

# 세계 지열에너지 현황과 전망

전통적인 의미에서의 지열에너지의 정의와 역사를 소개하고 전 세계적으로 지열에너지를 이용한 발전 및 직접 이용의 현황을 살펴본 후, 앞으로 지열에너지 활용 증가의 전망에 대해 소개한다.

송 윤 호, 안 은 영  
한국지질자원연구원

지열에너지란 지구가 가지고 있는 열에너지를 총칭하나 최근에 지열에너지는 인간에 의해 발견되고 개발된, 또는 개발될 수 있는 지구의 열을 지칭하는 의미로 자주 쓰인다. 지열의 근원은 지각 및 맨틀을 구성하고 있는 물질 내부의 방사성 동위원소 즉, 우라늄( $U^{238}$ ,  $U^{235}$ ), 토륨( $Th^{232}$ )과 칼륨( $K^{40}$ )의 붕괴에 의한 것이 약 83%, 맨틀 및 그 하부 열의 방출 즉, 지구가 서서히 식어가는 과정에 의한 원인이 약 17%로 알려져 있으며, 지표에서 느껴지는 지열의 약 40%가 지각에 의한 것으로 추정되고 있다. 따라서 지하로 내려갈수록 지온은 높아지게 되며 이를 지온증가율 또는 지온경사(geothermal gradient)라 부르는데, 현대의 시추기술로 파내려갈 수 있는 깊이 즉, 10 km까지의 평균 지온증가율은 약 25~30°C/km이다. 한편 지하 심부의 고온 지대와 천부의 저온 지대 사이의 온도차는 심부로부터 천부로의 전도에 의한 열의 흐름(conductive flow of heat)을 발생시키며, 평균적인 대륙 및 해양의 지열류량(terrestrial heat flow)은 각각 65와 101 mWm<sup>-2</sup>이고 각각의 면적을 고려하여 평균하면 지구 전체의 지열류량 평균은 87 mWm<sup>-2</sup> 이 된다. 그러나 이러한 값들은 모두 평균적인 것으로, 맨틀의 대류에 의한 지각 판의 경계에서는 화산활동과 관련된 고온 지열지대가 존재하여 지표 근처에서 100°C 이상의 온도를 보이는 곳도 많으며 대부분의 지열발전소가 이러한 곳에 위치하고 있다.

따라서 세계적인 지열이용 현황을 살펴보려면 먼저 고온 지열수 또는 증기를 이용한 지열발전(간접이용)과 상대적으로 저온의 지열수를 지역 난방이나 농어업에 활용하거나 천부의 지중열을 건물 냉난방에 활용하는 직접이용으로 나눌 필요가 있다.

## 세계 지열 발전 현황

땅이 가지고 있는 열 즉, 지열을 에너지로서 활용하고자 하는 시도는 지극히 당연한 것이며 인류는 수천년 동안 지열에너지자원을 활용해왔다. 지열에너지자원의 경제적인 활용의 시초는 아무래도 고대 로마시대의 온천에서부터 찾을 수 있는데, 온천은 현재에도 가장 손쉽고 가장 인기 있는 지열의 활용방안이라 하겠다. 그러나 근대적인 의미에서의 지열에너지 활용의 역사는 약 100년 정도이다. 20세기 초인 1904년 이탈리아의 Larderello에서 지열 증기를 이용하여 처음으로 발전이 이루어졌는데, 1913년 상업적이 발전이 시작된 후 현재도 이 지역에서는 547 MW의 발전용량을 갖추고 있다. 2000년까지 전세계 평균 약 9%의 연간 발전량 증가를 보여왔다.

먼저 전 세계적으로 재생에너지 사용량에서 지열에너지가 차지하는 비중을 살펴보자. 2001년도 세계 1차에너지 총 소비량 10,038.3 Mtoe중 재생에너지는 약 13.6%인 1,364.5 Mtoe가 소비

되었는데 이중 바이오매스가 1,080 Mtoe (79.15%), 수력이 222.7 Mtoe (16.32%), 나머지 61.85 Mtoe가 소수력, 지열, 풍력 등의 기타 재생에너지에 의한 것이다. 한편 기타 재생에너지 중에서는 지열이 70%로 주를 이루고 있으므로 현재까지 가장 중요한 재생에너지 자원임을 잘 보여주고 있다.

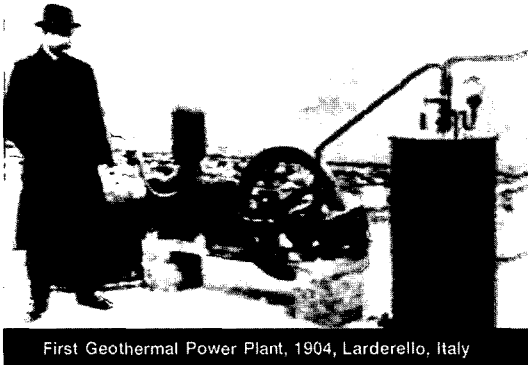
그림 2는 지난 100년간 지열 발전량의 증가 추

이를 나타낸 것이다. 앞서 서술한 바와 같이 1904년 최초로 지열 발전이 시험에 성공한 후로, 1913년에 이탈리아에서 상업적인 발전이 이루어졌으며 그 후 일본의 Beppu(1919), 미국 California의 The Geysers(1921), 그리고 뉴질랜드 Wairakei(1958), 멕시코(1959) 등 세계로 퍼져나가 2004년 현재 8,735 MWe에 이르고 있다.

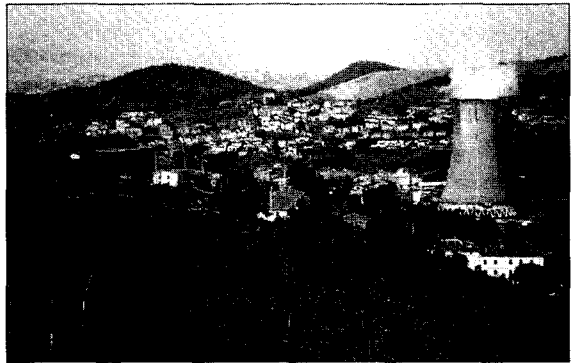
<표 1> 2001년도 재생에너지원별 1차에너지 소비량 (European Renewable Energy Council; EREC)

	바이오매스	대수력	기타 재생에너지							계
			소수력	풍력	태양광	태양열	지열	해양	소계	
MToe	1,080	222.7	9.5	4.7	0.2	4.2	43.2	0.05	61.85	1,364.5
%	79.2	16.3	(15.4)	(7.6)	(0.3)	(6.8)	(69.9)	(0.0)	4.5	

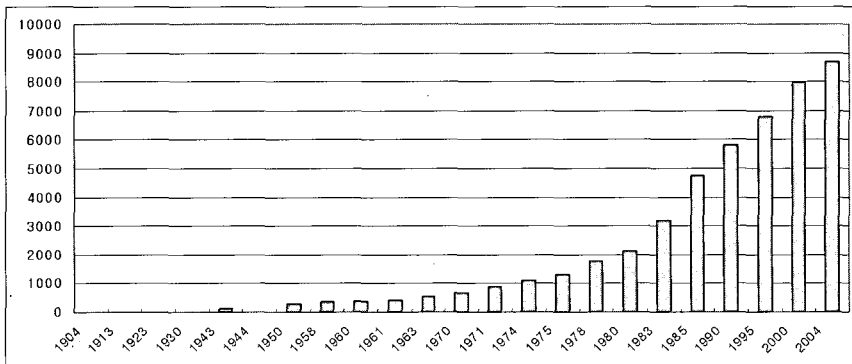
\*()안은 기타 재생에너지에 대한 비율



First Geothermal Power Plant, 1904, Larderello, Italy



[그림 1] 이탈리아 Larderello에서 100년전 최초의 지열발전 실험 모습(왼쪽)과 현재의 지열발전소 모습(오른쪽).



[그림 2] 지난 100년간 전세계 지열 발전량 증가 추이 (단위: MWe)

<표 2> 2004년 세계 지열발전 설비용량 현황

국 명	시설용량(MW)	생산량(GWh/yr)
아르헨티나	(1)	Not operating
호주	< 1	3
오스트리아	< 1	5
중국	32	100
코스타리카	162	1,170
엘살바도르	105	550
에디오피아	7	30
프랑스	4	21
독일	< 1	2
그리스	(2)	Not operating
과테말라	29	180
아이슬란드	200	1,433
인도네시아	807	6,085
이태리	790	5,300

표 2는 국가별 지열발전 설비용량 및 연간 생산량을 보여주는데, 역시 미국이 압도적으로 다수이며 (주로 California, The Geysers field), 다음으로 필리핀, 멕시코, 인도네시아, 이탈리아, 일본, 뉴질랜드가 많은 용량을 자랑한다.

한편 각 나라에서 지열발전이 전체 발전량 중에서 차지하는 비율을 나타낸 표 3을 보면 필리핀의 경우, 전체 발전량 중에서 지열이 20% 이상을 차지하고 있어 주요한 에너지원임을 보여주고 있으며 현재에도 계속적으로 지열 자원의 탐사 및 개발에 많은 투자를 하고 있다.

### 세계 지열 직접 이용 현황

우리나라와 같이 화산활동과 관련된 고온성 지열 에너지가 부존하지 않은 지역에서의 지열 이용은 냉난방 등에 직접 활용하는 기술이 필요하게 된다. 지열은 크게 고온성 (high enthalpy system) 과 중·저온성 (low enthalpy system) 으로 나뉘는데, 전자는 120℃ (때로는 150℃를 기준으로 분류하기도 함) 이상의 열을 가진 것으로 간접이용 (indirect use; 발전) 으로, 후자는 25℃

국 명	시설용량(MW)	생산량(GWh/yr)
일본	537	3,395
케냐	127	1,100
멕시코	953	6,282
뉴질랜드	453	3,600
니카라과	78	308
파푸아뉴기니	30	100
필리핀	1,931	8,630
포르투갈	8	42
러시아	62	170
타이완	3	15
태국	< 1	2
터키	21	90
미국	2,395	16,000
계	8,735	54,613

<표 3> 각 나라에서 전체 발전량 중 지열발전이 차지하는 비율

국 명	발전설비 비율	발전량 비율
필리핀	16.2%	21.5%
엘살바도르	15.4%	20.0%
케냐	15.0%	20.0%
니카라과	17.0%	17.2%
아이슬란드	13.0%	4.7%
코스타리카	7.8%	10.2%
뉴질랜드	5.1%	6.1%
인도네시아	3.0%	5.1%

~120℃의 온도로 지역난방이나 온실, 양어, 심지어 냉난방 등에 직접이용 (direct use) 되고 있다. 매 5년마다 개최되는 세계 지열회의 (World Geothermal Congress; WGC) 의 2000년도 회의에서 발표된 내용에 따르면 현재 지구에는 앞으로 500만년 동안 사용 가능한 직접이용 대상 지열에너지가 부존하고 있다. 따라서 이러한 무궁무진한 재생에너지 자원의 활용은 매년 막대한 에너지 수입 비용을 지출하는 우리나라 입장에서는 매우적인 분야라 하겠다.

표 4는 2000년도 전세계 지열에너지 직접이용 설비 용량 및 사용량을 각 나라별로 나타낸 것으로, 전체 설비용량은 15,145 MWt, 사용량은 190,699 TJ/yr (Tera=10<sup>12</sup>)에 이른다. 직접이용면에서도 미국이 전세계의 약 25%로 가장 활발한 지열 이용국가인데, 흥미로운 것은 사용량 면에서는 중국이 약 20%로 단연 1위를 차지하고

있는 점이다. 중국은 최근 들어 심부 지열수를 이용한 지역난방 및 열펌프를 이용한 냉난방 등이 매우 활발히 이루어지고 있다. 또한 대서양 판이 갈라지는 곳에 위치한 아이슬란드에서는 2002년 현재 나라 전체의 난방 중 87%를 지열에너지를 통해 공급하고 있다.

한편 활용 분야별로 구분하여 보면 표 5에 나타

<표 4> 2000년의 세계 지열 직접이용 설비용량 및 사용량

국 명	설비용량		에너지이용량	
	(MW)	%	(TJ/yr)	%
알제리	100	0.66	1,586	0.83
아르헨티나	25.7	0.17	449	0.24
아르메니아	1	0.01	15	0.01
호주	34.4	0.23	351	0.18
오스트리아	255.3	1.69	1,609	0.84
벨기에	3.9	0.03	107	0.06
불가리아	107.2	0.71	1,637	0.86
캐나다	377.6	2.49	1,023	0.54
카리브제도	0.1	0.00	1	0.00
칠레	0.4	0.00	7	0.00
중국	2,282	15.07	37,908	19.88
콜롬비아	13.3	0.09	266	0.14
크로아티아	113.9	0.75	555	0.29
체코	12.5	0.08	128	0.07
덴마크	7.4	0.05	75	0.04
이집트	1	0.01	484	0.01
핀란드	80.5	0.53	484	0.25
프랑스	326	2.15	4,895	2.57
그루지아	250	1.65	6,307	3.31
독일	397	2.62	1,568	0.82
그리스	57.1	0.38	385	0.20
과테말라	4.2	0.03	117	0.06
온두라스	0.7	0.00	17	0.01
헝가리	472.7	3.12	4,086	2.14
아이슬란드	1,469	9.70	20,170	10.58
인도	80	0.53	2,517	1.32
인도네시아	2.3	0.02	43	0.02
이스라엘	63.3	0.42	1,713	0.90
이탈리아	325.8	2.15	3,774	1.98
일본	1,167	7.71	26,933	14.12

국 명	설비용량		에너지이용량	
	(MW)	%	(TJ/yr)	%
요르단	153.3	1.01	1,540	0.81
케냐	1.3	0.01	10	0.01
대한민국	35.8	0.24	753	0.39
라투아니아	21	0.14	599	0.31
마케도니아	81.2	0.54	510	0.27
멕시코	164.2	1.08	3,919	2.06
네팔	1.1	0.01	22	0.01
네덜란드	10.8	0.07	57	0.03
뉴질랜드	307.9	2.03	7,081	3.71
노르웨이	6	0.04	32	0.02
페루	2.4	0.02	49	0.03
필리핀	1	0.01	25	0.01
폴란드	68.5	0.45	275	0.14
포르투갈	5.5	0.04	35	0.02
루마니아	152.4	1.01	2,871	1.51
러시아	308.2	2.03	6,144	3.22
세르비아	80	0.53	2,375	1.25
슬로바키아	132.3	0.87	2,118	1.11
슬로베니아	42	0.28	705	0.37
스웨덴	377	2.49	4,128	2.16
스위스	547.3	3.61	2,386	1.25
태국	0.7	0.00	15	0.01
튀니지	23.1	0.15	201	0.11
터키	820	5.41	15,756	8.26
영국	2.9	0.02	21	0.01
미국	3,766	24.87	20,302	10.65
베네수엘라	0.7	0.00	14	0.01
에멘	1	0.01	15	0.01
합계	15,145	100	190,699	100

낸 바와 같은데, 전 세계적으로 열펌프를 이용한 건물 냉난방이 가장 많은 비율을 차지하고 있으며 이는 점점 증가해가는 추세이다 (1995년에 비해 3배의 증가). 재미있는 것은 시설 용량에 비해 실제 이용량면에서 열펌프의 비율이 적는데, 이는 실제 냉난방에 활용하는 기간이 집중되어 전력 및 화석에너지 사용의 피크부하를 감소시키는 역할을 하고 있음을 보여준다.

한편 가장 많은 이용량을 자랑하는 미국의 경우를 살펴보자. 표 6은 2002년도 미국에서의 지열 직접이용 현황을 분야별로 나타낸 것인데, 미국의 경우 열펌프를 이용한 건물 냉난방이 전체 시설 용량의 85.8%, 연간 사용량의 60.2%로 압도적임을 보여준다. 우리나라의 경우 여름철에는 냉방,

겨울철에는 난방용으로 사용될 수 있기 때문에 capacity factor가 이보다는 높게 나타날 것이다. 2002년 현재 열펌프는 500,000 대가 설치되어 있고 연간 10%의 증가율을 보이고 있다. 열펌프의 열교환 방식별로 본다면 수직형 열교환기가 47%로 가장 많고, 수평형 열교환기가 38%, 그리고 지하수를 이용한 개방형이 15%를 차지하고 있다. 미국 Energy Information Agency에 따르면, 최근에 개방형이 25%까지 늘고 있다고 한다.

한편 단위면적당 가장 많은 지중 열교환기 설치 실적을 자랑하는 스위스의 경우를 살펴보자. 스위스는 화산활동과 관련된 고온 지열에너지가 부존하지 않는다는 점에서 우리나라의 경우와 유사하며, 또한 모든 화석에너지를 수입에 의존한다는

<표 5> 1995년과 2000년의 전세계 지열 직접이용 현황

구 분	시설용량 (MWt)			이용량 (TJ/year)		
	2000		1995	2000		1995
열펌프	5,275	34.8%	1,854	23,275	12.2%	14,617
지역난방	3,263	21.6%	2,579	42,926	22.5%	38,230
온실	1,246	8.2%	1,085	17,864	9.4%	15,742
양어	605	4.0%	1,097	11,733	6.2%	13,493
농산물 건조	74	0.5%	67	1,038	0.5%	1,124
산업	474	3.1%	544	10,220	5.3%	10,120
목욕, 수영	3,957	26.1%	1,085	79,546	41.7%	15,742
냉동, 제설	114	0.8%	115	1,063	0.6%	1,124
기타	137	0.9%	238	3,034	1.6%	2,249
총 계	15,145	100.0%	8,664	190,699	100.0%	112,441

<표 6> 2002년도 미국에서의 지열 직접이용 현황

구 분	설치건수	시설용량(MWt)	연간이용량(TJ/year)	Capacity factor
개별난방	1,000	90	950	0.33
지역난방	18	105	665	0.20
양어	45	140	3,100	0.70
온실	40	140	1,230	0.30
농산물 건조	3	20	305	0.48
산업	4	10	80	0.25
리조트, 온천, 수영	220	110	2,500	0.72
제설	5	3	20	0.21
열펌프	500,000	3,730	13,400	0.11
총계 (평균)		4,348	22,250	0.16

측면에서도 우리나라와 비슷하므로 비교대상으로 적합하다. 2004년에 스위스의 지열에너지 직접 이용량은 1,189 GWh이며 2 km<sup>2</sup> 당 한 대팔로 단위면적당 세계 최고의 보급량을 보여주고 있고 또한 매년 10%이상의 보급 증가율을 나타내어 단연 지열 직접이용의 선진국이다. 표 7은 1999년도 스위스의 활용방식 별 생산량을 나타내는데 역시 수직형인 시추공 열교환이 58.6%로 압도적인 비율을 보인다. 흥미로운 것은 건축물의 기초 파일을 이용한 열교환 및 터널 지하수를 이용한 열교환 등도 비록 적은 비율이긴 하지만 활용되고 있다는 점인데, 최근의 활발한 도로 공사 등으로 교량이나 터널이 많이 건설되고 있는 우리나라에서도 이러한 방식으로 지열을 활용할 여지가 많음을 증명하고 있다.

**앞으로의 전망**

국제에너지협회(IEA)의 World Energy Outlook 2004에서는 비관적인 견해로 2030년에는 현재의 60% 이상의 에너지를 더 소비할 것이며(16,487 Mtoe) 신재생에너지 공급도 2002년 전체 에너지소비의 14%와 마찬가지로 점유(2,226 Mtoe) 할 것으로 전망하였다(표 8 참조). 그리고 환경에 대한 전지구적인 영향과 국가별 에너지 안정 공급 정책을 고려하였을 때 2030년의 에너지소비량은 기존의 시나리오의 결과보다 10% 적은 14,817 Mtoe가 될 것으로 전망하였다.

또한 2004년 European Renewable Energy Council (EREC)은 국가적인 재생에너지 공급 증가 정책과 더불어 Kyoto Protocol의 적용 등에 의해 국제적인 협력이 심화될 것으로 가정한 Advanced International Policies (AIP) 시나리오에 의해 2030년 전체 에너지 중 34.7%를 재생에너지가 공급할 것으로 발표하였다. 그리고 AIP 시나리오와 달리 국제적인 협력이 강화되지 않고 국가적인 에너지정책만을 감안한 Dynamic

<표 7> 1999년 스위스의 활용방식별 지열에너지 생산 현황

지열 활용 방식	생산량 (GWh/yr)
수평형 열교환	32.0
시추공 열교환	362.0
지하수 이용 개방형	180.0
기초 파일	2.8
심부 시추공 열교환	0.7
심부 지열수	36.3
터널 지하수	3.8
총 계	617.6

<표 8> 비관적인 전망에 따른 세계 1차에너지 소비량중의 재생에너지 소비 및 비중 (IEA)

	에너지 소비량 전망 (Mtoe)				
	1971	2002	2010	2020	2030
수력	104 (2%)	224 (2%)	276 (2%)	321 (2%)	365 (2%)
바이오/폐기물	687 (12%)	1,119 (11%)	1,264 (10%)	1,428 (10%)	1,605 (10%)
기타 재생에너지	4 (0%)	55 (1%)	101 (1%)	162 (1%)	256 (2%)
재생에너지 합계	795 (14%)	1,398 (14%)	1,641 (13%)	1,911 (13%)	2,226 (14%)
전체 에너지	5,536	10,345	12,194	14,404	16,487

<표 9> DCP 시나리오에 따른 세계 1차에너지 소비량중의 재생에너지 비중 (EREC)

	에너지 소비량 전망 (Mtoe)			
	2001	2010	2020	2030
바이오	1,080.0	1,291.0	1,653.0	2,221.0
수력	222.7	255.0	281.0	296.0
소수력	9.5	16.0	34.0	62.0
풍력	4.7	35.0	167.0	395.0
태양광	0.2	1.0	15.0	110.0
태양열	4.2	11.4	43.0	136.0
지열	43.2	73.0	131.0	194.0
해양	0.05	0.1	0.4	2.0
재생에너지 합계	1,364.5	1,682.5	2,324.4	3,416.0
세계 1차 에너지 소비량	10,038.3	11,752.0	13,553.0	15,547.0
재생에너지 비중	13.6 %	14.3 %	17.1 %	22.0 %

<표 10> 스위스와 비교한 국내 지열에너지 보급량 산정

	한국	스위스
2002년 지열에너지 공급량 (toe)	119 toe	109,227 toe
면적 (km <sup>2</sup> )	99,600 km <sup>2</sup>	41,284 km <sup>2</sup>
면적대비 지열에너지 공급량(toe/km <sup>2</sup> )	0.0012	2.646
2011년 지열에너지 보급 가능량(toe)	623,000 toe	258,000 toe

Current Policies (DCP) 시나리오에 따르면 2030년까지 전세계 1차에너지 소비량 중 재생에너지가 차지하는 비중이 22.0%에 이를 것이며, 용량면에서는 3,416 Mtoe에 달한다(표 9 참조). 어떠한 경우이던 간에, 2030년에 바이오매스와 대수력을 제외한 기타 재생에너지 중에서 가장 큰 부분은 풍력이 담당하게 될 것임은 이견이 없다. 그러나 그 다음은 지열에너지가 차지하게 될 것이며, 2030년까지 지열발전 용량은 4 배 이상 증가할 것으로 예상된다.

우리의 관심이 되는 직접 이용면에서 보면, 지열 에너지의 장기적인 직접이용 증가 전망은 자세히 발표되지 않고 있으나 대체적으로 전세계적으로 연간 6%에서 8%를 전망하고 있다. 한편 우리나라와 지열 여건이 비슷한 스위스의 경우를 예를 들면 지난 10년간 매년 10% 이상의 증가율을 보이고 있다. 따라서 우리나라가 2011년까지 스위스와 동일한 수준의 지중 열교환기를 설치한다면 전체 공급량은 623,000 toe에 이르며 2002년 에너지 불변가격으로 9천만달러에 달한다(표 10 참조). 이는 2011년 우리나라의 재생에너지 공급 목표의 4%를 차지하는데, 현재 추진중인 심부 지열수 개발을 통한 지역난방이 실현되고 또, 우리나라에는 지역적으로 풍부한 충적층 지하수 자원이 부존하고 있음을 감안한다면 대용량의 지하수 열교환방식 냉난방시스템을 설치할 수 있으므로 적극적인 투자를 통해 훨씬 많은 지열에너지의 보급이 가능할 것으로 판단된다.