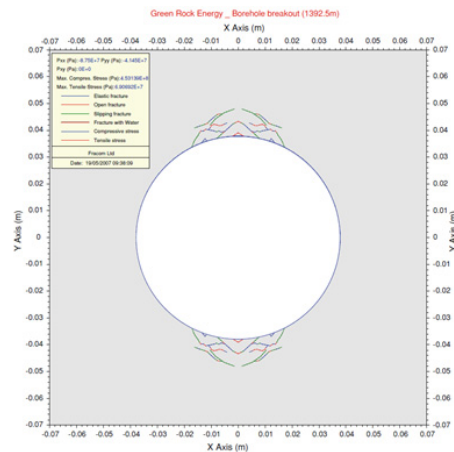
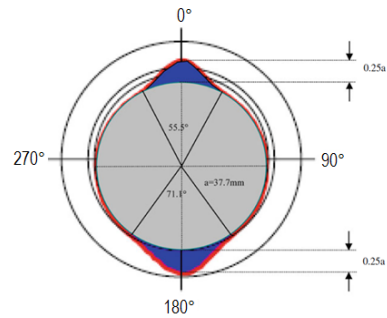


Fig. 12. Measured and predicted borehole breakout at borehole Blanche-1 close to Olympic Dam mine near Cooper Basin. The depth is 1392 m and stress ratio is $S_H/S_V = 2.75/1.25/1.0$ (Klee et al., 2011).

4. 결론

앞서 대표적인 EGS 실증 사례인 영국 Rosemanowes 프로젝트와 호주 Cooper Basin 프로젝트에 대해 살펴 보았듯이, 수리지각 기술은 하나의 상품이 아니라 저류층에 대한 이해를 기반으로 제품 및 인력, 시스템이 결합된 기술로 장기간에 걸쳐야 획득이 가능한 수준 높은 기술이다. 따라서 포항 EGS 사업 성공을 위해 미국, 일본, 영국, 프랑스, 호주의 실증사례에 대한 더욱 심도 깊은 연구가 필요하다. 또한 미소진동, 저류층 시뮬레이션, 지하수, 지구화학, 시추공학 등의 폭넓은 분야의 연구가 필요하며, 다방면의 전문분야를 결합한 학제간 연구가 중요하다.

한편 2000년대 이후로는 열교환 유체를 물 대신 CO₂를 이용하여 CO₂ 지중저장과 결합된 형태의 CO₂ 중심의 EGS 시스템(CO₂-driven EGS system) 개념이 새롭게 제안되었다(Brown, 2000). Brown은 CO₂가 열교환 유체로서 가지는 장점으로서 큰 팽창성과 부력, 낮은 점성도, 낮은 지하화 반응도를 들었다. 큰 팽창성과 부력으로 인해 유체를 순환시킬 때 더 적은 에너지가 필요하며, 낮은 점성도로 인해 더 잘 흐르게 된다. 또한 지하화 반응성이 물보다 더 낮아 암석과 반응해 광물을 생성하여 열수의 흐름을 막아버리는 플러징 현상을 줄이거나 없앨 수 있다. Brown은 또한 CO₂가 낮은 열용량을 갖는 단점에 대해서도 언급하였지만, 이는 더 큰 유량으로 극복할 수 있는 문제이기 때문에 CO₂가 물보다 열교환 유체로서 더 적합하다고 제안하였다. 이후 CO₂ 중심의 EGS 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되었는데(Fouillac et al., 2004, Gurgenci et al., 2008, Atrens et al., 2010), 특히 Pruess(2006)는 수리지질학과 열역학의 개념을 이용하여 이윤 창출이 가능한 압력과 온도조건을 계산함으로써 CO₂ 중심의 EGS 시스템의 실현 가능성에 대해 연구하였다. 이와 같이 추후에는 새로운 형태의 EGS 시스템에 대해서도 연구가 필요하다 생각된다.

사 사

이 논문은 2013년도 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(CO₂ 해양지중저장 기술개발).

References

- Asanuma, H., Kenmoku, Y., Niitsuma, H. and Wyborn, D., 2009, Interpretation of reservoir creation process at Cooper Basin by micro-seismic multiplet analysis, GRC Transaction, Vol 33, 149-154.
- Atrens, A. D., Gurgenci, H., Rudolph, V., 2010, Electricity generation using a carbon-dioxide thermosiphon, Geothermic, Vol 31, 161-169.
- Baisch, S., Voros, R., Weidler, R., Wyborn, D., 2009, Investigation of fault mechanisms during geothermal reservoir stimulation experiments in the Cooper Basin, Australia. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, 148-158.
- Baria, R., 2012, Examples of spin-offs from the Hot Dry rocks Project in Cornwall in the 80s, 2nd UK Geothermal Symposium.
- Bendall, B., Huddleston-holmes, C., Goldstein, B., 2013, The current status of geothermal project in Australia - a national review, Proceedings of thirty-eight workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford, California, USA.
- Brown, D. W., 2000, A Hot Dry Rock geothermal energy concept utilizing supercritical CO₂ instead of water, Proceedings of the Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA, 233-238.
- Chen, D., 2010, Concepts of a basic EGS model for the Cooper Basin, Australia, Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Chen, D., Wyborn, D., 2009, Habanero field tests in the Cooper Basin, Australia: a proof-of-concept for EGS, GRC Annual Meeting, Reno, Nevada, USA.
- Fouillac, C., Sanjuan, B., Gentier, S., Czernichowski-Lauriol, I., 2004. Could sequestration of CO₂ be combined with the development of Enhanced Geothermal Systems?, Paper presented at Third Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Alexandria, VA.
- Geodynamics, 2003, Annual Report 2003, 24 March, 2013 <http://www.geodynamics.com.au/Investor-Centre/Reports/Annual-Reports.aspx>
- Geodynamics, 2004, Annual Report 2004, 24 March, 2013 <http://www.geodynamics.com.au/Investor-Centre/Reports/Annual-Reports.aspx>
- Geodynamics, 2005, Annual Report 2005, 24 March, 2013 <http://www.geodynamics.com.au/Investor-Centre/Reports/Annual-Reports.aspx>
- Geodynamics, 2007, Annual Report 2007, 24 March, 2013, <http://www.geodynamics.com.au/Investor-Centre/Reports/Annual-Reports.aspx>
- Geodynamics, 2009, Annual Report 2009, <http://www.geodynamics.no/Web/Content/Reports/2009/Geodynamic-s-Annual-Report-2009.pdf>
- Geodynamics, 2011, Annual Report 2011, 24 March, 2013, <http://www.geodynamics.com.au/getattachment/c7b9661b-e548-4319-836b-808f7a61378b/2011-Annual-Report.aspx>
- Geodynamics, 2012a, Innamincka Deeps (EGS) Project, 24 March, 2013, <http://www.geodynamics.com.au/Our-Projects/Innamincka-Deeps.aspx>
- Geodynamics, 2012b, Annual Report 2012, 24 March, 2013, <http://www.geodynamics.com.au/getattachment/664b7400>

- fee3-420a-9800-e13be304a283/Annual-Report-2012.aspx
18. Gurgenci, H., Rudolph, V., Saha, T., Lu, M., 2008, Challenges for geothermal energy utilization, Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
 19. Harrison, R., Symons, G. D., 1991, HDR Economics: A Review of the Uk Geothermal Hot Dry Rock R&D Programme, Geothermal Resources Council Transactions, Vol 15, 333-37.
 20. Kaieda, H., Sasaki, S., 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, Bali, Indonesia.
 21. Klee, G., Bungler, A., Meyer, G., Rummel, F., Shen, B., 2011, In Situ Stresses in Borehole Blanche-1/South Australia Derived from Breakouts, Core Discing and Hydraulic Fracturing to 2 km Depth, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol 44(5), 531-40.
 22. Parker, R., 1999, The Rosemanowes HDR Project 1983-1991, Geothermics, Vol 28, 603-15.
 23. Pine, R. J., Batchelor, A. S., 1984, Downward Migration of Shearing in Jointed Rock During Hydraulic Injections, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstract, Vol 21(5), 249-263.
 24. Pine, R. J., Cundall, P. A., 1985, Applications of the Fluid Rock Interaction Program (FRIP) to the Modeling of Hot Dry Rock Geothermal Energy Systems, In Fundamentals of Rock Joints, 293-301. Luleå, Sweden: Centek Publishers.
 25. Pine, R. J., Ledingham, P., Merrifield, C. M., 1983b, In-Situ Stress Measurement in the Carnmenellis Granite —II. Hydrofracture Tests at Rosemanowes Quarry to Depths of 2000 M, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstract, Vol 20(2), 63-72.
 26. Pine, R. J., Tunbridge, L. W., Kwakwa, K., 1983a, In-Situ Stress Measurement in the Carnmenellis Granite —I. Overcoring Tests at South Crofty Mine at a Depth of 790 M, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstract, Vol 20(2), 51-62.
 27. Pruess, K., 2006, Enhanced Geothermal Systems (EGS) Using CO₂ as Working Fluid - A Novel Approach for Generating Renewable Energy with Simultaneous Sequestration of Carbon, Geothermics, Vol 35(4), 351-367.
 28. Reynolds, S. D., Mildren, S. D., Hillis, R. R., Meyer, J. J., 2004, The in situ stress field of the Cooper Basin and its implications for hot dry rock geothermal energy development, PESA Eastern Australasian Basins Symposium II, Adelaide, Australia.
 29. Richards, H. G., Parker, R. H., Green, A. S. P., Jones, R. H., Nicholls, J. D. M., Nicol, D. A. C., Randall, M. M., 1994, The Performance and Characteristics of the Experimental Hot Dry Rock Geothermal Reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988), Geothermics, Vol 23(2), 73-109.
 30. Ward, G., 2013, Habanero EGS Project – Successful Demonstration of deep granite hosted EGS.
 31. Wyborn, D., 2010, Update of development of the geothermal field in the granite at Innamincka, South Australia, Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
 32. Yoon, W.-S., Song, Y., Lee, T. J., Kim, K.-Y., Min, K.-B., Cho, Y.-H., Jeon, J., 2011, Research Background and Plan of Enhanced Geothermal System Project for MW Power Generation in Korea, Tunnel and Underground Space, Vol. 21, No. 1, p. 11-19.
 33. Zhao, J., Brown, E. T., 1992, Hydro-Thermo-Mechanical Properties of Joints in the Carnmenellis Granite, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol 25(4), 279-90.



민기복

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

Tel: 02-880-9074
E-mail: kbmin@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과 부교수



김한나

2010년 서울대학교 공과대학 에너지자원공학과 공학사
2012년 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 공학석사

Tel: 02-880-7230
E-mail: kyhn1123@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정



린마오시

2009년 중국 북동대학교 공과대학 토목과 공학사
2011년 중국 북동대학교 대학원 자원공학과 공학석사

Tel: 02-880-9034
E-mail: xielinmao@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정



이재원

2008년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사

Tel: 02-880-7234
E-mail: sodg3135@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 박사과정