

몽골의 심부 지열에너지 자원과 지열발전에 관한 연구

한정상^{*†}, 윤운상^{*}, 김영식^{*}, 한찬^{**}, 박유철^{***}, 목종구^{***}

^{*}(주)넥스지오, ^{**}소다기술연구소, ^{***}강원대학교 지구물리학과

A Study on Deep Geothermal Energy and Potential of Geothermal Power Generation in Mongolia

Jeongsang.Hahn^{*†}, Yun Sang Yoon^{*}, Youngseek Kiem^{*}, Chan Hahn^{**}
Yu-Chul Park^{***}, Jong-Gu Mok^{***}

^{*}Nexgeo Inc., Seoul, 138-800, Korea ^{**}Sodalab, 135-894, Seoul, Korea

^{***}Dept. of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

Abstract

Mongolia has three(3) geothermal zones and eight(8) hydrogeothermal systems/regions that are, fold-fault platform/uplift zone, concave-largest subsidence zone, and mixed intermediate-transitional zone. Average temperature, heat flow, and geothermal gradient of hot springs in Arhangai located to fold-fault platform/uplift zone are 55.8°C, 60~110 mW/m² and 35~50 °C/km respectively and those of Khentii situated in same zone are 80.5°C, 40~50 mW/m², and 35~50 °C/km separately. Temperature of hydrothermal water at depth of 3,000 m is expected to be about 173~213°C based on average geothermal gradient of 35~50 °C/km. Among eight systems, Arhangai and Khentii located in A type hydrothermal system, Khovsgol in B type, Mongol Altai plateau in C type, and Over Arhangai in D type are the most feasible areas to develop geothermal power generation by Enhanced Geothermal System (EGS). Potential electric power generation by EGS is estimated about 2,760 kW at Tsenher, 1,752 kW at Tsagaan Sum, 2,928 kW at Khujir, 2,190 kW at Baga Shargaljuut, and 7,125 kW at Shargaljuut.

Key words: Mongolia(몽골), Hydrogeothermal system(수문지열계), Fold-fault platform/uplift zone (습곡-단층대지/용기대), Concave-largest subsidence zone(요곡-대규모 침강대), Geofluid(지중 순환수), Geothermal gradient(지열구배), Enhanced Geothermal System (EGS):지열저류층 조성기술, Specific power output(지중순환수의 단위 유량당 지열발전량)

기 호 설 명

ℓ / s : liter per second

1. 서 언

몽골은 현재 전체 에너지의 95%이상을 석탄에 의존하고 있어 이에 따른 심각한 대기오염이 사회적인 문제로 대두되고 있다. 따라서 몽골 정부는 재생에너지 활성화를 위해 “국가 재생에너지 프로그램을 수립하여 실시함은 물론 재생 에너지를 입법화하여 수력과 화력, 태양광 및 지열발

† Corresponding author

Tel.: + 82-10-5232-5144, Fax: + 82-448-6966

E-mail: jshahn@jejunu.ac.kr

접수일 : 2012년 7월 31일

심사일 : 1차:2012년 8월 17일, 2차:2012년 8월 24일

채택일 : 2012년 8월 27일

전과 같은 재생 에너지 활용에 역주하고 있다.

몽골은 단층/습곡 대지로 이루어진 대지형 융기대(fold-fault platform and uplift zone)와 요곡 및 대규모 침강대(concave, largest subsidence zone)와 이들 사이에 분포된 혼합 중간 및 전이대(mixed inter- mediate 또는 transitional zone)로 이루어진 3종의 지열대(geothermal zone)와 8개의 열수 시스템 지구(hydrogeothermal system)가 발달되어 있다. 이들 지역은 추후 지열발전을 위시하여 주택난방, 및 온실재배 등 재생 에너지로서 지열이용의 잠재성이 매우 큰 지역들이다.

본 논문은 상술한 3종의 지열대와 8개의 열수 시스템 지구에서 심부지열 에너지를 이용한 지열발전의 가능성에 관한 연구를 수행한 결과이다.

2. 본 문

몽골은 지열자원조사와 이의 활용에 대한 체계적인 조사는 아직 까지 실시된 바 없으나 지난 30여 년간 간헐적으로 남부 시베리아 대지, Baikal 지구대, Trance-Baikal 습곡지대와 지질과 지구조대가 서로 다른 4구역으로 구성된 몽골을 포함한 동 시베리아의 몽골 지역의 지열 이상대에 대한 일반적인 연구는 단속적으로 수행된 바 있다. 이들 지역에 분포된 대륙지각은 Riphean~신생대에 속하는 매우 불균질한 암체로 구성되어 있다.

몽골의 지열 이상대 조사는 기존의 32개의 지열류량 측정지점을 중심으로 실시되었는데 10여년 전부터 몽골의 농업산업부^[1]는 기존의 가용한 지구조, 지구물리 및 수리지질, 광역지질, 지각구조 및 온천연구 조사결과로부터 도출된 자료들을 바탕으로 하여 “Geotherm” 연구 프로그램을 작성하고 이에 따라 연구를 실시한 바 있다.

2.1 지열에너지 산출상태와 현황

몽골의 지열 이상대에 분포되어 있는 온천의 현황과 지체구조는 다음과 같다

2.1.1 온천의 산출특성

몽골은 오래전부터 지열수(온천수)를 고�혈압, 류마티스, 피부질환, 신경계질환 등 질병치리와

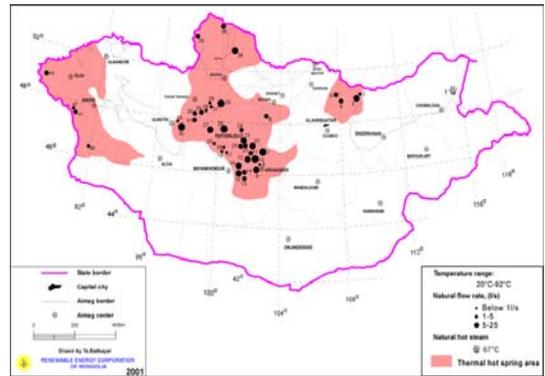


Fig.1 Location map of 43 major hot spring areas in Mongolia (Dept. of Agriculture/Industry,1999)^[1].

수술 후 회복용으로 이용했고, 광천수와 용천의 화학성분, 가스성분의 가용성, 이탄과 유황을 함유하고 있는 점토 및 기후 조건에 따라 특정 질병을 치료하는 요양소를 운영해 왔다.

몽골 중부와 중북부 및 서부지역에 약 43개소의 주요 용천지역이 분포하며 이들 온천의 위치, 분포고도, 유출량, 미네랄 함양 및 평균수온을 도표화하면 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

Table 1에 의하면 온천 온도가 55°C 이상 되는 곳은 16개소로 총 유출온천의 37.2%에 이른다. 특히 Khentii주에 소재하는 Ikh onon과 Bayankhongor 주의 Shargaljuut 및 Arhangai의 Tsenher 온천은 지표면 부근에서 측정된 온천의 수온이 각각 88°C, 92°C 및 86°C이며 평균 유출량은 각각 11 l/s, 25 l/s, 10 l/s로서 비교적 규모가 크고 온도가 높다^[2].

2.1.2 지열류량과 지체구조

몽골에서 최근에 발생했던 지구조 활동 시기는 남부 시베리아판과 Baikal 호수대의 동시 발달로 인한 중생대 말기로서 올리고세초에 시작되었으며 이 시기에 일어난 강력한 지구조적인 운동으로 인해 현재와 같은 몽골의 산계가 형성되었다. 지각구조를 파악하기 위한 지구물리탐사 결과에 의하면 Khangai와 Khentii산맥 하부의 지표 가까운 심도에는 magma plume과 같은 열원이 축적되어 있다. 몽골에 설치되어 있는 32개소의 지열류량 관측소에서 측정된 자료에 의하면 지열류

Table 1 Type of thermal water, flow rate, and mean temperature of 43 hot springs in Mongolia

No	Name/ Location	Type of thermal water*	EL (m)	Q (ℓ/s)	Mean T.(°C)
1	Utaat minjuur	D	720	over flow	67
2	Baga onon	A	1450	0.1	73
3	Ikh onon	A	1470	11	88
4	Eustii	A	1150	3	34
5	Euruu	E		3	43
6	Saikhan khulj	D	2130	2.3	55
7	Khujirt	A	1748	16	55
8	Emt	A	1850	0.5	39
9	Khuremt	A	1900	5	55
10	Mogoit	A	1650	7	72
11	Khamar	A	1750	4	39
12	Gyatruun	A	2500	5	36
13	Sharga	D	1900	1	30
14	Taats	D	1335	2.5	55
15	Baga Shargaljuut	D	2150	10	58
16	Shargaljuut	A	2400	25	92
17	Uheg	A	2100	5	57
18	Orgoot	A	-	5	40
19	Teel	A	2200	5	32
20	Tsokhiot	A	-	5	23
21	Tsenher	A	1860	10	86
22	Tsagaan Sum	A	1840	8	69
23	Gyalgar	A	1900	1	52
24	Shivert	A	1710	4	55
25	Bor tal	A	1880	4.5	46
26	Chuluut	A	2190	1.2	45
27	Noyon	A	2370	6	38
28	Testsuuh	A	2050	0.2	36
29	Zaart	A	2080	2.8	44
30	Khaluun us	A	2170	1	35
31	Khojuul	A	2170	4	45
32	Otgontenger	A	2510	1.7	56
33	Ulaan khaalga	A	228	0.2	37
34	Bulnai	B	1660	5	47
35	Salbart	A	-	6	44
36	Urtrag	B	-	3.1	21
37	Tsuvraa	A	-	0.1	35
38	Khunjil	A	1950	0.1	62
39	Jalga	B	-	5	40
40	Bulgan	C	1670	0.6	29
41	Gants mog	C	2590	1	31
42	Chihert	C	2480	0.5	25
43	Tsagaan gol	C	-	3	32

* Type of thermal water : refer to Table 3

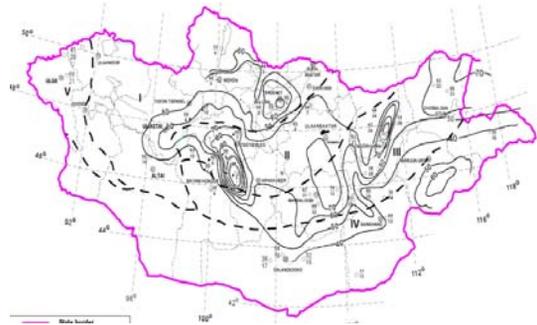


Fig. 2 Mongolian heat flow map (mW/m²) (Dept. of Agriculture/Industry,99) [2].

량은 (62±9)~(40±7) mW/m² 이며 서쪽으로 갈수록 감소하는 경향이 있다.

Fig.2는 몽골 농업산업부가 작성한 32개소의 지열류량 관측소에서 측정된 지열류량을 이용하여 작성한 몽골 전역의 지열류량 분포도이다[2].

Table 2는 몽골의 대표지역별 평균 지열유량을 요약한 표로 Khangai 산맥지역, Hovsgol 호수지역 및 Dornod 몽골 초원지역의 평균 열유량은 각각 52±6 mW/m², 80±10 mW/m², 및 44±6 mW/m² 정도이다.

Table 2 Heat flow of representative areas of Mongolia

Representative area	heat flow (mW/m ²)
Mongol Altai mountains	54±24
Khangai mountains	52±6
Hovsgol lake area	80±10
Dornod steppe area	44±6

2.1.3 몽골 지열대(geothermal zone)와 열수 시스템지구(hydrogeo-thermal system)의 수문지열학적 특성

1999~2000년 몽골 농업산업부는 광역지질조사 결과를 바탕으로 몽골전역을 Fig. 3과 같이 3종의 지열대(geothermal zone)와 A에서 F로 표시된 8개의 열수시스템지구(hydro-geothermal system or region)로 구분하였으며 이를 도표화하면 Table 3과 같다.

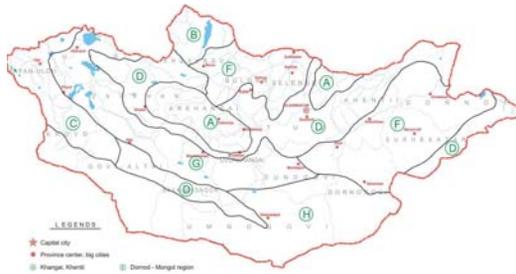


Fig.3 Mongolian hydrogeothermal system (Dept. of Agriculture/ Industry,1999)^[3].

3종의 지열대는 단층, 습곡 대지로 이루어진 대지형 융기대(fold-fault platform and uplift zone)와 요곡 및 대규모 침강대(concave, largest subsidence zone)와 이들 사이에 분포된 혼합 중간 및 전이대(mixed intermediate 또는 transitional zone)이다^[2].

(1) 단층/습곡대지로 이루어진 대지형 융기대 (Fold and fault plat form and uplift zone)

이 지열대는 Arhangai와 Khentii 시스템지구(A형 열수시스템 지구)와 Hovsgol지구(B형 열수시스템 지구) 및 Mongo-Altai지구(C형 열수시스템 지구)로 구성되어 있다. 이들 가운데 Arhangai와 Khentii 시스템지구는 Fig. 1에 나타난 주요 온천 분포지역과 거의 일치하며 지역 특성은 다음과 같다. Khangai산맥은 고도가 3,000~3,500 m 되는 거의 대지형 산지로서 Khangai산맥 축을 따라 근세에 일어난 지구조적인 융기와 같은 광역 단층들에 의해 고립된 지역이다. 이 지역에서는 열수의 유동통로 역할을 하는 단층과 같은 단열대는 지표에 노출되어 있거나 준-노출상태로 분포하고 있으며 고압수의 증기들이 단층이나 파쇄대를 통해 산출된다. 그간의 조사연구 결과에 의하면 Khangai산맥은 화산분출이 반복적으로 일어났던 휴화산지역으로서 지진활동이 빈번했던 지역이었기 때문에 현재 온도가 비교적 높은 온천이 널리 발달되어 있다.

이 지역에는 지표로 용출되는 35개의 온천이 소재하며 이 가운데 32개는 단층대나 일종의 선구조인 기존 하천을 따라 발달되어 있다. 현재 이들 시스템 지구에 발달된 온천의 수온 범위와 평균수온 및 지열류량은 각각 Arhangai지구가

(62±42)℃와 55.8℃ 및 60~110 mW/m²이고 Khentii지구가 (80.5± 7.5)℃와 80.5℃ 및 40~50 mW/m²이다.

이 지역의 지온구배는 대체적으로 35~50 °C/km(평균 42.5℃/km)이므로 지표하 3,000 m 심도에서의 지온은 대략 173~213℃에 이를 것으로 예상된다. 현재 Khangai지구에서 지표로 용출되는 용천의 유출량은 약 34.7 ℓ/s정도이다.

특히 Bortal지역과 Tsenker지역에 발달된 온천의 수온은 각각 49.5℃와 84.3℃이며 이들 온천의 지열 저류층에서 온도를 Chalcedony 환산법과 Na/K법으로 산정한 바, Bortal온천은 117℃, Tsenker온천은 106~109℃이다(Table 4).

이 지역에 산출되는 열수의 수질 특성은 중화산염 이온구조를 가지고 있고 불소 산화물을 함유하고 있으며 pH는 8.5~8.8로서 N₂, O₂, H₂S, HCO₃SO₄, NaO₃SO₄ 및 HCO₃/Na형이다. 미네랄 함량은 500 mg/ℓ 미만이다.

(2) 요곡 및 대규모 침강대 (Concave or largest subsidence zone)

이 지열대는 E형의 Orchon Selenge 열수시스템 지구, F형의 Dornold Mongol 열수시스템 지구, G형의 대호수-요곡지구와 H형의 고비사막 지구 등 4개의 지구로 이루어져 있다. 이 지열대 가운데 Orchon Selenge 시스템 지구의 지열구조대는 상부가 피복암으로 덮여 있으며 지열류량은 30~90 mW/m²이고 지온구배는 20~35℃/km정도이다. 이 지역에 발달되어 있는 Euruu온천의 평균 유출률은 3 ℓ/s 규모이고 수온은 43℃로서 피압성을 띠고 있다. 지중온도가 상술한 지온구배에 비례하여 증가한다면 지표하 5,000 m 심도의 지온은 약 143~218℃로 예상된다. 열수의 수질 유형은 NH₄, H₄s, CO₂, Cl/Na, CA형이며 미네랄 함량은 5~25 mg/ℓ 이다.

(3) 혼합 중간대 및 전이대

(Mixed intermediate/Transitional zone)

혼합 중간대는 Fig. 3에서 D 열수시스템 지구로 표시되어 있는 지역이며 이 지열대의 하위 지열시스템에 속하는 지구로는 Mongol-daur, Bayangokhor 및 Bulgan 시스템 지구 등이 있다.

본 역에 분포된 지열구조대는 상부 피복암에 의해 피복되어 있으며 지열유량은 30~60 mW/m² 규모이고 지온구배는 C형의 Mongol-Altai 지구와 유사한 20~35°C/km이다. 열수의 수질 유형은 N₂, O₂, H₂S, SO₄ 및 HCO₃/Na형이며, 현재 이 지구에 속하는 Bayan Khongor 지구에 발달되어 있는 용천의 수온은 23~92°C이고 평균온도는 50.3°C이다. 본 지열대에서 산출되는 온천은 대체적으로 중-저온의 온천으로서 1개소 당 지표에서 용출되는 양은 5 l/s 규모이다. 그러나 Bayan Khongor의 Shargalijuut 지역에 발달되어 있는 온천수의 수온은 92°C이고, 온천의 유출량은 25 l/s 이며 미네랄 함량은 25 mg/l 정도이다. 이 지

열대의 지표하 3,500m 지점에서 지온은 120~150°C 규모로 예상되며 5,000m 심도에서 지온은 150~225°C로 예상된다.

몽골 지열자원의 주요 분포지역은 A형 열수시스템 지구에 속하는 Arhangai 지역과 Khentii 지역이 대중을 이루고 있으며, 그 외에 신생대의 2차 지구조 운동 시 형성된 B형 열수시스템 지구에 속하는 Hovsgol 지역과 C형 열수시스템 지구에 속하는 몽골 Altai 대지 및 혼합 중간대-전이대에 속하는 D형 열수시스템 지구의 Ovor Arhangai 지역 일대이다. Arhangai 수문지열계는 추후 몽골의 지열 개발에 가장 유망한 후보지임을 암시하고 있다(Table 3).

Table 3 Geothermal characteristics and types of three(3) geothermal zones and eight(8) hydrogeothermal systems in Mongolia³¹

Geothermal zone	Type	Region, System name	Structure of hydrogeothermal system	Heat flow (mW/m ²)	Geothermal gradient (°C/Km)	Ground water type	Condition of power generation	Mineral content (mg/L)
Platform zone and Uplifts	A	Arhangai Khentii	open semi-open high pressured water/ steam fissured rock	60-70 80-110 40-50	45-80 35-50	N ₂ , O ₂ , H ₂ S SO ₄ ·HCO ₃ NaO ₃ SO ₄ , HCO ₃ /Na	Favorable	<0.5
	B	Hovsgol	open semi-open semi-closed closed	40-80 (35-50)	25-40	N ₂ , O ₂ , H ₂ S SO ₄ · HCO ₃ /Na	Favorable	<1.0
	C	Mongol Altai	semi-open closed	30-70	20-30	N ₂ , O ₂ , H ₂ S SO ₄ · HCO ₃ /Na	probable	37,260
Mixed, Intermediate /Transitional zone	D		closed	30~60	20-35	N ₂ , O ₂ , H ₂ S SO ₄ · HCO ₃ /Na	probable	37,324
Concave, largest subsidence zone	E	Orhon Selenge	closed, high mineralized, pressurized between stratum	30-40 70-90	20-35	NH ₄ , H ₄ S CO ₂ , Cl/ Na·Ca	Need boring test	5-25 (150)
	F	Dornod-Mongol	pressurized between stratum w/oil bed	-	-	NH ₄ , H ₄ S CO ₂ , Cl/ Na·Ca		20-80 (300)
	G	Great Lake Concave	pressurized between stratum	-	-	NH ₄ , H ₄ S CO ₂ , Cl/ Na·Ca·Mg		30-80 (300)
	H	Desert Gobi	improbable			NH ₄ , H ₄ S CO ₂ , Cl/Na·	-	37,548

Table 4 Measured and calculated temperatures at the geothermal reservoir of hot springs by Chalcedony analysis and Na/K geothermometer methods

Name of hot spring	Measured Temp.(°C)	Chalcedony Temp.(°C)	Na/K Temp.(°C)	Remarks
Shargaljuut-1	88	101	99	Transitional, zone-D type
Shargaljuut-2	76	86	88	ditto
Bortal	49.5(mean 46)	117		Uplift zone-A type
Tsenker	84.3(mean 86)	109	106	ditto

Bayankhongor와 Shargaljuut(Arhangai주)와 Bortal 및 Tsenker온천의 지표에서 직접 측정한 수온과 Chalcedony 온도 및 Na/K온도 환산법으로 산정한 지중온도는 Table 4와 같이 Arhangai 지역의 지열 저장소에서의 수온은 100°C를 상회하는 것으로 해석되었다. 따라서 Arhangai와 Khentii주와 같은 A형의 열수시스템 지구와 Hovsgol 주와 같은 B형의 열수시스템 지구를 위시하여 일부 C 및 D형 열수시스템 지구는 추후 지열수의 직접이용은 물론 인공 지열 저류층 조성 기술(Enhanced Geothermal System, EGS)에 의한 지열발전을 적용할 수 있는 최적 유망지이다.

Table 4에 제시된 Shargaljuut와 Tsenker 지역에 발달되어 있는 온천은 온도가 높고, 온천수 유출량이 크며, 다량의 불소를 함유하고 있다.

2.2 심부 지열에너지를 이용한 지열발전 가능성과 개발가능량

2.2.1 몽골의 심부지열 현황

몽골에 분포되어 있는 온천들의 유출량 범위는 0.1~25 l/s 규모이고 평균 유출량은 약 4.39 l/s 이며, 온천의 지표 천부에서의 용출온도의 범위는 21~92°C이고, 평균온도는 47.7°C이다. 따라서 이와 같은 저온의 지열수를 직접 발전용수로 이용하기는 불가능하다. 상술한 열수의 온도는 어디까지나 지표 부근의 천부 온도이므로 단층/습곡대지의 용기대 가운데 A 및 B형 열수시스템 지구나 혼합 중간대(전시대)에 속하는 D형 열수시스템 지구 및 일부 요곡 및 대규모 침강대 중 Orhon Selenge 열수시스템 지구와 같이 지열류량이 높고 지온구배가 다소 큰 지열이상대 지역에

심도가 3,000~5,000 m 되는 장심도의 지열정을 설치하면 지열발전에 필요한 중~고온의 지열수를 개발할 수 있을 것이다.

일반적으로 비화산성 지열 이상대에서 산출되는 지열수의 수온은 180°C이하이다. 수온이 90~175°C정도 되는 중-저온의 지열수를 열원으로 이용하여 열교환기에서 비등점이 낮은 2차 작동유체(binary fluid)를 고온의 기체로 변환시켜 분사시킨 후 이를 증기터빈으로 보내 발전기에서 전기를 생산하는 방식을 2차 작동유체를 이용한 바이너리 지열발전이라 하며 그 대표적인 예가 인공 지열저류층 조성을 수반한 공학적인 지열 발전시스템이다. 인공 지열발전 시스템은 하루-24시간 동안 연속적으로 전기에너지 공급할 수 있기 때문에 미국은 2050년까지 필요로 하는 기초 부하전력 100,000 MWe를 EGS형식으로 생산 공급하려 하고 있다^[7].

몽골의 열수시스템지구들 가운데 A, B, C, D 및 E 열수시스템 지구는 지구구조적인 특성이나 수문 지열학적인 조건을 감안할 때 단순한 열에너지는 물론 지열발전과 관련된 지열에너지 개발에 최적의 조건인 3가지의 수문-지열학적 요건을 구비하고 있는 지역이다. 즉 ① 심부에 열원으로 고온암체의 분포 가능성 ② 수리적인 연결성이 비교적 양호한 단열구조의 발달 가능성 ③ 유동 가능한 지열수가 심부 저류층에 부존되어 있을 가능성이 매우 높은 지역이다. 따라서 이들 지역에 심도 3,000~5,000m 정도 되는 장심도의 지열정을 설치하여 설치하고 EGS 기술을 적용하면 현재 지표로 용출되고 있는 온천 유출량만으로도 각 소음(soum, 인구 2,000~4,000명 정도의 인구밀집지)이나 북(bog, 마을규모)단위의 소규모 인구

밀집지가 필요로 하는 전력과 열에너지를 충분히 생산, 공급할 수 있다.

2.2.2 몽골의 심부지열 개발 방법, 발전 가능량과 개발 유망지

현재 몽골에서 산출되고 있는 43개의 지열이상대인 온천 지역 가운데 온천수의 온도가 40°C 이상이며, 용천 유출량이 2.3 l/s 이상 되는 온천지구는 Table 5와 같이 19개 지구이다.

3종의 지열대와 8종의 열수시스템 지구들 가운데 위의 조건(온도>40°C, 용천유출량> 2.3 l/s)을 구비하고 있는 온천지구는 단층/습곡대지로 이루어진 대지형 용기대 가운데 A형 열수시스템 지구에 속하는 온천이 전체 대상온천(19개소) 가운데 68.4%에 해당하는 13개소이고, B형 열수시스템 지구에 해당하는 온천지구가 2개소이다.

이들 온천지구는 열수의 유동통로인 단열대가 저투수성 피복암에 의해 피복되어 있지 않거나 준피복 상태이며, 지열류량이 비교적 높은(60~110 mW/m²) 단층/습곡대지로 이루어진 대지형 용기지대에 분포한다. 기타 3개소는 D시스템 지구에 속하며 용기지역에 인접한 혼합 및 중간 전이대에 분포하고 나머지 1개소는 E형 열수시스템 지구에 소재한다(Table 5).

A 및 B형에 속하는 열수시스템 지구는 몽골 중부의 Oror-hangai, Bayankhongor, Arhangai 및 Zavhan주와 Hovsgol주의 Bulnai와 Jalga지역에 분포되어 있다. 이 지대에 속한 온천의 지표 온도는 40~92°C이며 온천 유출량은 2.8~25 l/s이다. 이에 비해 D형 열수시스템 지구에 분포되어 있는 온천의 유출량은 2.3~10 l/s 규모이고 지표유출 온도는 55~58°C 정도이며, Selenge주에 소재하는 E형 열수시스템 지구에 속하는 Euruu온천의 유출량은 3 l/s이고 온도는 43°C이다

특히 Khangai 열수시스템 지구에 소재하는 Shivert 온천 시스템은 준 피복상태로 발달되어 있으며 1980년 이전 시기에 측정한 온천 유출량은 0.2 l/s, 수온은 32~40°C이었으나 1980년도에 몽골과 러시아 과학자들이 심도 26~40m 정도 되는 6개의 천정(shallow well)을 이 지점에 설치한 결과 온천 유출량은 4.5 l/s, 수온은 48~57°C로 증가하였다. 실제로 이지역의 수리화학적 분석

을 통해 예측한 지표하 500m 심도와 3,000m에서의 지온을 산정한 결과는 각각 154°C와 221°C이었다.^[3]

현재 Khenti주에 소재하는 Ikh Onon과 Bayankhongor주에 소재하는 Shargaljuut 그리고 Arhangai주에 소재하는 Tsenher 및 Shivert 온천의 지표에서 유출되는 토출온도는 각각 88°C, 55°C, 92°C, 및 86°C로서 비교적 높고, 평균 유출량은 각각 11 l/s, 10 l/s, 25 l/s 및 4 l/s로 비교적 크기 때문에 2차 작동유체를 이용한 바이너리 지열 발전 (binary cycle power generation)이 매우 유망한 지역이다.

Table 5는 몽골에서 온천의 지표 용출온도가 40°C이상이고 온천 유출량이 약 2.3 l/s이상인 온천지역의 수문지열계 유형, 유출량, 지온구배, 지표 유출온도와 해당지역에 장공의 지열정을 설치했을 경우의 예상온도, 1 Kg/s의 지열수 (geofluid)로부터 발전 가능량(Specific power output, kW/Kg/s) 및 해당 지열정별 총 발전가능량을 각 Case별로 요약한 표이다.

Table 5에 제시된 예상온도는 각 지역이 Table 3에서 제시한 지온구배에 따라 지중온도가 증가하는 경우에 각 지구별로 지열류량과 지온구배가 높은 순에 따라 A형 지구는 지표하 3,000m까지, B형 지구는 지표하 4,000m까지, 기타 지구는 지표하 5,000m까지 지열정을 굴착했을 경우의 예상되는 지온이다. A형 열수시스템 지구의 지온구배는 Arhangai지구가 45~85°C/Km, Khentii지구가 35~50°C/Km이므로 수문지열계의 불확실성을 고려하여 Khentii지구의 지온구배인 35~50°C/Km의 평균치인 42.5±7.5°C/Km 적용하였다. 이 지구 가운데 Ovor-Arhangai주에 소재하는 No.7 및 No.9 온천과 Arhangai주에 위치한 No.24 온천들의 평균 온도는 55°C이므로 만일 본 지구에서 지중 온도가 상술한 평균 지온구배에 따라 증가한다면 이들 온천들이 발달된 지점의 지표하 3,000m 심도에서의 지중온도는 최소 약 182°C (42.4×3+55) 정도 될 것이며, 이 온도는 지열 발전용 열원으로 사용할 지열수의 입구온도가 된다.

각 온천지역에 장공의 지열정을 전술한 예정심도까지 굴착했을 시 Case-1은 현 온천유출량의 증가는 발생하지 않으나 열수의 온도가 Table 5

와 같이 상승하는 경우에 현재 토출되는 열수만을 직접 지열 발전용수로 이용할 경우의 발전 가능량을 예측한 량이며, Case-2는 인공 수압과쇄를 실시하여 인공 저류층을 조성하고 초기 용출 열수의 3배에 해당하는 지열수를 이용하여 EGS 형식으로 지열발전을 하는 경우의 각 온천지구별 지열 발전 가능량을 예측한 내용이다.

(1) 순수한 온천의 열수만을 지열발전용 열수로 이용 시 발전가능량(Case-1)

Table 5에서 Khujirt(7번), Khuremt(9번) 및 Shivert(24번) 지역에 3,000m 심도의 지열정을 설치했을 경우의 예상 온도는 182°C 정도이다. 지금 발전기의 열교환기로 유입되는 지열수의 입구온도가 약 182°C이고 출구온도가 55°C일 때 1 kg/s의 지열수가 생산할 수 있는 발전량은 약 80 kW이다⁵⁾.

따라서 Ovor-Arhangai주에 소재하는 No.7 및 No.9 온천과 Arhangai주에 위치한 No.24 온천에서 생산할 수 있는 전력은 각각 1,280, 400 및 320 kW로 추산된다.

19개 분석 대상 지구에서 산출되는 지열수 1 kg/s 당 발전가능량의 범위는 약 64~117 kW 규모이며 지구별로는 D열수시스템 지구에 소재하는 Saikhan khulj 온천지구(16번)는 202 kWe의 전력을 생산할 수 있으며, A열수 시스템 지구에 소재하는 Shargaljuut 온천(16번)은 약 2.9 MWe(2,925 kW)의 지열발전이 가능하다. 지열정 1공당 1 MWe이상의 발전을 할 수 있는 열수 시스템 지구는 모두 A열수시스템 지구에 소재한다.

D 열수시스템 지구는 지표하 5,000m 심도까지 지열정을 설치한 후, 온도가 상승한 지열수를 이용하여 지열발전을 할 경우 1개 지열정당 평균 발전량은 약 444 kWe 정도이고 B 열수시스템 지구는 지표하 4,000m 심도까지 지열정을 설치한 후, 1개 지열정당 평균 발전 가능량은 약 342 kW 정도로 예상된다. 이에 비해 지온구배와 열유량이 비교적 높은 A 열수시스템 지구에서는 3,000m 심도로 지열정을 설치하는 경우에 1개 지열정에서 발전 가능량은 약 726 kW로서 D 및 B 열수시스템 지구에 비해 월등히 높다.

(2) EGS 적용 시 발전가능량(Case-2)

일반적으로 몽골의 지열대와 같이 지체구조가

잘 발달되어 있고 현재 중-저온의 열수 온천이 산출되고 있는 지역에서 EGS를 적용하는 경우에 인공 파쇄법을 적용하여 열극과 열극사이의 수리적인 연결성을 개선시켜 인공 지열 저류층을 조성하면, 결국 지열수의 순환구역에서 투수성과 저유성이 증대되므로 지열수의 산출률도 증가한다. 그러나 이미 설명한 바와 같이 Shagaljuut 온천과 Bortal과 Tsenher 온천지대는 단층/습곡대지의 용기대에 소재한 지역으로서 몽골에 발달되어 있는 주요 지구조적인 지구대와 밀접한 관련이 있는 지역들이다. 특히 이들 지역들은 열수의 유동 통로가 되는 단층/파쇄대와 같은 2차 유효공극들이 망(Net)상으로 잘 발달되어 있고 Arhangai 산맥과 Khentii 산맥 하부의 지표 가까운 심도에는 magma plume와 열원이 소재하여 현재까지도 magma 활동이 활성적으로 성장하고 있는 지열 이상대에 속한 지구들이다.

전반적으로 보아 몽골의 주요 온천 분포 지구는 2차 유효공극이 비교적 양호하게 발달되어 있어 이들 지역에 장심도의 지열정을 굴착하여 포화대의 두께를 증대 시키면 현재 용출되는 온천 유출량보다 훨씬 많은 량의 열수를 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 그 대표적인 사례가 전술한 Khangai 열수시스템 지구에 소재하는 Shivert 온천지구에서 유출량과 온도의 증가 현상이다.

이 지역에 심도가 3,000m 되는 장공의 지열정을 설치하면 온천열수의 산출량과 수온은 비록 상술한 심도별 증가율처럼 증가하지는 않을 지라도 현재의 산출물이나 수온에 비해 크게 증가할 것이다. 지금 이들 유망지역에 장심도의 지열정을 굴착하여 EGS를 이용한 지열발전을 실시하는 경우에 다음과 같은 가정 하에 가장 보수적인 방법을 이용하여 각 지구별 지열발전량을 산정하였다.

① 현 온천들의 유출량은 크게 증가하지 않으며 ② 지온은 해당지역의 지온구배에 따라 상승하되 ③ EGS형 지열발전 과정에서 예상 굴착심도에서 지열수를 채수하여 지상의 발전 설비와 지하 저류층의 단열을 따라 순환시키는 동안 발생하는 순환용 지열수의 열손실을 초기 저류층 온도의 10%로 가정하고 ④ 전술한 각 온천 분포 지역 별로 현재 용출되는 중-저온의 온천수의 약 2배에 해당하는 주입수를 기존의 온천 열수와 혼

Table 5 Hydrogeothermal conditions of major hot spring(T> 40℃, Q>2.3ℓ/s) and expected geothermal power generation via case-1 and case-2

No	Location of hot spring	Type	Flow rate (ℓ/s)	Geothermal gradient (℃/Km)	Temp. at surface (℃)	Depth of well (m)	Expected temp. (℃)	Specific power output (kW/Kg/s)	Total power Generation (kW)
5	Euruu, Selenge	E	3	20~35	43	5,000	180	77	231
			9				162	58	522
6	Saikhan khulj-Bulgan	D	2.3	20~35	55	5,000	192	88	202
			6.9				173	70	483
7	Khujir, OA	A	16	35~50	55	3,000	182	80	1,280
			48				164	61	2,928
9	Khuremt, OA	A	5	"	55	"	182	80	400
			15				164	61	915
10	Mogoit, OA	A	7	"	72	"	199	96	672
			21				179	75	1,575
14	Taats, OA	D	2.5	20~35	55	5,000	192	88	220
			7.5				173	70	525
15	Baga Shargaljuut, OA	D	10	20~35	58	5,000	195	91	910
			30				176	73	2,190
16	Shargaljuut, BK	A	25	35~50	92	3,000	219	117	2,925
			75				197	95	7,125
17	Uheg, BK	A	5	35~50	57	3,000	184	81	405
			25				166	63	945
18	Orgoot, BK	A	5	"	40	"	167	64	320
			25				150	47	705
21	Tsenher, Arhangai	A	10	"	86	"	213	113	1,130
			30				192	92	2,760
22	Tsagaan Sum Arhangai	A	8	"	69	"	196	93	744
			24				176	73	1,752
24	Shivert Arhangai	A	4	"	55	"	182	80	320
			12				164	61	732
25	Bortol Arhangai	A	4.5	"	46	"	173	70	315
			13.5				156	53	715
29	Zaart Zavhan	A	2.8	"	44	"	171	67	187
			8.4				154	52	437
31	Khojuul Zavhan	A	4	"	45	"	172	69	276
			12				155	53	636
34	Bulnai Khovsgol	B	5	25~40	47	4,000	177	73	365
			15				159	55	825
35	Salbart Khovsgol	A	6	20~35	44	5,000	181	78	468
			18				163	60	1,080
39	Jalga Khovsgol	B	5	25~40	40	4,000	170	64	320
			15				153	50	750

단 : T>40℃, Q>2.3ℓ/s 의 조건을 구비한 온천들의 지열현황 OA: Ovor Arhangai BK : Bayan-khongor

입구온도=굴착심도에서 예측한 예상온도, 출구온도=55℃



발전 가능량(Khujirt) =80kW/Kg/s×16ℓ/s=1,280kW(단 EWT=120℃ LWT=80℃일 경우,(Worley International,1995)

합시켜 인공 지열저류층으로 주입시키면 지열수는 열원이 거의 무한대인 고온 암체로 이루어진 지열 저류층의 단열면을 통과하면서 열교환을 일으켜 지열 저류층의 온도와 유사한 지열수 순환수를 지속적으로 생산할 것이므로, 이를 발전소의 열교환기로 보내 2차 작동유체를 이용한 열교환식 지열발전을 한다.

이러한 조건하에서 Table 5의 하단부에 제시된 각 온천지구별로 발전소의 열교환기로 유입되는 입구온도는 예상심도까지 지열정을 굴착했을 경우의 해당 지역의 평균 지온 구배에 따라 상승한 예측온도의 90%를 적용하고 출구온도는 발전소의 열교환기를 통과한 후의 온도인 55°C로 했을 경우에 EGS를 이용한 지열발전 가능량을 추산하면 Table 5의 하단부의 값과 같다.

보수적인 방법을 이용하여 각 지역별로 EGS형식으로 지열발전을 할 때, 1개 지열정당 1 MWe 이상의 지열발전이 가능한 지역은 모두 A열수시스템 지구에 소재하며 이들 지역과 이 지역에서 발전 가능량은 ① Khujirt 온천지역은 2,928 kW, Mogoit 온천지역은 1,575 kW이고 ② Baga Shargaljuut와 Shargaljuut 온천 지역은 각각 2,190 kW와 7,125 kW이며 ③ Tsenher 온천 지역은 2,760 kW, Tsagaan Sum 온천지역은 1,752 kW이고 ④ Salbart 온천지역은 1,080 kW로 예측된다.

3. 결론

3.1 몽골의 심부지열의 산출특성

몽골에 발달되어 있는 3종의 지열대와 8종의 열수시스템 지구들 가운데 온도가 40°C 이상이고 용천 유출량이 2.3 l/s 이상인 수문지열 조건을 구비하고 있는 온천지구는 단층/습곡대지로 이루어진 대지형 용기대 가운데 A형 열수시스템 지구에 속하는 온천이 전체 대상 온천(19개소) 가운데 68.4%, B형 열수시스템 지구에 해당하는 온천지구가 10.5%, E형 열수시스템 지구에 소재하는 온천이 약 5%이다. 이들 온천지구는 열수의 유동통로인 단열대가 지표에 노출되어 있거나 준피복상태로서, 열유량이 비교적 높은 단층/습곡대지로 이루어진 대지형 용기대에 분포한다.

이와 같은 지열대와 열수시스템 지구, 이들 지구에서의 지열류량과 지온구배 및 현재 지표로 용출되고 있는 온천의 산출상태와 이로부터 직접 개발 가능한 열에너지 분석자료 등을 토대로 하여 추후 몽골에서 심부지열 에너지를 개발하여 지열발전을 할 수 있는 유망지역들을 선별하면 다음과 같다.

- 1) 단층 및 습곡대지/대지형 용기대에 속하면서 A지구에 소재하는 Khujirt와 Mogoit 온천지구, Shargaljuut 온천지구, Tsenher, Tsagaan Sum와 Shivert 온천지구, B지구에 소재하는 Bulnai 온천지구
- 2) 혼합 중간 및 전이대에 속하면서 D지구에 소재하는 Baga Shargaljuut 온천지구
- 3) 요곡 및 대규모 침강대에 속하면서 E지구에 소재하는 Euruu 온천지구 등 이다

3.2 활용방안

몽골에서 지열 개발을 실시하기 이전에 위험성이 가장 높은 단계는 지열자원의 답사단계이다. 따라서 몽골에서 지열에너지를 직·간접적으로 활용하기 위한 지열 에너지 개발에 따른 위해 요소를 최대한 경감시키기 위해서는 다음과 같은 사전 연구와 예비이 필요하다.

- 1) 기존의 지질조사, 지구물리탐사 자료의 구축(DB)과 수리지구화학 및 수리지질 조사자료를 바탕으로 몽골의 수문지열계 자료를 정량화 시킨 후 추가적인 세부조사를 실시해야 할 필요성이 있는 지역 즉 추후 지열에너지 개발 전망이 밝은 지역을 선정한다.
- 2) 지열에너지 개발가능지점을 선정한 후 해당 지점의 지하에 발달된 수문지열계의 수리 및 지열특성을 규명하기 위하여 시험 및 착정 시추를 시행하고 지열에너지 개발 가능성에 대한 사전평가를 실시한다.
- 3) 현재 화석연료를 에너지원으로 사용하고 있는 Bayankhongor주, Arkhangai주와 Ovor-khangai주 가운데 인구 밀집지는 고가의 화석연료의 개발비와 과도한 운송비 및 심각한 대기오염 현상을 해소하기 위해 지열 개발보급 방안을 고려한다.

- 4) 동시에 Ulaanbaatar, Erdenet 및 Darhan 시와 같은 대도시는 심부 지열에너지를 이용한 지열 발전 가능성을 판단하기 위한 수문 지열조사를 실시한다.

현재 몽골에서 지표로 용출되고 있는 대표적인 43개 온천지구에서 생산되는 온천수를 직접 열원으로 이용할 경우에 개발 가능한 열 에너지량은 18MWt 규모^[6]이다. 이는 해당 지역의 관광산업과 온실재배 및 농업, 축산산업에 크게 기여를 할 수 있다.

전술한 심부 지열자원이 양호하게 부존되어 있을 것으로 예상되는 개발 유망지역에 장심도(약 3,000~5,000m)의 지열정을 설치한 후, EGS 방식으로 심부 지열에너지를 개발할 경우에 지열정 1기당 지열발전 가능량은 7.1~2.76 MWe 정도로 예측되었다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단 신재생에너지 센터의 2011년도 상반기 “신재생에너지 해외 진출 지원 사업 중 해외시장 조사 및 프로젝트 발굴사업(2011-01-010)”의 일환으로 수행되었다

참고문헌

1. Purevsuren Dorj, Batbayar Tseesuren and Ovgor Bavuundorj, 2003, Future Geothermal Survey-

Study in Mongolia, Session 10, International geothermal Conference, Reykjavik, pp.15-19

2. Batbayar Tseesuren, 2001, Geothermal Resources in Mongolia and Potential Uses. The UN University-Reports 2001, No.15, pp.350-352

3. Mendbayar Badarch, Damdinsuren Gantulga, etal, 2005, Hydrothermal Heat Supply of Province Center, Feasibility Study Report for Promotion of Renewable Energy, Energy Efficiency and Greenhouse Gas Abatement (PREGA) in Mongolia pp.11-13

4. Isor Iceland Geosurvey, 2004, Geothermal Project in Tsetserleg Mongolia-Pre Feasibility Study, pp.8-9

5. Hahn, J. S., Han, H. S., Hahn, C., 2010, Geothermal Energy, Han Rim Won Publisher, Korea pp.17-19

6. Hahn, J. S., Yoon. Y. S., Yoon, K. S., Lee, K.S and Kim, H. S., 2012, A Study on Development Potential of Shallow Geothermal Energy as Space Heating and Cooling Sources in Mongolia, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol.8. No.2, pp.36-48

7. MIT, 2006, The Future of geothermal energy/Impact of EGS on the United States in the 21th Centry, An assessment by an MIT-led interdisiplinary panel, pp1-1~9-46