

“MW급 지열발전 상용화 기술개발” 사업 경과 및 계획

윤 윤 상
(주)넥스지오 대표이사

1. 서론

우리나라는 저탄소 녹색성장을 위한 제1차 국가 에너지 기본계획(2008-2030) 상 2030년까지 1차 에너지소비량의 11% (33,027,000 TOE)를 신재생에너지로 보급하고 신재생에너지산업을 신성장동력으로 육성하는 정책을 표방하여 왔으며, 이러한 신재생에너지 육성 정책 중 국내 심부 지열자원의 개발과 활용 역시 중요한 과제 중의 하나로 제시된 바 있다 (강신형, 2007; 장기창, 2009; 송윤호, 2010).

지열발전은 계절과 날씨 등에 영향을 받지 않고 365일 24시간 가동할 수 있어 기저부하를 담당할 수 있는 유일한 신재생에너지 자원으로서 국내 신재생에너지 육성 정책에 부합함은 물론 전 세계적으로도 지열 발전에 대한 관심이 증대되고 있는 것이 사실이다. 화산성 고온 지열지역이 아닌 우리나라에서는 그동안 주로 연중 일정한 온도를 유지하는 천부 지중열을 이용한 지열냉난방을 중심으로 지열에너지에 대한 관심과 보급이 집중되었다.

그러나, 최근 선진국을 중심으로 화산성 고온 지열 지대가 아닌 지역에서 심부 지열원을 확보하고 지열저류층을 수리자극 (hydraulic stimulation)을 통해 인공적으로 생성하는 인공지열 저류

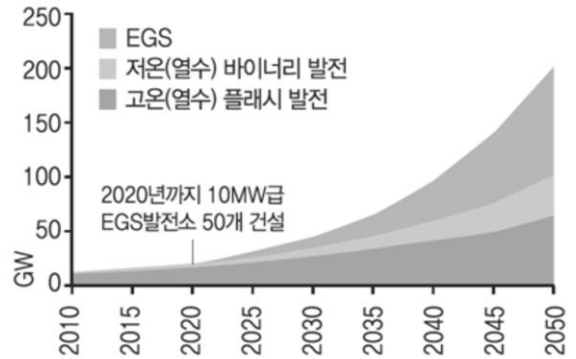
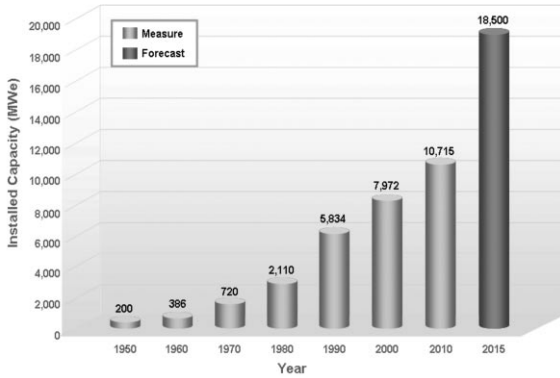
층 생성 기술(EGS : Enhanced Geothermal System)을 통한 상업적 지열발전이 시도되고, 운영됨에 따라 국내에서도 심부지열을 이용한 지열발전의 가능성이 제기되었다.

이에 ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발’ 사업이 지식경제부의 지원에 의해 2010년 12월 착수되었으며, 1단계 (2010. 12~2012.11) 개발을 완료하고, 2단계 (2012. 12~2015. 12) 사업에 진입하였다. 여기서는 ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발’ 사업의 개요와 1단계 사업 성과 및 2단계 계획에 대해 기술하도록 하겠다.

2. ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발’ 사업 추진 배경

2.1. 지열 발전 국제 동향

2010년 1월 현재, 세계 지열 발전용량은 10.7 GWe의 발전시설을 갖추고 있고 2010년의 전력 생산량은 67,246 GWh에 달하고 있다 (Bertani, 2010). 또한 Wissing (2009)는 IEA GIA 기준으로 총 17백만 배럴의 석유대체효와 64백만톤의 148백만톤의 이산화탄소 배출 절감효과로 분석한 바 있다. 이와 관련하여 국제에너지협회 IEA는 2011년 전세계 지열발전 산업을 전망하면



[그림 1] 연도별 지열발전 설비용량 (자료: Bertani, 2010, IEA, 2011)

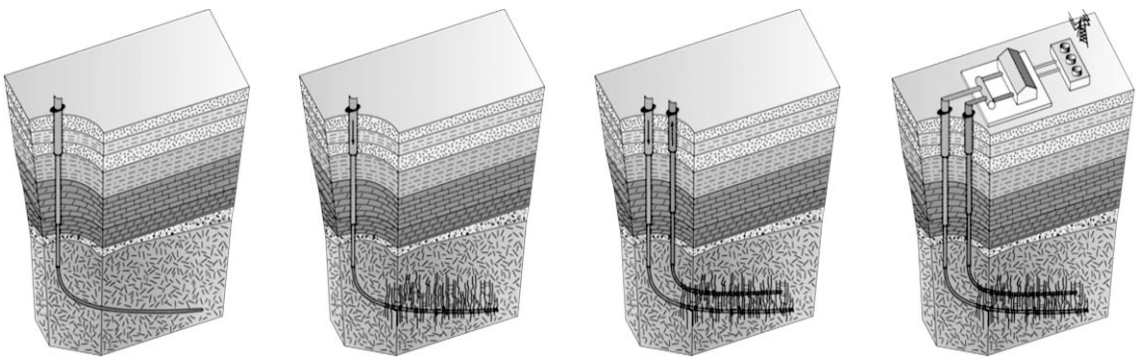
서, 2010년 현재 10.7 GWe의 발전설비용량이 2050년에는 200 GWe로 증가할 것으로 예상하고 그중에서도 2020년 이후 비화산지대의 EGS 지열 발전이 급성장하여 2050년에는 전체 지열 발전의 40% 이상을 차지할 것으로 예측한 바 있다. 이러한 EGS 지열 발전 시장의 확대에 대한 인식은 비화산지역인 우리나라의 지열 발전 산업 창출의 가능성 뿐 아니라, EGS 지열 발전 시장을 선점할 수 있는 기회가 열려 있음을 시사하고 있다.

2010년 현재 전 세계적으로 지열발전 플랜트는 526기가 건설되었으며, 설치용량 면에서 1단 습증기(single flash-steam) 방식 (4,421 MWe, 41%)과 2단 습증기(double flash-steam) 방식 (2,092 MWe, 20%)의 뒤를 이어 건증기(Dry Steam) 방식(2,878 MWe, 27%), 바이너리

(Binary) 방식 (1,178 MWe, 11%)의 점유율을 보이고 있다. 특히 용량에서는 바이너리 방식의 비율이 낮았지만, 플랜트 수에서는 전체 526기의 플랜트 중 236기(45%)가 바이너리 방식으로 타 방식보다 설치 수량이 월등한 상태이다. 중저온의 지열수를 이용하는 바이너리 방식의 설치 개소가 많은 것은 지열발전이 더 이상 화산성의 고온 지열자원을 가지고 있는 국가에서만 보급될 수 있는 분야가 아니라는 사실을 뒷받침하고 있다.

2.2. EGS 지열 발전 기술

EGS (Engineered Geothermal System) 지열 발전 기술은 과거에 고온암체(Hot Dry Rock; HDR)를 대상으로 했던 기술을 좀 더 포괄



[그림 2] EGS 기술의 개념도

<표 1> 독일의 지열발전소 (Wissing, 2009)

위 치	설비용량	연 도
Unterhaching (German Molasse Basin)	3.3 MW (Kalina)	2007
Landau (Upper Rhine Valley)	2.9 MW (ORC)	2007
Insheim (Upper Rhine Valley)	5 MW	2010
Bruchsal (Upper Rhine Valley)	0.55 MW	2009
Sauerlach (German Molasse Basin)	8 MW	2009
Garching (German Molasse Basin)	-	2011
Unterf r ing (German Molasse Basin)	-	2011

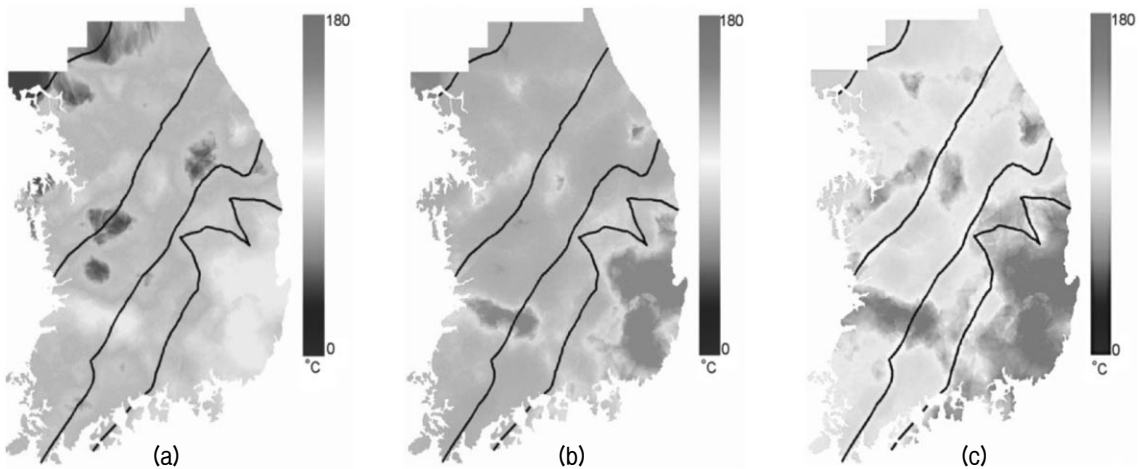
적인 의미로 진보시킨 것으로 발전을 위한 온도는 충분하지만 유체가 부족하거나, 투수율이 낮아 발전에 필요한 만큼의 지열 저류층이 부족하지 않을 경우에 인공적으로 투수율을 향상시켜 이를 상업적으로 발전이 가능한 시스템으로 만들어내는 기술이다. 일반적으로 EGS에서는 그림 2와 같이 지하 심부를 굴착한 후, 강한 압력으로 수리자극을 진행시킴으로써 인공적인 저류층을 생성한 다음, 이를 통과하면서 열교환된 고온의 지열수를 생산정으로 끌어올려 발전에 이용하게 된다.

진보된 지열발전기술인 EGS 기술의 개발에 따라 화산지대가 아닌 프랑스, 독일, 호주 등 비화산 지대에서도 지열발전의 상용화가 활발히 추진되

고 있는 점은 주목할 만한 동향이다. 이 들 국가에서는 화산성 고온지역이 아닌 지역에서 고온의 지열 자원을 탐사 평가 (지열자원 탐사 및 평가 기술)하여 유망 지열 자원을 확보하고, 지하 3 ~ 5 km 심도까지 굴착 후 (심부 굴착 기술), 고압의 수리자극을 이용하여 인공적으로 지열 저류층을 생성(인공 저류층 생성 기술)하여 이로부터 증기 및 열수를 회수하여 전기를 생산(binary 지열발전 기술)하고 집단 열에너지를 공급하는 EGS 기술을 적극 도입하고 있다. 독일의 경우 표 1과 같이 Landau에서 현재 2.9 MWe의 지열발전 시설이 가동 중에 있으며, 2025년까지 150개의 지열발전소를 건설할 계획을 세우고 있다.

2.3. 국내 심부 지열 자원 및 지열 발전 산업 전망

2003년 이래 한국지질자원연구원에서 기존의 온천시추 등의 자료를 수집하고 암석의 열물성을 측정하여 2007년 기준으로 총 359개의 지열류량 시료와 580개의 지온증가율 자료, 1,560개의 암석 샘플에 대한 열전도도를 측정하여 남한에 대



[그림 3] 국내 심도에 따른 지온 분포 예측 (a) 3 km, (b) 4 km, and (c) 5 km. (Lee et al, 2010)

한 지온증가율 분포도, 지열류량 분포도, 그리고 암석의 열전도도 분포가 작성된 바 있다. 이상의 연구 결과에 따르면 우리나라는 비화산지대의 특성 상 화산 지대에 비해 지온경사도가 크지 않으나, 그림 3과 같이 5 km 심도에서 지역에 따라 180°C 이상의 지열저류층이 발달하고 있을 가능성이 높은 것으로 평가되었다 (Lee et al., 2010).

우리나라 5 km 이내 심도에 부존하는 지열에너지의 총량은 2.4×10¹² 석유환산톤(TOE)로 알려져 있으며, 이중 2%를 추출하여 사용한다고 가정했을 때, 약 480억 TOE로 이는 2006년 우리나라 전체 1차 에너지 총 소비량의 약 200배에 해당하는 양이다 (Lee et al., 2010). 우리 국토에 부존하는 막대한 지열자원을 심부지열발전기술로 개발하여 이산화탄소 감축 및 국가 에너지 안보에 기여할 필요가 있으며, 급격한 성장세를 보이는 지열발전 산업분야에서 해외수주 경쟁력을 확보하고 지열발전 산업의 육성을 위해서는 시범지역에서의 심부 지열자원의 확보를 위한 핵심기술의 개발과 활용의 성공 사례가 필수적이다.

이와 같이 국내 심부 지열을 이용한 지열 발전 가능성이 대두됨에 따라 ‘한국형 지열발전 시스템의 기술개발 타당성 연구’ (장기창, 2009)에서

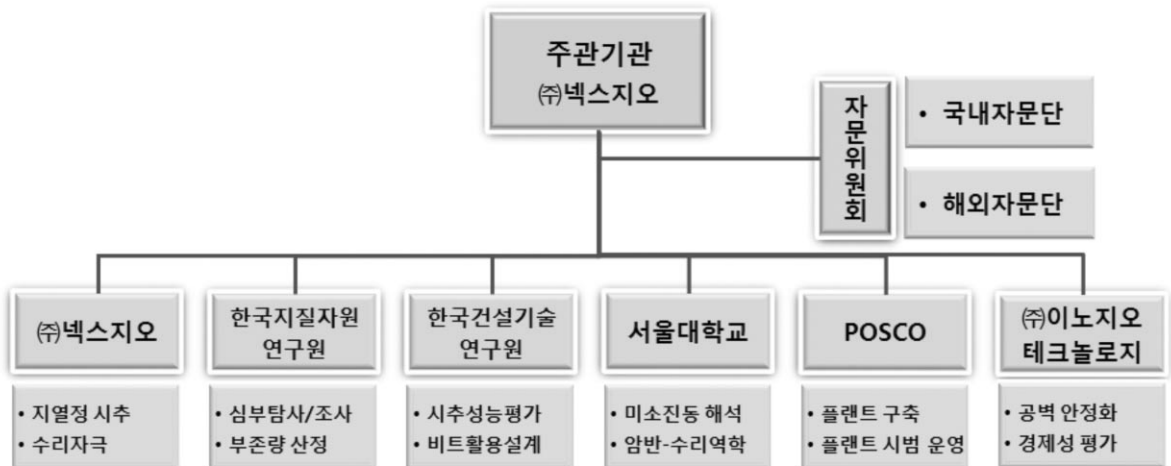
는 우리나라 지열발전 기술 개발 단계를 구분하여 단기(2011 ~ 2015)적으로 200 kWe급 차세대 지열발전 플랜트 기술개발 및 1 MWe급 지열발전 플랜트(소형플랜트) 구축, 중기(2016 ~ 2020)적으로는 5 MWe급 상용화 플랜트(중형플랜트) 완성, 장기(2021 ~ 2030)적으로는 한국형 중대형 지열발전시스템을 개발하여 10 MWe급 지열발전 플랜트(대형플랜트)를 다수 보급하는 것을 목표로 제시한 바 있다.

특히 2011년 지식경제부의 “온실가스감축 기술 로드맵”에서는 20 MWe급의 지열발전소를 전략 품목으로 설정하고, 2020년까지 20 MWe 지열발전설비용량, 2030년까지 200 MWe 지열발전설비용량을 갖출 것을 제시하고 있다.

3. ‘MW급 지열발전 상용화 기술개발’ 사업 진행 경과

3.1. 사업 목표 및 내용

‘MW급 지열발전 상용화 기술 개발’ 사업은 2010년 12월로부터 5개년 계획으로 정부 출연금 약 200억원, 민간출연금 약 250억원 규모의 예산으로 착수되었다. 사업 주체는 (주)넥스지오를 주

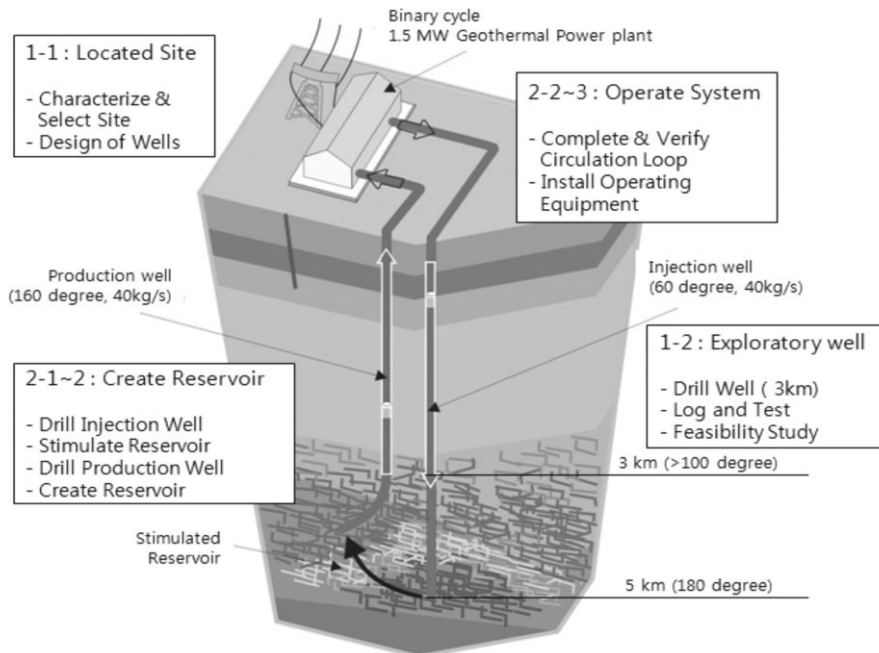


[그림 4] MW급 지열발전 사업 연구 참여 기관 및 역할

관기관으로 하여 개별 요소 기술의 국내 전문 기관인 한국지질자원연구원, 한국건설기술연구원, 서울대학교, 포스코, 이노지오테크놀로지 등이 그림 4의 내용 중심으로 연구 개발에 참여하고 있다.

이 과제에서는 국내 5 km 심도 이내에서 발전이 가능한 심부지열자원을 탐사, 평가하고 인공적으로 지열저류층을 형성하여 지열수 순환시스템을 완성하는 원천기술을 확보함으로써 MWe급 상용화 지열발전소(CDP : Commercial Demonst-

ration Plant)를 건설 운영하는 것을 목표로 하고 있다. 이 과제에서 연구 개발하고자 하는 핵심 기술은 지열자원의 조사/탐사 기술, 지열 저류층 평가 기술, 심부 시추기술 및 심부 지열저류층 활성화 기술 등 지중 지열수 순환 시스템 관련 기술과 확보된 심부지열수를 활용하여 전력을 생산할 수 있는 MW급의 플랜트 설계 및 건설, 운영 기술 등이다. 이 연구는 크게 2단계로 구분되어 수행될 계획이며, 그림 5는 단계별로 진행되는 연구의 중심 내용이다.



[그림 5] ‘MW급 지열 발전 상용화 기술개발’ 사업 개요

3.2. 사업 진행 성과

3.2.1 부지의 선정, 특성화 및 모니터링 시스템 구축

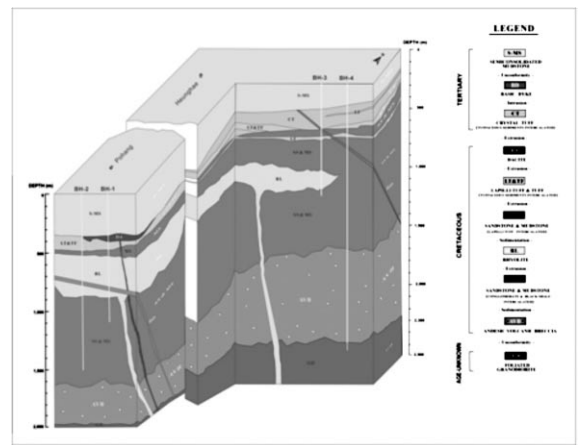
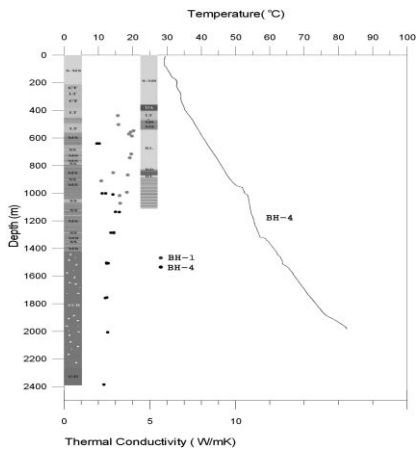
현재 우리나라에서 비교적 심부 지열자원 부존 가능성이 높다고 여겨지는 몇몇 지역에 대해 이러한 두 가지 지열부존 방식에 입각하여, 온도를 포함한 지질학적 조건 및 지리적, 사회적(infra 구축, 접근성 등) 입지조건을 고려하고 또한 각종 조사자료의 분석을 통해 지열발전의 적용 가능성을 분석하였다. 가장 신뢰적인 분석기법으로 널리 알려져 있는 확률론적 접근방법에 기반한 분석을 수행하였으며, 비교안별 분석결과 값에 대한 불확실성 및 위험도를 고려한 신뢰도 평가도 수행하

였다. 확률적 VE분석 및 신뢰도 평가에는 ‘몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)기법’을 활용하였다. VE분석을 위한 비교안은 강릉시, 석모도, 울릉도, 제주도, 포항시의 5개 지역으로 설정하였으며, 그 분석 결과는 표 3과 같다.

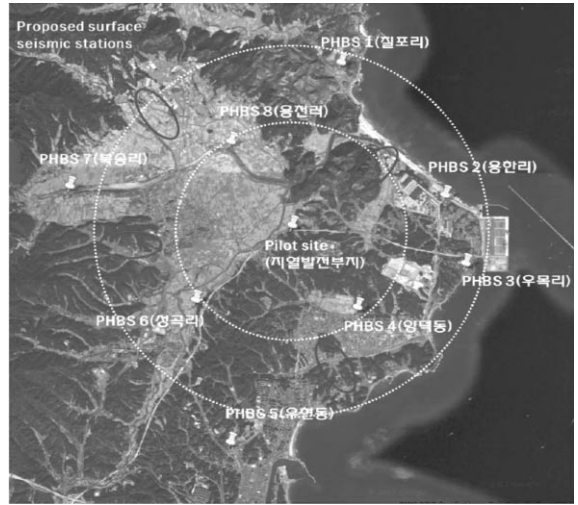
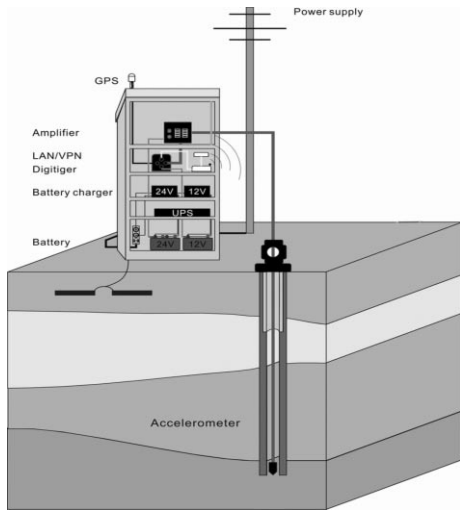
몬테카를로 시뮬레이션을 활용한 비교안 별 확률적 성능점수를 분석한 결과, 확정적 분석결과와 비슷한 수치의 성능점수가 도출되었으며, 포항시가 81.36점으로 가장 최적의 입지후보로 판단되었다. 포항 지역 내 구체적 후보 부지는 기존 조사자료가 충분한 지역을 대상으로 선정을 위해 (1) 수리자극 등을 위한 용수확보 가능성, (2) 차량 등의 용이한 접근성, (3) 소음 및 진동에 관한 민원제기 가능성, (4) 매입면적, (5) 기반시설 확충,

<표 3> 비교안별 확률적 성능분석 결과

평가기준항목		강릉	석모도	울릉도	제주도	포항
		PI (평균)	PI (평균)	PI (평균)	PI (평균)	PI (평균)
A	지열부존형태/개발방식	12.48	9.56	12.48	10.38	10.21
B	조사수행 및 자료유무	9.43	17.05	16.04	10.45	19.61
C	심부 고온확보 가능성	17.76	21.97	25.89	17.45	21.66
D	인프라 구축/ 부지확보	14.59	15.50	11.34	13.42	19.91
E	타당성 조사 예상기간	7.29	7.87	7.17	6.83	9.96
확률적 PI(점)		61.55	71.96	72.92	58.53	81.36



[그림 6] MW급 지열발전소 부지 지질 특성 및 모델



[그림 7] 미소진동 관측시스템 모식도 및 설치 위치

(6) 준공(검사)에 대한 검토를 수행하였다.

선정된 부지의 사전 조사 자료를 종합하면 그림 6과 같이 폐름기 화강섬록암을 기반암으로 하여 약 2.2 km 심도에서 중생대 경상누층군의퇴적암 및 화산암이 부정합으로 덮고 있으며, 약 300 ~ 500 m 심도에서 신생대 이암층이 경상누층군을 다시 부정합으로 덮고 있는 것으로 분석되었다.

선정된 부지를 중심으로 미소진동 모니터링을 위해 시추공 관측소 9개 및 지표 관측소 4개소를 구성하였으며, 이중 시추공 관측시스템 8개소를 설치 완료하고 배경 신호를 기록 중에 있다. 미소진동 모니터링은 수리자극 시 심부 암반 내 균열이 생성 및 전파할 때 발생하는 미소진동(micro seismicity)을 실시간으로 관측함으로써 지열 저류층 생성 및 발달 상황을 3차원적으로 규명 할 수 있으며, 굴착 중 암반 내 탄성과 속도 규명 및 심부 파쇄대를 영상화 할 수 있다. 또한 미소진동 반사 신호를 해석하여 지열수 순환 경로를 영상화하는데 그 목적이 있다. 미소진동 관측시스템 모식도 및 설치 지점은 그림 7과 같다.

3.2.2 지열정 설계와 대심도 시추

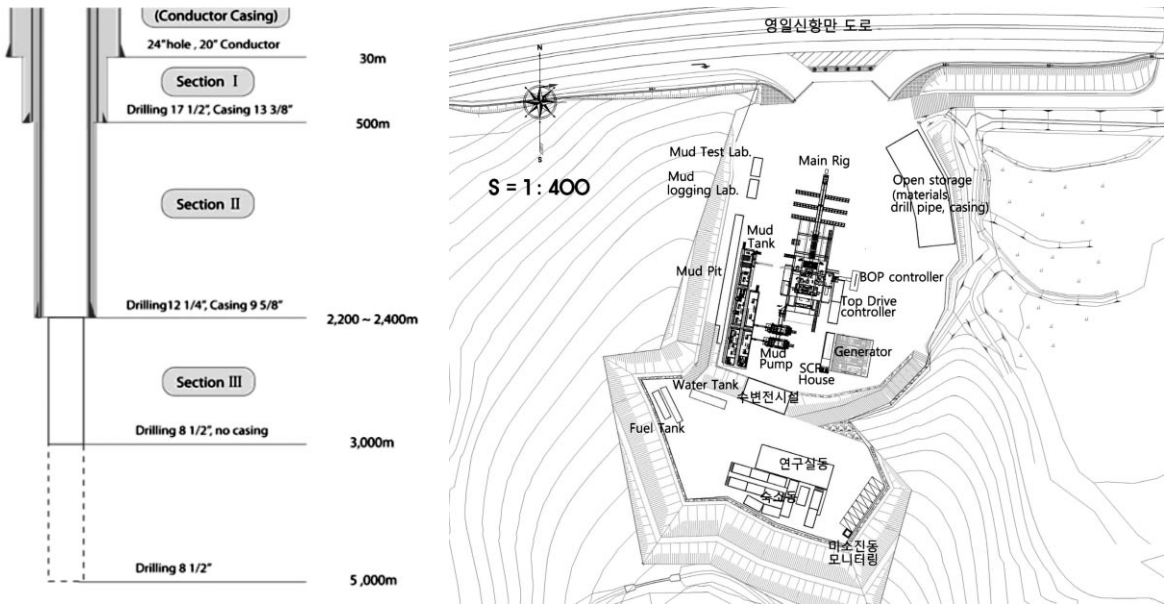
지열정 설계는 하부 지반의 지질 및 공학적 특성

에 따라 지열정 케이싱의 단수 및 크기를 고려하여 이루어져야 한다. 예기치 못한 사고의 발생, 지열정의 안정성 등을 고려하면 케이싱의 단수를 늘리는 것이 필요하지만, 시추 비용과 시간이 늘어나게 된다. 지열정 설치비용을 최소화 하고 충분한 안정성을 보장하는 지열정 설계가 이루어지기 위해서는 사전에 부지의 지질 및 지반 특성 파악이 매우 중요하다.

그림 6의 부지 지질 모델을 기초로 하여 외국 사례의 검토와 해외 기술진의 자문을 종합하여 그림 8의 4단 casing의 지열정 설계를 도출하였으며 지열정의 활용성, 비용, 공기 등 최적의 시추작업을 위해 필요한 모든 요소를 고려하여 결정하였다.

아울러 최대 5 km 심도까지 계획된 지열정을 시추하기 위한 시추 장비를 표 4와 같이 구성하고, 그림 8과 같이 대심도 시추 공사를 위한 장비 배치 계획을 수립하였다.

자체 시추 프로그램을 개발하여 2012년 9월 시추에 착수한 이후 현재 지속적인 시추를 진행하고 있다. 각각의 시추 진행 경과에는 그림 9와 같이 예측된 지질 조건과 실제 시추 굴착 중 확인된 지질 조건의 비교, 사전 시추 계획과 실제 실행된 시



[그림 8] 지열정 설계 및 부지 시추 공사 배치도

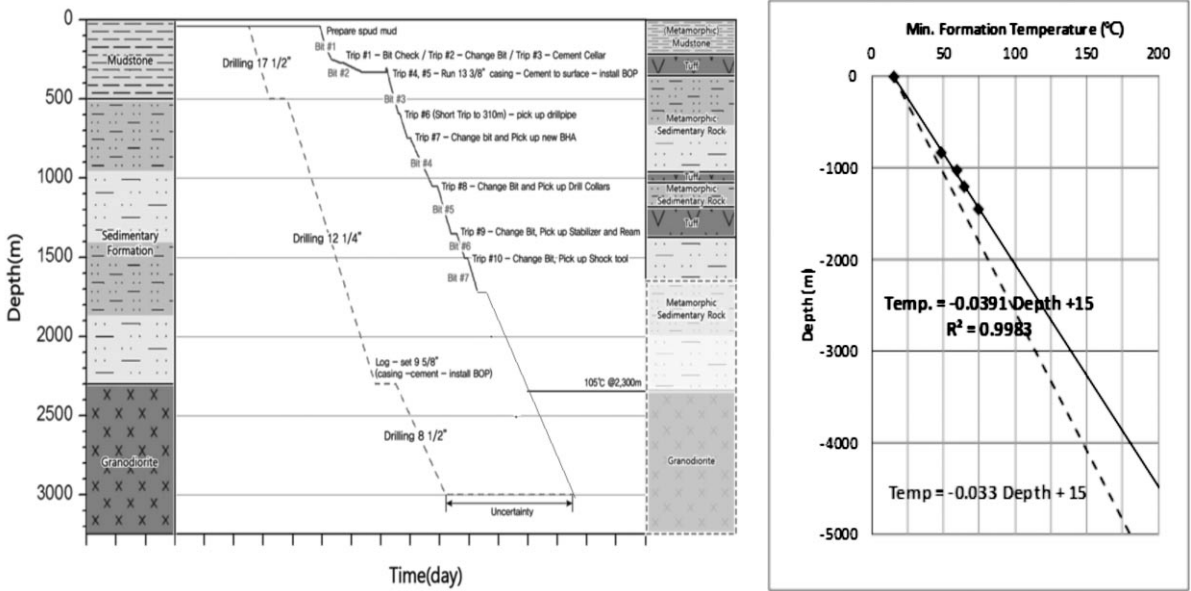
<표 4> 시추장비 사양 및 전경

Description	사 양
Nominal drilling depth	3,500 ~ 5,000 m
Max. hook load	3,150 kN
Nominal class	1,500 HP
Drawworks max input power	1,500 HP
Substructure height	7.62 m
Rotary/setback loading	3,150/1,800 kN
Mast height	45 m
Sheave dia. of crown block	1,270 mm
Wireline diameter	35 mm
Rotary table drive	800 kW
Open dia. of rotary table	37-1/2 "
max pressure of mud pump	5,000 psi
Total volume of mud tank	250 m ³
BOP(boresize/pressure)	13-5/8 " / 5,000 psi



추 기록 및 조건들은 상세 기록하고 있으며, 이는 향후, 국내 대심도 시추 기술의 발전과 생산성 시추에 직접적인 기여를 할 것으로 생각된다. 현재

시추를 진행하며, 지중의 온도를 지속적으로 분석하고 있으며, 분석 결과 그림 9와 같이 약 39°C /km의 지온증가율을 보이고 있으며, 현재의 지온

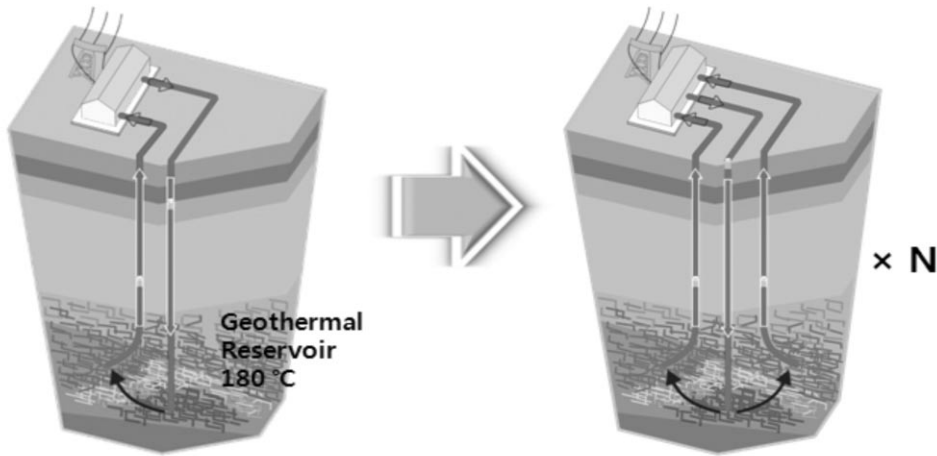


[그림 9] 시추 계획 및 진행 비교 및 지온 증가율 분석

2013년	2014년	2015년
<p>1단계</p>	<p>2단계 (4~5km)</p>	
주입정 완성	생산정 완성	지중순환시스템 완성
플랜트 기본 설계	플랜트 상세 설계 및 제작	플랜트 구축 및 시범 운영

[그림 10] 향후 ‘MW급 지열발전 상용화 기술 개발’ 주요 진행 계획

2010-2015	-2017	-2020	-2030
Doublet	Triplet	Well network	× N
>1.5 MW	>3 MW	>20 MW	>200 MW



[그림 11] MW급 지열발전소 확대 계획

증가율이 지속될 경우, 4 km 심도에서 170°C, 5 km 심도에서 210°C에 도달할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 'MW급 지열발전 상용화 기술개발' 사업 향후 계획 및 전망

현재까지의 연구 개발 성과를 바탕으로 향후 2013년에서 2015년까지 MW급 지열 발전소의 구축 및 운영을 위한 본격적인 지중 순환시스템 구축과 지상 플랜트 구축이 진행될 계획이다. 그림 10의 계획에 따르면 2013년에는 180°C의 지중 온도에 도달할 것으로 예상되는 4 ~ 5 km 심도의 주입정이 완성될 예정이며, 2014년에는 대심도 경사시추를 수반한 생산정 시추가 완료될 예정이다. 2015년에는 인공저류층 생성 등 지중 순환시스템 구축과 지산 바이너리 발전 시스템 구축으로 시범운영을 포함한 본격적인 지열 발전

소 운영이 시행될 것이다.

이 과제는 국내 최초 MW급 상용화 지열발전 사업으로서, 과제의 성공 여부는 연구 과정에서 또한 연구 종료 후에 국내 지열 발전 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이후의 성공적인 수행을 전제로 할 때, 그림 11과 같이 2015년 까지 1.0 MW (doublet) 이상, 2017년까지 3 MW (triplet) 이상, 2020년까지 20 MW (well network) 이상, 2030년까지 200 MW 이상의 지열 발전이 국내에서 가능할 것으로 기대하고 있다.

지열발전소의 사업화 계획에는 전력 생산 뿐 아니라, 지열수로부터 발생하는 열에너지의 공급 역시 중요한 자원으로 고려되어야 한다. 개발된 지열수는 전기에너지로 변환되어 공급되고 필요한 경우 열교환을 통하여 열에너지로서 지역난방이나 농업, 어업 등의 산업단지에 공급할 수 있을 것으로 보인다.

“MW급 지열발전 상용화 기술 개발” 사업은 국내에서 최초로 대규모 정부지원이 포함된 EGS 지열발전 상용화 기술 개발 연구 프로그램이다. 현재 국내의 기술 수준으로 4 ~ 5 km 급 심도의 인공저류층 생성과 MW급 지열 발전소 구축 운영이라는 목표는 큰 도전이 아닐 수 없다. 이 과제가 성공적으로 수행된다면, 1년 365일 기후와 주야에 관계없이 기저부하를 담당할 수 있으며 이산화탄소 배출이 거의 없는 청정 신재생에너지를 확보할 수 있는 국내 지열 발전 산업의 창출이라는 획기적인 전기를 마련할 뿐 아니라, 세계 지열 발전 시장에서 주목받는 강국으로 성장 가능하다.

또한 관련 지질 자원 탐사와 암석역학 및 플랜트 기술의 획기적인 진일보를 이루어 낼 수 있을 것으로 기대하고 있다. 3 ~ 5 km 심부 시추기술의 개발을 통하여 상대적으로 낙후된 국내 심부시추 기술을 선진화함으로써 심부 시추기술 자립화에 기여하고 석유 가스전 개발 및 세일 가스 개발, 이산화탄소 지중저장, 방사성 폐기물의 지하 저장 등 심부 공간 이용분야에 활용토록 하는 것도 하나의 예가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010년 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 연구과제(No. 2010T100200494)입니다.

참고문헌

1. 강신형, 2007, 신·재생에너지 R&D 전략 2030의 지열분야 전문위원회 최종보고서.
2. 송운호, 2010, 인공 지열 저류층 생성 기술(EGS)을 이용한 국내 지열발전 pilot plant 규모 추정, 한국지구시스템공학회지, 47, 245-253.
3. 이태중, 송운호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 조병

욱, 이승구, 김통권, 황세호, 윤옥, 이상규, 이철우, 이영민, 이성곤, 박인화, 심병완, 이윤수, 2008, 지열수 자원 실용화 기술 개발, 한국지질자원연구원 연구보고서 GP2007-002-03-2, 지식경제부, 185p.

4. 장기창, 2009, 한국형 지열발전 시스템의 기술개발 타당성 연구, 지식경제부 연구보고서.
5. Bertani R, 2010, Geothermal power generation in the world: 2005-2010 Update Report, Proc. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.
6. EREC, 2005, A sustainable world energy outlook.
7. Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A., and Rybach, L., 2008, “The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change”, in Hohmeyer, O., and Trittin, T. (Eds.) IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Proceedings, Luebeck, Germany, 20-25 January, pp. 59-80.
8. Lee Y, Park S, Kim J, Kim HC, and Koo M-H, 2010, Geothermal resource assessment in Korea, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, 2392-2400.
9. Tester et al., 2006, The future of geothermal energy - Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century, Massachusetts Institute of Technology, <http://www1.eere.energy.gov>.
10. Wissing, L., 2009, Germany Country Report, presented at 21st IEA GIA ExCo meeting, Madrid, Spain, May7-8, 2009.
11. <http://kggris.kigam.re.kr>
12. <http://www.soultz.net>. 