



지열발전의 개요 및 현황

김정훈 교수
/ 홍익대학교 전자전기공학부

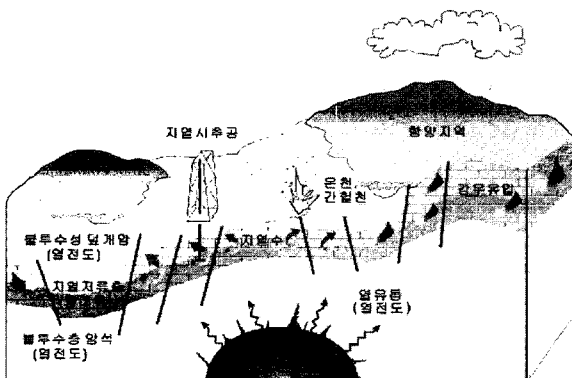
1. 서론

신재생에너지에 관한 기존의 피상적인 관심으로부터 교토협약 발효 후에는 그 중요성과 긴급성에 대한 관심이 크게 부각되고 있다. 현재, 우리나라에서는 석유, 석탄, 원자력, 천연가스가 아닌 에너지로 다음과 같은 11개 분야를 지정하고 있다. 신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법 제2조에 의하면 신·재생에너지 분야는 태양광, 태양열, 풍력, 연료전지, 바이오에너지, 폐기물에너지, 가스화 복합발전, 수소에너지, 소수력, 해양에너지 및 지열에너지 등이다.

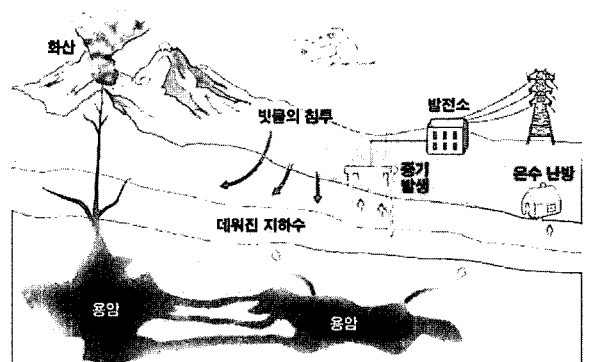
지열 에너지는 지구의 탄생과 함께 존재해왔으며 지구열(geo-thermal; earth-heat)을 이용한 에너지라고 말할 수 있다. 이는 지구의 지표면과 맨틀 사이에 마그마라고 부르는 뜨거운 액체바위에 저장되어 있는 에너지를 이용하는 것이다. 지구는 중심부로 들어갈수록 3°C/100 m 단위로 온도가

증가하며, 3 km 이하만 내려가도 바위의 온도는 100°C이상의 온도를 얻을 수 있다. 지열에너지는 재생이 불가능한 에너지원이나 지구 자체가 가지고 있는 에너지이므로 굴착하는 깊이에 따라 잠재력은 거의 무한하다고 할 수 있다. 태양에너지의 약 46%가 땅속에 저장되며 이는 현재 사용되고 있는 에너지의 약 500% 이상 되는 에너지로서 우리가 지열에 관심을 가져야 할 이유가 여기에 있다. 그림 1은 이상적인 지열 시스템의 구성도이다.

현재 우리나라는 공급자 중심의 전력공급이 이루어지고 있는데, 향후에는 열병합발전, 분산전원 등의 지역전원을 통한 전력공급으로 추세가 변화되어 전력의 사유화 개념이 도입될 것이다. 향후 이러한 지역전원의 하나로 이용될 지열에너지는 우리나라에서 냉난방에 주로 사용될 것으로 전망되는데, 본고는 주로 외국에 설치되어 있는 지열발전의 원리, 현황, 종류 및 동작특성 등을 정리하여 기술하고자 한다.



[그림 1] 이상적인 지열 시스템



[그림 2] 지열 발전 방식

2. 지열발전의 원리 및 특징

지열 발전은 그림 2에 나타낸 바와 같이 지하에 있는 고온층으로부터 증기 또는 열수(熱水)의 형태로 열을 받아들여 발전하는 방식으로 지하 수 km 아래로부터 고온의 건조 증기를 얻어, 이것을 증기터빈에 유도하고 고속으로 터빈을 회전시킨다. 터빈에는 발전기가 연결되어 있어 에너지를 생산하는 방식이다. 열수로 분출하는 경우는 증기만을 얻고 물은 흘려보내거나, 열교환기에 보내어 물을 증발시켜 보내는 방식을 말한다. 다시 말하면, 지열발전은 “자연 보일러”를 이용하는 기력(氣力)발전이고, 지표에서의 기수분리 이후의 시스템은 보통 화력발전소와 원리는 같다. 자원의 특성에 따라 주로 전통적인 증기터빈이나 바이너리(binary) 발전을 이용하고, 전통적인 증기터빈의 경우는 유체의 온도가 최소 150℃ 이상이어야 하고 대기방출형(배압식) 또는 응축형 모두 적용 가능하다.

지열발전은 발전 비용이 비교적 저렴하고 운전 기술이 비교적 간단한 편이며, 공해물질 배출이 거의 없다. 또한 다른 신재생에너지의 발전기에 비해 가동률이 높으며 잉여열을 지역에너지로 이

용할 수 있다. 그러나 지열 발전은 발전이 가능한 지역이 한정되어 있고 우리나라는 적격지가 드문 편이다. 또한 다시 보충할 수 없어 재생불가능한 에너지이고, 땅의 침전이 있을 수 있으며 지중상황 파악이 곤란하다는 단점을 가지고 있다. 지열 직접이용은 경제성, 친환경성, 편리성, 안정성 등 여러 가지 면에서 뛰어난 장점들을 보인다. 그림 3에 이러한 장점들을 나타내었다. 한편, 초기 투자비가 타 냉난방시스템보다 크고, 냉난방 면적이 작은 곳에는 시공비의 부담이 크므로 가정용 설비로는 경제적 효율성을 검토하여야 하며, 지형지물상 시공이 어려운 장소가 있다는 단점을 갖고 있다.

3. 지열발전의 현황

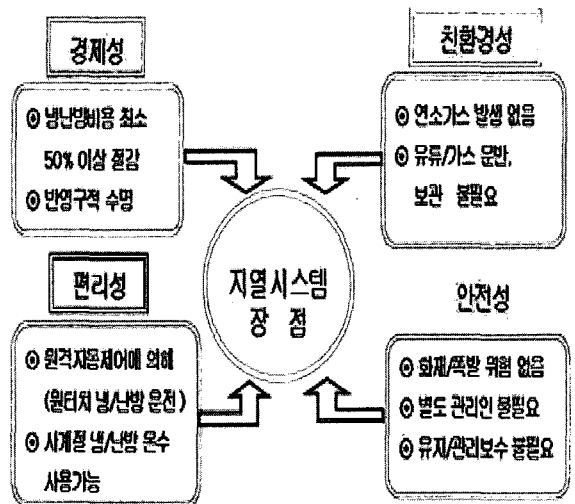
3.1 지열발전사업현황

20세기 초부터 이미 여러 국가에서 지열발전사업이 시작되었으며, 지열발전사업의 현황을 역사적으로 살펴보면 표 1과 같다.

표 2는 지열에너지를 발전에 이용하고 있는 국가와 1995년 및 2000년 지열발전 설비용량, 또 5년간의 증가량, 그리고 2003년말 현재 총 설비

<표 1> 해외 지열발전사업 개요

국가	사업내용
이탈리아	<ul style="list-style-type: none"> • 1904년 Larderello에서 지열증기를 이용한 최초의 발전 시도 • 1942년 127,650 kW 용량의 본격적인 생산 설비 • 2003년 791 MWe 설비 보유
일본	<ul style="list-style-type: none"> • 1919년 Beppu에 최초의 지열시추공 굴착, 1925년 1.12 kW 발전 • 2003년 561 MWe 설비 보유
미국	<ul style="list-style-type: none"> • 1921년 California의 The Geysers에 굴착 • 2003년 2020 MWe 설비, 샌프란시스코 공급전력의 상당부분 지열 담당
뉴질랜드	<ul style="list-style-type: none"> • 1958년 소형 지열발전소 가동 • 2003년 421 MWe 설비 보유
멕시코	<ul style="list-style-type: none"> • 1959년 최초 가동 • 2003년 953 MWe 설비 보유
필리핀	<ul style="list-style-type: none"> • 2003년 1,931 MWe 설비 보유



[그림 3] 지열시스템의 장점

〈표 2〉 국가별 지열발전 현황

나라명	1995 (MWe)	2000 (MWe)	1995-2000 증가량(MWe)	1995-2000 증가율 (%)	2003 (MWe)
아르헨티나	0.67	-	-	-	-
호주	0.15	0.15	-	-	0.15
오스트리아	-	-	-	-	1.25
중국	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
코스타리카	55	142.5	87.5	159	162.5
엘살바도르	105	161	56	53.3	161
이디오피아	-	7	7	-	7
프랑스	4.2	4.2	-	-	15
독일	-	-	-	-	0.23
과테말라	-	33.4	33.4	-	29
아이슬란드	50	170	120	240	200
인도네시아	309.75	589.5	279.75	90.3	807
이탈리아	631.7	785	153.3	24.3	790.5
일본	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
멕시코	753	755	2	0.3	953
뉴질랜드	286	437	151	52.8	421.3
나카라과	70	70	-	-	77.5
파푸아뉴기니	-	-	-	-	6
필리핀	1227	1909	682	55.8	1931
포르투갈	5	16	11	220	16
러시아	11	23	12	109	73
태국	0.3	0.3	-	-	0.3
터키	20.4	20.4	-	-	20.4
미국	2816.7	2228	-	-	2020
합계	6833.35	7972.5	1728.54	16.7	8402.21

용량을 국가별로 나타낸 것이다. 이중 개발도상국의 지열발전 설비용량은 1995년과 2000년에 전 세계 총량의 각각 38%와 47%를 차지하고 있다. 개발도상국의 지열이용은 해를 거듭할수록 눈에 띄게 두드러져 1975년과 1979년의 5년간 이들 국가들의 지열발전용량은 75에서 463 MWe로 늘었고 이후 5년이 지난 1984년 말에는 1495 MWe에 달해 이 두 기간 동안의 증가율은 각각 500%와 223%에 달했다.

3.2 국외 기술개발현황

미국, 일본 등의 해외 여러 국가에서는 다음과

같은 지열발전 기술을 개발해오고 있다.

가. 고온암체발전기술

지하에 존재하는 고온의 암반까지 굴착하고 물은 주입하여 수증기를 발생시켜 전기를 얻는 방식으로서 미국이 1970년대 초에 개발에 착수하였다. 일본의 경우에는 NEDO를 중심으로 기술 개발중이다.

나. 화산발전기술

마그마의 열을 이용하는 것으로서 미국은 1970년대 중반부터 Sandia Lab.이 중심이 되어 기초

연구를 수행해왔고, 일본은 'Sun-Shine 계획'의 일환으로 개발 연구를 추진하고 있다.

다. GEOTEC 기술

지열 에너지 이용 기술과 해양 온도차 발전 기술을 복합적으로 이용하는 기술 개발이 시도중이다.

라. 스타링 엔진 기술

일본에서 개발하고 있는 스타링 엔진은 지열이나 온천열 등을 동력원으로 하여 움직이는 효율이 좋은 엔진으로 100℃ 정도의 열로 약 1 kW의 출력이 가능하다. 배기가스 등 유해물질이 나오지 깨끗한 발전장치로 주목을 받고 있으며, 향후에는 에틸렌그리콜과 같은 열전도율이 높은 매체를 이용함으로써 태양열이나 공장배수 등도 에너지원으로 이용할 수 있을 것으로 전망된다.

마. 지열원 히트펌프

1940년대 후반과 1950년대에 미국과 유럽에서 연구가 시작되었고, 1970년대 석유파동 이후 난

방을 목적으로 사용되기 시작하였다. 미국은 지열 협회를 중심으로 연구를 시작하여 1980년대부터는 실용화 보급이 이루어졌다. 일본의 경우에는 인공연못을 활용하는 지열교환기를 개발하여 지열난방 시스템을 개발하였다.

바. 기타

선진 각국이 저온 비등 매체를 이용하는 방식이나 터빈 사이클과 냉동 사이클을 결합시킨 복합 사이클 방식을 경쟁적으로 추진하여 많은 기술이 축적되어 있다.

3.3 국내 기술개발현황

기술개발지원은 1988년부터 현재까지 3개 개발과제로서 주로 심층 지열원 이용을 위한 지열 에너지 탐사개발을 실시하였다. 향후에는 실용화를 위해 선진국에서 현재 활성화 보급되고 있는 히트펌프 이용 지열 냉·난방시스템의 개발에 주력할 계획이고, 경제성 확보를 위한 히트펌프의 성능계수 향상과 지중열교환기의 효율향상 등의 기술개발과 아울러 이미 설치되어 운전되고 있는 건물의 지열이용시스템에 대한 성능평가 및 효과 측정 등을 위해 실용화 평가사업도 함께 추진할 계획이다. 표 3과 표 4에 최근까지의 지열에너지 이용사업 관련된 투자와 과제 현황을 나타내었는데, 현재로서는 지열발전을 위한 기술개발과 투자는 진행되고 있지 않으며 열에너지만을 이용하고 있는 실정이다.

〈표 3〉 지열에너지사업 개요

	1997 ~ 2001	2002 ~ 2006
지열이용 유망지역 조사		지열이용 유망지역 적출 열수온도 95℃, 고온 암체층
		지열에너지 이용시스템 개발
투자규모(기술개발) : 총 13억원(정부 10, 민간 3) (백만원)		

〈표 4〉 지열에너지사업 실적 및 계획

구분	연도	'91~'00	2001	2002	2003	2004	계
	과 제 수	신규	2	1	3	3	6
계속		3	-	-	3	3	9
계		5	1	3	6	9	24
사업비 (백만원)	정부	690	300	475	1,205	2,196	4,866
	민간	70	281	503	491	758	2,103
	계	760	581	978	1,696	2,954	6,969

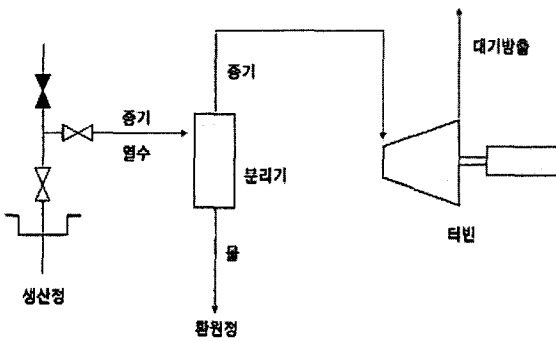
4. 지열발전의 종류 및 동작특성

가. 대기방출형

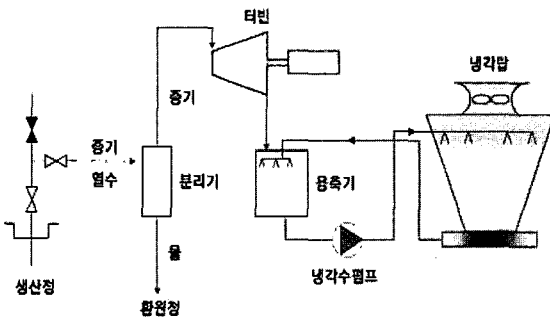
대기방출형 터빈은 간단하고 값이 싸지만 시추공으로부터 뽑아 올린 건증기 또는 습증기로부터 분리해 낸 증기가 터빈을 통과한 후 대기로 방출된다(그림 4).

나. 응축형

응축형 설비는 더 많은 보조장치가 필요하며 더 복잡하고 크기도 커서 제작하고 설치하는데 두 배의 기간이 소요된다. 그러나 증기소비율은 대기방출형의 거의 절반에 가깝다. 응축형 발전기는 용량 55~60 MWe급이 일반적으로 사용되지만 최근에는 110 MWe급도 제작/설치된 바 있다(그림 5).



[그림 4] 대기방출형 지열발전



[그림 5] 응축형 지열발전

다. 바이너리

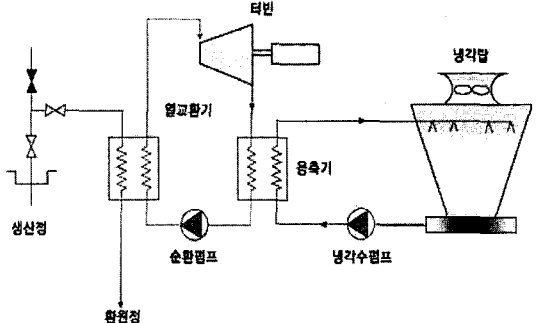
바이너리 발전은 증기에 비해 끓는점이 낮고 저온에서도 높은 기체압력을 보이는 2차 순환유체를 이용한다. 이 2차 유체는 통상적인 Rankine 사이클을 따라 동작한다. 열교환기에서 2차 유체는 지열수로부터 열을 넘겨받아 가열되고 증발되며 이 기체는 터빈을 구동하고 난 후 식고 응축되어 사이클은 다시 반복된다(그림 6).

라. 발전방식에 따른 분류

발전방식에 따라서는 건조증기배압식, 건조증기복수식, 습기증기복수식, 플러시발전방식, 열수발전방식 등이 있으며, 각 발전방식의 개략적인 구성을 그림 7에 나타내었다.

5. 지열발전의 환경성

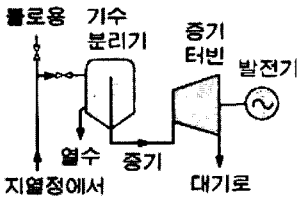
지하에서 추출된 증기 중에는 적은 양이긴 하지만 CO₂가 포함되어 있어 발전과 수반하여 대기중으로 방출된다. 그러나 화석연료의 연소로 인해 방출되는 CO₂의 양과 비교하면, 단위출력당 1/10~1/100 정도로 그림 8에서 보는 바와 같이 다른 에너지원에 비해 매우 적은 편이다. 또한, 지열 지역은 그 특징으로 온천지 근방의 자연경관이 뛰어난 산간지역에 편재되는 경우가 많고, 자연공원법의 규제나 주변온천과의 조화가 과제이고, 발전소의 설치에 있어서는 경관이나 온천 보



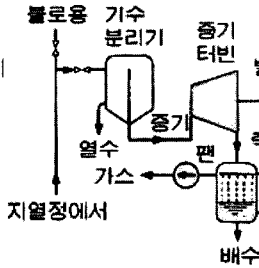
[그림 6] 응축형 지열발전

지열발전/발전방식

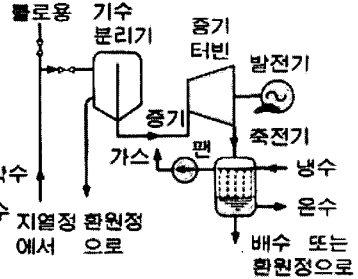
(a) 건조증기배압식



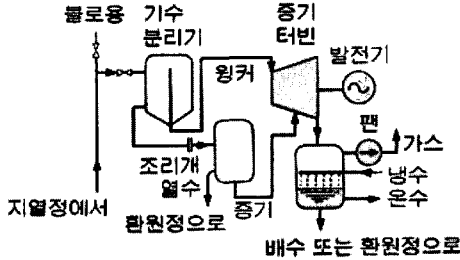
(b) 건조증기복수식



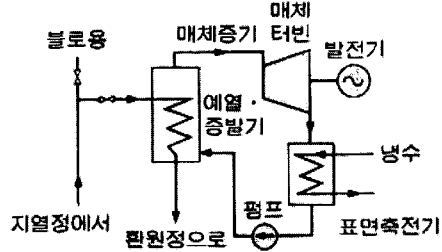
(c) 습기증기복수식



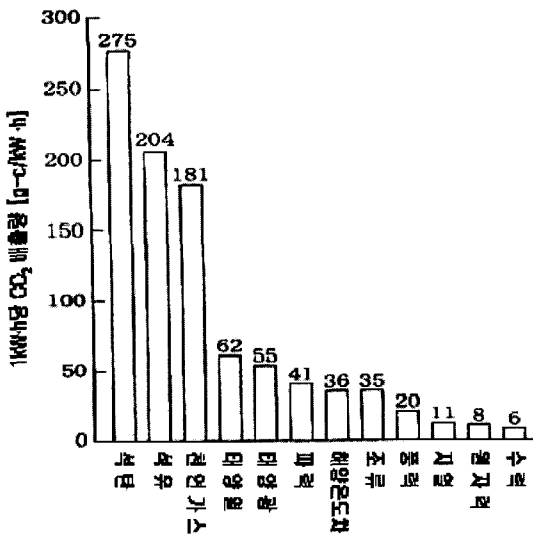
(d) 플래시 발전방식



(e) 열수발전방식



[그림 7] 발전방식에 따른 지열발전의 분류



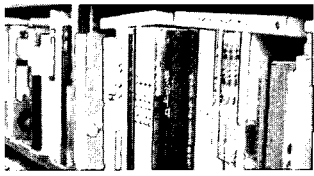
[그림8] 발전의 종류에 따른 CO2 배출량*

* 원료의 채굴에서 건설·수송·정제·운용(실제의 발전)·보수 등을 위하여 소비되는 모든 에너지를 대상으로 CO2배출량을 산정(원자력에 대해서는 재처리·폐기물 처리·원자로 폐기까지 포함) (여) 석탄: 채굴, 선탄 수송 발전 석탄재 처리 (출처: 일본전력중앙연구소, 전력경제연구 No.29)

호 등의 관점에서 주변환경과의 조화를 도모해야 한다. 지열발전소를 설치하는 때는 주변환경과 조화되도록 개발 계획을 하고, 환경영향조사에 의한 주변환경 규제범위 내에서 영향이 없는 것을 확인한 다음 개발을 진행한다.

6. 지열발전의 향후 과제

지열발전의 단점으로서 조사에서 개발까지의 기간이 긴 점, 단일기 출력에 상대적으로 작은 점 등의 요인으로 발전비용이 높은 점이 개발을 저해하고 있다. 그렇지만, 기존 개발지역에서의 증설 등에 의한 리스크 저감, 분산형 전원 등에 의한 전력공급방식이 고려되고 있다. 또한 지열발전은 RPS법의 대상전원으로도 되어 있어 향후 새로운 개발이 기대되고 있다. 부존자원이 희박한 우리나라에서 환경성이 우수하고 또한 공급신뢰성 높은 자연에너지인 지열을 어떻게 활용할지가 차후의 과제이다. 세계의 주요 화산대에 속해 있지 않은



일반원고

우리나라로서는 현실적으로 본격적인 발전을 위한 지열에너지 유망지역을 찾기가 어렵기 때문에 냉·난방시스템을 위한 지열에너지의 활용에 주력해야 하는데, 이를 위하여 체계적이고 과학적인 지열이용 유망지역 적출 방법론의 개발이 필요하고 보다 효율적인 지열에너지 시스템의 개발이 요청된다. 한편, 지열에너지의 온도낙차가 작아서 지열발전 도입이 어렵다면 압력낙차를 크게 만들

수 있는 기술 개발을 통해 발전을 할 수 있는 방안을 모색해야 할 것이다. 아울러 지열에너지를 이용한 냉·난방시스템의 보급을 위한 정책과 타 에너지원을 기반으로 한 냉·난방시스템과의 경쟁에 따른 제반 문제점을 해결할 수 있는 정책의 개발이 수행되어야 하며, 더 나아가 분산형 전원으로 활용될 경우 계통연계와 관련된 기술적, 법적 문제 해결을 위한 연구가 요청된다. 