

비화산지대에서의 지열발전 시스템

전 종 욱

(주) 이노지오테크놀로지 시스템개발부 부장

1. 지열에너지의 개요

지열에너지는 지구 내부로부터 방출되는 사용가능한 열에너지를 말하며, 에너지의 정도에 따라 전력생산과 직접이용(집단난방, 온수생산, 수경재배, 원예, 등) 그리고 산업용으로 사용될 수 있다. 게다가 항온성을 갖춘 천부의 지중 열원은 지열히트펌프의 사용으로 지열에너지 사용을 보다 널리 인식시키고 있다.

세계적으로 지열을 이용한 전력생산량은 2009년 말 기준으로 10.7 GW에 이르고 직접이용 방식으로는 50.6 GW의 지열이 사용되고 있다. 지열발전소는 기저부하로 사용할 수 있는 전력(용량 가용율 75%) 약 67 TWh를 생산했다. 직접 이용되는 지열로는 440 PJ이 이용되었고 지열히트펌프를 이용한 지열사용이 약 50%에 이른다.

지열을 이용하는데 있어서 특별히 유용한 먼은 기저부하 전력생산가능, 계절에 영향을 받지 않음, 기온의 변화나 기후변화에 영향을 받지 않음, 중압집중이나 분산형 에너지 발전시스템이 모두 가능, 세계 어디서나 에너지원 확보가능, 직접이용 가능 등을 들 수 있다.

이와 같이 유용한 지열에너지원이 빠르게 확산되지 못하고 있는 이유로는 과도한 초기투자비, 에너지원 개발의 불확실성, 지열에너지의 인식부족과 환경문제에 대한 인식부족 등을 들 수 있다.

1.1 지열에너지의 재생능력

지열에너지원은 뜨거운 지구내부로부터 지표로 올라오는 에너지원으로 일반적으로 지표에서 하부로 내려갈수록 온도가 상승하게 된다. 지구내부의 에너지원 부존은 인류가 필요로 하는 에너지량에 비할 수 없이 크다. 만약 지중으로부터 방출되는 열에너지율이 지표로부터 소산되는 열에너지율보다 크지 못하다면 지열에너지는 지속성이 없는 신재생에너지가 될 것이다. 지표로 소산되는 열에너지율은 연간 약 10^{20} J로 오늘날 세계 에너지사용량과 유사하다. 그러나 자연적으로 단위면적당 지표에서 소산되는 에너지 (50 kW/km^2)는 지구가 내부로부터 방출할 수 있는 에너지원에 비하면 너무나 작은 부분에 지나지 않기 때문에 상업적으로 지열에너지를 개발하는 것을 Heat mining 또는 Heat extraction이라고 부른다.

1.2 지열에너지원의 부존량

세계적으로 지중 5 km 깊이까지 부존하는 지열에너지원은 약 1.46×10^{26} J (Aldrich et al, 1981)로 추산된다. 이중 1% 정도만 개발이 가능하다고 한다면 1.46×10^{24} J이 될 것이고 이는 전 세계 연간 에너지 사용량인 4.18×10^{20} J을 고려했을 때 인류가 3,500년을 사용할 수 있는 에너지량이다 (Johansson, 2005). 물론 이같은 가정은 아주 보수적으로 잡은 것이다. 인류의 기술이 발전하면서 이미 지하 10 km까지 지열자원의 개

발이 가능하므로 지열에너지의 부존량은 이보다 훨씬 클 것으로 예상된다. 이상의 결론은 인류의 에너지 사용량이 불확실하게 지속적으로 증가하지 않는다는 가정 하에 내린 결론으로 인류의 인구와 에너지 사용량은 2050년을 지나면서 줄어들 것이라는 발표에 기초한 것이다. (그림 1)

지열에너지자원은 Heat mining이 성공적으로 이루어졌을 경우 신재생에너지 원으로 예상보다 더 긴 시간동안 에너지를 공급할 수 있다. 예를 들어 일반적인 유효 발전기간인 30년 동안 지열이 사용된 곳은 발전을 멈춘 후 100년 내에 지열에너지원이 자연적으로 완전히 복원된다(Pritchett, 1998). 지열에너지 자원은 완전한 신재생에너지 원으로서 고갈되지 않는 에너지원이라 말할 수 있다.

2. 지열자원에 따른 다양한 지열타입

그림 2은 환태평양 화산대를 나타내며 활화산과 지진이 빈번하게 일어나는 곳이다. 환태평양 화산대는 지구의 지각을 이루는 tectonic plates의 경계선으로 정의된다. 기존의 지열발전용량의 대부분이 이 지역에서 발전되고 있으나 기술의 발달로 비화산지대에서도 지열발전소의 개발이 활기

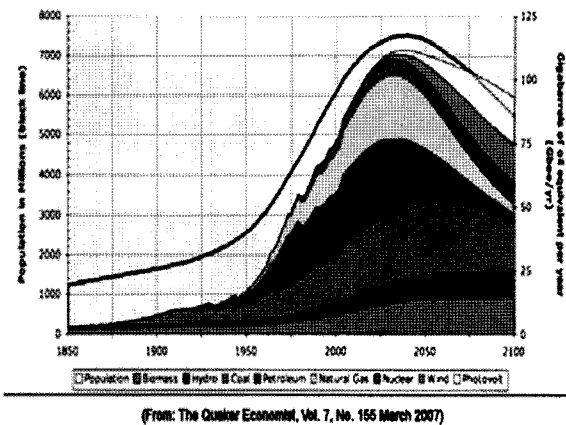
를 띄고 있다. 지열원의 형태에 따른 다양한 지열 시스템타입을 알아보자.

기본적으로 2가지 타입의 지열시스템을 정의할 수 있다. 전도 지열시스템과 대류 지열시스템이다. 전도 지열시스템은 지구내부로부터 열전도에 의한 열류량이 고려되므로 지중으로 깊이 들어갈수록 고온의 온도를 확보할 수 있다. 대류지열시스템에서의 지중온도는 열유체의 대류현상 때문에 깊이에 무관하게 일정하게 나타난다. 일반적으로 불침투성의 덮개지층(cap rock)이 열유체의 상부를 덮고 있는 형태에서 대류지열시스템이 정의된다(그림 3).

지열원에 따라 비화산지대에서도 지열발전이 가능한 다양한 지열시스템으로 (1) 대류지열시스템, (2) EGS시스템(Enhanced Geothermal System), (3) 열전도율이 높은 지역의 퇴적분지 시스템, (4) 오일, 가스 생산공에서의 열수 시스템, (5) 지중고압 시스템, (6) 마그마이용 시스템 등이 정의될 수 있다.

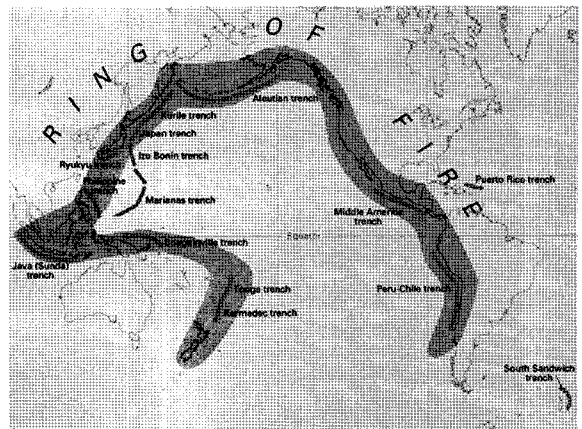
2.1 대류지열시스템

대류(열수)시스템은 약 20개국에서 수 십년동안 상업적 지열발전시스템으로 사용되어왔으나 그 활용가능 지역은 제한되어 있다. 대류시스템은

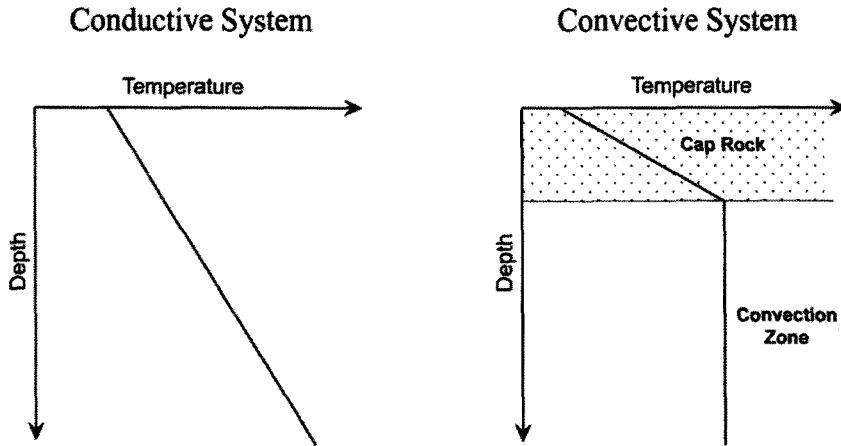


(From: The Quaker Economist, Vol. 7, No. 155 March 2007)

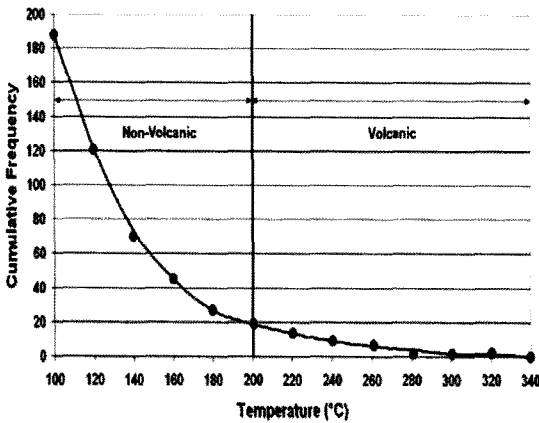
[그림 1] 세계인구와 에너지생산량 예상
(The Quaker Economist Vol. 7, No. 155, March 2007)



[그림 2] 지진과 화산활동이 활발한 환태평양 조산대



[그림 3] 전도와 대류 시스템의 정의



[그림 4] 미국 내 지열에너지 온도에 따른 장소 개수

열원의 종류에 따라 화산지대와 비화산지대 시스템으로 나눌 수 있다. 화산지대에서 대류현상의 열원유체의 에너지원은 마그마이고, 비화산지대에서 대류현상의 열원유체는 천수(meteoric water)로서 마그마는 존재하지는 않으나 지구내부 깊은 곳으로부터 방출되는 열로 천수가 가열되어 대류 순환하는 방식이다. 대부분의 지열발전 용량은 대류지열시스템으로 발전되고, 미국에서만 현재 3,000 MW의 전력을 생산한다. 비록 화산이 존재하지 않는 나라일지라도 비화산 대류지열발전시스템이 존재한다. 그림 4는 미국 내에서 온도에 따른 대류지열시스템의 개수를 분석한 결

과이다(Muffler et al. 1979). 200°C를 기준으로 화산지대와 비화산지대가 나뉘며 200°C보다 낮은 온도의 시스템들이 훨씬 더 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.2 EGS(Enhanced Geothermal System)

EGS방식은 주입정과 생산정 사이가 불침투성 이거나 매우 단단한 암석이 존재할 경우 수압과쇄법을 이용하여 인공적인 지열수 통로를 형성시키는 방법이다. 주입정으로 상온의 물을 고압으로 주입하여 인공파쇄대를 형성 시킨 후 주입수의 순환이 가능한 생산정을 만들어 지표의 물을 순환시키는 방법이다. 이 때 지중으로 유입된 물은 고압체의 열전도에 의해 온도가 증가한다. EGS는 열전도방식 지열시스템으로 수압파쇄방법을 이용하여 열원유체 저장용량과 유량을 증가시킨 경우이다. EGS는 이론적으로 세계 어디서나 발전 가능한 시스템이나 열원을 확보할 만큼의 충분한 깊이의 시추가 선결되어야 하고 기술적으로 보완해야 할 일들이 남아있다. 우선 바위에 충분한 파쇄대를 원하는 만큼 만들어내는 일, 생산정의 생산성에 대한 충분한 경제성 확보, 순환되는 열원유체의 단시간 냉각용량 최소화, 파쇄대로 주입되는 열원유체의 유실 최소화, 개발과정

중 야기될 수 있는 유도진동의 최소화 등이 좀 더 연구 발전되어야 할 과제들이다.

2.3 열전도율이 높은 지역의 퇴적분지 시스템

하부에 높은 열전도도를 가진 퇴적분지를 이용한 시스템으로 불투수성층(세일층 등)에 의해 대류현상은 존재하지 않는다. 이미 투수성을 갖고 있는 퇴적암층을 이용하므로 파쇄가 필요하지 않으나 적절한 이용 가능한 온도를 위해서는 충분히 깊은 위치에서 형성되어 있어야 하며 열원유체의 생산가능성도 충분히 검증되지 못했다. 일반적으로 열원이 높을수록 가온에너지 생산단가는 낮아지게 되어있고, 온도가 낮은 열원일수록 유량에 따른 생산단가가 크게 영향을 받는다. 퇴적분지 시스템은 낮은 온도에서도 높은 유량확보가 가능할 수 있는 시스템이므로 앞으로 충분히 개발 가능한 시스템이다.

2.4 오일, 가스 생산공에서의 열수 시스템

석유를 생산하는 과정에서나 수명이 다한 오일이나 가스 생산정에서의 열수분출은 일반적인 사실이다. 분출되는 열수를 에너지원으로 활용하는 시스템이기는 하나 보통의 경우 지열발전에 사용하기에는 온도가 낮고, 유량이 많지 않아 경제성이 떨어지는 시스템으로 여겨졌다. 현재는 지상설

비의 발달로 소규모 전력생산과 지역난방용으로 사용이 가능하다.

2.5 지중고압 시스템

장소의 제약을 가장 많이 받는 시스템으로 지중에서 주변 수력정압보다 충분히 높은 압력을 형성하고 있는 고립된 퇴적암층의 지열수가 갖고 있는 높은 압력에너지와 열에너지를 이용하는 시스템이다. 더욱이 고압의 지열수는 메탄가스가 용해되어 있을 확률이 높아 가스엔진 발전도 고려해 볼 수 있다. 지중고압 시스템은 높은 압력에너지, 고온의 지열수에너지, 가스에너지까지 활용할 수 있는 점에서 매력적인 시스템이기는 하나 현재까지 상업적으로 운전되는 곳은 없다.

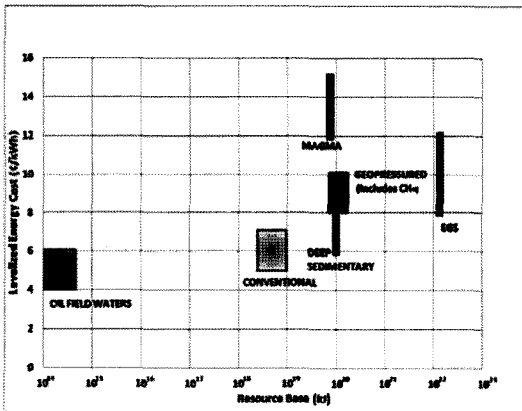
2.6 마그마이용 시스템

마그마를 열원으로 이용하는 시스템으로 이론적으로는 가능하나 기술적으로 많은 어려움을 가지고 있다. 마그마의 부존을 확인하기까지의 경제적

<표 1> 지열에너지 최대사용 15국가

지열발전		지열직접이용	
Country	GWh/yr	Country	GWh/yr*
United States	16603	China	20932
Philippines	10311	United States	15710
Indonesia	9600	Sweden	12585
Mexico	7747	Turkey	10247
Italy	5520	Japan	7139
Iceland	4597	Norway	7000
New Zealand	4055	Iceland	6768
Japan	3064	France	3592
Kenya	1430	Germany	3546
El Salvador	1422	Netherlands	2972
Costa	1131	Italy	2762
Turkey	490	Hungary	2713
Papua New Guinea	450	New Zealand	2654
Russia	441	Canada	2465
Nicaragua	310	Finland	2325

* 1000 GWh = 3.6 PJ



[그림 5] 지열에너지시스템의 발전비용과 에너지 공급능력

인 시추깊이 또한 일반적이지 못하다.

이상의 6가지 지열원에 따른 시스템들은 미국의 지열자원 MIT 보고서(2006)에 기초했으며 미국 내 지하 10 km 깊이의 활용가능한 지열에너지원은 EGS방식이 초기 투자비는 많으나 다른 지열 시스템에 비해 2차수(10^{25} → 10^{27})가량 더 큰 에너지로 보고되고 있다.

3. 지열발전 현황

3.1 세계 지열발전 현황

2009년 지열발전용량은 10.7 GWe에 이르고 67.2 Wh의 전력이 생산되었다. 이는 평균 6.3 GWh/MWe이며, 나라별 총 전력대비 지열발전량으로는 아이슬랜드(25%)가 가장 높고 엘살바도르(22%), 케냐와 필리핀(17%), 코스타리카(13%) 순으로 나타났다. 미국은 3,093 MWe의 전력생산용량으로 16,603 GWh의 전력을 생산하는 세계 최대 지열발전 국가이다. 표 1

국제에너지기구(IEA)의 에너지기술전망(Energy Technology Perspectives) 2010의 블루맵 시나리오에 따르면 지열발전의 전력생산량은 2050년까지 1000 TWh가 넘을 것이고 히트펌프를 이용한 지열이용은 현재의 20배가 넘을 것으로 추정되고 있다.

3.2 지열발전의 경제성

지열에너지를 위한 투자금액은 세계적으로 2008년에 25억 달러를 넘고 있다. 이는 전년대비 40%가 증가한 금액이다. 지열전문 인력으로 25,000 명이 고용되었고 6 GWe 이상의 새로운 지열발전 프로젝트가 진행중이며, 2015년에 운

<표 2> 지열발전을 위한 투자비분석

Exploration and resource confirmation	10 ~ 15%
Drilling	20 ~ 35%
Surface facilities	10 ~ 20%
Power plant	40 ~ 60%

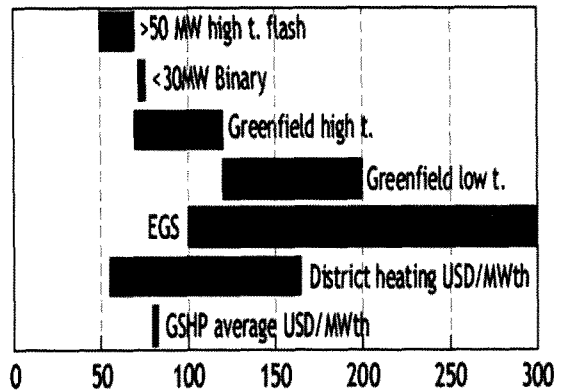
전될 예정이다.

2008년 기준 산간지역에 건설되는 지열발전소 초기 투자비용으로 플래시 방식은 1 kWe 당 \$2000에서 \$4500에 이르고 바이너리 방식은 \$2400에서 \$5900정도가 필요하다. 최근 플래시 플랜트로 전력을 생산할 경우 발전비용은 1 kWe 당 \$0.05에서 \$0.12, 바이너리 플랜트의 경우 약 \$0.07에서 \$0.2에 이른다. 지열을 이용한 지역난방을 하고 있는 유럽의 경우 1 kWe의 열량에 대한 생산비는 \$0.06에서 \$0.17까지 변한다.

지열발전소에 들어가는 초기투자비용은 열원의 온도와 압력, 지열저장소(Reservoir)의 깊이, 투수율, 유체의 화학적 성분, 위치, 드릴링 시장, 개발규모, 지상설비 타입과 개수, 신설과 증설여부, 개발비용은 또한 사용 자재들(기름, 철, 시멘트,…)의 가격에 크게 영향을 받는다. 2008년 이후 오일 가스 가격의 하락은 지열개발비용을 감소시켰다. 표 2는 지열발전을 위한 투자비를 분석한 데이터이다.

2020년에는 초기투자비가 약 5% 감소할 것으로 예측되고 있다. 우리나라와 유사한 비화산지대의 유럽에서는 (독일과 오스트리아에서 운전되는 소형지열발전소와 유사)저열원의 지열수를 활용하여 소형(수 MWe) 바이너리 발전시스템이 크

Generation costs (USD/MWh)



[그림 6] 지열발전비용 (IEA Geothermal implementing Agreement)

게 증가할 것으로 예상된다.

지열발전을 위한 투자비용은 kW당 \$5,900에 달하고 신재생에너지 FIT와 부수적 열원을 구매해주는 형태의 지원정책은 비화산지대 지열발전 사업의 경제적 자립도를 크게 증가시키고 있다.

지열발전의 경우 O&M 비용이 연료를 사용하는 일반발전설비에 비해 많이 낮다. 일반적으로 O&M 비용은 설비의 크기와 위치, 플랜트 타입, 그리고 원격조정 기능 등에 의해 좌우되는데 추가시추비용을 제외하면 규모가 큰 플래시 방식의 경우 \$9/MWh에서 소형 바이너리 방식의 \$25/MWh 수준이다.

지열발전이 여타의 신재생에너지원과 크게 차이를 둘 수 있는 점은 발전소의 운전성능에서 찾아볼 수 있다. 지열발전소의 용량 가용율은 75~95%, 부하율은 84~96%, 운전 가용율은 92~99%로 높은 수치를 나타낸다.

지열발전소의 경제적인 수명은 대체로 20~30년으로 계획된다. 뉴질랜드와 같은 신생 지열발전 개발에 소요되는 비용은 이미 고열원을 확보한 상태에서 약 \$50~70/MWh로 높은 경쟁력을 보이거나 미국의 경우 새로운 지열발전소를 위한 비용은 \$120/MWh로 보고되었다. 비화산지대의 저열원을 가진 유럽은 \$200/MWh이고 미국에서 보고한 EGS방식의 발전비용은 지하 4 km에서 300°C 온도를 확보할 경우 \$100/MWh, 지하 5 km에서 150°C를 확보할 경우 \$190/MWh로 나타났다. 유럽에서는 \$250~300/MWh까지도 보고 있다.

지열발전비용이 낮아지기 위해서는 시추비용의 감소, 고온고압 지중펌프의 운전신뢰성, 고온고압에서의 지중 환경 측정장비, 시추전의 예상 지열량의 정확한 진단, 인공파쇄법의 기술개발 등이 선행되어야 한다. 유럽에서는 2030년까지 일반적인 발전비용을 \$29/MWh으로 목표하고 있고 저열원이나 EGS방식은 \$74/MWh까지 낮추려고 노력 중이다.

3.2 지열발전의 환경영향성

지열자원의 개발은 환경영향력이 거의 없는 것으로 보고되고 있다. 지열발전소의 폐수에 포함된 소량의 화학성분(붕소, 비소)과 가스(황화수소, 이산화탄소)가 이슈가 되고 있으나 다양한 방법으로 이를 처리할 수 있는 기술(분리수의 재주입, 가스의 응축, 화학적 처리, 미네랄 추출 등)이 도입되어 더 이상 문제되지 않고 처리비용도 발전비용의 1~2%밖에 되지 않는다. 저열원의 지열발전시 발생하는 이산화탄소량은 0~1 g/kWh 정도로 무시할 수 있을 정도이고 대부분의 바이너리 방식은 열원유체가 폐회로로 순환되도록 설계된다. 그러므로 비화산지대의 지열발전방식은 Zero emission이라 볼 수 있다.

지진같이 느껴질 수 있는 유도진동은 몇몇 EGS R&D 프로젝트를 통해 환경/사회적 이슈가 되었다. 자칫 지진으로 오해될 수 있는 미세진동에 관한 국제적 규약과 조절방법에 관한 연구가 심도 있게 진행 중이다. 몇몇 고온의 지열발전지역에서의 지반침하 현상은 모니터링이 정형화 되었고 이를 최소화하기 위한 재주입 방법이 실행되고 있다.

4. 맺음말

지열에너지원은 이론적으로 인류가 존재하는 동안 충분히 사용할 만큼 부존하고 있다. 화산지대에서만의 전유물이었던 지열발전 시스템은 이제 다양한 연구와 기술개발로 전세계 어디서나 가능한 중요한 신재생 에너지자원이 되었다. 6가지의 지열에너지개발에 따른 분류에서 미국 내 개발 가능한 가장 많은 지열에너지는 비화산지대의 지열에너지 개발방식인 EGS방식으로 나타났다. 화산지대를 포함한 여타의 개발방식보다 월등히 높은 것으로 보고되었다. 화산지대에서만 가능했던 지열발전은 이제 세계적으로 신재생에너지의 주축으로 자리잡으려고 꿈틀거리고 있다. 선진국들은 지역의 제약을 받지 않는 EGS의 경제

성확보를 위해 지속적인 연구투자를 하고 있고, 비화산지대에서의 지열발전 산업을 성장시키기 위해 국가적인 지원을 아끼지 않고 있다. 기 확보된 최상의 환경영향력과 기술개발에 따라 지속적으로 높아지는 경제성, 높은 (용량, 부하, 운전)가 용율, 그리고 인류가 사용할 충분한 부존량은 지열발전 산업을 성장시키는 큰 밑거름이 되고 있다. 비화산지대인 우리나라도 선진국들의 지열발전에 대한 관심과 투자에 더 이상 좌시할 수 있는 시기가 아니라고 생각한다.

Reference

1. Aldrich, M.J., A.W. Laughlin and D.T. Gambill, 1981. Geothermal Resource Base of the World: A Revision of the Electrical Power Research Institute's Estimate. Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-8801-MS, University of California, Los Alamos, New Mexico, April, 1981.
2. IEA, 2010. Geothermal essentials report, 2010
3. Johansson, T.B. and J. Goldenberg, 2004. World Energy Assessment Overview: 2004 Update. UNDP, 2005.
4. 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.
5. Muffler, I.J., Editor, 1979. Assessment of Geothermal Resources of the United States - 1978, Geological Survey Circular 390. United States Department of the Interior, 1979.
6. Pritchett, J.W., 1998. Modeling Post-Abandonment Electrical Capacity Recovery for a Two-Phase Geothermal Reservoir: Transactions Geothermal Resources Council, Vol. 22, pp. 521-528.
7. Subir K. Sanyal, 2010. Future of geothermal energy. Proceedings, Thirty-fifth workshop on geothermal reservoir engineering stanford university, Stanford, California, February 1-3 2010.
8. The Quaker Economist, 2007, Vol. 7, No. 156, March 2007.