WATER FOR FUTURE

일반 기사

무한한 청정 에너지 자원 HDR(Hot Dry Rock) 국외 개발 현황

정 우 창 |
경남대학교 토목공학과 전임강사
jeongwc@kyungnam.ac.kr

1. 서 론

현 정부가 출범한 이후 주도적으로 추진 중에 있는 녹색성장의 핵심 분야의 하나로 신재생 에너지 개발을 들 수 있다. 신재생 에너지에는 탄소를 효과적으로 저감시킬 수 있는 에너지를 말하며, 이에는 풍력, 태양광, 바이오 연료 등 있다. 이와 더불어 지열에너지도 무한한 청정에너지 자원으로 전 세계에서 많은 연구가 추진 중에 있다. 지열에너지 개발은 물, 지하수 및 지하의 열 등의 온도차를 이용하여, 냉·난방에 활용하는 기술을 말하며, 지표면에서 비교적 얕은 깊이에서 지열을 채취하는 것을 천부 지열 그리고 수 km 이상 깊이에 존재하는 마그마에 의해 가열된 결정질 암반층에서 지열을 채취하는 것을 HDR 지열 시스템이라 한다. 본고에서는 HDR 지열개발의 의미와 국외 개발현황에 대해 살펴보고자 한다.

2. HDR(Hot Dry Rock) 지열개발이란?

HDR 개념은 지하 심부의 화강암과 같은 결정질 암반층(crystalline rock layer)에는 마그마에 의해 가열된 높은 온도를 나타내며, 또한 높은 암반층의 압력으로 인해 물이 침투할 수 없다는 가정에 기초한다. 이러한 환경에서 지열을 개발하기 위해서는 그림 1과 같은 물이 주입되는 주입정(injection well) 및 물을 끌어올리는 생산정(production well)의 시추공 사이에 열 교환기 역할을 하는 균열부로 구성되며, 지표에서 주입된 상온의 물은 이러한 균열부를 통과하면서 데워지며, 시추공들을 통해 순환한다. 생산정을 통해 데워진 물의 증기는 지표에 설치된 터어빈을 통과하면서 전기를 생산하게 된다.

초기에는 전기에너지를 생산하는 것이 주목적이었으며, 이는 생산정으로부터 끌어올려진 물이 140℃ 이상의 온도가 되어야 경제적인 것으로 알려져 있다. HDR 시스템은 과거 30여년 전부터 진행되어온 연구결과를 토대로 최소한 20년의 기간 동안 약 10~100에 달하는 열용량을 생산할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이를 위해서는 약 3~10km^{2}에 달하는 지하 열교환 표면과 50~100 liter/sec에 달하는 순환유속을 필요로 한다. 5km의 깊이에 위치한 HDR 열저장소

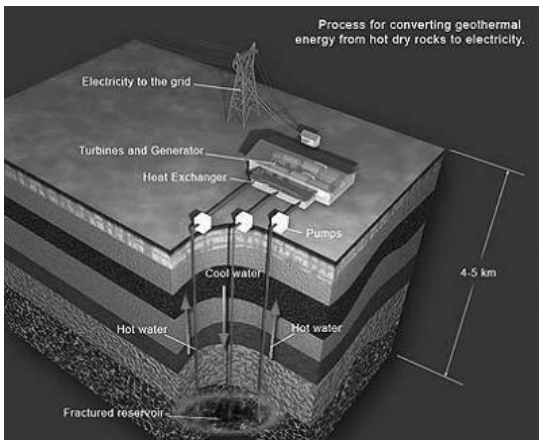

그림 1. HDR 개념도

의 경우 필요한 최소 펌프압력은 약 40MPa이며, 주입정과 생산정 사이의 유속차를 생산정에서의 유속으로 나눈 후 이를 유압으로 환산한 유동 임피던스는 최소 0.1MPa 이상이어야 한다. 따라서 유동 임피던스가 크면 클수록 HDR 시스템은 전기생산에 효과적이나 그에 따라 펌프의 용량도 증가된다.

3. 국외 HDR 개발 현황

3.1 미국의 Fenton Hill HDR 프로젝트

Fenton Hill은 뉴멕시코 Rio Grande Grabe의 서쪽에 위치한 로스 알라모스로부터 약 40km 떨어진 캘더라 동부에 위치해 있다. 이 지역은 화산활동으로 인해 열 유동량은 1m^{2}당 약 250밀리와트이며, 이는 지표에서의 평균 열 유동성의 약 3배에 달한다. 1단계 프로젝트는 1973년부터 1979년까지 수행되었으며, 195℃에 달하는 깊이 3km의 화강암 암반층에 존재하는 단일 균열부를 활용하여 2개의 시추공들을 연결하는 HDR 개념을 시험하였다. 1차 소형 순환 시스템의 평균 열용량은 약 3메가와트였으며, 순환실험의 자료를 토대로 유효 지하 열 교환 면적은 8,000m^2 으로 평가되었다. 순환실험을 하는 동안 시간당 5기가와트에 달하는 지열 에너지가 추출되었으며, 이는 수백 세대 가정의 연간 전력 소비량과 맞먹는 수준이다. 1차 시험이후에 2개의 시추공은 300m 이상의 대형 균열부에 연결되었으며, 유효 열 교환 면적은 50,000m^{2}으로 1차 시험 때에 비해 약 6배로 증가되었다. 2.3메가와트에 달하는 열용량의 일부는 전기에너지를 생산하기 위해 50킬로와트의 터빈 발전기를 구동하는데 사용되었다. 2단계 프로젝트는 1980년에 시작되었으며, 다중 균열(multifrac) HDR 개념을 시험하는데 그 목적이 있었다. 순환 시스템은 깊이 4,500m에 달하는 2개의 시추공으로 구성되어 있으며, 시추공 바닥의 온도는 327℃였다. 2단계 프로젝트가 시작된 지 7년이 지난 1986년에 2차 HDR 순환시스템이 완성되었으며, 이때 열용량은 10메가와트였다. 2001년 미국 에너지부는 Fenton Hill 프로젝트를 마감하였다. 미국 산업계의 요구에 부응하여 미국 에너지부는 현재 지열 발전 산업에는 단기적 편익을, 전력소비자들에게는 장기적 편익을 제공하기 위해 강화된 지열 시스템(Enhanced Geothermal System, EGS) 프로그램을 보유하고 있다. EGS 프로그램의 주안점은 연구개발 프로그램으로부터 산업 집약적인 프로그램으로 전환하는데 있다. 단기목표로는 상업용으로 개발된 수열(hydrothermal)분야로부터 증기 생산량을 증가시키는 것이며, 장기목표로는 증기 및 전력을 경쟁력 있는 가격으로 생산할 수 있는 인공 저장소를 설립하는 것이다. Fenton Hill 프로젝트로부터 얻어진 지식은 현재 북부 캘리포니아의 Geyser 현장에 적용되고 있다.

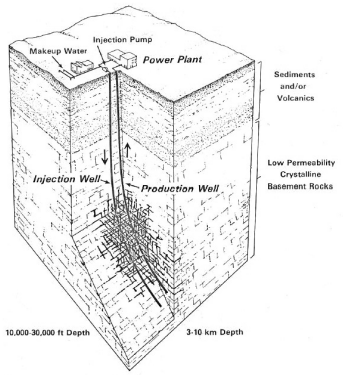

그림 2. Fenton Hill HDR 개념도

3.2 일본의 HDR 시스템 개발 프로젝트

일본에서 HDR 시스템 개발에 관한 연구는 1970년 이후 체계적으로 추진되어 왔으며, 자체적인 HDR 연구 활동과 더불어 1980년부터 1986년까지 미국의 로스 알라모스 국립 연구소(Los Alamos National Laboratory, LANL)의 HDR 프로젝트에 적극적으로 참여하였으며, 유럽 프로젝트들과의 과학적 협력관계가 추진되었다. 대표적인 HDR 프로젝트는 다음과 같다.

- Hijiori 프로젝트(야마가타 지방)

1980년 이후 국제무역산업부(MITI)는 Hijiori에서 깊이가 약 2,000~2,200m이며, 암반 온도가 약 250℃인 4개의 시추공에서 HDR 개념에 대한 기술적 타당성 조사를 지원하였다. 단기적 수리학적 시험들은 1991년, 1995년 및 1996년에 실시되었다. 고온의 하강암 기저부인 1,800m와 2,200m 각각에서 2개의 균열부가 구축되었다. 1991년에 상부 균열부에서 3개월에 걸친 순환시험이 이루어졌으며, 2000년 말에 2년 동안의 장기적 순환시험이 하부 균열부에서 이루어졌다. 본 시험의 주목적은 균열부의 수명기간을 조사하는데 있었다. 시험초기에 예상치 못한 높은 주입 임피던스가 관측되었으며, 얕은 균열부의 높은 회복율과 매우 낮은 압력이 결정되었다. 이듬해 신규에너지 및 산업 기술 개발기구인 NEDO와 국립오염자원연구소인 NRIPR에서 얕은 균열부의 적극적 관리 계획을 수립하였다.

- Yunomori 프로젝트(이와테 지방)

1988년 Yunomori 지역에 위치한 현장에서 이른바 Hot Wet Rock (HWR) 프로젝트가 개시되었다. 이 프로젝트의 목적은 200℃에 달하는 깊이 1.5km 지점에서 물과 암반 사이의 상호작용을 연구하는데 있었으며, 교육부와 일부 민간 연구소에서 재정적 지원이 이루어졌다. Yunomori에서 TIGER 프로젝트의 현장시험은 NEDO에 의해 과학적으로 운영되었으며, MITI에 의해 재정적 지원을 받았다.

- Ogachi 프로젝트

Ogachi 프로젝트는 민간전력회사에 의해 지원되었으며, 중앙 전력산업 연구소(GRIEP)에 의해 운영되었다. 1986년과 1988년 사이의 1단계 Akinomiya 현장시험에서 수많은 기초 연구가 진행되었으며, 이후 얕은 깊이에서 순환시험이 이루어졌다. 1990년부터 1992년 사이에 약 1,000m 깊이에서 2개의 새로운 시추공을 가로지르는 균열부가 개발되었다. 1990년 이후 228℃의 온도에서 2단계 대규모 수리학적 균열 및 순환 시험이 이루어졌으며, 1993년 3단계에서 22일 동안 순환시험이 실시되었다. 1993년 이후 5개월 동안의 순환시험과 1995년에 1개월 동안의 순환시험이 이루어졌으며, 160℃의 생산온도 및 25%의 물 회수가 달성되었다.

3.3 호주의 HDR 시스템 개발 프로젝트

호주에는 엄청난 HDR 지열 에너지 잠재력이 존재한다. 조사는 1995년에 시작되었으며, 2000년에는 "Geodynamics Limited"라는 한 상업 회사가 설립되었다. 회사의 임무는 고온 건조한 암반 자원으로부터 청정하고 재생 가능한 지열 에너지를 상업적으로 생산하기 위하여 호주의 고유한 잠재력을 개발하는데 있었다.

호주의 중부, 남부 및 동부에 위치한 여러 지역들이 조사되었으며, 이 중 일부지역에서는 깊이 5km에서의 예상 온도는 250℃이상이다. 이것은 3,291개의 시추공에서 기록된 온도들의 데이터베이스를 토대로 추정한 것이며, 가장 깊은 시추공은 5,594m이며, 평균깊이는 1,669m이다. 현재 25개의 주입정과 36개의 생산정을 가진 360메가와트급 발전소 건설이 추진 중에 있다.

3.4 유럽연합의 Soultz-sous-Forêt HDR 시스템 개발 프로젝트

1986년에 HDR 연구를 위해 독일 및 프랑스 연구단이 구성되어 프랑스 동부의 Upper Rhine Graben에 위치한 Soultz-sous-Forêt 지역에서 추진되는 HDR 연구 프로젝트에 공동으로 참여하였다. 이 프로젝트는 유럽연합, 독일연구기술부(DMRT) 및 프랑스의 에너지국의 의해 재정지원이 이루어졌다. Soultz-sous-Forêt는 중부유럽 최고 수준의 열 유동성이 탐지되는 곳으로 Strassbourg 북쪽으로 약 50km에 위치하고 있다. 이 지역에서 기존의 원유 시추공은 지표로부터 km당 60℃ 또는 km당 거의 100

℃에 달하는 지열경사를 보여주었다.

1987년부터 1989년까지 1단계 프로젝트 기간 동안 HDR 지열 에너지 추출에 대한 적합성을 알아보기 위해 화강암으로 이루어진 결정질 암반에서 다양한 기초 시험을 실시하였다. 첫째로 지하 2,000m까지 화강암을 관통하는 1차 시추공을 설치하였으며, 암반 온도는 1,000m 깊이에서 120℃였으나 2,000m에서는 불과 20℃가 증가된 141℃이었다. 이는 결정질 암반에서의 고열에 의해서가 아니라 과도한 침전층에서의 물 순환으로 인해 온도 증가속도가 떨어진 것에 기인한다. 1 단계 프로젝트에서 균열부는 10,000m^{2}으로 확장되었으며, 시추공을 통한 수리학적 인공파쇄 시험을 수행한 결과 균열의 증가로 인해 엄청난 양의 물 손실이 발생하였고 자연 상태로 존재해 있던 균열구역과 교차했다. 이러한 상호연결은 상당한 속도로 고온수를 생산할 가능성을 열어 주었다. 1989년부터 1991년까지 2,280m 깊이까지 시추공을 도달하게 하였으며, 균열 사이의 연결망 및 광물학에 대한 유용한 정보와 지구물리학적 기록들을 후속적으로 해석할 수 있는 기반을 제공하였다. 1992년부터 1993년까지 수행된 2차 프로젝트의 목적은 약 160℃에 달하는 3,590m 깊이까지 시추공을 확장

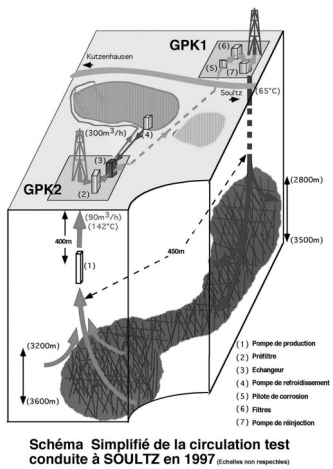

그림 3. Soultz-sous-Forêt HDR 개념도

하는 것이었다. 1995년에 기존의 1차 시추공에서 남쪽으로 약 450m 떨어진 지점에 깊이 2,890m에 달하는 2차 시추공을 추가하였으며, 주입성(injectivity)을 향상시키기 위해 총 30,000m^{3}에 달하는 물을 24, 45 그리고 78liter/sec로 단계별로 주입하였다. 1999년에는 2차 시추공이 201℃에 달하는 깊이 5,060m까지 확장되었으며, 1차 수리학적 시험결과 약 5km 깊이에 열 교환기 및 과학적 파일럿 플랜트를 개발할 수 있는 매우 유망한 결과를 보여주었다.

지난 수년간 Soultz-sous-Forêt 지역에서 실시된 다양한 시험결과는 전세계에서 가장 성공적인 HDR 프로젝트로 만들었다. 현재 30메가와트의 발전능력을 갖추고 있으며, 5,000m의 최종 깊이에 HDR 파일럿 플랜트를 건설하여 시험운영 중에 있다.

4. 앞으로의 전망

전 세계적으로 HDR 연구가 실시된 지난 30년 동안 특정 지역에서 발전용으로 사용되는 지하 심부의 결정질 암반에서 지열 에너지를 개발하기 위한 방법에 대한 초기 연구단계에서는 크게 성공을 거두지 못하였다. 그러나 향후 단 하나의 HDR 시스템뿐만 아니라 몇 개의 개별적인 지역 조건을 활용하여 개선하는 다양한 방법들이 제안되었으며, 이를 통해 경제적인 지열 생산이 가능해 질 것으로 전망된다. 우리나라에서도 HDR 시스템을 통한 지열 생산에 대한 매우 기초적인 연구가 정부의 주도로 수행된 적이 있지만 경험부족 등으로 인해 성공을 거두지는 못하였다. 최근 주요 선진국에서 추진된 HDR 시스템의 성공사례를 종합적으로 분석하여 무한한 청정에너지 자원인 지열 개발에 도전해 볼 필요가 있을 것으로 판단되며, 이는 현 정부에서 추진 중인 녹색에너지 개발 사업에도 부합하는 것이 될 것이다.

참고문헌

1. Baria, R.; Baumgärtner, J.; Gerard, A. and J. Garnish, 2000. ""The European HDR Programme: Main Targets and Results of the Deepening of the Well GPK2 to 5000m," Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, May 28-June 10, International Geothermal Association, Pisa, Italy.
2. Rummel; F., Kappelmeyer, O. and O. A. Herde, 1992. Geothermal Energy, Future Energy Source? Facts- Research-Future, MesyGmbH (Ed.) Bochum.
3. Swenson, S.; Chopra, P. and D. Wyborne, 2000. ""Initial Calculations of Performance for an Australian Hot Dry Rock Reservoir,"" Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, May 28-June 10, International Geothermal Association, Pisa, Italy.