



국내외 지열발전 기술동향



김 범 주

한국전력공사 전력연구원 그린에너지연구소 선임연구원

1. 개요

전 세계적으로 지구온난화 및 기후변화의 주원인인 온실가스 증가를 억제하고, 유가 상승 및 자원 고갈로부터

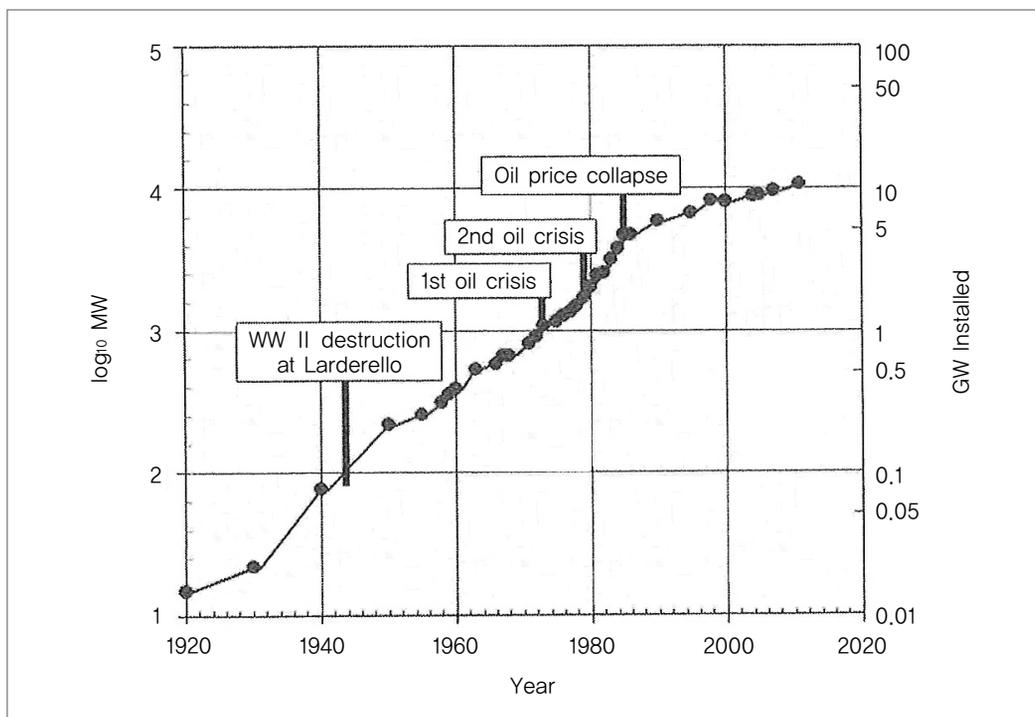
독립적이고 안정적인 에너지원 발굴을 위한 신재생에너지 개발 및 보급이 절실하다. 교토 기후변화협약 시행과 신재생에너지에 대한 관심이 높아지면서 지열발전에 대한 보급과 개발이 증가하는 추세이다.

지열발전은 시추공을 통해 지하에 저류하는 고온의 지열유체를 분출시키거나 물을 주입시켜 고온의 물이나 수증기를 뽑아내어 전력을 얻어내는 발전 방식이다. 환경 오염이 없고, 풍력 및 태양에너지와는 달리 항시 발전이 가능하여 전력수요 공급측면에서 기존 전력망의 부하 경감에 기여할 수 있다. 설비 이용률이 높은 편이고, 운영비 및 생산단가가 낮은 장점이 있으나, 높은 초기 투자비 및 리스크가 큰 단점도 있다.

2011년 기준, 28개 나라가 지열로부터 전기를 생산하고 있거나 생산 경험을 보유하고 있다. 세계적으로 지열 발전 산업은 몇 번의 도약의 계기가 있었다.(그림 1 참조) 2차 세계대전까지 이탈리아는 상업용 지열발전소를 가진 유일한 나라였고, 1930년부터 1944년까지 연평균 성장률은 약 14%였다. 그 이후에 뉴질랜드(1959년)와 미국(1960년)이 상업용 지열발전소를 건설하였고, 일본(1967년), 아이슬란드(1969년), 멕시코(1973년), 필리핀(1979년)이 그 뒤를

이었다. 1920년부터 1977년까지 연평균 성장률은 8.2%였다. 1차 석유파동(1973년)과 2차 석유파동(1979년)은 여러 나라가 지열원을 개발하는 계기가 되었다. 1977년에서 1985년까지 연평균성장률은 17.1%였으며, 그 이후 2011년까지 성장률은 3.2%에 그치고 있지만, 향후 지열 발전의 가능성이 확대될 것이란 전망이 우세한 상황이다.

전 세계 지열 잠재용량은 72GW로 평가되고 있다. 미국의 에너지부는 2015년 18.5GW의 설비용량 및 30조원의 시장이 형성될 것으로 예상하고 있으며, 유럽재생에너지 위원회(EREC)에서는 2009년 브뤼셀 선언을 통해 2030년까지 전체 전력의 5% 이상을 지열발전으로 생산할 계획이며, 최대 30GW의 설비규모를 마련할 방침이다. 국제에너지기구(IEA)는 2011년 지열로드맵에서 2050년 세계 지열발전 규모를 200GW, 연간 발전량 1400TWh로 예측하고 있다.

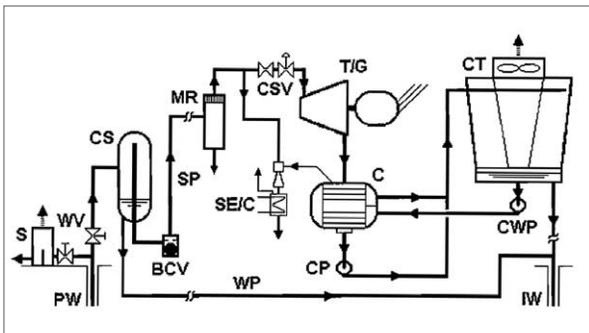


[그림 1] 세계의 지열 발전 설치용량 추이

2. 지열발전의 종류

■ Single-flash Power Plants

Single-flash steam plant는 지열발전 산업의 중추라고 할 수 있다. 2011년 기준, 전세계 16개국에서 169개의 발전소가 이 방식으로 건설되었다. Single-flash 발전소는 전 세계 유닛기준으로 29%를 차지하며, 발전용량 기준으로는 49%를 담당하고 있다. 단위 용량은 3~117MW 분포이며, 1 유닛당 평균 용량은 27MW이다. 그림 2에서 보듯이 생산정에서 올라온 지열유체는 분리기에서 물과 증기로 나뉘고, 증기는 터빈으로 가서 전력을 생산한다. 30MW single-flash 지열발전소에서 보통 5~6개의 생산정, 2~3개의 주입정을 갖는다.

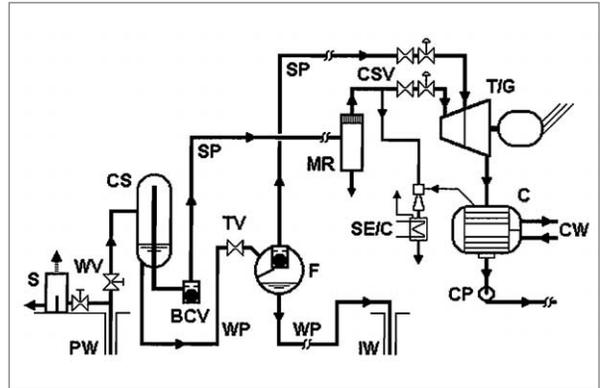


[그림 2] Single-flash 지열발전 시스템의 개략도

■ Double-flash Power Plants

Double-flash steam plant는 single-flash 타입에서 개선된 것으로 동일 지열유체 조건에서 플랜트 구조가 더 복잡하여 제작 비용이 5% 증가하고, 유지보수도 더 많이 요구되나, 전력을 15~25% 정도 더 얻을 수 있다. 2011년 기준, 전 세계 59개의 발전소가 운전 중에 있고, 유닛기준으로 10%를 차지하고 있다. 1 유닛당 발전용량은 4.7~110MW의 분포를 보이며 평균 31MW이다.

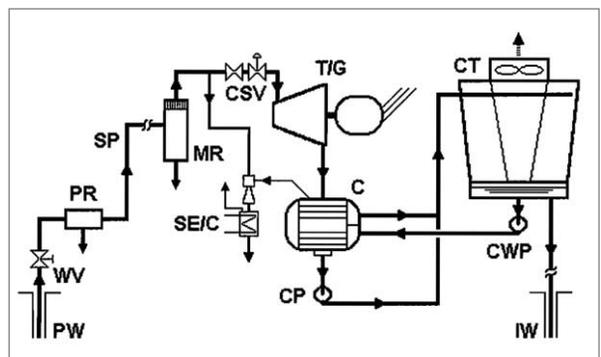
Double-flash power plant는 Single-flash power plant와 유사한 양상을 보이며, 저압터빈으로 증기가 이동하여 발전하는 점에서 차이를 보이고 있다.



[그림 3] Double-flash 지열발전 시스템의 개략도

■ Dry Steam Power Plants

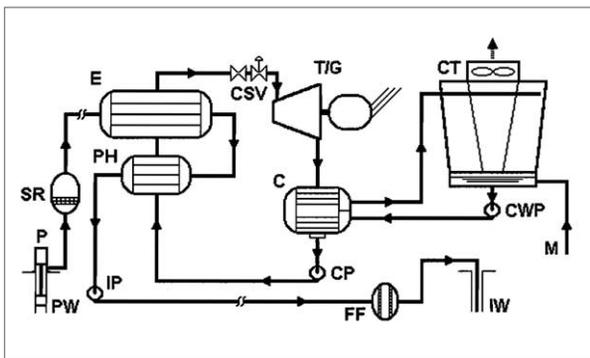
Dry steam plant는 지열발전 시스템 중에 처음으로 상용화된 것으로 1904년 Prince Piero Conti가 이탈리아의 Larderello에서 최초 운전을 시작하였다. 지하에서 끌어 올려진 고온의 건조증기가 직접 터빈으로 보내어져서 발전하는 방식으로 유체가 스팀으로만 이루어져있기 때문에 발전을 위한 구성 장치는 상대적으로 간단하다. Flash steam plant에 비해 단순하고 비용도 적게 든다. 미국의 The Geysers와 이탈리아의 Larderello가 가장 큰 dry steam이 발생하는 지역이고, 세계적으로 71개 유닛이 운전 중이며, 유닛기준으로 12%의 비중을 차지한다. 발전용량은 2,893MW가 설치되어 있으며, 전 세계 발전용량의 27%을 담당한다. Dry steam plant의 평균 유닛용량은 40.75MW이다.



[그림 4] Dry Steam 지열발전 시스템의 개략도

■ Binary Cycle Power Plants

Binary cycle power plant는 기존의 화력발전소 또는 원자력발전소의 열역학적 원리와 가장 유사하다. 작동 유체가 150℃ 이하의 지열유체로부터 열교환기를 통해서 열을 받은 후, 증발, 팽창, 응축을 거쳐서 사이클을 형성하여 발전하게 된다. 공식적인 첫 바이너리 플랜트의 운전은 1967년 러시아의 Paratunka로 기록되고 있다. 이 곳에서 발전용량은 670kW였고, 작은 마을과 농장에 전력과 온실의 열을 공급하였다. 2011년 기준으로 전 세계에 235개의 유닛이 있으며, 15개국에 708MW의 전력을 생산하고 있다. 발전기 유닛기준으로는 40%이지만, 발전용량 대수로는 6.6%에 불과하며, 평균 유닛 용량은 3MW이다.



[그림 5] 바이너리 지열 발전 시스템의 개략도[가]

■ Enhanced Geothermal Systems(EGS)

EGS은 비화산지대의 지열수의 부존량이 적을 때 적용하는 방식이다. 2500~5000m 정도 깊이의 지하 심층의 뜨거운 암반층(Hot Dry Rock)까지 보어홀을 시추하고, 이 안으로 물을 넣어서 고온의 물 또는 수증기를 만든 후 이를 다시 지상의 터빈으로 보내어 발전을 하는 방식으로 지열분야에서 차세대 발전으로 각광받고 있다. 발전에 필요한 만큼의 압력을 가진 지열수 저류층이 부존하지 않을 경우에 인공적으로 투수율을 향상시켜 발전이 가능한 시스템으로 만들어내는 신기술이다.

최근에 프랑스 및 독일에서의 발전 사례가 있으며, 국내에서도 이 기술을 이용한 프로젝트가 진행되고 있다.

3. 국내외 기술동향

■ 해외기술동향

2011년 기준 전 세계 지열발전은 28개국에서 운전 중이거나 운전을 하였고, 약 10GW가 보급이 되었으며, 표 1에 국가별 지열발전 용량과 대수를 정리하였다.

미국은 세계지열발전을 주도하는 나라로 발전설비용량, 연구개발 투자, 연간 이용량 등 모든 분야에서 앞서 있고, 지열발전과 관련된 모든 기술영역에서 세계최고 수준이다. 1960년대에서 1980년대까지 캘리포니아의 The Geysers를 중심으로 건증기 자원을 이용한 개발이 주를 이루었고, 이후 습증기 및 바이너리 플랜트 기술 개발뿐만 아니라 최근의 EGS 시스템의 연구개발에도 많은 투자를 하고 있다. 현재 15개주 146개 프로젝트를 진행 중이며, 가장 큰 지열지대는 미국의 The Geysers 이고, 총 26개 터빈(1,585MW)를 보유하고 있다. 미국의 ORMAT사는 바이너리 발전기 대부분(1,100MW)를 공급하고 있으며, 지열발전 개발 및 건설, 소유, 운영에 이르기까지 지열발전의 모든 분야를 통합하여 운영하는 회사이다. Calpine은 북아메리카의 지열발전 공급분야에서 선두를 달리는 회사로 캘리포니아의 The Geysers에 15개의 지열발전소를 소유하고 있으며 미국 지열발전의 40%(725MW)를 보유하고 있다.

일본은 지열발전량이 1996년 528.9MW이었는데 현재에도 비슷한 수준에 그치고 있다. 지열의 자원 매장량이 미국과 인도네시아에 이어 세계 3위로 평가받고 있음에도 불구하고 신규개발이 부진한 실정이다. 지열 자원이

매장된 곳의 80% 이상이 국립공원 내에 위치해 개발에 어려움을 겪었다. 일본 정부는 최근 이러한 규제를 완화하여, 원자력발전소 사고가 났던 후쿠시마에 일본 최대 규모의 지열발전소를 건설할 계획이며, 향후 10년간 180MW의 발전설비가 도입될 것으로 예측된다. Mitsubishi, Toshiba, Fuji 3개 회사가 전체 지열발전 터빈의 70%를 공급하고 있으며, 지열발전 설비 분야를 주도하고 있다.

Mitsubishi는 지열발전 분야에서 디자인, 개발, 건설, 운전, 유지보수를 담당하고 있으며 1967년 Otake에서 발전소를 건설을 통해 지열 발전을 시작하였다. Fuji사는 1904년 이탈리아의 바이너리 사이클을 시작으로 터빈과 발전기를 주로 공급해 오다가, 1990년 이후에는 뉴질랜드와 필리핀에 플래쉬 사이클의 발전소를 공급하기 시작하였고 최근에는 지열발전의 부속 장비들도 제공하고 있다.

인도네시아는 세계 최대 지열발전 잠재량(28GW)을 가진 나라로 평가되며, 약 276개의 유망지역이 존재하지만 지난 30년간 개발된 프로젝트는 120MW에 그쳐 전체 잠재력의 4%만 개발된 상태이다. 플래쉬 스팀과 바이너리 타입의 지열발전소가 주류를 이루며, 2025년 까지 9.5GW로 용량을 확대할 계획을 가지고 있다.

케냐는 1967년부터 유엔개발기구와 동아프리카 전력청이 합작하여 현재의 울카리아와 보고리아 호수 주변에 지열구를 시추하면서 지열개발이 본격화 되었으며, 2012년까지 약 368MW의 증설이 계획되어 있다.

케냐발전청은 2010년 7월부터 국제개발협회, 일본국제 협력단, 프랑스개발협회, 유럽투자은행, 독일개발협회 등이 공동으로 자금을 지원하는 총 8억불 규모의 울카리아 I (140MW)과 IV(140MW) 지열발전 프로젝트를 진행하고 있다.

[표 1] Status of geothermal power plant development

Rank	Country	No. units	MWe
1	United States	253	2774.43
2	Philippines	48	1840.9
3	Indonesia	23	1134
4	Mexico	39	983.3
5	Italy	25	882.5
6	New Zealand	43	783.3
7	Iceland	31	715.4
8	Japan	21	535.26
9	Costa Rica	8	205
10	El Salvador	7	204.3
11	Kenya	13	166.2
12	Turkey	8	94.98
13	Nicaragua	5	87.5
14	Russia	12	79
15	Papua-New Guinea	6	56
16	Guatemala	9	44.6
17	Portugal - Azores	6	26
18	China	8	24
19	France - Guadeloupe	2	14.7
20	Ethiopia	1	8.5
21	Germany	4	6.75
22	Austria	3	1.45
23	Thailand	1	0.3
24	Australia	1	0.15
25	Argentina	-	-
26	Democratic Republic of the Congo	-	-
27	Greece	-	-
28	Zambia	-	-
Totals		587	10668.52

프랑스, 독일, 영국, 호주 등 비화산지대에서도 EGS 기술개발을 통해 지열발전이 활발히 연구되고 있는 가운데, 프랑스에서는 Soultz 프로젝트(1.6MW), 독일에서는 Landau 프로젝트(2.9MW)가 진행되었다.

■ 국내기술동향

국내의 지열에너지는 중저온 천부지열을 활용하는 지열 열펌프 시스템에 한정되고 있으며, 지열발전 사례는 전무한 실정이다. 지식경제부의 신재생기술개발사업으로

EGS기술과 관련하여 “MW급 지열발전 사용화 기술개발 프로젝트”가 2010년부터 진행중이며, 넥스지오, 포스코, 이노지오, 지질자원연구원, 건설기술연구원, 서울대학교가 참여하고 있다. 포스코에서는 저온 지열발전에 적합한 600kW급 칼리나 사이클 발전 시스템을 2013년 개발 목표로 진행 중에 있다. 현대엔지니어링은 1994년에 인도네시아의 다라자트 지열발전소 프로젝트에 참여하였으며, 최근에 케냐 전력청에서 발주한 Olkaria 프로젝트를 진행 중에 있다.

4. 전망

향후 지열발전은 지속적으로 보급이 확대될 전망이며, 연구개발부문에서는 EGS방식에 초점이 맞춰질 것으로 예상된다. 북미와 유럽은 탐사와 시추분야에서 선진 기술을 확보하고 있으며, 일본은 발전설비 분야에서 독보적인 위치를 점유하고 있다. 선진국과 우리나라의 기술개발과 보급현황은 큰 차이가 있는데, 우리나라는 지열발전에 열악한 환경조건을 가지고 있고, 정부와 민간 기업의 관심이 낮기 때문이다. 지열발전은 높은 초기 투자비와 위험 요소를 내재하고 있다. 이에 따라 정부의 주도적인 지원을 통해 요소기술에 대한 투자를 늘리고 해외사업 진출의 확대가 필요한 것으로 판단된다.

5. Nomenclature

CS: Cyclone Separator, S: Silencer, CSV: Control & Stop Valves, CW: Cooling Water, MR: Moisture Remover, SP: Steam Piping, CP: Condenser Pump, BCV: Ball Check Valve, WP: Water Piping, SE/C: Steam Ejector/Condenser, PW: Production Wells, P: Pump, SR: Sand Remover, PH: Preheater, E:evaporator, PR: Particular Remover, C: Condenser, T/G: Turbine/Generator, IW:Injection Wells, CT:Cooling Tower KEA

참고문헌

- [1] DiPippo, R., “Geothermal Power Systems,” sect. 8.2 in Standard Handbook of Powerplant Engineering, 2nd ed., T.C. Elliott, K. Chen and R.C. Swanekamp, Eds., McGraw-Hill, Inc., New York, 1998, pp 8.27-8.60.
- [2] DiPippo, R., “Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact”, 3rd edition, Butterworth-Heinemann Press, Oxford, 2012
- [3] DiPippo, R., “Geothermal Energy as a Source of Electricity: A Worldwide Survey of the Design and Operation of Geothermal Power Plants, U.S. Dept. of Energy, DOE/RA/28320-1, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, 1980.
- [4] 송윤호, 지열발전 현황 및 기술동향, 대한설비공학회 설비저널, 제40권, , 2010.
- [5] 안형준, 지열에너지 산업 국내외 동향, 지열에너지 저널, 제7권, 3호, 2011.