

지열 자원 활용을 위한 국내 열생산을 분포

김 종찬¹⁾, 이 영민²⁾, 황 세호³⁾, 구 민호⁴⁾

Distribution of Heat Production for the Utilization of Geothermal Resources in Korea.

Jongchan Kim, Youngmin Lee, Seho Hwang, Min-Ho Koo

Key words : geothermal resources(지열자원), heat production(열생산물), heat flow(지열류량)

Abstract : 지열류량은 지열자원 개발 시 지열 이상대를 찾는 데 있어서 중요한 자료로 사용된다. 우리나라의 지체구조별 지열류량 평균은 경기육괴 66 mW/m², 옥천습곡대 65 mW/m², 영남육괴 60 mW/m², 경상분지 72 mW/m², 연일분지 75 mW/m²이다. 이러한 대륙 내의 지표 지열류량은 상부 지각내의 방사성 동위원소 붕괴에 의한 열생산물(~40%)과 하부지각 및 상부맨틀에서부터 전도되어 올라온 지열류량(~60%)으로 설명할 수 있다. 따라서 지열류량의 결정에 있어서 열생산물의 정보는 중요한 부분을 차지한다. 열생산물은 지각 내에 존재하는 주요 방사성 동위 원소인 U, Th, K의 붕괴열에 의한 것이며, 열생산물의 측정 방법은 gamma-ray log 자료를 이용하는 방법과 화학분석을 통한 방법이 있다. 이 연구에서는 두 가지 방법을 이용하여 총 123개(화강암 86개, 편마암 37개) 지점에서의 열생산물을 산출하였다. 화강암의 열생산물을 평균은 2.15 μW/m²이며, 편마암의 열생산물 평균은 2.22 μW/m²로 나타났다. 지체구조별 열생산물의 평균은 경기육괴 2.52 μW/m², 옥천습곡대 2.16 μW/m², 영남육괴 2.35 μW/m², 경상분지 2.01 μW/m²로 나타났다. 지체 구조별 열생산물과 지열류량의 상관성 분석에서 우리나라의 경우 지열류량이 높은 지역에서 열생산물이 낮은 경향을 보인다. 따라서 열생산물이 지표 지열류량을 결정하는데 있어서 가장 중요한 요소가 아님을 확인할 수 있다.

Nomenclature

A₀ : surface heat production, μW/m²
A₁ : lower crust heat production, μW/m²
GR : gamma-ray logs, API
U : uranium, ppm
Th : thorium, ppm
K : potassium, %
ρ : density, kg/m³
Q₀ : surface heat flow, mW/m²
Q_m : mantle heat flow, mW/m²
T₀ : surface temperature, °C
K : thermal conductivity, W/mK
b : attenuation factor, km
z : depth, km
z_m : moho depth, km
GG : Gyeonggi Massif
OC : Okcheon Fold Belt
YN : Youngnam Massif
GS : Gyeongsan Basin
YI : Yeonil Basin

1. 서론

온실가스에 의한 지구 온난화와 유가 상승의 영향으로 최근 전 세계가 대체에너지 자원에 대한 관심이 높아지고 있다. 우리나라 역시 신재생 에너지에 대한 정부차원의 투자가 점차 늘어나고 있는 추세이다. 지열은 화석연료를 대체할 수 있는 친환경 청정에너지 자원이며 지속가능한 에너지 자원이다. 신재생에너지 중에서 지열에너지는 가동효율이 가장 높은 장점을 가지고 있지만 초

- 1) 공주대학교
E-mail : geotherm01@gmail.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) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : hwangse@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3158 Fax : (042)861-9720
- 4) 공주대학교
E-mail : koo@kongju.ac.kr
Tel : (041)850-8515 Fax : (041)850-8953

기 투자비용의 부담이 크기 때문에 활용이 저조한 편이다. 초기 투자비용을 줄이기 위해서는 최적의 입지를 선정해야하는데, 최적의 입지조건을 결정하는 지표 중의 하나는 지표 지열류량 값이라 할 수 있다. 지표 지열류량은 열전도도와 지온구배의 함수로서 표현할 수 있으며, 지표 지열류량의 약 40%는 상부지각내의 방사성 동위원소가 붕괴할 때 발생하는 열이 차지하고 약 60%는 하부지각과 맨틀상부에서 전도되어 올라오는 열이 차지한다고 알려져 있다¹⁾.

이 연구에서는 지표 지열류량의 약 40%를 차지하는 열생산율을 gamma-ray log 를 이용한 방법과 화학분석을 통한 방법으로부터 산출 하였으며, 산출된 열생산율로부터 우리나라의 열생산율 분포를 파악하였다. 지열류량과 열생산율은 구조구형성과 관련이 있기 때문에 우리나라를 지체구조별로 나누어 지표 지열류량과 열생산율의 평균을 산출하였으며, 지체구조별 지표 지열류량과 열생산율과의 상관관계를 파악하였다. 마지막으로 산출한 열생산율 값을 이용하여 지체구조별 지온구배와 맨틀 지열류량을 산출하였다.

2. 본 론

2.1 연구 방법

상부 지각을 구성하고 있는 암석은 U, Th, K 와 같은 방사성 동위원소를 포함하고 있다. 방사성 동위원소는 안정 상태로 존재하기 위해 방사성 붕괴를 하면서 α, β, γ -ray 를 방출한다. γ -ray 는 암석 내에서 열에너지로 바뀌게 되며 이때 발생하는 열을 열생산율이라 한다. U, Th, K 등의 방사성 동위원소는 원자의 지름이 커서 olivine, pyroxene 과 같은 용융점이 높은 결정격자 속에 들어가기가 힘들다. 따라서 맨틀로부터 지각이 분리될 때 방사성 동위원소들은 지각과 함께 상층부로 이동하게 되므로 특히 상부지각에 대부분 분포한다²⁾.

열생산율은 직접 측정할 수 없기 때문에 측정을 위해서는 암석 내 존재하는 U, Th, K 의 함량을 우선적으로 알아야 한다. γ -ray spectrometer 는 U, Th, K 의 함량을 측정하는 가장 일반적인 분석기기이며 XRF, Fluorimetry, ICP-MS 방법 등도 방사성동위원소 함량 분석에 많이 쓰이고 있다. 열생산율은 분석기기에 의해 측정된 U, Th, K 의 함량과 시료의 밀도를 이용하면 Rybach(1986) 이 제안한 다음 식 (1)에 의해 산출 된다³⁾.

$$A = 10^{-5} \rho (9.52 [U] + 2.56 [Th] + 3.48 [K]) \quad (1)$$

열생산율을 측정하는 또 다른 방법은 시추공 내 암석밀도 측정을 위한 물리검층인 gamma-ray 검층으로부터 얻은 gamma-ray log 자료를 이용하는 것이다. 이 방법은 Bucker 와 Rybach(1996)⁴⁾에 의해 제안되었으며, gamma-ray log 방법의 가장 큰 장점은 gamma-ray log 자료가 있을 경우, 다음 식 (2)를 이용하여 열생산율을 간단히 산출할 수 있다는 것이다. 또한 화학분석의 오차($\pm 2\%$)보다 gamma-ray log 방법의 오차($\pm 10\%$)가 크

지만, 계산식이 모든 암종에 잘 맞는 장점을 가지고 있기 때문에 널리 쓰이고 있다.

$$A = 0.0158 (GR - 0.8) \quad (2)$$

이 연구에서는 총 123개 지점에서의 열생산율을 측정하였으며, 그중 55개는 gamma-ray log 방법을 이용하였으며, 나머지 68개는 화학분석 방법인 ICP-MS와 AAS 를 이용하여 측정하였다. 두 방법 간의 측정오차를 확인하기 위해서 세종시 내에 위치한 시추공에서 측정된 gamma-ray log 자료를 이용하여 열생산율을 산출하였고, 같은 공에서 회수한 같은 심도의 시추코어 시료 5개를 화학 분석하여 열생산율을 산출하여 비교하였다. 두 방법의 평균오차는 7%로 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

열생산율은 일차적으로 U, Th, K 의 함량에 영향을 가장 크게 받으며, 암종에 따라서도 영향을 받는다. 이 연구에서는 기반암(화강암, 편마암)만을 대상으로 열생산율 값을 산출하였다. 따라서 gamma-ray log 자료에서 퇴적층의 자료들은 제거하였다. 화학분석에 사용된 시료 역시 기반암인 화강암과 편마암을 대상으로 하였다.

2.2 연구 결과 및 고찰

2.2.1 열생산율

Gamma-ray log 방법과 화학분석을 통하여 얻은 123개의 열생산율 중에 화강암은 86개, 편마암은 37개이며, 이로부터 산출된 평균은 각각 $2.15 \mu W/m^2$, $2.22 \mu W/m^2$ 이다. 지체 구조별 열생산율 평균은 경기육괴 $2.52 \mu W/m^2$, 옥천습곡대 $2.16 \mu W/m^2$, 영남육괴 $2.35 \mu W/m^2$, 경상분지 $2.01 \mu W/m^2$, 연일분지 $2.95 \mu W/m^2$ 이다. 한반도의 중서부와 중동부 지역에서 열생산율이 높게 나타나고, 남부 내륙과 중부 해안에서 낮은 분포를 보인다.

2.2.2 지표 지열류량

우리나라의 지표 지열류량 연구는 Kim and Lee(2007)에 의해 수행 되었다⁵⁾. 지체 구조별 지표 지열류량 평균은 경기육괴 $66 mW/m^2$, 옥천습곡대 $65 mW/m^2$, 영남육괴 $60 mW/m^2$, 경상분지 $72 mW/m^2$, 연일분지 $75 mW/m^2$ 이다. 지표 지열류량이 높은 지역은 중서부, 남동부, 그리고 북동부 지역이며, 지열류량이 낮은 지역은 남서부 지역이다.

2.2.3 열생산율 vs. 지표 지열류량

우리나라는 지표 지열류량이 높은 지역에서 열생산율은 낮은 경향을 보인다. 이점으로 미루어 열생산율이 지표 지열류량을 결정하는 가장 중요한 요소가 아님을 확인할 수 있다.

Lachenbruch(1968)와 Birch et al.(1968)는 지표 지열류량과 열생산율간의 상관관계로부터 다음 식(3)과 같은 선형관계를 제시하였다⁶⁾⁷⁾.

$$Q_0 = Q_r + A_0 D \quad (3)$$

여기서 Q_0 는 지표 지열류량, Q_r 은 맨틀 지열류량 (reduced heat flow), A_0 는 열생산율, D 는 방사성 동위원소의 분포 깊이(attenuation depth)이다.

연구지역내에서 획득한 지표 지열류량과 열생산율의 선형관계로부터 Q_r 과 D 값이 일정하다면, 그 연구지역의 tectonothermal history 가 유사하다고 할 수 있다⁸⁾. 우리나라의 경우 경상분지에서 $Q_0 = 47.06 + 12.29A_0$ 라는 선형관계를 보이지만, 다른 지체구조에서는 열생산율과 지열류량의 자료가 부족하여 관계식 산정이 불가능 하다.

2.2.4 지온구배

지표 지열류량과 열생산율 값을 알면 역으로 지각내부의 온도 분포를 추정할 수 있다. 깊이에 따른 온도분포를 산출하기 위해서는 방사성 동위원소의 분포를 고려해야 한다. 다음 식 (4)는 깊이에 따른 열생산율 분포와 전도에 의한 열의 이동을 고려한 지온구배 계산식이다⁹⁾.

$$T(z) = \frac{A_0 b^2}{K} [1 - e^{-z/b}] + \left(\frac{Q_0 - A_0 b}{K} \right) z + T_0 \quad (4)$$

방사성동위원소가 분포하는 깊이(b)는 경상분지의 경우 약 12km로 지표 지열류량과 열생산율 상관관계로부터 산출 되었다. 전 세계 평균은 약 10-15km이다¹⁰⁾.

다음 식(4)에 필요한 변수 값은 Table 1과 같다. 모호면까지의 깊이는 Yoo et al., (2007) 자료를 이용하였고¹¹⁾, 평균 지표 온도는 구민호의 (2006)의 자료를 이용하였다¹²⁾.

Fig. 1은 식(4)를 이용하여 산출한 깊이에 따른 지각 내부의 온도분포를 보여준다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 우리나라 지체구조별 지온구배는 영남육괴가 가장 낮고 경상분지가 가장 높게 나타난다.

Table 1. Parameters for equation (4), (5)

	GG	OC	YN	GS	YI
A_0	2.52	2.16	2.35	2.01	2.95
A_1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Q_0	66	65	60	72	75
T_0	13.1	13.7	14.4	15.1	15.8
z_m	31.9	33.1	34.4	33.6	28.8
K	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
b	12	12	12	12	12

2.2.5 맨틀 지열류량

맨틀 지열류량은 열생산율과 지표 지열류량의 선형관계(Q_r)로부터 알 수 있지만, 정확한 맨틀 지열류량은 다음 식(5)에 의해 가능하다¹³⁾.

$$Q_m = Q_0 - \{ (A_0 - A_1)b + A_1[z_m - b \ln(A_0/A_1)] \} \quad (5)$$

깊이에 따라 방사성 동위원소의 분포와 함량은 다르기 때문에 지표에서 b (attenuation depth) 까지의 구간과 b 에서 모호면 이전까지의 구간을 두 개의 층으로 구분하여 맨틀 지열류량을 산출하였다.

Fig 2는 지체구조별 지표 지열류량과 맨틀 지열류량의 분포를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 경상분지의 높은 지열류량값은 높은 맨틀 지열류량값에 의한 것으로 판단된다.

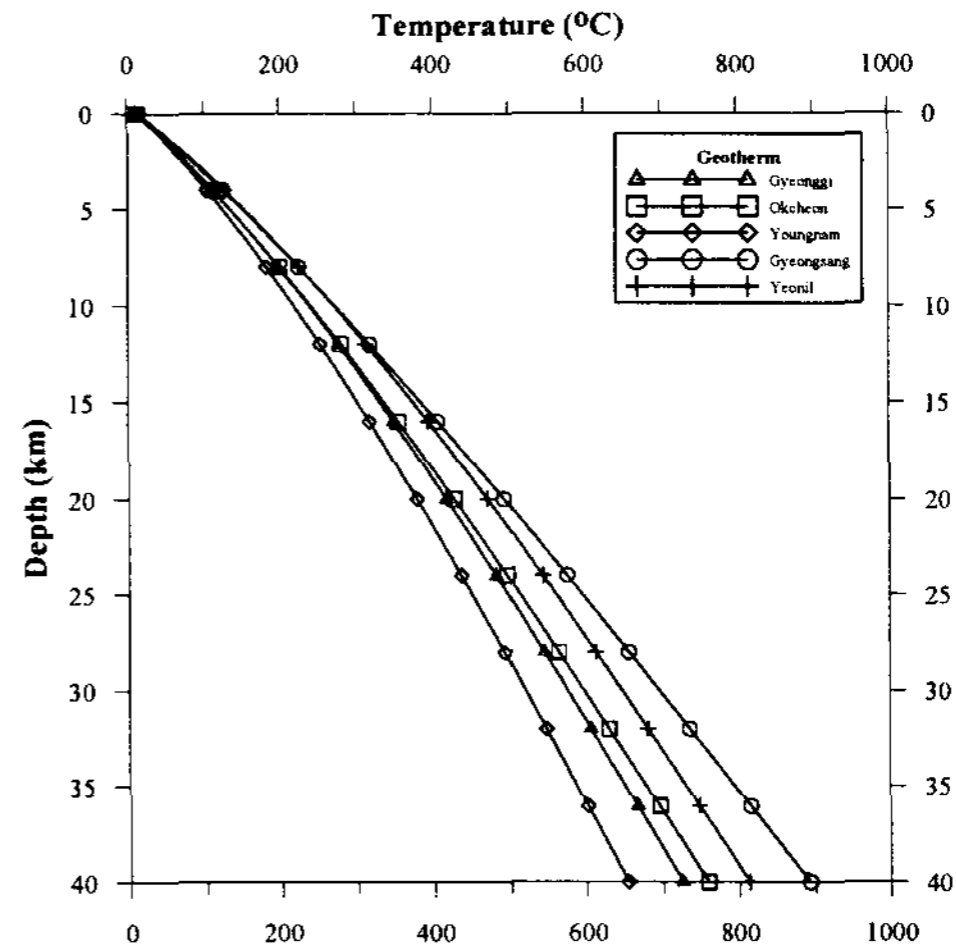


Fig. 1. Geotherms of tectonic provinces

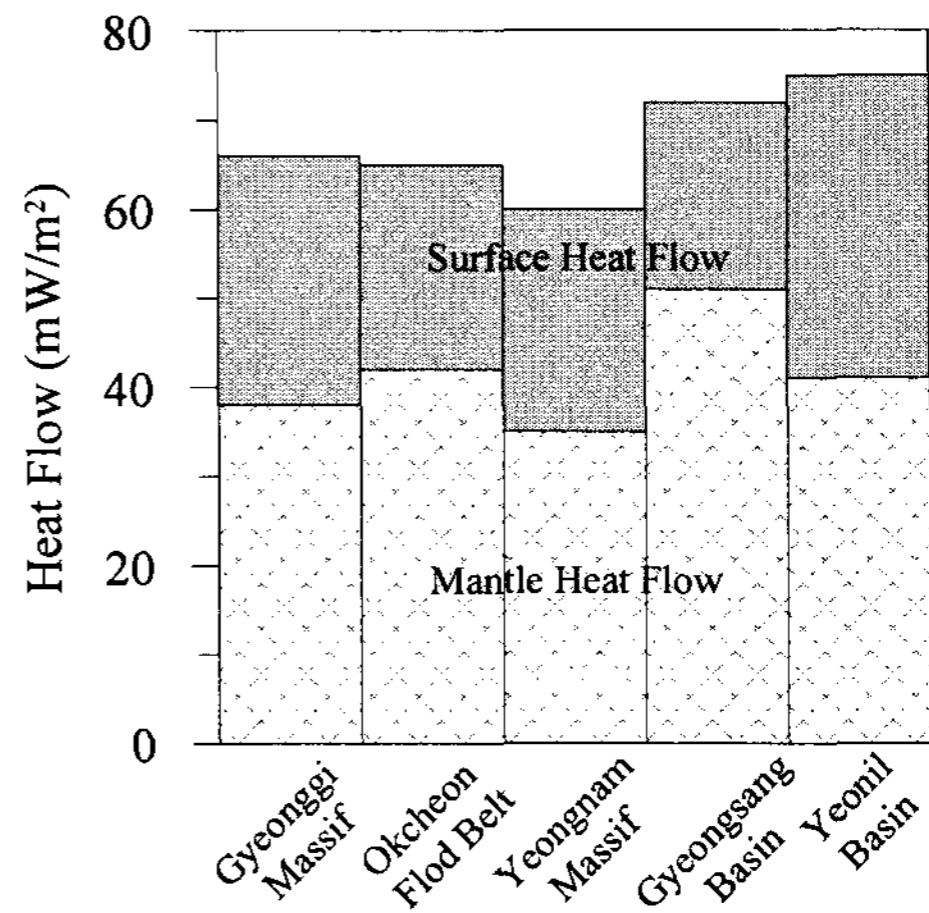


Fig. 2. Distributions of surface heat flow and mantle heat flow in tectonic provinces.

3. 결론

지표 지열류량은 지열 자원 개발 시 지열 이상대를 찾는 데 중요한 지표중 하나이다. 이런 지표 지열류량의 약 40%를 결정하는 요인은 상부 지각 내에 존재하는 방사성 동위원소 붕괴에 의한 열, 즉 열생산율이다. 이 연구에서는 총 123개 지점에서 기반암(화강암, 편마암)의 열생산율을 산출하였다. 화강암의 열생산율 평균은 $2.15 \mu W/m^2$, 편마암의 열생산율 평균은 $2.22 \mu W/m^2$ 이다. 지체구조별 열생산율 평균은 경기육괴 $2.52 \mu W/m^2$, 옥천습곡대 $2.16 \mu W/m^2$, 영남육괴 $2.35 \mu W/m^2$, 경상분지 $2.01 \mu W/m^2$, 연일분지 $2.95 \mu W/m^2$ 이다. Kim

and Lee, (2007)가 연구한 우리나라 지열류량 자료로부터 지체구조별 평균은 경기육괴 66 mW/m², 옥천습곡대 65 mW/m², 영남육괴 60 mW/m², 경상분지 72 mW/m², 연일분지 75mW/m²이다. 위의 값들로부터 높은 지표 지열류량을 보이는 곳에서 낮은 열생산율을 나타내는 경향을 확인 할 수 있다. 이점으로 미루어 우리나라는 열생산율이 지표 지열류량을 결정하는데 가장 중요한 요소가 아님을 알 수 있다. 경상분지에서 12개의 열생산율과 지표 지열류량 자료로부터 $Q_0 = 47.06 + 12.29A_0$ 라는 선형 관계식을 확인 하였다.

마지막으로 지표 지열류량과 열생산율 값으로부터 우리나라 지체구조별 지온구배와 맨틀 지열류량을 산출하였다. 경상분지는 다른 지체구조에 비해서 지온구배와 맨틀 지열류량이 높게 나타났다. 따라서 경상분지의 높은 지표 지열류량은 지각내 방사성 동위원소에 의한 열생산율보다 맨틀 지열류량의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원 지열자원연구실의 기본사업인 지열수 자원 실용화 기술 개발 (GP2007-002-01)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Pollack, H.N., and Chapman, D.S., 1977, "Mantle heat flow", *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 34, pp. 174-184.
- [2] Birch, F., 1965, "Speculations on the Earth's thermal history", *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 76, pp. 1334-154.
- [3] Rybach, L., 1986, "Amount and significance of radioactive heat production in crustal rocks: An exponential law", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 117, pp. 75-82.
- [4] Bucker, C. and Rybach, L., 1996, "A simple method to determine heat production from gamma logs", *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 3, pp. 373-375.
- [5] Kim, H. C., and Lee, Y., 2007, "Heat flow in the Republic of Korea", *J. Geophysical Research*, Vol. 112, B05413, doi:10.1029/2006JB004266.
- [6] Lachenbruch, A. H., 1968, "Preliminary geothermal model of the Sierra Nevada", *J. Geophysical Res.*, Vol. 73, pp. 6977-6989.
- [7] Birch, F., Roy, R.F., and Decker, E. R., 1968, "Heat flow and thermal history in New England and New York", In *Studies of Appalachian Geology: Northern and Maritime*, pp. 437-451, New York: Wiley Interscience.
- [8] Roy, R. F., Blackwell, D.D., and Birch, F., 1968, "Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces", *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 5, pp. 1-12.
- [9] Turcotte, D. L., and G. Schubert, 1982, "Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems", pp. 450, John Wiley & Sons.
- [10] Drury, M. J., 1989, "The heat flow-heat generation relationship: Implications for the nature of continental crust", *Tectonophysics*, Vol. 164, pp. 93-106.
- [11] Yoo, H. J., Herrmann, R. B., Cho, K. H., and Lee, K., 2007, "Imaging the three-dimensional crust of the Korean peninsula by joint inversion of surface-wave dispersion and teleseismic receiver functions", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 97, pp. 1002-1011.
- [12] 구민호, 송윤호, 이준학, 2006, "국내 지면은도의 시공간적 변화 분석", *자원환경지질학회*, 제39권, 제3호, pp. 255-268.
- [13] Pollack, H. N., and Chapman, D. S. 1977, "Mantle heat flow", *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 34, pp. 174-184.