

# 국내외 지열발전 현황 및 전망

장기 흥 / 한국에너지기술연구원

전통적인 개념의 지열에너지는 지구 내부가 가지고 있는 열로서 그 근원은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 즉, 지표에서 측정되는 지열류량은 대륙의 경우 약 40%가 상부 지각내에 함유된 방사성 동위원소 즉, 우라늄(U238, U235), 토륨(Th232)과 칼륨(K40)의 붕괴에 의해 지속적으로 발생하는 열에 기인하고, 나머지 60%는 지구가 생성될 당시 하부지각과 맨틀 상부에 축적된 원시 에너지에 기인한다.

지열에너지는 화산활동이나 지각변동에 의해 지표에서 그 징후가 발견되는데, 인류가 지열에너지를 이용하는 가장 원시적인 형태는 로마시대에도 이용된 온천일 것이다. 지열을 에너지원으로서 이용한 것은 이미 19세기 초반에 이루어졌으며, 이탈리아의 Larderello 지역에서 시추공으로부터 자연 용출하는 열수에서 봉산을 추출하는 과정에서 필요한 열의 일부를 지열수가 가진 온도에너지에서 추출하여 활용하였다. Larderello에서는 이후 1904년에 세계에서 최초로 지열 증기를 이용하여 전기를 생산하였으며, 이후 일본, 미국, 뉴질랜드, 멕시코 등으로 지열발전이 확산되는 계기가 되었다.

지열의 이용은 크게 지열 증기를 이용하여 전기에너지를 변환을 통한 간접이용(indirect use)과 지열수가 가진 열에너지를 그대로 이용하는 직접이용(direct use)으

로 구분할 수 있다. 간접이용은 다시 생산되는 지열수가 150°C 이상인 고온의 증기 또는 유체인 경우에 가능한 전통적인 증기터빈 방식의 지열발전과 85~170°C 범위의 중저온의 지열수나 열수탁월형 지열발전소에서 분리되어 배출되는 폐열수를 활용하고 2차유체기술(binary fluid technology)을 이용하는 방식의 binary 발전으로 나눌 수 있다. 지열직접 이용은 가정 오래되고 보편적이고 다목적으로 이용되는 방법으로 온천욕, 건물 및 지역난방, 농업응용, 수산업응용 그리고 산업적인 응용으로 나뉘며 가장 널리 보급되어 있는 열펌프 기술도 포함된다.

지하에 부존하는 지열에너지는 막대하다. 지하에 부존하는 또는 추출가능한 에너지량에 대해서는 지금까지 다양한 접근방법으로 여러 연구결과가 발표되어 있다. 우선, 전 지구적으로 볼 때 지열류량으로부터 계산된 지구의 총 열함유량은  $12.6 \times 10^{24}$  MJ, 지각의 경우는  $5.4 \times 10^{21}$  MJ로 추정된다(Armstead, 1983). 또한, 2006년말에 MIT에서 발표한 보고서(MIT, 2006)에 따르면 미국에서 현재의 기술수준으로 활용가능한 에너지의 총량은  $2 \times 10^{5}$  EJ로서 2005년도 미국 전체 1차에너지 사용량의 약 2,000배에 달하는 것으로 발표되었다.

지금까지 우리가 이용해온 지열에너지는 지하 심부로부터 지표로 열을 운반해주는 매개체(즉, 액체나 증기의 형태)의 유동이 가능한 지질학적인 조건을 만족하

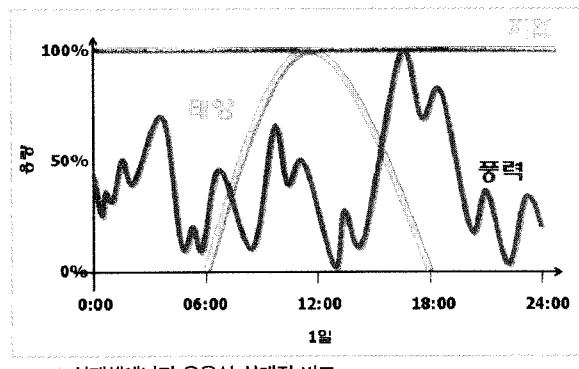
는 지역, 즉 지열자원(geothermal resources)이 부존하는 지역에서만 국한되었으나 최근에는 기술의 비약적인 발전에 힘입어 지하 4km 이상 시추하고 지상에서 물을 강제로 고압으로 주입해서 인공적인 대수층을 형성한 후, 이로부터 150°C 이상의 열수를 얻어내어 전기를 생산하는 개선된 지열시스템(EGS, Enhanced Geothermal System) 기술로 발전하여 화산지대가 아니라 땅속에 지열수가 부존하지 않더라도 지열에너지의 개발 및 활용을 가능하게 하는 기술이 입증되어 우리나라와 같은 비화산지대에서도 지열발전이 가능하게 되었다.

## 2-1. 지열발전 보급 특성

지열발전은 다른 재생에너지에 비해 시장경쟁력이 높지 않지만 연료가 불필요하고 재생이 가능하며 청정한 대체에너지가 될 수 있는 등의 장점 때문에 잠재력이 있는 국가를 중심으로 개발이 확대되고 있다. 또한, 다른 신재생에너지와는 달리 계절이나 기후에 거의 영향을 받지 않고 발전과 열 이용을 병행할 수 있기 때문에 미국이나 유럽에서는 지열발전 이외에도 냉난방을 위한 지열직접이용이 증가하고 있는 추세이다.

[그림 1]에서 알 수 있듯이 지열발전이 태양광발전 및 풍력발전과는 달리 24시간 중단되지 않고 제공될 수 있어 국가의 기저부하를 담당할 수가 있기 때문에 기존의 다른 신재생에너지의 발전과는 달리 퍽크부하에 의한 추가적인 발전소 건설을 대체할 수가 있다. <표 1>은 발전소 유형에 따른 가동률을 나타낸 것인데 지열발전은 원자력발전과 거의 유사한 90% 이상의 가동률을 보이고 있기 때문에 국가의 전력 기간산업에 큰 역할을 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 지열발전은 현재 주로 화산지대를 중심으로 상용발전이 이루어지고 있기 때문에 발전단가도 [그림 2]에서 알 수 있는 바와 같이 풍력발전과 거의 유사한 경향을 보이고 있으므로 계속 증가추세를 보이고 있다.

세계적으로 발전소를 건설하는 데에는 많은 건설비 및 기간이 소요되므로 국가적으로 장기적인 계획에 의해 추진되고 있다. [그림 3]에서 살펴보면 지열발전소를

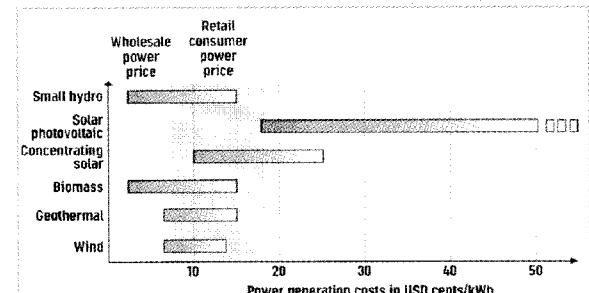


신재생에너지 유동성 상대적 비교

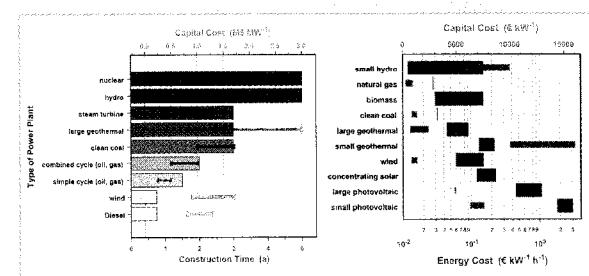
표 1 발전소 유형별 가동률

Technology	Expected Capacity Factor (percent)
Coal	71
Nuclear	90
Geothermal	86-95
Wind	25-40
Solar	24-33
Natural Gas Combustion Turbine	30-35
Hydropower	30-35
Biomass	83

$$\text{Capacity Factor} = \frac{\text{Total Energy Produced}}{\text{Energy Produced if at Full Capacity}}$$



신재생에너지원별 발전단가 비교



발전설비의 초기투자비 및 운전비용 비교

건설하는 데에 걸리는 기간은 원자력 및 수력발전의 건설기간에 절반 정도이나 건설비용은 지열발전을 위한

주변 여건에 따라 변화폭이 크게 나타나고 있다. 화산지역과 같은 고온의 지열수를 확보하기가 쉬운 지역에서는 건설비용이 화력발전소와 비슷하나 비화산지대와 같은 주변여건이 충분하지 않은 지역에 건설할 경우에는 원자력 및 수력발전과 거의 같은 수준의 건설비가 소요되는 것으로 나타난다.

## 2-2. 지열발전 보급 현황

세계의 지열발전 잠재력은 최대 72,392MWe 정도로 평가되고 있다. 잠재력이 높은 국가는 인도네시아(27,791MWe), 미국(23,000MWe), 일본(20,000MWe), 필리핀(6,000MWe) 및 멕시코(6,000MWe)의 순서이다. 한편, [그림 4]에서와 같이 지열에너지 컨퍼런스인 EGC-2007에 의하면 2007년도 세계 지열 발전용량은 9,737MWe(2007년 가동 1,142MWe 포함)이며 이는 총 잠재력의 13.5%에 해당한다. 최대 이용국가는 미국(2,687MWe)이며, 필리핀(1,970MWe), 인도네시아(992MWe), 멕시코(953MWe), 이탈리아(811MWe), 일본(535MWe), 뉴질랜드(471.6MWe)의 순서로 높다. 특히 세계 8위인 아이슬란드는 2005년도 발전용량이 202MWe이었으나 2007년도에 2배 이상 증가한 421.2MWe를 가동할 예정이다.

특히 유럽연합의 지열 발전 용량은 862.8MWe로서 지열발전량은 2006년도에 5,693GWh를 기록하였다. 이중 이탈리아의 지열 발전 용량은 810.5MWe이며 유럽연합 총 발전용량의 대부분을 차지하고 있다. 2006년도 지열발전량은 5,527GWh를 기록하였으며, 재생에너지 우대정책을 시행하고 있기 때문에 2010년까지 100MWe의 지열발전을 추가로 개발할 계

획이다. 그리고 포르투갈은 2006년도에 화산섬인 Azores 제도에 10MWe를 신규 개발하여 총 발전용량이 28MWe가 되었으며 유럽에서 두번째로서 2006년도 발전량은 85GWh이다. 재생에너지 전력에 고정우대가격제도를 시행하고 있어 지열발전 개발도 증가할 전망이다.

프랑스의 2006년도 지열 발전용량은 14.7MWe이며 지열발전량은 78GWh이었다. 주로 Guadeloupe를 비롯한 해외영토에서 지열발전을 개발해왔으나 본토인 Soultz-sous-Forêts에 1.5MWe 규모의 지하심부 지열발전 시험시설을 건설하고 있고, 본토에서의 개발 가능성을 모색하고 있다. 2006년 10월부터 지열발전을 포함한 재생에너지 전력의 고정우대가격제도를 시행하고 있다. 오스트리아는 2기의 바이너리 지열 발전시설을 가동하고 있으며, 총 발전용량은 1.2MWe이다. Altheim 발전시설(1MWe)의 지열수 온도는 106°C이고 Blumau 발전시설(180kWe)은 110°C이다. 모두 열병합발전이며 2006년도에 3GWh를 발전하였다. 독일은 2003년부터 Neustadt-Glewe 지열 발전시설(230kWe, 98°C)을 가동하고 있으며, 2006년도에 0.4GWh를 발전하였다. 2007년도에 3기(총 발전용량 8MWe)의 신규 발전시설이 가동될 예정이며 앞으로 총 발전용량이 크게 증가할 전망

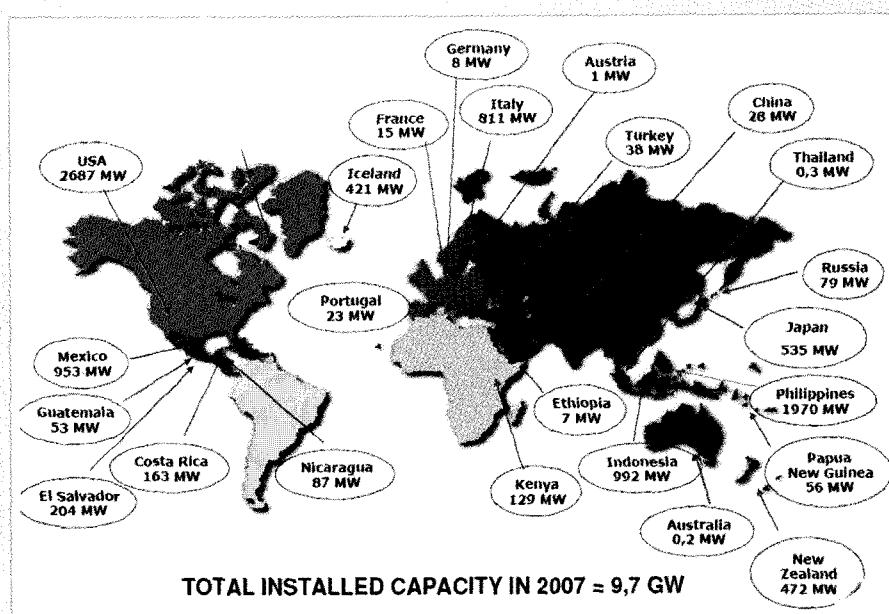


그림 4 세계 지열발전 설치 용량 분포

이다. 독일은 유럽에서 재생에너지 전력 개발을 가장 우대하는 정책을 시행하고 있어 지열발전 개발도 활발해지고 있다. 5MWe 이하 시설의 지열전력 구매가격을 15유로센트/kWh로 우대하고 있으며, 시설용량이 증가하면 구매가격을 약간씩 낮게 책정하고 있다.

### 2-3. 지열발전 플랜트 현황

지열발전 플랜트의 크기는 국가별 또는 각 지역별 지열자원 분포 특성과 발전 요구량에 따라 작게는 100kWe급에서 크게는 100MWe급까지 다양하다. 플랜트의 설치용량(installed capacity) 면에서 미국·필리핀·멕시코·이탈리아·인도네시아·일본 등이 전 세계 지열발전 용량의 86%를 차지한다.

〈표 2〉와 [그림 5]는 전 세계적으로 2005년 초까지 건설된 지열발전 플랜트를 방식별로 구분한 것이다. 전체

표 2 발전 방식별 전 세계 지열발전 플랜트 현황(2005년 초 기준).  
[Bertani (2005)]

Plant type	Installed capacity(MWe)	Percent	Installed capacity (number of units)	Percent
Dry steam	2545	28	58	12
Single-flash	3294	37	128	26
Double-flash	2293	26	67	14
Binary/combined cycle/hybrid	682	8	208	42
Back-pressure	119	1	29	6
Total	8933	100	490	100

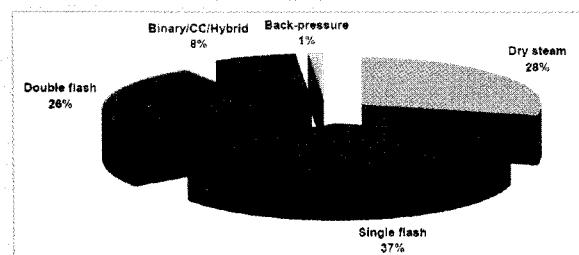


그림 5 전 세계 지열발전 방식별 점유율 비교 [그림 출처: ABS Research (2007)]

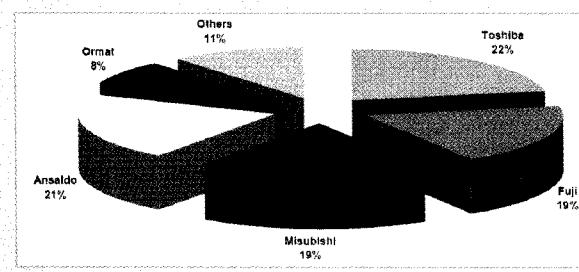


그림 6 지열 발전설비 관련 시장점유율(출처 EurObservER(2005))

490기의 플랜트가 건설되었으며, 총 설치용량은 8,933MWe에 달한다. 설치용량 면에서 1단 습증기(single flash-steam) 방식[3,294 MWe(37%)]과 2단 습증기(double flash-steam) 방식[2,293 MWe(26%)]이 단연 지열발전의 대세다. 뒤를 이어 전증기 28%(2,545 MWe), 바이너리 8%(682 MWe), 배압(back pressure) 방식 1%(119 MWe)의 점유율을 보였다. 주목할 점은 용량에서는 바이너리 방식의 비율이 낮았지만, 플랜트 수에서는 그 반대라는 것이다. 즉, 전체 490기의 플랜트 중 208기(42%)가 바이너리 방식으로, 타 방식 [1단 습증기 128기(26%) · 2단 습증기 67기(14%) · 전증기 58기(12%) · 배압방식 29기(6%)]보다 우세하였다. 이는 지열발전이 더 이상 고온의 지열자원을 가지고 있는 국가에서만 보급될 수 있는 분야가 아니라는 사실을 뒷받침한다. [그림 6]에서 알 수 있듯이 현재 미국의 기업들이 지열발전 분야를 주도하고 있으며, 대표 기업으로 CalEnergy, Unocal, Ormat 등이 있으며, 발전설비 분야에서는 Ormat(미국), Toshiba, Mitsubishi, Fuji(일본), Ansaldo(이탈리아) 등 5개 회사가 세계의 시장을 분할하고 있다.

### 2-4. EGS 지열발전

EGS 기술은 1970년대부터 상업적 지열발전이 힘든 지역에서 지열을 개발하기 위한 연구로 전해되었고, 대표적인 연구 프로젝트는 미국의 Fenton Hill, Coso, Desert Peak 프로젝트, 유럽의 Rosemanowes, Falkenberg, Urach, Le Mayet de Montagne 프로젝트, 일본의 Hijiori, Ogachi 프로젝트 등이 있다. 최근에는 EU에서 ENGINE(ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe, <http://engine.brgm.fr>)을 조직하여 주요 유럽 프로젝트인 Soultz-sous-Forêts(<http://www.soultz.net>)를 지원하고 있다. 참여국가로는 프랑스, 독일, 이탈리아, 스위스, 미국, 일본 등 다수이며, 이 프로젝트는 산업 컨소시엄(EGIG Heat Mining)이 운영하고 있다. 자금은 EC, 프랑스, 독일이 거의 균등하게 제공하고 있으며, 이 사이트의 시스템은 [그림 7]과 같이 1개의 주입정과 2개의 생산정으로 되어 있다.

미국의 경우 지열발전 분야의 목표로는 10년 내에 현재의 약 3배 이상 발전량을 예상하고 있다. 특히 EGS 기

## ● 기획시리즈

술을 활용한 지열발전에 대해 큰 기대를 가지고 있으며, 2050년에는 미국의 1차에너지 소비량의 약 10% 정도를 지열발전 분야가 담당하는 도전적인 목표를 세우고 있다. 따라서 장기적으로 EGS를 활용한 지열발전 분야는 거대 시장으로 발전할 것으로 예상되고 있다.

일본도 EGS 및 저온발전 분야에 대한 장기적인 연구 개발 기술로드맵을 2007년 수립하여 진행하고 있다. 일본의 경우 지열발전 분야를 바이너리 지열발전, 고온암체 발전, 마이크로 지열발전으로 구분하여 연구개발 전략을 수립하고 있다. 우선적으로 가장 빨리 보급될 수 있는 바이너리 발전 분야에 대한 연구가 진행되고 있으며, EGS 발전의 경우 2020년대 말에 도입을 목표로 하고 있다.

호주도 1980년대부터 EGS 지열발전에 대한 연구를 시작하였고, 최초의 현장 프로젝트는 Cooper Basin에서 수행되었다. Cooper Basin 지역은 호주에서 지열구 배가 가장 높은 지역으로 평가되었으며, 호주 EGS 지열발전의 연구프로젝트의 시발점이 되었다. Cooper Basin 프로젝트 시작 이후 Muswellbrook HDR 프로젝트, Woronora HDR 프로젝트가 현재 호주에서 진행 중에 있다(Burns et al., 2000)

구체적인 EGS 기술 연구방향으로는 In-situ stress의 크기 및 방향이 reservoir 형성에 미치는 영향, micro seismic sensing 기술을 활용한 reservoir 규모파악 (Hiroshi et al., 2000, Tishner et al., 2007), modeling 및 tracer를 이용한 지열유체 순환 및 lifetime 결정 (Hardeman et al., 2000, Sarkir et al., 2000), 경제적 심부천공 기술 등에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

## III. 국내 지열발전 기술 현황

### 3-1. 국내 지열자원 분포 및 심부지열 개발

1970년대까지 국내 지열연구는 주로 온천조사였다. 1980년대 들어서면서 관련 연구소와 학계가 온천조사 뿐만 아니라 지열류량에 대한 연구도 비로소 수행하기 시작하였다. 이후 산발적으로 국내 지열자원에 대한 조사가 행해지다가 2003년 한국지질자원연구소에서 기존의 온천시추 등의 자료를 수집하고 암석의 열물성을 측

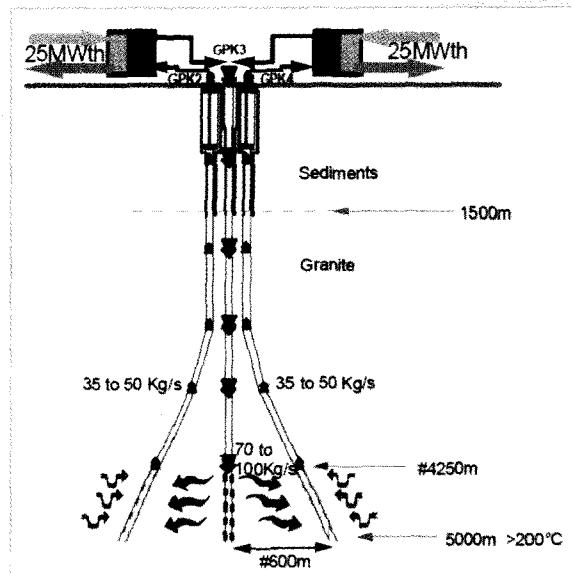


그림 7 Soultz EGS 프로젝트

정하여 2007년 기준으로 총 359개의 지열류량 자료와 580개의 지온증가율 자료, 또한 1,560개의 암석 샘플에 대한 열전도도를 측정하여 남한에 대한 지온증가율 분포도, 지열류량 분포도 그리고 지역별, 지질별 암석의 열전도도 분포가 작성되었다. 따라서 각 깊이에서의 지중온도는 지열에너지 부존량 산출에 가장 큰 영향을 끼친다. 우리나라 지하 1 km에서 온도는 23.9~47.9°C, 2 km에서 온도는 34.2~79.7°C, 3 km에서 온도는 44.2~110.9°C, 4 km에서 온도는 53.8~141.5°C 그리고 5 km에서 온도는 63.1~171.6°C의 온도 분포를 보이고 있다. 우리나라 지중온도가 높은 지역은 경상도 남·북부, 전라북도 중·동부, 경기도 중·남부 그리고 강원도 중부지역에서 높은 값을 보이고 있다. 이렇게 축적된 자료를 바탕으로 우리나라 지하 1 km~5 km 심도에서 EGS 기술을 통하여 추출가능한 지열에너지 자원의 총량을 산출한 결과 총 484억 TOE에 이르는 것으로 나타났으며, 이는 2006년 우리나라 전체 1차에너지 총소비량 (2,33억 TOE)의 약 200배에 해당되는 막대한 양이다(박성호 등, 2008). 이 양은 전체 우리나라 면적에서 약 2%를 개발하였을 때를 가정한 것으로 실제 개발 가능한 양은 수용처의 분포, 심부굴착기술, 열변환기술, 열수송기술 등에 따라 달라질 것이다.

국내 심부지열 개발은 2003년에 이르러서 본격적으

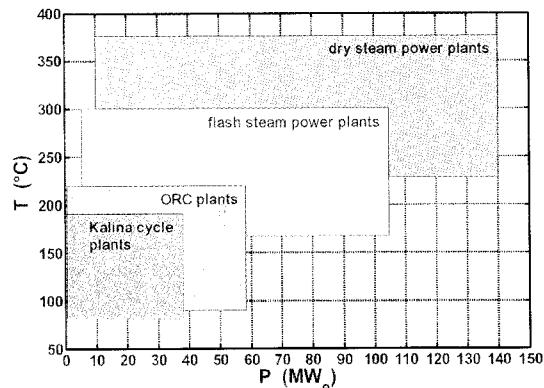
로 경상북도 포항시 흥해읍에서 지하 2 km 심도에서 75 °C 온도의 지열수를 개발하여 주변의 아파트단지의 지역난방 및 시설영농, 양어 등에 활용을 목적으로 하는 연구가 시작되어 1.5 km 심도 시험 시추공에서 온도 51 °C, 하루 560톤의 지열수 개발에 성공하였고, 본격적인 지열수 개발 및 활용을 위해 현재 2,385 km 심도까지 대구경 개발시추공의 시추가 완료된 상태이다.

### 3-2. 지열발전 기술개발 과제

우리나라는 비화산지대이며 지중온도가 가장 높은 지역의 5 km에서 약 170°C 내외이므로 외국에 비해 지온경사도가 크지 않은 편이다. 그리고 3 km 이상에서는 지하대수층이 거의 존재하지 않기 때문에 지열발전을 위해서는 EGS 기법을 도입할 수밖에 없는 실정이다. 그리고 지열수를 확보할 수 있는 온도범위가 약 100~150 °C 정도이므로 이에 적합한 지열발전 플랜트를 선정할 필요가 있다. 일반적으로 지열발전에 적용되는 플랜트는 건증기 지열발전, 플래쉬증기 지열발전, 바이너리 사이클 지열발전으로 분류할 수가 있으나 [그림 8]에서 살

펴보면 국내 여건에 맞는 방식은 바이너리 사이클 발전으로서 ORC 플랜트 또는 Kalina 사이클 플랜트가 적합하므로 이에 대한 기술 개발이 적극적으로 이루어져야 한다.

따라서 국내 지열발전의 기술개발에 있어서 핵심요소는 심부천공 및 EGS를 위한 인공파쇄기술과 지상 플랜트로서 저온지열 발전 플랜트의 기술확보가 필요한



지열발전을 위한 지열자원의 온도 범위와 각 방식별 발전량  
(Bandi et al., 2006)

### EGS를 통한 지열발전

#### EGS 기술의 초기 실현으로 지열에너지로 이용한 전기생산 및 집단 지역난방 공급

- ① 심부 시추를 통해 지하 5km까지 시추하면 지온은 150°C 이상이 된다.
- ② 주입공에 고압으로 물을 주입하면 수압파쇄에 의해 심부 암석에 군열이 발생한다.
- ③ 주입된 물은 군열을 따라 이동하면서 지온에 의해 뜨겁게 대워지고, 대워진 지열수는 생산공을 통해 지상으로 출력된다.
- ④ 생산정으로부터 생산된 150°C 이상의 지열수를 이용하여 전기를 생산한다.
- ⑤ 발전에 이용된 후 지열수는 다시 집단 지역난방-유리온실-양어장에 순차적으로 공급되어 열에너지로서 활용되고 다시 주입정을 통해 영속에 재주입 된다.

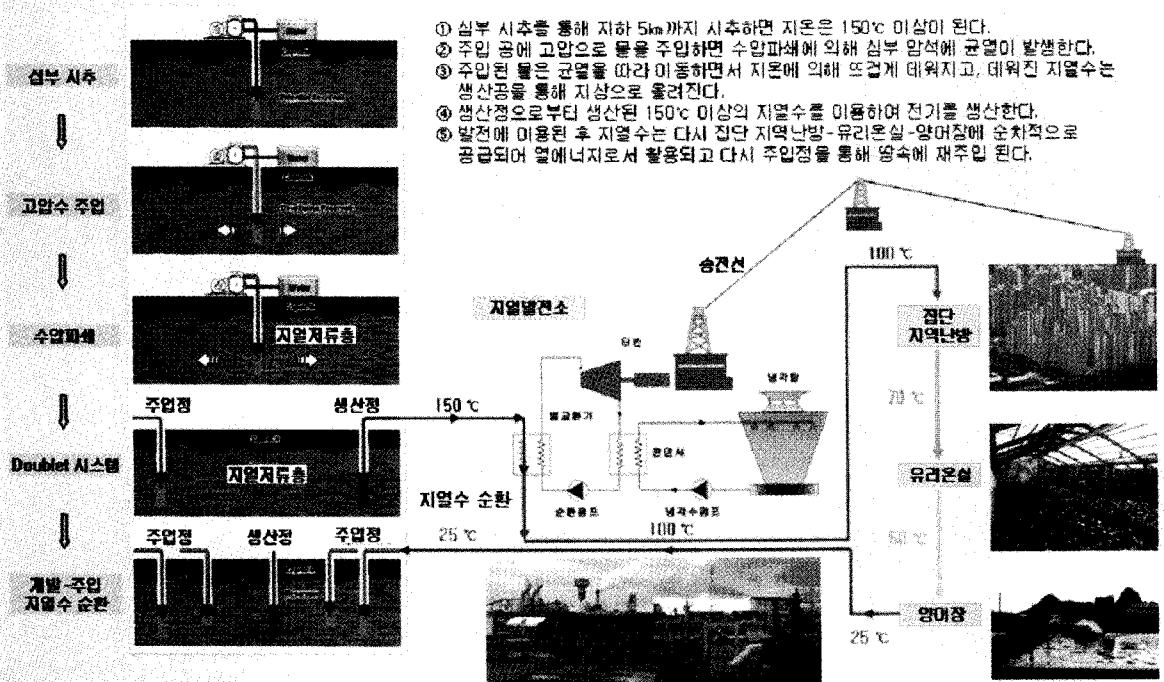


그림 9 EGS를 통한 지열발전 및 지역열공급 개략도

설정이다. 이와 같은 기술개발이 완성되면 그림 9과 같아 발전 뿐만 아니라 집단지역난방, 온실 및 양어장 등에 도 열공급이 가능한 열병합발전이 가능하게 될 것이다.

#### IV. 결 론

지열은 날씨와 기온 등에 영향을 받지 않고 연중 가동할 수 있어 기저부하를 담당할 수 있는 유일한 신재생에너지 자원이므로 이에 대한 기술개발이 시급하다. 화산성 고온 지열지역이 아닌 우리나라에서도 심도 5km에서의 지온은 최대 약 170°C로 EGS 기술을 이용한 지열발전이 가능할 것이다. EGS 기술로서 상업적 성공을 이룬 것은 세계적으로 2~3개 사례에 불과한 신기술로서, EGS 기술의 국내 조기 실현으로 기술 선점 및 해외 수출을 모색할 필요가 있다. 그리고 심부 지열자원은 국내 어디에나 부존하는 ubiquitous 자원이며 이산화탄소 배출이 전무한 청정 국산 에너지 자원이나, 이의 개발에는 높은 초기 투자비와 risk를 요하므로 민간업체의 투자가 제약을 받는다. 따라서 정부의 적극적인 지원 하에 산·학·연 중심으로 시범보급이 우선 이루어진 후 민간의 자발적 투자를 통한 지열 개발을 유도할 필요가 있다.

#### 참고문헌

1. 지열냉난방시스템 성능평가 및 엔지니어링 기술 확보, 산업자원부(2005. 5.)
2. MIT, The Future of Geothermal Energy, 2006.
3. EurObser'ER/EU, "Geothermal Barometer - 9564.6MWthe and 854.6MWe in 2006", Systemes Solaires, 181, pp.49 ~ 66 (2007)
4. 박성호, 지열에너지 자원 활용을 위한 한국의 지열 에너지 부존량 평가, 공주대학교 대학원 석사학위 논문 (2008)
5. Clauser, C., Geothermal Energy, In: K. Heinloth (Ed), Landolt-Bornstein, Group VIII: "Advanced Materials and Technologies", Vol. 3 "Energy Technologies", Subvol. C "Renewable Energies", 480-595, Springer Verlag, Heidelberg-Berlin (2006)
6. 이태종, 심부 지열에너지 자원의 개발 및 활용, 지열에너지저널 Vol. 4, No. 2 (2008)
7. 나상민, 세계 지열발전 현황 및 EGS 지열발전, 지열에너지저널 Vol. 4, No. 2 (2008)
8. 이태종, 우리나라 심부 지열에너지 개발 및 활용 현황, 지열에너지저널 Vol. 4, No. 2 (2008)