



지구 열원에 대한 고찰

이영민, 송윤호*

한국지질자원연구원 선임연구원, *책임연구원

1. 서론

지표면에서 받는 가장 큰 열에너지는 태양의 복사열이다. 이 태양의 복사열로 지구의 지표면의 온도가 약 14℃ 정도로 유지되며 아울러 기상과 해양순환이 일어나 풍화와 침식 같은 지질작용이 가능케 한다. 그러나 태양열은 지표 부근 암석의 낮은 열확산율 때문에 지구내부로 깊이 전도되지 못한다. 따라서 지구의 열원에 대한 논의를 위해서는 지구내부의 열원에 대한 고려가 필요하다. 이 논문에서는 지구의 외부 및 내부의 열원에는 어떠한 것이 있는지 그리고 열원으로부터 어느 정도의 열이 발산되어 나오는 지를 고찰하여 지구내부의 열을 이해하고자 한다.

2. 지구의 지열류량 및 전지구적 열손실

지구의 평균 지열류량은 전세계에서의 20,201개 (대륙자료 13,249개; 해양자료 6,952)의 지열류량 자료에 의해 결정되었는데, 대륙의 평균 지열류량은 67 mW/m²이고, 해양의 평균지열류량은 101 mW/m², 그리고 전지구평균 지열류량은 87 mW/m²이다[1]. 이에 따른 열손실은 대륙이 1.32 × 10¹³ W이고 해양이 3.1 × 10¹³ W이다. 그리고 대륙에서의 열손실과 해양에서의 열손실을 합하면 전지구적 열손실이 산출되는데 이는 4.42 × 10¹³ W이다. 해양에서의 열손실이 전지구적인 열손실의 약 70%를 차지하고, 대륙에서의 열손실이 약 30%를 차지한다. 해양에서의 열손실 중에서는 확장되는 해령에서의 해양암권(oceanic lithosphere)의

형성에 의한 열손실이 대부분을 차지한다.

3. 지구외부의 열원

3.1 태양의 복사열

태양으로부터 막대한 양의 열에너지가 지구 상에 도달한다. 그 양은 1.75 × 10¹⁷ W에 이른다(Fig.1). 그 중에 약 35% (6.1 × 10¹⁶ W)는 단파복사로 바로 반사되어 방출되고 나머지 65%(1.14 × 10¹⁷ W)만이 대기권, 수권, 암석권에 의해 흡수된다. 이렇게 흡수된 태양으로부터의 에너지중 31%(3.53 × 10¹⁶ W)는 대기권에 의해 흡수되고 69%(7.87 × 10¹⁶ W)만이 지구표면에 도달한다. 따라서 태양으로부터 복사되는 총 열에너지 중 약 45%만을 지구의 열원으로 생각할 수 있는 것이다. 이렇게 지구표면에 도달한 태양의 복사열중 1 ppm(3.2 × 10⁹ W - 3.2 × 10¹⁰ W)만이 지구의 지각에 저장된다[2]. 이 중 작은 비율의 태양복사에너지가 지표면을 데우는데 사용되는데 대부분의 태양복사에너지는 지각의 매우 낮은 열확산율(10⁻⁶ m²/s) 때문에 지각의 매우 얇은 깊이까지만 들어간다. 예를 들면, 지각의 낮은 열확산율 때문에 대기의 온도의 계절적변화와 일변화가 지각의 약 20 m 정도까지만 영향을 준다는 것을 보면 태양의 복사에너지가 지각의 얇은 부분까지만 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 결론적으로 태양의 복사열은 지구 내부의 열적 상태에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

3.2 중력에너지

지구와 달과 태양 사이에 작용하는 중력에너지는 지구의 조석에너지의 근원이다. 지구의 조석감속(tidal deceleration)은 약 $3 \times 10^{12} \text{ W} - 6 \times 10^{12} \text{ W}$ 의 회전운동에너지의 감소를 가져온다. 이 에너지는 조석 마찰에 의해 방출되고 열로 전환된다. 이 에너지 중 최소한 80%는 해양에서 방출되고 나머지 20%는 지구의 맨틀에서 방출된다. 중력에너지로부터 얻어진 열은 $6 \times 10^{11} \text{ W} - 12 \times 10^{11} \text{ W}$ 이다. 이 양은 지구내부에서의 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 열에 비하면 1/10 - 1/100에 이르는 수준이다[2].

4. 지구내부의 열원

4.1 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열

암석내의 방사성동위원소가 붕괴 시 열을 발생하며 이때 발생한 열은 지구내부의 가장 중요한 열원 중의 하나이다. 지구의 중요한 열원이 되기 위해서는 방사성동위원소의 양이 충분히 많아져 되고, 반감기가 지구의 나이에 비해 너무 짧거나 너무 길지 않아야 된다. 이러한 조건을 만족하는 방사성 동위원소는 235U, 238U, 232Th, 40K이

다. 이들 방사성 동위원소에 의해 발생하는 현재의 열은 $2.75 \times 10^{13} \text{ W}$ 이다[2]. 한편, 지구내부의 열전도에 의한 열손실은 $4.42 \times 10^{13} \text{ W}$ 이다[1]. 따라서 방사성 동위원소에 의한 열과 열전도에 의한 열손실의 비는 $2.75 \times 10^{13} \text{ W} / 4.42 \times 10^{13} \text{ W} = 0.62$ 이다[2]. 다시 말하면 지구내부 열의 2/3가량이 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 열이다. 대륙에서만 보면 상부지각 암석의 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열이 40% 정도 차지하고 나머지 60%의 열은 하부지각과 맨틀과 그리고 맨틀 아래에서 올라오는 열로 설명될 수 있다[3].

암석의 열생산율은 다음과 같은 경험식으로 산출할 수 있다[4].

$$A [\text{W/m}^3] = 10^{-5} \rho (9.52C_u + 2.56C_{Th} + 3.48C_k) \quad (1)$$

여기서 (kg/m^3)는 암석의 밀도이고, Cu[ppm], CTh[ppm], 그리고 Ck[%]는 각각 U, Th, K의 함양이다. 방사성동위원소가 1그램당 일년동안 방출하는에너지는 U이 0.74 cal/(g-yr), Th이 0.120cal/(g-yr), 그리고 K가 0.026 10-3 cal/(g-yr)이다[7]. U의 열생산이 가장 크다는 것을 알 수 있고 K가 가장 작은 열생산을 가진다. 하지만 암석내의 K의 양이 많기 때문에 K에 의한 열생산량은 무시할 수 없다. 방사성동위원소의 반감기는 U이 109년정도이고, Th이 1010년정도, 그리고 K가 104년 정도이다. 방사성동위원소(U, Th, K)는 주로 상부지각에 집중적으로 존재하기 때문에 지각에서 생성되는 열은 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열이 중요한 역할을 차지한다. Lachenbruch[5]는 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열생산이 지표로부터 지수적으로 감소한다는 것을 밝혔다(Fig. 2).

암석은 U, Th, K의 함양이 다르기 때문에 다른 열생산율을 가진다. 또한 같은 암종이라도 산출환경에 따라 U, Th, K의 함양이 다르게 나타날 수 있기 때문에 열생산율이 다르게 나타날 수 있다.

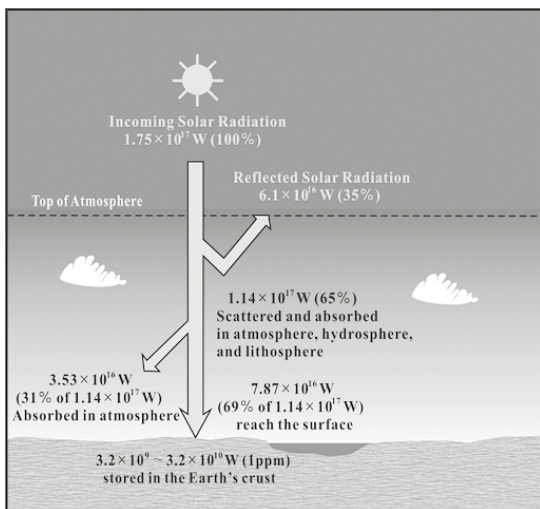


Figure 1. Solar radiation budget

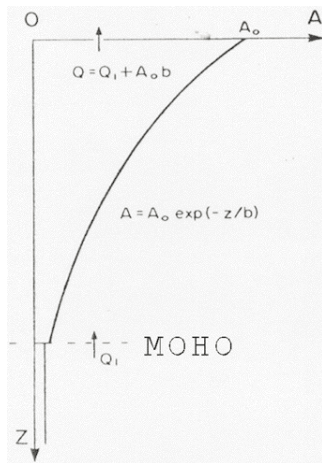


Figure 2. The distribution of heat production in the crust and upper mantle [5]

Table 1, 2, 3은 화성암, 퇴적암, 변성암중에 대한 평균적인 열생산율을 나타낸 것이다. 화성암중에 우리나라에 많이 분포하고 있는 화강암(granite)이 $2.45 \mu W/m^3$ 로 비교적 큰 열생산율을 보인다(Table 1). 그리고 해양지각의 구성 암석인 현무암(basalt)은 $0.309 \mu W/m^3$ 로 작은 열생산율을 가지는 데 이를 통해 해양지각에서는 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열이 매우 작게 생성된다는 것을 알 수 있다(Table 1). 그리고 맨틀의 구성 암석인 peridotite와 dunite는 각각 $0.0117 \mu W/m^3$ 과 $0.00188 \mu W/m^3$ 의 매우 작은 열생산율을 가지는데 맨틀의 체적이 지각에 비해 매우 크기 때

Table 1. Heat production in some igneous rocks due to radioactive decay

암석	열생산율($\mu W/m^3$)
Granite/Rhyolite	2.45
Granodiorite/Dacite	1.48
Diorite, Quartzdiorite/Andesite	1.08
Gabbro/Basalt	0.309
Peridotite	0.0117
Dunite	0.00188

문에 결과적으로 무시할 수 없을 정도의 열이 맨틀의 방사성동위원소의 붕괴에 의해 생성된다.

퇴적암은 대체적으로 작은 열생산율을 가진다(Table 2). 단, 퇴적암 중에 Black Shale은 매우 높은 열생산율($5.5 W/m^3$)을 지닌다(Table 2).

Table 2. Heat production in some sedimentary rocks due to radioactive decay

암석	열생산율($\mu W/m^3$)
Limestone	0.62
Dolomite	0.36
Salt	0.012
Anhydrite	0.09
Shale/Siltstone	1.8
Sandstone	0.84
Black Shale	5.5
Quartzite	0.32
Deep sea sediment	0.74

변성암은 매우 높은 열생산율을 가진다. 우리나라에 많이 분포하는 편마암(Gneiss)이 $2.44 W/m^3$ 의 비교적 높은 열생산율을 지닌다(Table 3).

Table 3. Heat production in some metamorphic rocks due to radioactive decay

암석	열생산율($\mu W/m^3$)
Greenschist	3.15
Gneiss	2.44

암석의 열생산율은 실험실에서 gamma-ray spectrometry를 이용하여 직접 측정할 수 있고, 다른 여러 가지 방법을 이용하여 간접적으로 측정할 수도 있다. 그러한 간접적인 방법들에는 Gamma-ray log, P파의 속도, 밀도 등이 있다. Gamma-ray log는 열생산율과 다음과 같은 일

차원적인 관계를 보인다[6].

$$A[\mu W/m^3]W/m^3=0.0158[GR(API)-0.8] \quad (2)$$

위식은 다양한 암종에 대해 보정된 것이고 10%의 오차를 보인다(Fig. 3).

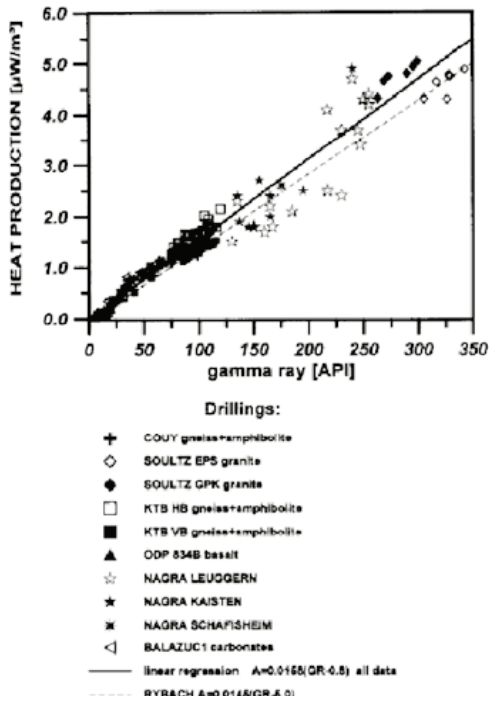


Figure 3. Empirical relationship between gamma-ray log and heart production [6]

P와의 열생산율과의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(Fig. 4)[4].

$$\ln A[\mu W/m^3]=16.5 - 2.74 V_p[km/s] \quad (3)$$

위식에서 보는 바와 같이 P와의 속도가 증가하면 열생산율 값이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 지하 심부로 갈수록 P와의 속도가 증가하고 방사성동위원소(U, Th, K)가 지하 심부로 갈수록 지수적으로 감소한다는 사실과도 일치한다.

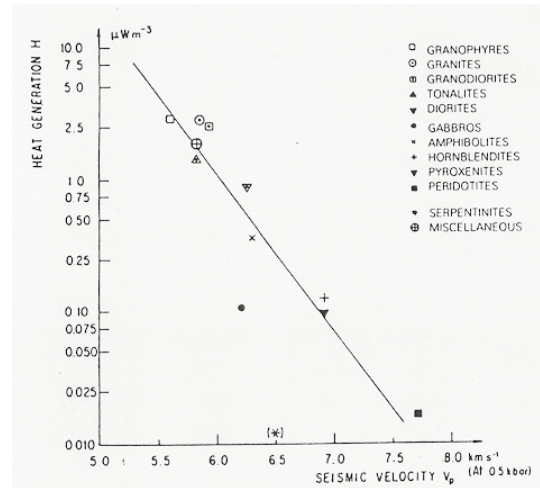


Figure 4. Empirical relationship between seismic velocity (V_p) and heat production [4]

암석의 밀도와 열생산율과의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(Fig. 5)[4].

$$\ln H[\mu W/m^3]=22.5-8.15 [\rho/g/cm^3] \quad (4)$$

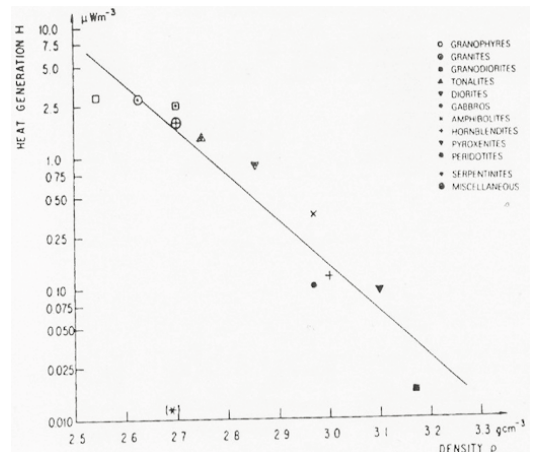


Figure 5. Empirical relationship between density of rock and heat production [4]

4.2 지구형성 초기의 열(Original heat)

지구가 형성될 당시 성간물질이 중력에 의해 수축되어 발생한 열이 주된 열원인데, 이렇게 형성된 지구 초기의 열이 냉각되어 현재의 지열류량에 중요한 기여를 하고 있다[2][7]. 암석의 평균 비열을 $1088 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 로 보고 46억년 동안 650 K 의 온도 감소가 있었다면 $2.9 \times 10^{13} \text{ W}$ 의 원래의 열이 손실 되었다는 계산이 나온다[2]. 지구의 냉각에 의한 열손실은 현재 보다 온도가 높았고 분화가 안된 상태의 초기 지구에서 더 크게 작용하였을 것이다.

4.3 포텐셜에너지

포텐셜에너지는 철로 이루어진 지구 핵의 생성에 의해 46억년 동안 $3.2 \times 10^{11} \text{ W} - 4.5 \times 10^{13} \text{ W}$ 정도의 에너지가 생성되었으며, 새로운 지각의 형성 또는 맨틀에서의 무거운 금속의 농축으로 $3.2 \times 10^{10} \text{ W} - 3.2 \times 10^{12} \text{ W}$ 의 에너지가 축적되어 결과적으로 $3.5 \times 10^{10} \text{ W} - 4.8 \times 10^{13} \text{ W}$ 정도의 에너지가 포텐셜에너지에서 열에너지로 전환되어 방출되었다[2].

4.4 마찰열

지진이 발생할 때 탄성에너지의 방출로 인해 열이 발생하는데 약 $1.6 \times 10^{10} \text{ W} - 1.3 \times 10^{12} \text{ W}$ 정도의 열이 발생한다[2].

5. 결론

지구의 총열손실 ($4.42 \times 10^{13} \text{ W}$)에서 방사성동위원소에 의한 열에너지 ($2.75 \times 10^{13} \text{ W}$)를 빼면 오늘날의 지구상의 열원 중에 방사성동위원소가 아닌 열원(Original heat, 위치에너지, 마찰열 등)에 의한 열에너지가 산출되는데 그 양은 $1.67 \times 10^{13} \text{ W}$ 이다. 따라서, 방사성동위원소에 의해 발생하는 열에너지가 방사성동위원소에 의하지 않은 열원에 의해 발생하는 열에너지보다 크다.

참고문헌

- [1]Pollack, H. N., Hurter, S. J., and Johnson, J. R., 1993, Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set, Reviews of Geophysics, Vol. 31, No. 3, pp. 267-280.
- [2]Clauser, C., 2006, Geothermal Energy, In: Heinloth, K.(ed), Landolt-Bornstein, Group VIII "Advanced Materials and Technologies". Vol. 3 "Energy Technologies", Subvol. C "Renewable Energies", Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, pp. 480-595.
- [3]Pollack, H. N., and Chapman, D. S., 1977, Mantle heat flow, Earth Planet. Sci. Let., Vol. 34, pp. 174-184.
- [4]Rybach, L., 1988, Determination of heat production rate, In: Haenel, R., Rybach, L., and Stegena, L.(ed), Handbook of terrestrial heat-flow density determination, Kluwer Academic Publishers, pp. 125-142.
- [5]Lachenbruch, A. H., 1970, Crustal temperature and heat production: Implications of the linear heat flow relation, J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 3291-3300.
- [6]Buchker, C., and Rybach, L., 1996, A simple method to determine heat production from gamma-ray logs, Marine and Petroleum Geology, Vol. 13, No. 4, pp. 373-375.
- [7]Vacquier, V., 1991, The origin of terrestrial heat flow, Geophys. J. Int., Vol. 106, pp.199-202