한국신·재생에너지학회 2005년도 춘계학술대회논문집 pp.674~677

우리나라의 지열자원 분포

김 형찬[1], 이 철우[2], 송 윤호[3]

Distribution of geothermal resources of Korea

Hyoung Chan Kim, Chul Woo Lee, Yoonho Song

Key words : geothermal resources(지열자원), geothermal gradient(지온경사), thermal conductivity (열전도도), heat flow(지열류량), unconsolidated rock(미고결암)

Abstract : The characteristics of geothermal resources in Korea was roughly estimated using hot springs, 580 geothermal gradients and 338 heat flow data. In the aspect of hot springs with geologic structure, location of hot springs coincide with fault zone, especially younger age of Cretaceous to Tertiary. In the aspect of geothermal gradients, Pohang area shows the highest geothermal gradient anomaly, which is covered with unconsolidated rock of low thermal conductivity preserving the residual heat from igneous activity or radioactivity elements decay . In the aspect of heat flow density, high anomaly can be found along the zone connecting Uljin-Pohang-Busan on the southeastern part of Korean peninsula at which big fault zone as Yangsan fault is well developed.

1. 서 론

지구 내부에 축적되어 있는 거대한 열은 지표면으로 지각 구성 암석의 열전도에 의하거나, 온천과 같이 지하수 유동과 함께 열대류에 의해 전달된다. 화산과 같이 심부 마그마가 용출하여 고온의 지열이 지표로 직접 전달되는 몇몇 나라도 있으나 그 외 이러한 화산지역은 존재하지 않음에도 지열의 흔적인 온천이 존재하는 나라는 많이 있다. 우리나라에도 화산과 같은 고온의 지열은 아니지만 여러 지역에 온천이 있어 잠재 지열자원이 존재하고 있다는 것을 암시하여 준다. 지열의 근원은 맨틀 내의 고온의 열이 있으며, 또한 지각 내 암석의 방사성원소인 U, Th, K이 붕괴하여 발생되는 열이 있다. 우리나라의 경우 후자의 기원이 타당할 것으로 생각된다.

지열이 높다는 뜻은 곧, 지열류량이 크다는 것을 의미한다. 한반도의 지열류량에 관한 연구는 1968년도에 한일공동연구로 시작되어 장정진 (1970), Mizutani et al. (1970)에 의해 처음 연구 결과가 발표되었으며, 이후 서정희(1976), Han et al.(1985) 등에 의해 지열에 관한 연구가 맥을 이어왔다. 1989년도에는 한국지질자원연구원에서 지열자료를 추가하여 개략적인 한반도의 지열류량 분포도가 작성된 바 있다(임정웅 외, 1989). 1996년도에는 자료를 보충하여 진보된 지열류량 분포도가 만들어졌으며, 2002년도에 들어서 본격적인 지열연구가 한국지질자원연구원에서 수행되어 매년 새로운 지열류량 분포도가 작성되고 있다. 이러한 지열류량을 산출하기 위해서 필요한 중요한 요소는 지층을 구성하는 암석의 열전도도와 지하 심도에 따라 증가하는 지온 상승률인 지온경사(geothermal gradient)가 있다. 그러므로 시추공을 굴착할 때 얻어지는 암편의 열전도도 측정과 시추공에 대한 온도검층을 실시하여 자료를 얻는다. 그러나 시간적, 경제적인 이유로 코아 시추를 하지 않기 때문에 시추공에서 직접 암편을 채취하기는 어렵다. 이러한 경우에 시추공 주변의 노두를 이용하여 시추공 내와 동일한 암석을 채취하여 열전도도를 측정한다. 이번 연구에서는 기 조사된 자료와 1983년도부터 심부 시추공에 대한 온도검층으로 얻어진 지온경사, 그리고 시추공 및 시추공 주변 암석의 열전도도를 이용하여 지열류량을 산출한 결과를 분석하였으며, 지열의 흔적인 국내 온천 분포와 비교 분석하였다.

1) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : khc@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3074 Fax : (042)863-9404
2) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : lcw@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3085 Fax : (042)863-9404
3) 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
E-mail : song@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3175 Fax : (042)863-9404

2. 우리나라의 지질 및 지질구조

지각은 여러 개의 판으로 구성되어 지구 표면을 덮고 있다.

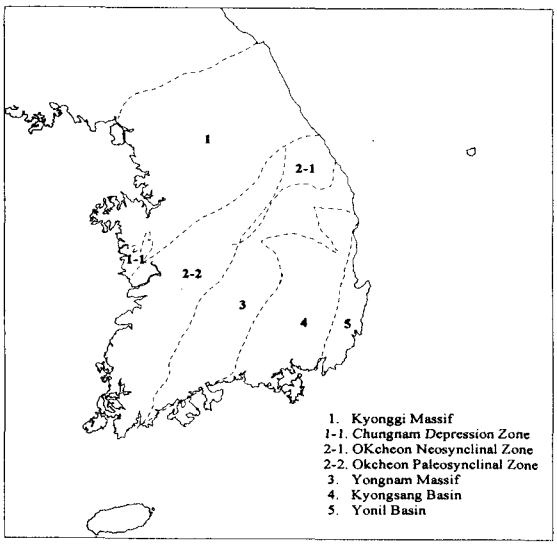

Fig. 1. Techtonic division map in South Korea

지구는 6개의 큰 판으로 유라시아판, 아프리카판, 인도판, 태평양판, 아메리카판, 남극판과 기타 작은 판으로 구성되어 있다. 한반도는 유라시아판의 동북부에 위치하며, 북동-남서 방향의 큰 구조선에 의해 지구조 지역이 구분된다, Fig. 1에서 구분된 것과 같이 중부 옥천벨트가 북동-남서 방향으로 뻗어 있으며, 이를 경계로 북쪽은 경기육괴, 남쪽은 영남육괴로 나뉜다. 또한 영남육괴는 경상분지와 포항 지역의 제 3기분지로 다시 분류된다.

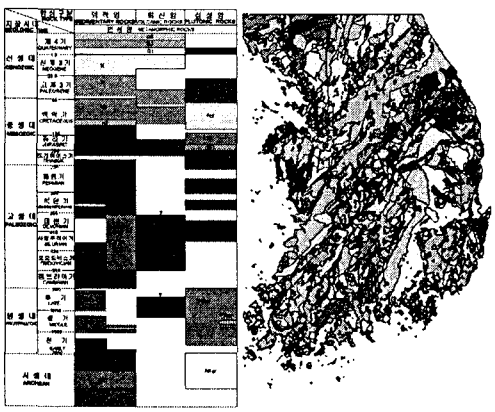

Fig. 2. 1:1,000,000 Geological map of South Korea (modified 1995, KIGAM).

각 분지별로 지질 분포를 보면 경기육괴는 주로 선캠브리아기의 편마암, 편암, 규암과 변성퇴적암에 협재된 대리암등이 구성되고, 트아이아스기의 몬조나이트, 트라이아스기-쥬라기의 대보화강암, 백악기 및 제 4기 화산암에 의해 관입된다. 옥천분지는 고생대의 해성 퇴적물 및 육성퇴적물로 쌓여 있고, 이를 페름기의 화강암류, 쥬라기 대보화강암류 및 백악기 화산암류, 화강암류가 관입한다. 영남육괴는 선캠브리아기의 편마암, 편암, 규암과 변성퇴적암류 내에 대리암 등이 구성되고, 이러한 변성암 및 변성퇴적암류를 쥬라기 대보화강암과 백악기 불국사화강암 및 화산암류가 관입되어 있다. 경상분지는 주로 백악기에 해당하며 육성퇴적물과 화산퇴적물이 퇴적되어 있으며, 이를 백악기 불국사화강암류 및 화산암류가 관입되어 있다. 신생대 제 3기분지는 포항 주변으로 분포되어 있으며 주로 해성퇴적물이 퇴적되어 있으며 이를 화산암류가 관입되어 있다. 특히 Rb-Sr연대측정으로 밝혀진 신생대 제 3기 화강암류도 관입되어 있다(김근수 외, 1995).

3. 한국의 온천 분포

지열의 증거인 온천은 지열의 부존과 지열수 순환 구조가 잘 발달되어 있을 경우 발생한다. 그러므로 온천은 물의 통로가 되는 단층대 및 파쇄대를 따라 발달한다. Fig. 3은 한반도의 시대별 단층선을 표시한 것이며(전명순 외, 1993), 여기에 우리나라의 온천을 도시하였다.

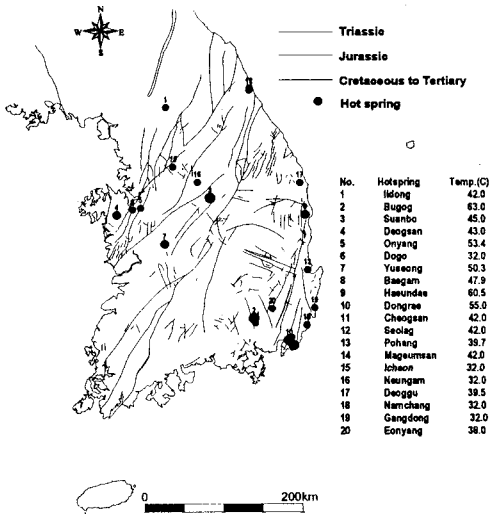

Fig. 3. Structural map and hot springs of South Korea. Green line occurred at Triassic, blue line at Jurassic and red line at Cretaceous to Tertiary. Superimposed are the hot springs higher than 30 ℃ in South Korea (Jeon et al., 1993, modified).

온천의 정의는 사전에서 '지하에서 그 지역 평균 기온보다 높은 온도의 물이 솟는 샘' 으로 설

명되어 있으며, 우리나라의 온천법 상 정의는 '인체에 해롭지 않은 25℃ 이상의 물' 로 설명되어 있다. 전자의 사전적인 의미로서는 상식적으로 온도가 매우 낮은 것으로 우리나라 모든 지하수가 온천으로 정의될 수 있는 문제가 있으며, 후자의 온천법 상 정의를 보면 심도는 관계가 없기 때문에 깊게 시추만 한다면 25℃ 이상의 지하수를 찾을 수 있으므로 두 가지의 정의 모두 애매하다. 그러므로 여기에서의 온천은 우리나라 평균지온경사 25.7 ℃/km 이상을 보이며(김형찬 외, 1999) 30℃ 이상이거나 자연용출 온도가 30 ℃ 이상의 온천을 표시하였다. Fig. 3에서 보면 온천의 분포와 단층선 발달이 밀접한 관계에 놓임을 잘 알 수 있다. 특히 한반도의 동남부 지역과 중서부 지역에 온천이 잘 발달되어 있다. 동남부 지역은 부곡, 마금산, 동래, 해운대, 해운대 등의 온천이 있으며, 중서부 지역은 온양, 도고, 덕산 온천이 있다. 이 지역의 온천은 위의 단층대 중 후기 백악기-제 3기에 발달한 단층선 주변으로 가장 젊은 시기의 단층대이다.

3. 우리나라 지열 분포

지열 부존대란 앞에서 언급한 바와 같이 지열류량이 높은 지역을 의미한다. 일반적으로 지지하 심부의 열은 지층의 열전도 능력에 따라 지표로 이동한다. 온천의 경우는 지하수가 심부 깊은 곳까지 이동하여 지온에 의해 데워져 밀도가 낮아지면서 지층의 약한 부분을 따라 이동한 열대류현상으로 나타나는 것이다. 지열류량은 지층을 매체로 열전도에 의한 열량이다.

지열류량은 열전도에 의해 전달되는 기본 관계로 Fourier 법칙에 따른다. 이는 열 흐름 (q) 즉, 한 매체의 임의의 지점에서 단위 면적 및 단위 시간당의 열량은 그 지점에서의 지온경사와 직접적으로 비례한다는 것이며 일차원적으로 열 흐름은 다음과 같다.

$$q = -K\frac{dT}{dz} \quad (\mathrm{mW/m^2})$$

여기서 K : 열전도도 (W/m°K), T : 온도 (℃), z : 열 흐름의 방향좌표, 즉 심도(m)이다. 지표에서 볼 때 열의 원인은 지하 심부이므로 1차원적 접근은 타당하며, 윗 식의 음수는 열이 온도가 낮은 방향으로 흐르기 때문이다. 이를 지열류량에 적용하면

$$Q = K \cdot \triangle T$$

Q: 지열류량 (W/m^2, 보통 mW/m^{2}의 크기)
K: 암석열전도도 (W/m-°K 또는 W/m-℃)
$\triangle T$: 지온경사 (℃/m)

로 표시할 수 있다.

3.1. 지온경사 분포

국내에 산재되어 있는 시추공 총 696개에 대한 온도검층 자료를 측정 및 수집하였다. 이러한 자료 중 온천이나 지하수 유동에 의해 불규칙한 변화를 보이는 자료를 제외하고 전형적인 일직선의 지온경사를 보이는 것과 공저온도 및 지표평균 온도를 이용하여 계산한 타당성 있는 지온경사 자료 580개를 이용하여 Kriging 단술산술평균법을 이용하여 Fig. 4와 같이 지온경사 분포도를 작성하였다.

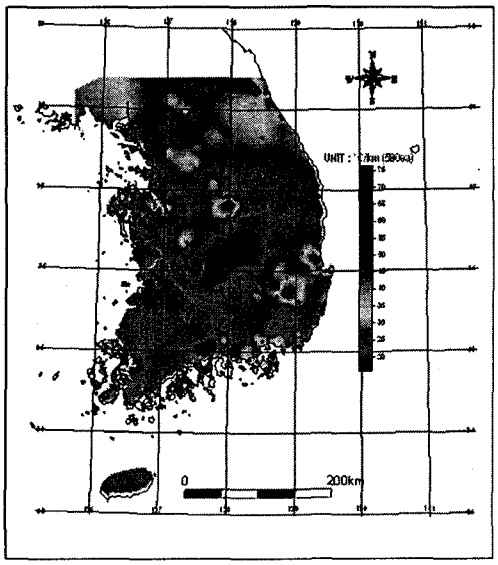

Fig. 4 Distribution map of geothermal gradients of South Korea using 580 data

Fig. 4에서 보면 포항 주변지역에서 가장 높은 지온경사를 보이며, 강화 석모도, 속초, 양양, 이천, 충원, 유성, 아산, 언양, 경남 고성 지역이 높은 지온경사를 보인다. 위의 지역은 주변에 온천이 위치하고 있다. 비록 온천자료는 사용하지 않았으나 온천 주변부가 지열수의 대류작용으로 다른 지역보다 상대적으로 많이 데워져 나타나는 것으로 보인다. 그러나 포항지역의 경우 온천이 개발되지 전부터 높은 지온경사를 보이던 지역이다. 이 지역은 심부 시추한 결과를 보면 상부는 신생대 제 3기 지층으로 기반암은 백악기 경상분지 퇴적암이 분포하고 이를 화산암 및 화강암이 관입하였으며, 위에 제 3기 퇴적암인 미고결 이암층이 덮여 있는 지역이다. 온도검층 결과를 보면 상부 신생대 제 3기 미고결 이암층과 백악기 경상분지 지층의 경계에서 상부는 높은 지온경사를 보이며, 하부는 우리나라 평균적인 지온경사를 보인다. 이는 곧, 상부의 미고결층이 열전도도가 낮다는 것을 의미하며, 이러한 이유로 신생대 제 3기 미고결층 하부는 화성활동 및 방사성원소 붕괴에 의한 잔류열이 있음을 예측할 수 있다.

3.2. 지열류량 분포

지금까지 국내의 지열류량 자료는 338개가 수집 및 측정되었으며, 개략적인 우리나라의 지열류량 분포를 파악하기 위하여 Kriging의 단순산술평균법을 이용한 지열류량 분포도는 Fig. 5와 같다.

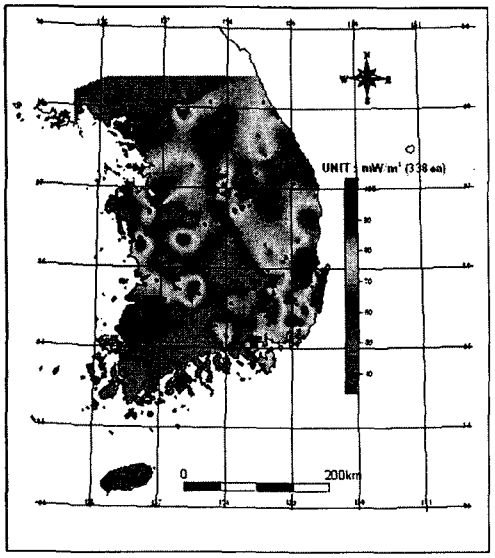

Fig. 5 Distribution map of Heat flow density of South Korea using 338 heat flow data

Fig. 4에서 보면 강원 산간지역과 서울 경기 주변, 전라도 남부 및 서부 등 자료가 충분치 않은 지역이 많이 있다. 지열류량은 시추공이 있어야 산출할 수 있으나 위의 지역에는 시추공이 많지 않기 때문이다. 그러나 이는 주로 심부시추공으로 300 m 심도 이상의 시추공을 대상으로 한 것이며, 최근 많이 개발된 농업용수를 위한 시추공을 이용하면 더 많은 자료를 축적할 수 있을 것으로 보인다. 개략적인 지열류량 분포를 보면 한반도 남동부의 울진-포항-부산으로 이어지는 지열류량 이상대가 형성되어 있고, 나머지는 부분적으로 포천, 속초, 양양, 아산, 수안보, 유성, 서산, 화순, 경남 고성 등에서 높은 지열류량을 보이는데, 앞에서 언급한 바와 같이 온천 주변부가 지열수의 대류작용으로 데워져 나타나는 것으로 보인다. 그러나 동남부 북북동-남남서 방향으로 이어지는 지열류량 이상대는 우리나라에서 가장 큰 단층인 양산단층이 발달한 중심으로 밀양단층, 모량단층, 동래단층 및 일광단층이 발달한 지역이다. 이 지역의 지열류량 이상대는 이러한 젊은 시기의 단층대와 관계가 깊을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 토의

이상과 같이 우리나라의 지질 및 지질구조와 온천 분포, 지온경사 분포, 지열류량 분포의 특성을 알아 보았다. 지열의 증거인 온천의 분포 특성을 보면 주로 단층대 주변에 잘 발달되어 있으며, 특히 백악기-신생대 제 3기에 발달한 단층대 주변에 많이 나타났다. 지온경사의 분포를 보면 역시 온천 주변에서 높은 지온경사를 보이나 이는 지열수 대류에 의해 주변의 지온이 높아져 나타나는 현상으로 보이며, 포항 주변의 높은 지온경사는 열전도도가 낮은 신생대 제 3기 미고결암인 이암층이 두껍게 덮여 하부의 잔류열을 보존하고 있는 것으로 판단된다. 지열류량 분포에서도 온천 주변부가 높게 나타났으며, 특히 울진-포항-부산으로 이어지는 지열류량 이상대는 국내의 가장 큰 단층인 양산단층대의 주변으로 나타나고 있다.

국내의 지열자료를 보면 강원 산간지역이나 전라도 남부 및 서부, 서울, 경기도 주변 등 자료가 없는 지역이 넓어 전반적인 지열특성에 대해 논하기는 너무 부족한 자료이다. 보다 정확한 지열 부존을 논하기 위해서는 지속적인 자료 수집 및 측정이 필요한 것으로 보인다.

Acknowledgements

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본사업인 '지열자원 부존 특성 규명 및 활용 기반 기술 사업' 결과의 일부이다.

References

Mizutani, H., Baba, K., Kobayashi, N., Chang, C. C., Lee, C. H. and Kong, Y. S., Heat *flow in Korea, Tectonophysics, Vol. 10*, p. 183-203, 1970.

김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동, 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대, 지구과학회지, Vol. 16, No. 4, p.272-279, 1995.

김형찬, 송무영, 지온경사 산출을 위한 효율적인 온도검층자료 이용 방법 연구, 자원환경지질, 제32권, 5호, p. 503-517, 1999.

서정희, 지열광상의 특성 및 탐사, 대한광산학회지, 제13권, 2호, p. 102-109, 1976.

장정진, 한국의 지열류량, 지질광상, 제10권, 국립지질광물연구소, p. 23-29, 1970.

전명순, 최위찬, 박근필, 한반도 및 그 주변의 Neo-Tectonic에 관한 연구, 과학기술처 연구보고서, 한국자원연구소, 86 p., 1993.

황재하, 진명식, 전명순, 조진동, 구성본, 최범영, 한현철, 김주용, 선우돈, 송교영, 유동근, 김복철, 기원서, 이사로, 이승렬, 임무택, 박영수, 정현기, 이윤수, 민중기, 박덕원, 이춘오, 이대준, 최종호, 고인세, 신현모, 고응력장 변화와 지각변형사연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-00(연차)-01, 220 p., 2000.