한국신·재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회논문집 pp.617~620

한국의 지열에너지 부존량 산출

*박 성호[1], 이 영민[2], 김 종찬[3], 김 형찬[4], 구 민호[5]

Assessment of Geothermal Energy Resources of Korea

*Sungho Park, Youngmin Lee, Jongchan Kim, Hyoung Chan Kim, Min-Ho Koo

Key words : Geothermal Energy(지열에너지), Geothermal Energy Assessment(지열에너지 부존량 평가), Geothermal Resources(지열 자원), Enhanced Geothermal System(EGS)

Abstract : 지열에너지는 지구 내부의 깊은 곳에서부터 발생하는 열과 상부 지각에서 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 열에 의해 발생한다. 지열에너지는 다른 신재생에너지(수력, 풍력, 태양력, 조력, 바이오 매스 등)에 비하여 가동효율이 높고, 지속가능한 재활용 자원으로 경제적 효율성이 높아 전 세계적으로 활용도와 잠재성이 높은 신재생에너지의 하나로 각광 받고 있다. 따라서, 지열에너지의 사용은 화석 연료 사용의 상당 부분을 대체할 수 있고, 온실가스의 배출도 줄일 수 있다.

현재 우리나라의 지열에너지 이용은 저온성 지열에너지를 이용한 냉난방에 국한되어 있지만, 앞으로의 지열에너지 이용은 Enhanced Geothermal System(EGS) 을 이용한 지열에너지 개발에 초점이 맞추어질 것이다. 현재의 지열에너지 개발을 용이하게 하고, 또한 미래의 지열에너지 개발에 대비하여 우리나라의 이용 가능한 지열에너지 부존량을 파악하기 위해 본 연구를 수행하였다. 연구 수행에는 1560개 열물성 자료(밀도, 비열, 열전도도), 353개 지표 지열류량 자료, 180개 열생산율 자료와 54개의 지표온도 자료가 사용되었다.

우리나라의 지표에서부터 1 km 깊이 간격별로 5 km 깊이까지 지열에너지 부존량을 산출한 결과 지표에서부터 5 km 깊이까지의 추출 가능한 지열에너지의 총 부존량은 1.01×10^{23} J 로 산출되었다. 지열에너지 부존량을 Toe(석유환산톤) 로 환산하면 2.40×10^{12} Toe 가 된다. 추출한 지열에너지 자원의 2%를 사용한다고 가정 했을때 약 480억 Toe 이다. 이는 2006년 우리나라 전체 1차 에너지 총 소비량(2.33억 Toe)을 고려했을때 약 200년 동안 사용할 수 있는 양이다.

Nomenclature

A_0: heat production, $\mu W/m^3$
b : attenuation depth, km
C_p: specific heat, J/kgK
K : thermal conductivity, W/mK
Q : heat content, J
q_0 : heat flow, mW/m^2
T_0: surface temperature, ^oC
T_z: temperature at depth z, ^oC
V : volume, km^3
z : depth, km
ρ : density, kg/m^3

subscript

IDW : inverse distance weighted
EGS : enhanced geothermal system
Toe : ton of oil equivalent

1. 서 론

전 세계적으로 지열에너지는 광범위하게 개발되고 있다(Barbier, 2002). 화산 활동과 관련된 고온의 풍부한 열수와 증기를 가진 지역에서는 고온성 지열에너지를 발전에 이용하고 있고, 그

1) 공주대학교 지질환경과학과
E-mail : seonho01@nate.com
Tel : (042)868-3069 Fax :(042)868-3358
2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : ymlee@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3069 Fax :(042)868-3358
3) 공주대학교 지질환경과학과
E-mail : geotherm01@gmail.com
Tel : (042)868-3069 Fax :(042)868-3358
4) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : khc@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3074 Fax :(042)868-3358
5) 공주대학교 지질환경과학과
E-mail :koo@kongju.ac.kr
Tel : (041)850-8515 Fax :(041)850-8510

외 지역에서도 저온성 지열에너지를 이용한 냉·난방과 지역 난방 등의 직접적인 이용이 활발히 이루어지고 있다. 일부 국가에서는 지열에너지 발전이 총 발전량의 20% 이상을 차지할 만큼 주요한 에너지원으로 이용되고 있다.

많은 부분에서 화석 연료에 의존하고 있어 매년 엄청난 에너지 수입 비용을 지출하는 우리나라 입장에서 지열에너지는 경제적으로 매우 효율적인 에너지 자원 분야이다.

우리나라에서도 최근 저온성 지열에너지를 이용한 냉·난방 등의 사업이 점차 확산되고 있다. 하지만, 앞으로의 지열에너지 이용은 냉·난방 등의 직접 이용 뿐만 아니라 지열에너지를 이용한 발전에 더욱 초점이 맞추어질 것이고, Enhanced Geothermal System(EGS) 은 미래의 지열에너지 발전을 위한 주요한 방법 중에 하나가 될 것이다 (McLarty et al., 2000). Enhanced Geothermal System(EGS) 은 지열류량이 평균 지열류량 보다 높지만 투수율과 유체의 흐름이 제한된 곳에서 지열에너지를 추출하기 위해 사용되는 방법으로써 전통적인 지열 에너지 개발 방법과 비교하여 더 많은 양의 지열에너지를 추출하여 에너지 개발에 이용할 수 있는 장점을 갖는다. 따라서 이 연구의 주요한 목적은 저온성 지열에너지 자원의 효율적인 활용과 미래에 Enhanced Geothermal System(EGS) 의 효율적인 이용을 위해서 우리나라 전 지역을 대상으로 지표에서부터 5 km 깊이까지의 지열에너지 부존량을 정량적으로 산출하고, 또한 이에 대해 지역적인 분석을 수행하기 위함이다(e.g., Blackwell et al., 2007; Tester et al., 2007).

2. 본 론

2.1 연구에 사용된 자료

연구에 사용된 자료는 밀도(ρ), 비열(C_p), 열전도도(K), 지표 지열류량(q_0)(Kim and Lee, 2007), 지표 열생산율(A_0)(김종찬, 2008), attenuation depth (b)(김종찬, 2008), 부피(V), 임의의 깊이 z에서의 온도(T_z) 그리고 지표온도(T_0)(구민호 외, 2006) 이다. 부피(V)는 우리나라의 전체 면적에 지표에서부터 5 km 깊이까지 1 km 깊이 간격별로 각 깊이를 곱하여 산출하였다. 각각의 자료들은 500 m × 500 m 의 격자 크기로 kriging 과 IDW(Inverse Distance Weighted) 방법을 사용하여 값을 산정하였다. Table 1 은 연구에 사용된 자료의 평균, 범위값, 개수를 보여준다.

2.2 연구 방법

지열에너지 부존량은 다음 방법들을 사용하여 산출 할 수 있다(Muffler and Cataldi, 1978).

1) 지표 지열류량법(Surface Heat Flux method)
2) 체적법(Volume Method)
3) 마그마의 열 공급법(Magmatic Heat Budget method)
4) 평면 균열법(Planar fracture method)

지표 지열류량법(Surface Heat Flux Method)은 개념적으로 가장 단순한 지열에너지 부존량 산출 방법으로 지각 밑(맨틀)에서 공급되는 열이 없다는 가정하에 단위 시간당 지열에너지 부존량을 계산하여 지하에 저장된 총 지열에너지 부존량을 계산하는 방법으로 풍부한 열을 포함한 지역에서 주로 사용된다. 체적법(Volume Method)은 가장 보편적으로 사용하는 방법으로 일정한 부피 내에서 획득된 에너지를 계산하는데 초점을 두고 있다. 마그마의 열 공급법(Magmatic Heat Budget Method)은 마그마가 분출되어 생성된 관입 화성암을 열원 또는 직접적인 개발의 대상으로 간주하여 지열에너지 부존량을 산출하는 방법이다. 관입 화성암의 크기, 위치, 연대 등을 측정하여 일정한 지역의 지열에너지 부존량을 측정할 수 있다. 이 방법은 넓은 범위의 지열에너지 부존량 파악에 용이하지만, 좁은 범위에서는 적용하기 어려운 단점이 있다. 평면 균열법(Planar Fracture Method)은 열이 유체의 흐름으로 평면의 균열을 통과하면서 발생하는 온도 차이를 이용하여 지열에너지 부존량을 산출하는 방법으로 지하 구조가 간단할 때 쉽게 적용하여 지열에너지 부존량을 산출할 수 있다.

위의 방법들 중 이 연구에서는 체적법(Volume Method)을 사용하여 1 km 깊이 간격별로 지표에서부터 5 km 깊이까지의 지열에너지 부존량(Q)을 산출하였다(식 1).

$$Q = \rho C_p V(T_z - T_0) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도(kg/m^3), C_p 는 비열(J/kgK), V 는 부피(km^3), T_z 는 임의의 깊이 z에서의 온도(℃) 그리고 T_0 는 지표온도(℃)이다.

임의의 깊이 z 에서의 온도(T_z)를 구하기 위해 열생산율(A_0)과 열전도도(K)를 고려한 다음 식 (2)를 사용하였다.

$$T_z = \frac{A_0 b^2}{K}(1 - e^{-z/b}) + (\frac{q_0 - A_0 b}{K})z + T_0 \quad (2)$$

여기서, T_z 는 임의의 깊이 z 에서의 온도(℃), A_0 는 지표 열생산율(μW/m^3), b 는 attenuation depth (km), K 는 열전도도(W/mK), z 는 깊이(km), q_0 는 지표 지열류량(mW/m^2) 그리고 T_0 는 지표온도(℃)이다.

Fig. 1은 5 km 깊이에서의 온도 분포를 보여준다. 5 km 깊이에서의 온도 범위는 최저 63.1℃ 에서 최고 171.6℃ 이다.

Table 1. Data for Geothermal Energy Resources Estimation

	A_0(μW/m^3)	C_p (J/kgK)	K (W/mK)	q_0 (mW/m^2)	T_0 (℃)	ρ (kg/m^3)
Mean	2.04	856.80	3.54	65.2	14.4	2673.67
Range Value	0.18 - 5.7	523.0 - 1181.0	1.60 - 8.76	35.2 - 102.3	8.6 - 16.7	1883.2 - 3182.2
Number	180	1560	1560	353	54	1560

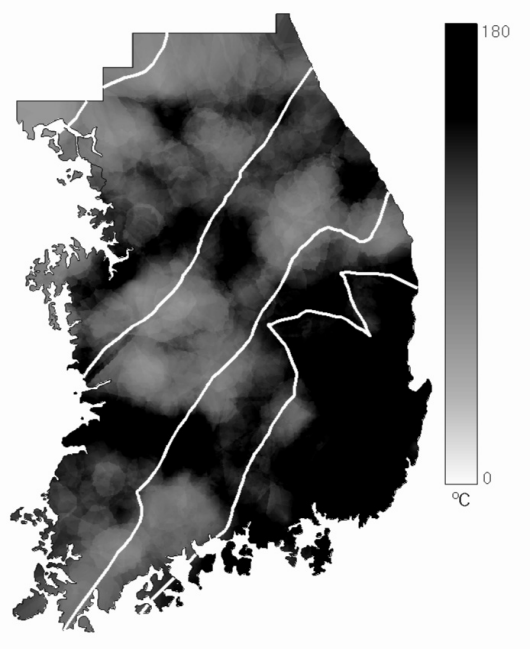

Fig. 1. Temperature at 5 km depth in Korea

2.3 연구 결과

앞으로의 효율적인 지열에너지 개발을 위해 우리나라의 전 지역에서 지열에너지 부존량 산출에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 2는 지표에서부터 5 km 깊이까지의 500 m ×500 m 격자내의 지열에너지 부존량을 보여준다.

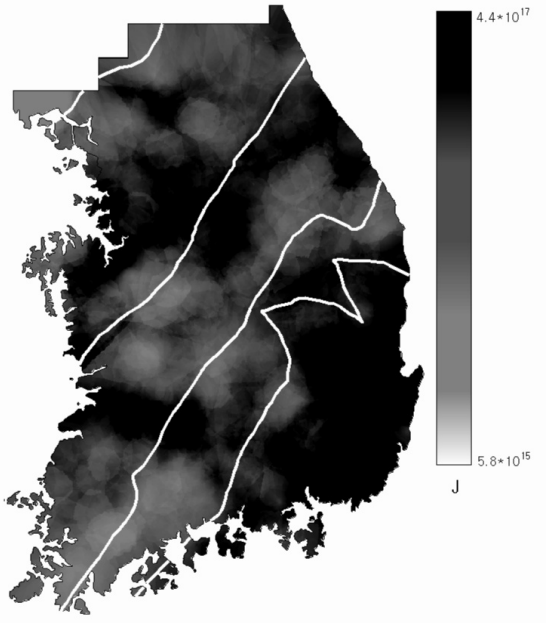

Fig. 2. Heat content at 5 km depth in Korea

우리나라의 지표에서부터 5 km 깊이까지 산출 가능한 지열에너지의 총 부존량은 1.01×10^{23} J 로 산출되었다. 이를 Toe (석유환산톤)로 환산하면 2.40×10^{12} Toe 로 산출한 자원의 2% 를 사용한다고 했을 때, 약 480억 Toe 로 2006년 우리나라 전체 1차 에너지 총 소비량(2.33억 Toe)을 고려 했을때 약 200년 동안 공급할 수 있는 양이다.

Table 2 는 지표에서부터 5 km 깊이까지 깊이 간격별 지열에너지 부존량을 J, GToe, 그리고 지열에너지 부존량의 2% 를 GToe 단위로 보여준다.

Table 2. Heat Content for different depth intervals

Depth Interval	Heat Content in J	Heat Content in GToe	Heat Content in GToe (2%)
0 - 1km	4.25×10^{21}	101.1	2.0
0 - 2km	1.67×10^{22}	398.7	8.0
0 - 3km	3.72×10^{22}	884.9	17.7
0 - 4km	6.52×10^{22}	1552.8	31.1
0 - 5km	1.01×10^{23}	2396.0	47.9

우리나라를 4개의 지체구조로 나누어 지체구조별 지열에너지의 총 부존량과 단위면적당 지열에너지 부존량을 산출하였다(Table 3). 단위면적당 지열에너지 부존량은 경상분지에서 1.20×10^{18} J/km^2 으로 가장 높은 값을 갖고, 경기육괴, 옥천습곡대 그리고 영남육괴에서는 각각 9.90×10^{17} J/km^2, 9.64×10^{17} J/km^2 와 9.41×10^{17} J/km^2 로 유사한 값을 보인다.

Fig. 1에서 경상도 남·북부, 전라북도 중·동부, 경기도 중·남부 그리고 강원도 중부 지역에서 높은 온도를 보이는 것을 볼 수 있다. 지열에너지 부존량(Fig. 2)은 깊이 z 에서의 온도 영향을 많이 받기 때문에 온도 분포도(Fig. 1)와 거의 유사한 분포 형태를 보인다. Fig. 1과 2에서 보듯이 온도와 지열에너지 부존량 모두 우리나라의 남동부(경상분지)에서 높은 값을 보이는 것을 알 수 있다.

Table 3. Heat Content for Tectonic Provinces (0-5 km)

	Area (km^2)	Heat Content (J)	Heat Content per unit Area (J/km^2)
Gyeonggi Massif	26671.03	2.64×10^{22}	9.90×10^{17}
Okcheon Fold Belt	31870.30	3.07×10^{22}	9.64×10^{17}
Youngnam Massif	18082.62	1.70×10^{22}	9.41×10^{17}
Gyeongsang Basin	21028.43	2.52×10^{22}	1.20×10^{18}

3. 결 론

우리나라의 효율적인 지열에너지 자원의 활용을 위하여 지열에너지 부존량 산출에 대한 연구를 수행하였다.

1) 지하 5 km 에서 온도는 우리나라의 남동부 지역에서 가장 높은 값을 보인다.

2) 지표에서부터 지하 5 km 사이에서 지열에너지 부존량은 우리나라의 남동부 지역에서 가장 높은 값을 보인다.

3) 지표에서부터 5 km 깊이까지의 산출 가능한 지열에너지의 2%를 개발한다고 하였을때 약 480억 Toe 이다. 이는 2006년 우리나라의 전체 1차 에너지 총 소비량(2.33억 Toe)과 비교 했을때 약 200년 동안 사용할 수 있는 양이다.

우리나라의 지열에너지 부존량 산출에 대한 연구를 수행함으로써 지열에너지 활용면에서 보다 체계적이고 과학적인 접근이 가능하게 되었다. 또한, 지열에너지 개발시 적합한 개발 위치를 선정함에 있어 효과적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원 지열자원연구실의 기본 사업인 “지열수 자원 실용화 개발” 사업과 에너지관리공단의 “대수층 축열 시스템 개발을 위한 수리지질/지열학적 조사 연구” 사업의 일환으로 수행되었다.

References

[1] 구민호, 송윤호, 이준학, 2006, "국내 지면온도의 시공간적 변화 분석," 자원환경지질학회, 제39권, 제3호, pp. 255-268, 2006.

[2] 김종찬, 2008, "한국의 화강암 열물성과 한국의 열생산율 분포 및 그 해석," 공주대학교 지질과학과 석사학위 논문, 97p., 2008.

[3] Barbier, E., 2002, "Geothermal energy technology and current status: an overview: Renewable and Sustainable Energy Reviews," Vol. 6, No. 1-2, pp.3-65, 2002.

[4] Blackwell, D. D., Negraru, P. T., and Richards, M. C., 2007, "Assessment of the Enhanced Geothermal System Resource Base of the United States," Natural Resources Research, Vol. 15, No. 4, pp. 283-308, 2007.

[5] Kim, H, C., and Y, Lee., 2007, "Heat flow in the Republic of Korea," Journal of Geophysical Research., 112, B05413, doi: 10.1209/2006JB004266, 2007.

[6] McLarty, L., Grabowski, P., Entingh, D., and Robertson, T. A., 2000, "Enhanced Geothermal Systems R&D in the United States," Proceedings World Geothermal Congress 2000, pp. 3793-3796, 2000.

[7] Muffler, P., and Cataldi, R., 1978, "Methods for Regional Assessment of Geothermal Resources," Geothermics, Vol. 7, pp. 53-89, 1978.

[8] Tester, J. W., Anderson, B., Batchelor, A., Blackwell, D., DiPippo, R., Drake, E., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M. C., Nichols, K., Petty, S., Toksoz, N., Veatch, R., Augustine, C., Baria, R., Murphy, E., Negraru, P., Richards, M., 2006, "The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century: Massachusetts Institute of Technology, DOE Contract DE-AC07-05ID 14517 Final Report, 374p., 2006.