

세계 지열발전 현황 및 EGS 지열발전

나 상 민
GS건설 기술연구소

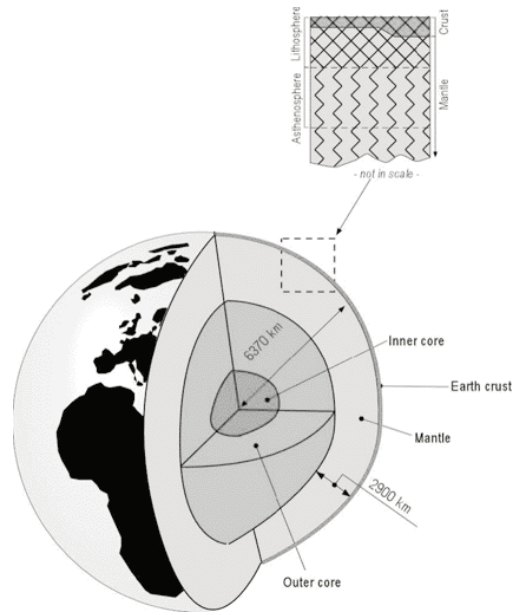
1. 서론

지열발전(地熱發電, geothermal power generation)이란 시추공을 통하여 지하에 저류되어 있는 지열유체를 분출시키거나 물을 주입시켜 고온의 물이나 수증기를 뽑아내어, 그 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 발전방식이다.

이러한 지열발전의 근원이 되는 열에너지인 지열(地熱)은 지표면의 얇은 곳에서 부터 수 km깊이에 존재하는 뜨거운 물과 암석을 포함하여 땅이 가지고 있는 에너지를 말한다. 태양열의 약 47%가 지표면을 통해 지하에 저장되며, 지구 내부로부터의 방사성물질의 붕괴에 의한 열이 지표로 전달되고 있다. 지구 내부로부터의 지열 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 방출에 의한 것이 약 17%로 알려져 있으며, 지표에서 느껴지는 지열의 약 40%가 지각에 의한 것으로 추정되고 있다. Stacey and Loper(1988)의 열평형 이론을 인용하면, 지구로부터 전도, 대류, 복사에 의한 총 열류량은 42×10^{12} W에 이를 것으로 추산된다. 그림 1은 지구 내부구조의 개념도인데(Dickson and Fanelli, 2004), 지각은 지구전체 부피의 약 2%밖에 차지하지 않지만 방사성 동위원소가 풍

부하기 때문에 열 방출량은 8×10^{12} W에 이르고, 전체부피의 82%를 차지하는 맨틀로부터는 32.3×10^{12} W, 전체부피의 16%를 차지하며 방사성 동위원소가 존재하지 않는 핵(core)으로부터는 1.7×10^{12} W의 열이 방출되고 있다고 추정되고 있다. 이렇듯 지열은 태양과 지구가 존재하는 한 계속 생성되는 에너지의 보고로서 지열에너지원은 무궁무진하다 할 수 있다.

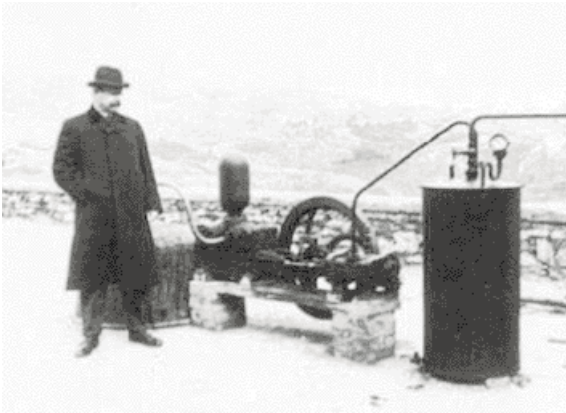
지표 하부로 내려갈수록 지온은 높아지게 되며



[그림 1] 지구의 내부구조(Dickson and Fanelli, 2004)

이를 지온증가율 또는 지온경사(geothermal gradient)라 부르는데, 현대의 시추기술로 파내려 갈 수 있는 깊이 즉, 10 km까지의 평균 지온증가율은 약 25 ~ 30 °C/km 이다. 한편 지하심부의 고온지대와 천부의 저온지대 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 mW/m²이고 각각의 면적을 고려하여 평균하면 지구 전체의 평균 지열류량은 87 mW/m²이 된다. 그러나 이러한 값들은 모두 평균적인 것으로, 맨틀의 대류에 의한 지각판의 경계에서는 화산활동과 관련된 고온 지열지대가 존재하여 지표 근처에서 100°C 이상의 온도를 보이는 곳도 많으며 대부분의 지열발전소가 이러한 곳에 위치하고 있다.

지열 증기로부터 발전을 이룬 최초의 시도는 1904년 이탈리아 Larderello에서 이루어졌다(그림 2). 이 실험의 성공은 지열에너지의 산업적인 가치를 세상에 분명하게 보여주었고, 세계적으로 지열의 이용이 급속하게 확대된 계기가 되었다. Larderello의 발전은 상업적으로도 성공을 거둬 1942년에는 127,650 kWe의 생산용량을 갖췄었다. 이탈리아의 이러한 성공을 거울삼아 몇몇 다



[그림 2] 1904년 Larderello에서 시행된 세계 최초의 지열발전 실험에 이용된 엔진과 이를 발명한 Prince Piero Ginori Conti (Dickson and Fanelli, 2004)

른 나라에서도 지열발전을 위한 움직임이 뒤따랐다. 1919년에 일본의 첫번째 지열 시추공이 벳부에, 뒤이어 1921년에 미국 California의 The Geysers에 각각 굴착되었다. 1958년에는 뉴질랜드에서 소형 지열발전소가 가동되기 시작했고, 1959년 멕시코, 이후 해가 갈수록 많은 나라가 지열발전을 시작하였다. 제2차 세계대전 이후 많은 나라는 지열에너지가 다른 에너지에 비해 경제적으로 경쟁력이 있다고 판단하여 매력을 느끼게 되었고 이는 지열에너지가 수입에 의존하지 않아도 되는 자국의 에너지이고 또 경우에 따라서는 그 지역에서 이용할 수 있는 유일한 에너지원이 될 수 있기 때문이었다.

2. 지열발전 현황

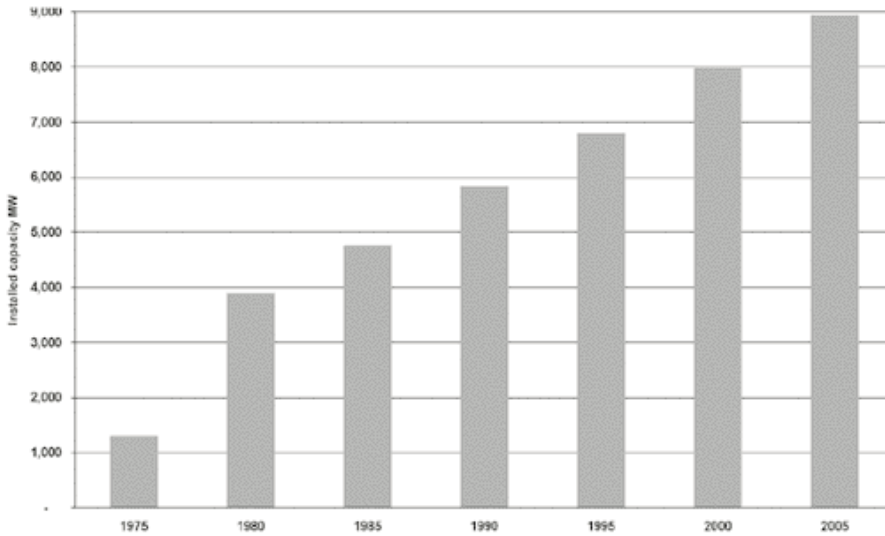
지열발전은 다른 대부분의 재생에너지원과 달리 24시간 중단되지 않고 제공될 수 있어 국가의 기초에너지로서의 역할을 담당할 수 있는 장점이 있다. 지열발전의 규모는 개개지역의 에너지자원과 발전요구량에 따라 100 kW에서 100 MW규모를 가지고 있다. 국가별 발전규모를 살펴보면 미국, 필리핀, 멕시코, 이탈리아, 인도네시아, 일본 등 6개국이 전 세계 지열발전의 86%를 차지하고 있다. 지난 5년간 지열발전은 연간 2.3% 성장(이전 5년간 3.25%)을 보이고 있으며, 현재의 기술로 지열발전의 가능규모는 72,500 MW이고 EGS (Enhanced/Engineering Geothermal System) 기술을 포함하면 137,100 MW 규모로 추정된다(ABS Energy Research, 2007). 한편 전 세계적인 지열발전 용량은 2000년 7,972 MW에서 2005년 8,933 MW로 증가하였다(그림 3). 이것은 전세계 총 발전시설 용량의 0.2%를 차지하는 것이다.

현재 전 세계적으로 24개국이 지열발전을 통해 전기를 공급하고 있다. 지열발전은 미국, 필리핀, 멕시코, 이탈리아, 인도네시아, 일본 등이 주도하고 있으며 최근에 멕시코와 인도네시아의 성장이

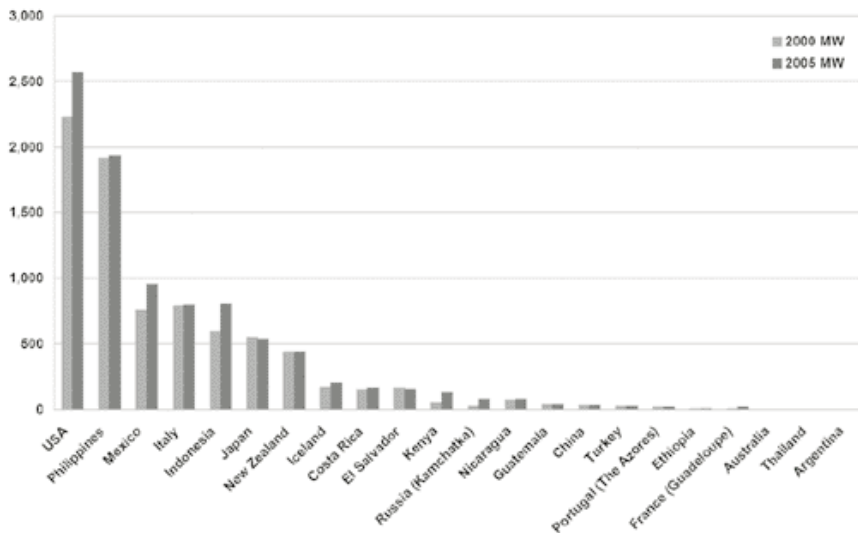
째 컸다. 새롭게 지열발전을 시작한 나라는 에티오피아(1998), 과테말라(1998), 호주(2001), 니카라과 등이다.

표 1에는 지열에너지를 발전에 이용하고 있는 나라들과 그 나라들의 1995년(6,833 MWe) 및 2000년(7,972 MWe)의 지열발전 설비용량, 5년

간의 증가량, 2003년 말(8,402 MWe)의 총 설비용량 등이 나타나 있다. 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 국가



[그림 3] 세계 지열발전 설치 용량(ABS Energy Research, 2007)



[그림 4] 국가별 지열발전 용량(ABS Energy Research, 2007)

들의 지열발전용량은 75에서 463 MWe로 늘었고, 이후 5년이 지난 1984년 말에는 1495 MWe에 달해 이 두 기간 동안의 증가율은 각각 500%와 223%에 달했다. 또한 1984년에서 2000년, 16년 동안은 거의 150%의 증가율을 보였다. 지열발전이 전력공급상에서 매우 중요한 역할을 담당하고 있는 나라도 있는데, 예를 들어 2001년에 필리핀의 경우 지열발전이 전체전력량의 27%를 차지하고, 케냐는 12.4%, 코스타리카는 11.4%, 그리고 엘살바도르는 4.3%를 차지하고 있다.

3. 지열발전 방식

지열발전은 지표에서 시추공을 파서 고온의 지하수와 수증기를 뽑아내고, 불순물을 제거하여 수증기는 발전소의 증기터빈으로 주입된다. 지열발전 방식은 현재 건조증기(dry steam) 방식, 증발증기(flash steam) 방식 및 바이너리(binary cycle) 방식 등이 상업화되어 있으며, 각 방식은 유체의 상태(물 또는 증기) 및 그 온도에 따라 결정된다(Ronald D., 2005).

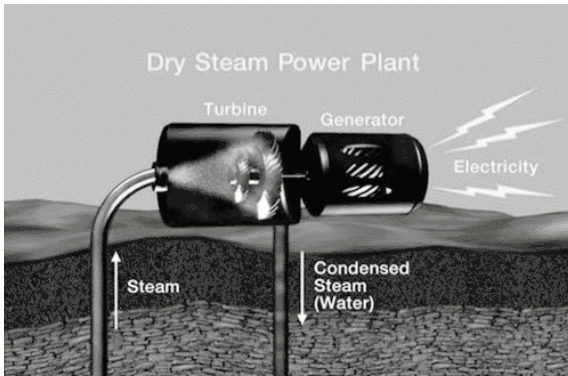
<표 1> 1995년에서 2000년 (Huttrer, 2001로부터), 2003년 말의 세계의 지열발전 설비용량 비교

Country	1995 (MWe)	2000 (MWe)	1995-2000 (increase in MWe)	% increase (1995-2000)	2003 (MWe)
Argentina	0.67	-	-	-	-
Australia	0.15	0.15	-	-	0.15
Austria	-	-	-	-	1.25
China	28.78	29.17	0.39	1.35	28.18
Costa Rica	55	142.5	87.5	159	162.5
El Salvador	105	161	56	53.3	161
Ethiopia	-	7	7	-	7
France	4.2	4.2	-	-	15
Germany	-	-	-	-	0.23
Guatemala	-	33.4	33.4	-	29
Iceland	50	170	120	240	200
Indonesia	309.75	589.5	279.75	90.3	807
Italy	631.7	785	153.3	24.3	790.5
Japan	413.7	546.9	133.2	32.2	560.9
Kenya	45	45	-	-	121
Mexico	753	755	2	0.3	953
New Zealand	286	437	151	52.8	421.3
Nicaragua	70	70	-	-	77.5
Papua New Guinea	-	-	-	-	6
Philippines	1227	1909	682	55.8	1931
Portugal	5	16	11	220	16
Russia	11	23	12	109	73
Thailand	0.3	0.3	-	-	0.3
Turkey	20.4	20.4	-	-	20.4
USA	2816.7	2228	-	-	2020
Total	6833.35	7972.5	1728.54	16.7	8402.21

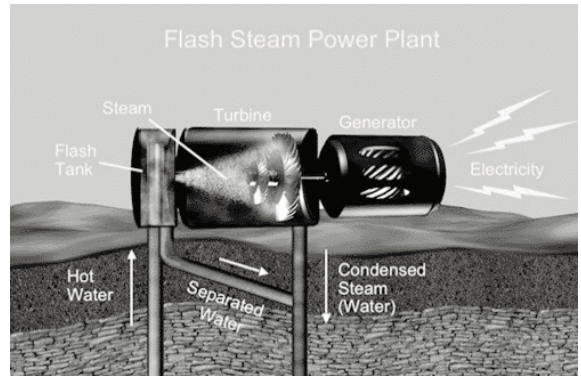
건조증기 발전방법은 건조증기시스템을 이용한다. 관정으로부터 나오는 증기(steam)를 터빈으로 직접 보내 발전을 하는 방법이다(그림 5). 설비용량 기준으로 지열발전소의 약 28%가 건조증기 방식을 이용한다. 이 방식은 관정으로부터 생산되는 지열유체가 증기만으로 구성될 때 적용 가능한 방식이다. 규모가 큰 건조증기 저류지는 Larderello와 The Geysers가 발견되었을 뿐이고 일본(Matsukawa), 인도네시아(Kamojang), 뉴질랜드(Poihipi Road section of Wairakei) 미국(Cove Fort, Utah) 등지에서 제한적으로 건조증기 생산지역이 있다. 이러한 사실은 건조증기 방식으로 지열발전이 가능한 지역이 극히 제한적이며 천혜의 조건을 가져야 한다는 것을 의미한다.

증발증기 방식은 오늘날 가장 일반적인 지열발전 형태이다. 182°C 이상의 온도의 물을 이용하는데 고압상태에서 발전시설로 양수한다. 발전시설에 도달하면 압력을 갑자기 낮추어 뜨거운 물의 일부가 증기로 변환 또는 증발하는데 이 증기를 이용하여 발전하는 방법이 증발증기 방식이다(그림 6). 설비용량 기준으로 지열발전소의 약 63%가 증발증기 방식을 이용한다. 이러한 증발증기 방식은 single flash 방식과 double flash 방식의 두 가지 종류가 있다.

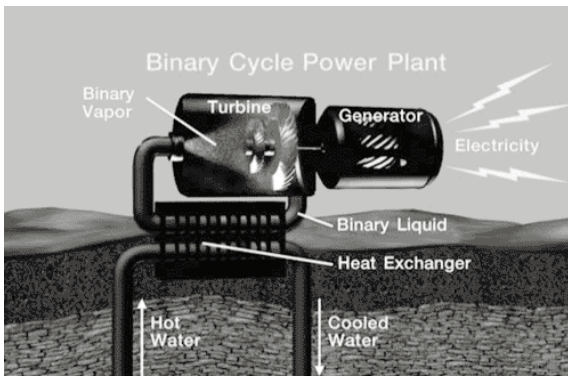
바이너리 지열발전은 상기 두 방법과는 차이가 있다. 물이나 증기가 터빈에 직접 접촉하지 않고 또 다른 'working fluid'를 덂히는데 이용된다. 이때 열교환기를 이용하게 되고, 열교환이 이루어



[그림 5] 건조증기 방식 발전 모식도(Alyssa et al., 2007)

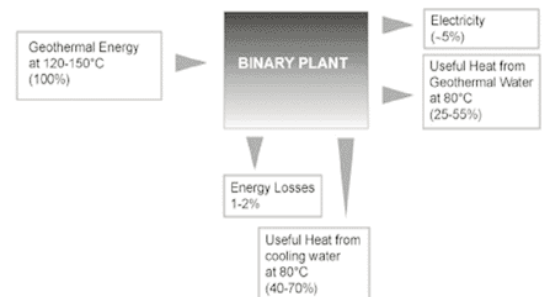


[그림 6] 증발증기 방식 발전 모식도(Alyssa et al., 2007)



[그림 7] 바이너리 방식 발전 모식도(Alyssa et al., 2007)

LOW-BIN Plant for Geothermal Cogeneration of Heat & Power



Energy flow chart for heat and power cogeneration in the LOW-BIN project

[그림 8] LOW-BIN 프로젝트 concept(<http://www.lowbin.eu>)

진 working fluid가 증기화되어 터빈을 돌리는 방식이다(그림 7). 이 시스템의 장점은 낮은 온도의 유체를 열원으로 사용하여 발전을 할 수 있다는 점이다. 세계적으로 최저온 지열발전이 이루어지고 있는 곳은 Alaska의 Chena Hot Spring 지역이다. 이 지역의 경우 1998년 최초로 시추가 이루어진 이래 2004년부터 75°C의 물을 이용하여 바이너리 발전을 하고 있다.

한편 EU에서는 LOW-BIN(Low Temperature Geothermal Binary Power) 프로젝트를 만들어 진행 중에 있다. 이 프로젝트는 지열발전의 효율향상 및 열 회수율 증가를 위한 연구로(그림 8) 8개국, 9개 회사가 참여하고 있으며, 2006년에 시작되어 2009년에 완료 예정이다(http://www.lowbin.eu). 프로젝트의 실질적 목표는 65°C에서 발전하는 Rankine Cycle Unit를 개발하는 것이며, 열에너지와 전력을 동시에 생산하는 시스템이다.

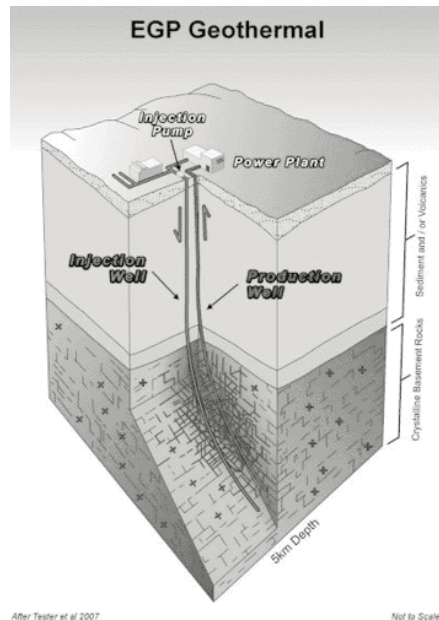
4. EGS 지열발전

지열발전이라고 하면 일부 한정된 지역에서만(열 구배가 높은 지역) 가능한 것으로 인식되어 지열구배가 높지 않은 대부분의 국가에서 기초에너지의 공급원으로 간주하지 않는 경향이 있었다. 하지만 EGS(Enhanced/Engineering Geothermal Systems) 기술을 통하여 지역적 제한에서 벗어난 지열발전의 가능성이 나타나고 있다. EGS 기술은 HDR(Hot Dry Rock), HWR(Hot Wet Rock), HFR(Hot Fractured Rock) 등으로 불린다. EGS 기술의 기본 개념은 기반암의 자연 절리의 투수율을 증가시켜서 다수정을 시공하고 물을 순환시켜 발전하는 개념이며(그림 9) EGS 기술은 다가오는 미래의 지열발전에 지대한 공헌을 할 것으로 기대된다.

EGS 기술은 1970년대부터 상업적 지열발전이 힘든 지역에서 지열을 개발하기 위한 연구로 진행되었고, 대표적인 연구 프로젝트로는 미국의 Fenton Hill, Coso, Desert Peak 프로젝트, 유럽

의 Rosemanowes, Falkenberg, Urach, Le Mayet de Montagne 프로젝트, 일본의 Hijiori, Ogachi 프로젝트 등이 있다. 최근에는 EU에서 ENGINE(ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe, http://engine.brgm.fr)을 조직하여 주요 유럽 프로젝트인 Soultz-sous-Forets(http://www.soultz.net)를 지원하고 있다. 참여국가로는 프랑스, 독일, 이탈리아, 스위스, 미국, 일본 등 다수이며, 이 프로젝트는 산업 컨소시엄(EEIG Heat Mining)이 운영하고 있다. 자금은 EC, 프랑스, 독일이 거의 균등하게 제공하고 있으며, 이 사이트의 시스템은 1개의 주입정과 2개의 생산정으로 되어 있다.

EGS 발전설비는 closed-loop 순환식으로 운영되므로 온실가스를 발생을 최소화한다. 주요 환경문제 이슈로는 지하수 사용과 오염, 지진의 발생, 물주입과 생산의 결과 발생하는 지반 침하문제 등이 있으나 기술의 발전과 더불어 해결될 수 있는 문제들로 인식되고 있다.

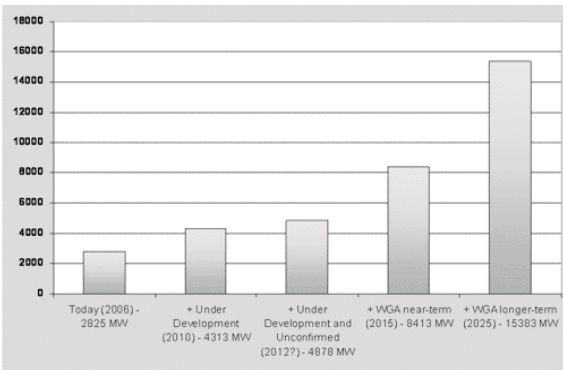


[그림 9] 2공 EGS 지열발전 개념도
(http://www.kuthenergy.com)

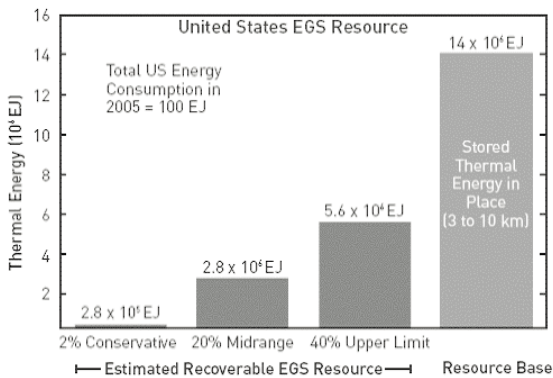
미국의 경우 지열발전 분야의 목표로는 10년 내에 현재의 약 3배 이상 발전량을 예상하고 있다(그림 10). 특히 EGS 기술을 활용한 지열발전에 대해 큰 기대를 가지고 있으며, 2050년에는 미국의 1차에너지 소비량의 약 10% 정도를 지열발전 분야가 담당하는 도전적인 목표를 세우고 있다. 따라서 장기적으로 EGS를 활용한 지열발전분야는 거대시장으로 발전할 것으로 예상되고 있다.

또한 미국에서의 EGS 지열발전의 가격경쟁력을 예측한 자료에 의하면 2010년대 초반에 EGS 기술에 의한 지열발전이 전력시장에서의 가격경쟁력 확보가 이루어질 것으로 예상되고 있다(그림 11).

그림 12는 미국의 추정 EGS 자원량 및 개발가



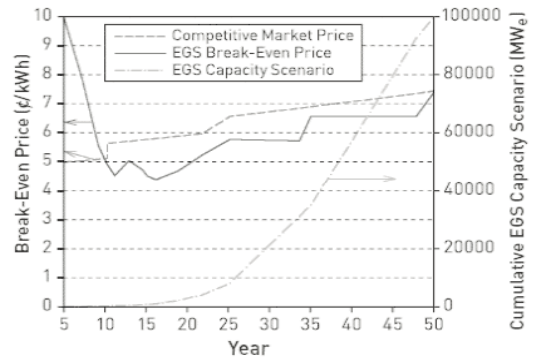
[그림 10] 미국의 장기 지열발전 성장예측(Alyssa, 2007)



[그림 12] 미국의 추정 EGS 자원량 및 개발가능량 (MIT, 2006)

능량을 보여주고 있다. 가장 보수적으로 개발가능량을 산정하여, 전체 EGS 자원량의 2%만을 개발하여도 2005년 미국 총 에너지 소비량의 2800배에 달할 정도이다. 이는 EGS 지열발전 산업의 에너지 자원 측면에서의 중요성과 개발 필요성을 시사하고 있다 하겠다.

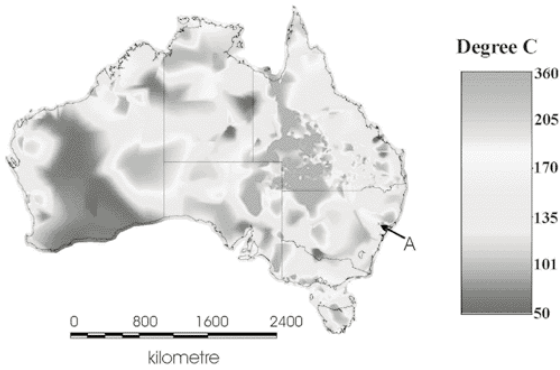
일본도 EGS 및 저온발전 분야에 대한 장기적인 연구개발 기술로드맵을 2007년 수립하여 진행하고 있다(그림 13). 일본의 경우 지열발전 분야를 바이너리 지열발전, 고온암체 발전, 마이크로 지열발전으로 구분하여 연구개발 전략을 수립하고 있다. 우선적으로 가장 빨리 보급될 수 있는 바이너리 발전분야에 대한 연구가 진행되고 있으며 EGS 발전의 경우 2020년대 말에 도입을 목표로



[그림 11] EGS 지열발전 가격경쟁력 변화 예측(MIT, 2006)

지열 발전	년도	2008	2010	2015	2020	2025	2030
바이너리 지열 발전	연구개발단계	0	0	0	0	0	0
	1. 지열자원 탐사 및 평가기술	0	1	5	2	5	0
	2. 저비용 공학기술	0	0	1	2	2	0
	3. 열저류 지층 모니터링 및 관리기술	0	0	0	0	0	0
	4. 유지관리 기술	0	0	0	0	0	0
	5. 환경영향 평가기술	0	0	0	0	0	0
고온암체 발전	연구개발단계	0	0	0	0	0	0
	1. 지하심부 지열탐사 기술	0	0	0	0	0	0
	2. 지열저류층 고장 및 평가기술	0	0	0	0	0	0
마이크로 지열발전	연구개발단계	0	0	0	0	0	0
	1. 지열자원 탐사 및 평가기술	0	0	0	0	0	0
	2. 저비용 공학기술	0	0	0	0	0	0
	3. 유지관리 대책기술	0	0	0	0	0	0

[그림 13] 일본의 EGS 및 저온발전 기술개발 전략 (산업자원부, 2007)



[그림 14] 5km 심도에서의 호주 지열분포 (Daniel et al., 2000)

하고 있다.

호주도 1980년대부터 EGS 지열발전 에 대한 연구를 시작하였고 호주 최초의 현장 프로젝트는 Cooper Basin에서 수행되었다. Cooper Basin 지역은 호주에서 지열구배가 가장 높은 지역으로 평가된 지역으로 호주 EGS 지열발전의 연구프로젝트의 시발점이 되었다. 그림 14는 심도 5 km에서의 호주지역 지온분포를 보여주고 있다. Cooper Basin 프로젝트 시작 이후 Muswellbrook HDR 프로젝트, Woronora HDR 프로젝트가 현재 호주에서 진행 중에 있다(Burns et al., 2000).

구체적인 EGS 기술 연구방향으로 In-situ stress의 크기 및 방향이 reservoir 형성에 미치는 영향, micro seismic sensing 기술을 활용한 reservoir 규모 파악(Hiroshi et al., 2000, Tishner et al., 2007), modeling 및 tracer를 이용한 지열유체 순환 및 lifetime 결정(Hardeman et al., 2000, Sarkir et al., 2000), 경제적 심부 천공 기술 등에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다.

5. 맺음말

앞에서 살펴본 바와 같이 세계적으로 1960년대 부터 지열발전 플랜트 건설이 활발히 이루어졌고

국제유가 상승 및 신재생 에너지 개발이라는 관심 속에 향후에도 지열발전소 건설은 지속적으로 계속될 것으로 예상된다. 특히 EGS 지열발전은 향후 지열발전 분야를 책임질 기술로 예측되어 지고 있다.

국내의 경우 지온경사가 높지 않아 지열발전 에 대한 관심이 상대적으로 적었던 것이 사실이다. 한국지질자원연구원에서 꾸준히 국내 지열분포 에 대한 조사를 하고 있지만 지열발전 관련기술의 개발은 극히 미약하다고 할 수 있다. 하지만 최근 지 열발전 분야에 대한 국내연구 필요성이 지열관계 자 분들에 의해 제기되어 2007년 지열발전분야 국가 기술 로드맵이 수립된 바 있다. 지열발전 분 야 기술 로드맵은 2030년 EGS 지열발전 국내 적 용을 목표로 하고 있으며, 저온발전기술, 지열탐 사 기술, 심부굴착 기술, reservoir modeling 기술 등을 포함하고 있다. 지열발전은 다학제간 협력에 의해 개발될 수 있는 기술로 관련분야 학계, 산업 계, 연구소 등의 지속적 관심과 참여가 필요하 다 고 하겠다.

대부분의 에너지를 수입해야하는 국내 현실에 비추어 볼 때 지열을 이용한 전력 및 열에너지 생산은 매우 매력적인 분야이다. 신재생에너지 이용, 온실가스 저감 효과, 자체 에너지원 개발 등의 많은 효과를 가지는 지열발전이 향후 국내에서도 경쟁력 있는 분야로 발전되길 바란다.

참고문헌

1. 산업자원부, 2007, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030 [지열].
2. ABS Energy Research, 2007, Geothermal Energy Report, 108p.
3. Alyssa K., 2007, Overview Geothermal Generation and Potential, POWER-GEN Renewable Energy & Fuels 2007.
4. Alyssa K., Diana B., Karl G., 2007, A Guide to Geothermal Energy and the

Environment

5. Burns, K .L. et al., 2000, Status of the Geothermal Industry in Australia, World Geothermal Congress 2000, 99–108.
6. Daniel S., Prame C., and Doone W., 2000, Initial Calculations of performance for an Australian HDR Reservoir, World Geothermal Congress 2000, 3907–3912.
7. Dickson, M. H. and Fanelli, M., 2004, What is geothermal energy?, <http://www.geothermal-energy.org/>.
8. Hardeman, B., Kulkarni, S., and Swenson, D., 2000, A 3–D Finite Element Model of Flow in Fractured Reservoirs, World Geothermal Congress, 4029–4034.
9. Hiroshi A. et al., 2000, Characterization of HDR Reservoir by Seismic Signal While Drilling, World Geothermal Congress, 3627–3632.
10. <http://engine.brgm.fr/>
11. <http://www.kuthenergy.com/>
12. <http://www.lowbin.eu/>
13. <http://www.soultz.net/>
14. Hutterer, G. W., 2001, The status of world geothermal power generation 1995–2000, Geothermics, 30, 7–27.
15. Ronald D., 2005, Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Study, 450p.
16. Sarkir S. et al., 2000, Chemical and Isotopic Survey of Geothermal Reservoirs in Western Anatolia, Turkey, World Geothermal Congress, 1765–1770.
17. Stacey, F. D. and Loper, D. E., 1988, Thermal history of the earth: a corollary concerning non–linear mantle rheology, Phys. Earth Planet. Inter., 53, 167–174.
18. MIT, 2006, The Future of Geothermal Energy.
19. Tishner T. et al., 2007, HDR Project Soultz: Hydraulic and Seismic Observations During Stimulation of the 3 Deep Wells by Massive Water Injections, 32th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 