

## 한국형 지열발전 타당성 연구

임 효 재<sup>†</sup>, 권 정 태, 김 금 수\*, 장 기 창\*\*

호서대학교 기계공학과, \*호서대학교 경제학과, \*\*한국에너지기술연구원 태양열지열연구센터

### A Feasibility Study on Geothermal Power Plant in Korea

Hyo Jae Lim<sup>†</sup>, Jung Tae Kwon, Geum Soo Kim\*, Ki Chang Chang\*\*

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan, 336-795, Korea

\*Department of Economics, Hoseo University, Cheonan, 330-713, Korea

\*\*Solar Thermal and Geothermal Research Center, KIER, Daejeon, 305-343, Korea

**ABSTRACT:** Geothermal energy is the heat contained in the earth and its internal fluids. Geothermal energy is stored as sensible or latent heat. Supplied by both internal and external sources, it represents a vast supply which is only started to be tapped for generation of electric power. In general, this is natural dry or wet medium to high enthalpy steam at temperatures above 150°C. For some time, binary systems employing substances with a lower boiling point than water in a secondary circuit have been used to generate vapor for driving turbines at a lower temperature level. The utilization of binary plants and the possibility of production from enhanced geothermal systems can expand its availability on a worldwide basis. The geothermal electricity installed capacity is approaching the 10,000GW threshold. Geothermal energy is not present everywhere, but its baseload capability is a very important factor for its success.

**Key words:** Geothermal energy(지열 에너지), Power plant(발전소), Dry steam(건증기), Wet steam(습증기), Binary power plant(바이너리 발전소)

#### 기 호 설 명

EJ : 열 에너지 (Exa Joule)

GWh: 전기 발전량 [Gigawatt hour]

#### 1. 서 론

지금까지 국내에서 지열에너지 이용은 주로 열 펌프를 활용한 냉난방 시스템에 국한되어 왔다.

그러나 선진국에서는 지열에너지를 이용한 발전 시스템을 적극적으로 연구, 설치하여 친환경적인 에너지보급에 적극 나서고 있는 실정이다.

따라서 지열에너지를 활용한 발전시스템을 국내에서 연구개발하고 보급할 경우 기술력 향상은 물론 일자리 창출과 국내 기술의 장점인 플랜트 산업의 기술력 향상은 물론 수출로 및 산업화를 통한 일자리 창출이 기대된다.

본 연구에서는 세계 각국에서 설치 및 운영되고 있는 지열발전 시스템을 조사하고, 이를 바탕으로 한국의 지질특성과 지형에 적합한 지열발전 방식을 제안하고자 한다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-540-5802; fax: +82-41-540-5582

E-mail address: hylim@hoseo.edu

## 2. 지열 발전의 특징

지열에너지는 지표면으로부터 깊이에 따라 천부지열(shallow geothermal)과 심부지열(deep geothermal)로 구분된다. 천부지열의 온도는 지형과 지역에 따라 다소 차이가 있지만 대략 10~20℃정도이며 심부지열은 40~150℃이상의 온도를 나타내고 있다.

지열에너지를 활용하는 측면에서 보면, 직접이용(direct use)과 간접이용(indirect use)방식으로 구분할 수 있다. 직접 이용방식은 지중의 중·저온 에너지를 열펌프나 냉동기 같은 에너지 변환기기의 열원으로 공급하여 냉난방, 시설영농 및 지역 난방 등에 활용하는 기술을 뜻한다. 그리고, 간접 이용 방식은 대략 80℃ 이상의 중·저온수 나 100℃ 이상의 증기를 끌어올려 지열발전에서 활용하는 기술을 말한다.

### 2.1 지열 에너지 특징

Fig. 1은 지열에너지 자원의 순환과정을 개략적으로 나타낸 것이다.

지열에너지의 근원은 지구 내부 마그마다. 이 마그마의 뜨거운 열이 지표면을 향해 이동하며, 지상에서 대기 중으로 발산한다.<sup>(1-4)</sup> 따라서 지중 암반층의 온도는 지구 중심부로 향할수록 증가하며, 온도 기울기가 형성된다는 것과 같은 의미로 볼 수 있다.

지열 온도 기울기는 지각 내에서 깊이에 따라 온도가 증가하는 비율을 뜻한다. 평균 지온 증가율은 100m당 2.5~3℃인 것으로 알려져 있으며,

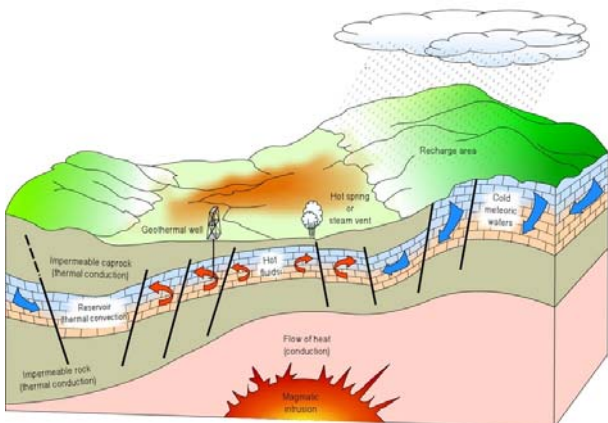


Fig. 1 Ideal geothermal system.

이 증가율을 이용하여 특정 깊이에서의 지중 온도를 예측할 수 있다.

그러나 지온 증가율이 이러한 평균값에서 벗어난 지역들이 있음을 알아야 한다.

심부 기반암이 급속하게 침강하여 형성된 분지에 지질학적으로 '매우 젊은' 퇴적물이 쌓여있는 경우, 지온 증가율은 1℃/100m 보다 작을 수 있는, 반면 지온 증가율이 평균보다 10배 이상 크게 나타나는 지역도 있다.<sup>(1, 2)</sup>

### 2.2 지열 에너지의 분류

지열자원에 대한 정의와 분류는 매우 다양하다. 현재 가장 널리 사용되는 정의와 분류법 몇 가지를 열거하고자 한다. Muffler et al.<sup>(3)</sup>에 따르면, 우리가 일반적으로 말하는 지열자원이란, 개발 가능한 원시자원량이다. 이는 특정지역의 국지적인 연평균기온을 기준으로 지표와 그 하부 지각의 특정 깊이 사이에 저장되어 있는 지열에너지를 총칭하는 의미로 사용한다.

이러한 지열 에너지를 활용하기 위해 시추, 지하화 및 지질학적 증거 등으로 특성이 확인된 자원으로 다른 에너지원에 비해 경쟁력이 있는 비용으로 채취할 수 있는 에너지를 포함한다. Fig. 2는 이러한 내용과 전문가들이 사용하고 있는 여러 용어를 도식화한 것이다.<sup>(3,4)</sup>

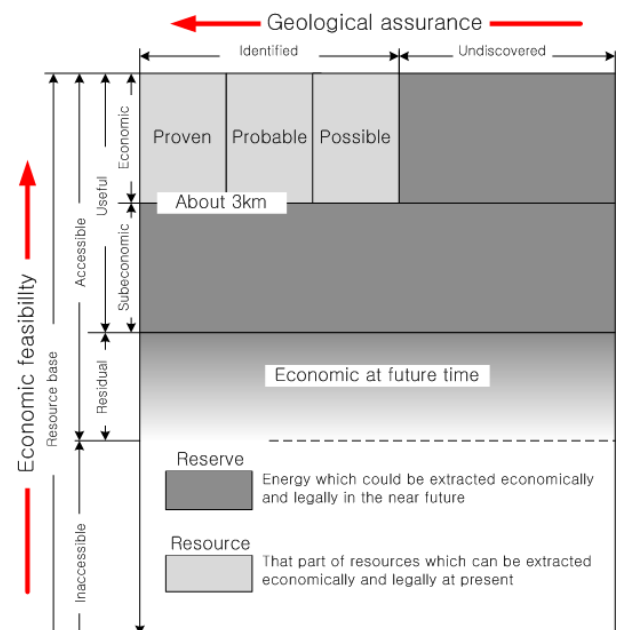


Fig. 2 Geothermal energy resource classification.

Table 1 Geothermal resource classification through temperature.

Category	Muffler and Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter and Cormy (1990)	Nicholson (1993)
low enthalpy	<90°C	<125°C	<100°C	≤150°C
Intermediate enthalpy	90~150°C	125~225°C	100~200°C	-
High enthalpy	>150°C	>225°C	>200°C	>150°C

그러나 지열 에너지 분류에 있어 지하 심부의 고온 암체로부터 지표까지 열을 전달해 주는 매개체 역할을 하는 지열유체의 엔탈피를 기준으로 구분하는 것이 가장 보편적이다. 엔탈피는 온도에 비례하고 유체에 함유된 열량을 나타내기 위해 사용되며, 그 대략적인 ‘가치’를 나타낸다.

Table 1은 엔탈피에 따른 지열자원 분류로 나타낼 수 있다.

### 3. 지열 발전 방식

지열 발전은 지열에너지를 이용하여 전력을 생산한다. 지열 에너지 활용면에서 보면 간접적으로 이용하는 것이다. 즉 땅이 가지고 있는 에너지를 사용자에게 공급하는 직접이용방식과는 달리 지열 에너지를 전기로 변환한 후 사용자에게 공급한다.

지열발전 직접이용방식은 터빈 구동에 필요한

고온의 열원을 지중에서 직접 추출한다. 수백 m에서 수 km로 천공된 보어홀을 통해 지열수 또는 증기를 추출하여 터빈 구동의 열을 추출한다. 건증기(dry steam) 지열발전, 습증기 또는 플래시증기(wet or flash steam) 지열발전, 바이너리(binary)사이클 지열발전이 여기에 속한다.

간접이용방식은 열원을 인위적으로 만들어 터빈을 구동한다. 지중의 뜨거운 암반층까지 보어홀을 시추하고, 이 안으로 물을 주입하여 고온의 물이나 수증기를 만든 후, 이를 다시 지상의 터빈으로 공급하여 전기를 생산하는 방식이다. 이 기술은 EGS(Enhanced Geothermal Systems) 지열발전으로도 불린다. 이는 3세대 지열 활용기술로서, 현재 미국을 비롯한 유럽의 선진국들이 연구 개발에 많은 투자를 하는 분야이다.

Fig. 3은 지열발전을 위한 지열자원의 온도 범위와 각 방식별 발전량을 비교한 것이다.<sup>(4)</sup>

#### 3.1 건증기 지열 발전

건증기 지열 발전은 가장 오래된 지열 발전 방식이다. 그러나 증기발생 지역에 설치되어야 하는 지역적인 제약조건으로 방식으로 널리 보급된 방식은 아니다. 따라서 국내에 이 방식을 도입하기에는 지역적인 제약조건이 따른다.

본 방식은 완전 포화상태 또는 약간의 과열상태의 증기를 하나 또는 여러 개의 보어홀에서 추출한 후 배관을 통해 발전 설비의 터빈으로 직접 보내어 전기를 생산한다. 이때 보어홀 상부와 증기배관 사이에 이물질 제거기를 설치하여, 터빈 블레이드가 손상되는 것을 방지한다. Fig. 4는 건증기 지열발전의 개략도를 나타낸 것이다.<sup>(4)</sup>

#### 3.2 습증기 지열 발전

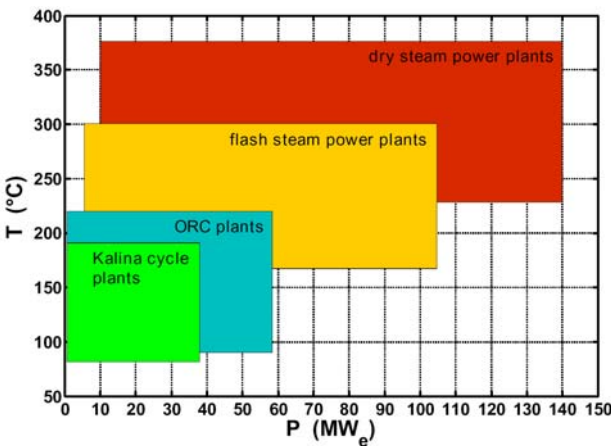


Fig. 3 Power range and characteristic reservoir temperatures for generation of electric power.

Fig. 5는 2단 습증기 지열발전의 개략도를 나타낸 것이다.<sup>(4)</sup>

습증기 지열발전은 현재 가장 널리 보급된 방식이며, 터빈의 단에 따라 1단, 2단 등으로 구분할 수 있다.

습증기 지열발전 플랜트의 보어홀에서 추출되는 증기는, 지열수와 증기의 2상 혼합물(two phase mixture)이다. 이 혼합물의 건도(quality)는

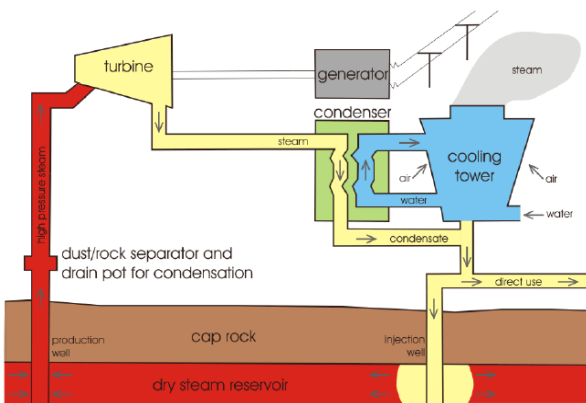


Fig. 4 Dry steam power plant.

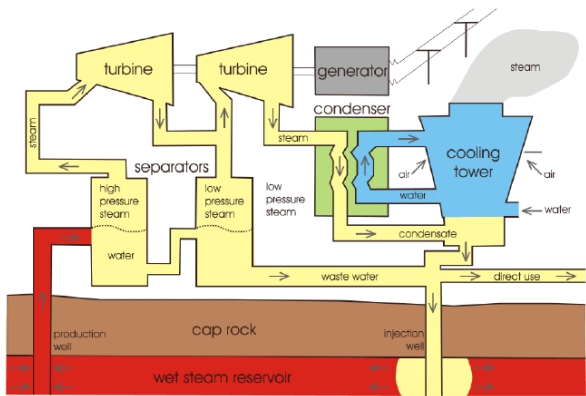


Fig. 5 Double flash wet steam power plant.

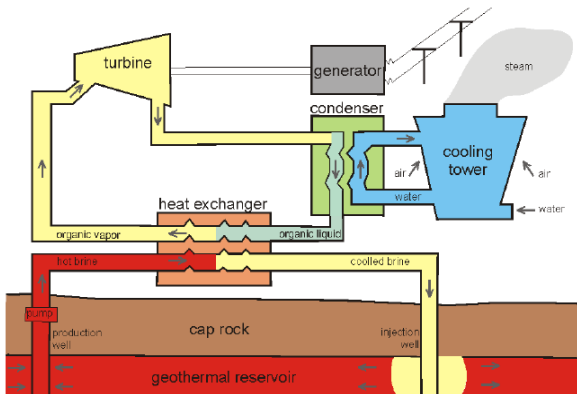


Fig. 6 Binary power plant.

저장소 내 지열유체의 상태와 보어홀의 크기에 좌우되는 값이다.

아울러 건도는 보어홀 헤드의 압력에 영향을 받는다. 압력은 헤드밸브 또는 오리피스(orifice plate)에 의해 조절되고, 보어홀에서 추출한 습증기를 기상과 액상으로 분리한 후 기상인 증기만 이용한다.

단 습증기 사이클은 기/액분리기에서 분리된 액상을 주입정으로 바로 환원하는 방식이다. 이때 환원되는 지열수는 높은 온도를 유지하기 때문에 지역난방 등에 활용되기도 한다.

반면 기계적인 장치를 통해 지열수를 1단 사이클의 증기압 보다 상대적으로 낮은 압력으로 증발시킨 후, 이 증기로 저압 터빈을 추가로 구동하는 방식이 2단 습증기 사이클이다.

### 3.3 바이너리 사이클 지열발전

바이너리 사이클 지열발전 방식은 지하에서 추출한 저온의 지열수(70~120℃)는 터빈과 접촉하지 않고, 중간에 설치한 열교환기에서 비등점이 지열수보다 낮은 2차 유체를 증발시킨 후, 이 증기를 이용하여 터빈을 구동한다.

즉 2차 유체의 증발에 필요한 열원이 지열수인 것이다. Fig. 6은 바이너리 사이클 지열발전 플랜트를 나타낸 것이다.<sup>(4)</sup>

바이너리 사이클의 2차 유체로 유기화합물을 작동유체로 사용하기 때문에 유기랭킨사이클로도 불린다.

본 방식의 장점은 낮은 온도의 지열수를 열원으로 이용하여 발전이 가능하다는 것이다. 그러나 효율이 상대적으로 낮기 때문에 지역난방과 연계한 열병합 발전 방식을 채택하여 경제성을 확보하고 있다.

### 3.4 EGS 지열발전

EGS 발전은 자연적인 열원을, 인공함양한 지열수를 통해 발전한다. 예를 들어, 지열발전소의 터빈을 구동하기 위한 지열수는 사용 후 특정한 환원정을 통하여 저류층으로 다시 주입할 수 있다. 이러한 방법으로 자연적인 함양에 인공적인 함양이 더해지게 되며, 재주입을 통해 지열발전소 가동에 따른 환경충격을 크게 줄여주는 한 방

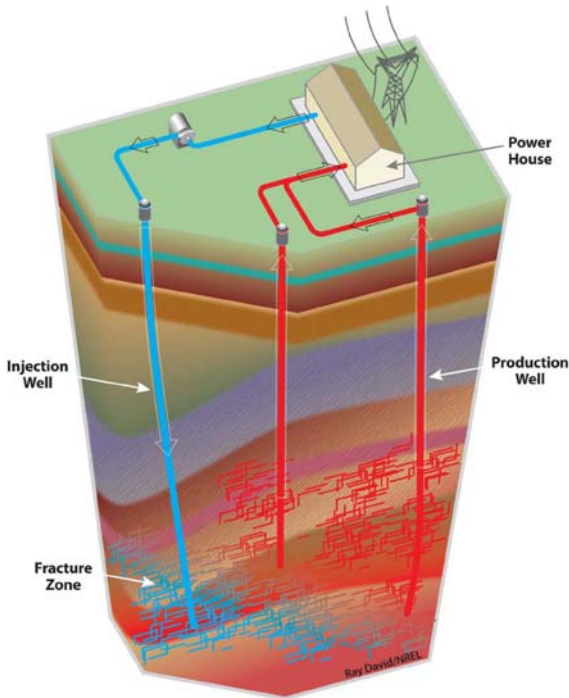


Fig. 7 EGS power plant system.

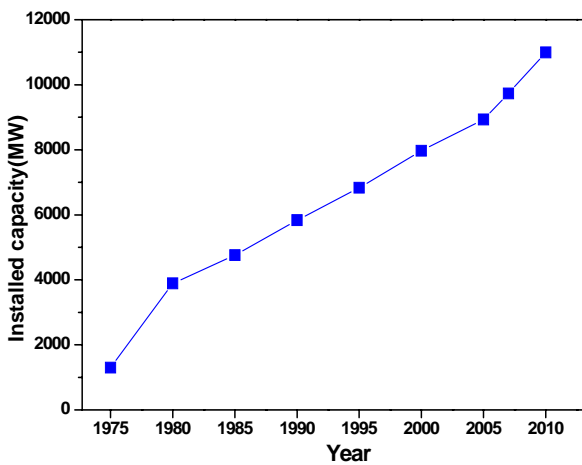


Fig. 8 Installed capacity geothermal power plant.

법으로 널리 채택되고 있다.

이러한 인공함양은 지열에너지의 재생 또는 유지에 기여할 수 있다. 예를 들어 세계에서 가장 큰 지열지대인 미국 캘리포니아주 Geysers에서는 1980년대 말 지열유체 부족으로 발전량이 감소되었으나, 재압입으로 발전량이 증가하였다.

그리고 1970년대에 시작된 HDR(Hot Dry Rock)프로젝트는 지하 심부에 있는 고온의 암체에 고압의 물을 주입하여 파쇄대를 형성하는 수압파쇄로 인공적인 저류층을 만들었다. 지열수는 이렇게 형성된 인공적인 파쇄대를 통해 이동하게 되고, 주변의 암석으로부터 열을 추출하여 자연적인 저류층과 같은 역할을 하게 된다. 이렇게 형성된 고온의 지열수를 추출하여 발전에 이용한다.

Fig. 7은 EGS 발전의 개략도를 나타낸 것이다.

#### 4. 지열 발전 플랜트 현황

지열 자원 부존량은 연간 약 189EJ을 생산할 수 있는 양이며, 이는 전세계적으로 연간 1차 에너지 소비량의 절반가량을 공급할 수 있다. 그러나 2005년 말 까지 사용한 양은 추정 공급량의 약 1%에 불과한 실정이다.<sup>(3,5)</sup>

##### 4.1 세계 현황

최초의 지열발전은 1904년에 이탈리아 라데렐로에서 시작되었으며, 이어서 미국, 뉴질랜드, 멕시코, 일본 등이 지열 발전을 적극적으로 보급하고 있다. 1960년대에는 세계 최대 규모의 건증기 발전 시스템을 미국 캘리포니아 Geysers에 설치

Table 2 Power Plant distribution.

Category	Installed Capacity (MW)	Percent (%)	Installed capacity (No. of Unit)	Percent (%)
Dry steam	2,545	28	58	12
Single flash	3,294	37	128	26
Double flash	2,293	26	67	14
Binary/Combined cycle/Hybrid	682	8	208	42
Back Pressure	119	1	29	6
Total	8933	100	490	100

하였다. Fig. 8은 1975년부터 2007년까지의 지열 발전 플랜트 설치 용량이며, 2010년은 추정치를 나타낸 것이다.<sup>(5,6)</sup>

Table 2는 전 세계에 설치된 지열발전 플랜트를 방식별로 구분한 것이다. 전체 490기의 플랜트가 건설되었으며, 총 설치 용량은 8,933 MWe이다.<sup>(7)</sup> 설치용량 면에서 1단, 2단 습증기 방식이 60%이상의 점유율을 나타내고 있다

그러나 바이너리 사이클 발전시스템의 설치용량은 8%에 불과하나, 설치 유닛부분에서는 약 50%로, 타 방식에 비해 두 배 이상의 점유율을 나타내고 있다. 이는 지열 발전이 더 이상 고온의 지열 자원을 가지고 있는 국가에서만 활용할 수 있는 분야가 아님을 알 수 있다.

## 5. 결 론

신·재생 에너지 중 지열에너지는 무한정한 자원으로 평가되고 있으며, 특히 미국이나 유럽에서는 지열에너지를 활용한 냉난방 및 발전분야에서 큰 성과를 거두고 있다.

본 연구에서는 한국형 지열 발전 플랜트에 관한 본격적인 연구 및 도입에 앞서 지열 발전 이용방안, 지열 발전 시스템 특징 그리고 국내외 현황을 살펴보았다.

지속 가능한 지열에너지를 적극 활용함으로써 에너지 비용을 절감하고 환경 친화적인 전력공급 시스템을 구축할 수 있다. 따라서 한국형 지열발전 플랜트 도입을 위해서는 다음과 같은 항목의 검토가 필요할 것으로 생각된다.

- (1) 플랜트 시스템 설계 및 보어홀 시추
- (2) 플랜트 시공 및 제어기술
- (3) 현장 성능진단 및 유지관리 기술
- (4) 지열자원 탐사 및 자원관리 기술
- (5) 플랜트 시스템 표준 모델 구축

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 2008년 신·재생에너지기술개발사업(2008-N-GE04-P-02-0000)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Dickson, M. H. and Fanelli, M., 2006, Geothermal energy Utilization and technology, Earthscan, London, UK.
2. Mary H. D. and Mario F., 2004, What is geothermal energy, International Geothermal Association, Pisa, Italy.
3. Muffler, P. and Cataldi. R., 1977, Methods for regional assessment of geothermal resources, Geothermal Resource Assessment and Reservoir Engineering, Laderello, Italy,
4. K. C. Lee, 1996, Classification of geothermal resources, Geothermal Reservoir Engineering, California, pp. 85-92.
5. Ruggero Bertani, 2007, World geothermal generation in 2007, Proceedings, Renewable energy business development, Rome, pp. 8-19.
6. Clauser, C., 2006, Geothermal energy, K. Heinloth ed., Heidelberg, Berlin, pp. 493-604.
7. Ruggero Bertani, 2005, The International Journal of Geothermal Research, Vol. 34, No. 6, pp. 651-690.