

남한지역 지질특성과 지열류량의 상호 관련성

김형찬^{1*} · 이사로² · 송무영³

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²한국지질자원연구원 지질자원정보센터, ³충남대학교 지질학과

Geological Characteristics and Heat Flow Relationship in South Korea

Hyoung Chan Kim, Saro Lee, Moo Young Song

¹Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²National Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

³Department of Geology, Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

The purpose of this study is to analyze the geothermal anomaly based on the relationship between heat flow values and geologic settings in South Korea. For this, a total of 247 heat flow data was constructed to spatial database and the spatial database was overlaid with 1 : 1,000,000-scale digital geologic map using GIS. As the result, the average of heat flow is $64 \pm 14 \text{ mWm}^{-2}$ in South Korea. In the lithological aspect, the area of sedimentary rock shows high heat flow of 74 mWm^{-2} , sedimentary/volcanic rock area 62 mWm^{-2} , plutonic rock area 63 mWm^{-2} and metamorphic rock area 61 mWm^{-2} . In the geologic time sequence, the Cenozoic strata has 91 mWm^{-2} , the Mesozoic and Paleozoic strata 65 mWm^{-2} , the Proterozoic strata 55 mWm^{-2} and the Archean strata 61 mWm^{-2} .

Key words : Geothermal, Heat flow, GIS, Lithology, Geological time

이 연구에서는 남한의 지열류량 총 247개 자료와 지질 및 지질시대와의 상관관계를 파악하였다. 이를 위해 지열류량 공간 DB를 구축하였으며, 이를 1 : 1,000,000 지질도 공간 DB와 GIS를 이용하여 교차 분석하였다. 그 결과 남한의 평균 지열류량은 $64 \pm 14 \text{ mWm}^{-2}$ 의 값을 보였다. 암석의 종류별 비교에서는 퇴적암류 분포지역에서 74 mWm^{-2} 로 가장 높은 지열류량을 보였으며, 변성암류 분포지역에서 약간 낮은 61 mWm^{-2} 의 지열류량을 보였다. 화산퇴적암류나 심성암류 분포지역에서는 각각 62, 63 mWm^{-2} 의 지열류량을 보였다. 지질시대별 지층과 지열류량간에서의 관계에서는 가장 신기에 속하는 신생대 지층이 분포하는 지역에서 가장 높은 91 mWm^{-2} 의 지열류량값을 보였으며, 중생대, 고생대 지층이 분포하는 지역이 65 mWm^{-2} 이며, 고기인 원생대, 시생대 지층이 분포하는 지역이 각각 55, 61 mWm^{-2} 로 가장 낮은 지열류량을 보였다.

주요어 : 지열, 지열류량, GIS, 암상, 지질시대

1. 서 론

우리나라의 지온, 암석의 열전도도 및 지열류량 분포에 대한 연구는 지극히 미미한 실정으로 개략적인 지열연구가 발표되었을 뿐이다. 지열류량을 측정하기 위해서는 시추공이 있어야 하며, 그 시추공내의 온도 검층과 암석의 열전도도(thermal conductivity)를 측정

해야 한다. 실제로 한국 전역에 대한 시추공 굴착 및 온도검층과 암석의 열전도도를 측정하기에는 많은 시간, 예산과 인력 등이 든다. 또 지열자원의 부존지역을 확인하였다 해도 다른 신·재생에너지 개발과 비교하여 개발을 위한 초기 시설투자비가 비교적 많이 드는 편이므로 남한의 지열자원개발은 아직 시기상조가 아닐까 염려하는 사람들도 있다. 그러나 미래의 에너지

*Corresponding author: khc@kigam.re.kr

로써 대비하기 위하여, 그리고 지역개발로 다시 얻기 힘든 자료가 될지 모르는 지열자료를 정리하고 분석하는 것이 필요하다. 그러므로 이 연구에서는 지금까지 조사된 남한의 지질 및 지열류량 자료와 암석의 물리화학적 특성을 이용하여 서로의 상관관계를 분석하였다. 특히 지리정보시스템(Geographic Information System; GIS)을 이용하여 체계적으로 우리나라의 지질 및 암석물성 자료를 분석하였다. 실제 남한에서의 지열류량 연구의 시작은 1969년도에 한일공동연구로서 “Columbo plan”의 일환으로 주로 광산주변에 대한 지열류량 연구가 있었으며(Mizutani *et al.*, 1970; 장정진 등, 1970), 서정희(1976)에 의해 남한의 지열광상의 특성 및 탐사에 관한 연구를 한 바 있다. 1980년대에 들어서는 한옥 등(1985)에 의한 한반도 주변의 지열류량에 대한 여러 편의 연구 논문이 발표된 바 있다. 그러나 남한에 대한 지열류량 자료가 너무 적어 전체적인 비교 연구는 거의 없었으며, 대부분 적은 지열류량 자료로 지열모델링을 통한 연구가 실시되었다(구민호 등, 1993; Lee *et al.*, 1986). 외국의 경우는 국립지질조사소 등에서 기본적으로 지열조사가 계속 진행되고 있으며, 지열류량 자료가 많아 연구가 비교적 잘 되어 있다. 이번 연구에서는 지열류량 자료가 어느 정도 확보되어 있으며, GIS를 이용하여 지열과 관련이 있는 자료를 모아 지열류량과 암상 및 시대와의 상관관계 분석을 하였다.

지구상의 열전달은 전도, 복사, 대류 중, 전도가 대부분을 차지하고 있다. 대륙지각과 암권에서의 온도 분포는 암석내의 방사성 동위원소의 붕괴에 의한 열과 지각 하부의 맨틀로부터 상승하는 열이 지표로 방출되는 열 전도에 의하여 주로 좌우되며(Turcotte and Schubert, 1982), 이러한 열은 열전달 매체를 통하거나 특정 경로를 통하여 이동한다. 이 연구의 목적은 지표에 직접적인 열의 흔적이 나타나지 않는 지역에서 지열자원의 부존 여부를 규명하기 위한 것이다. 그러므로 지구 전체를 보면 지각 내에서도 지표 부분의 지층의 물리화학적 및 구조적 특성을 파악하여 지표부근에서심부의 지열이 부존하는 곳을 탐사하는 것이 목적이다. 심부 지열을 탐사할 수 있는 가장 직접적인 방법이 바로 지열류량을 측정하는 것이다. 지열류량은 지구 내부에서의 열이 지표로 전달되는 과정에서 지층을 매체로 하여 단위 면적당 흐르는 열의 양을 말한다. 지열류량 계산은 지층의 열전도도와 심부 열이 지층을 통해 전달될 때 심도에 따른 온도차, 즉 지온경사를 측정하여 산출한다.

열의 전도는 Fourier 법칙을 따른다. 이는 열 흐름(\dot{q}_0) 즉, 한 매체의 임의의 지점에서 단위 면적 및 단

위 시간당의 열량은 그 지점에서의 지온경사와 직접적으로 비례한다는 것이며 일차원적으로 열 흐름은 다음과 같다.

$$\dot{q}_0 = -k_0 \frac{dT}{dz} \quad (\text{mWm}^{-2}) \quad (1)$$

여기서 열 흐름을 지열류량이라 할 때 지열류량(\dot{q}_0)은 한 지점에서 지층의 열전도도(k_0)가 일정할 때 지온경사 즉, 단위 심도 당 온도변화량(dT/dz)과 비례한다. 지표에서 볼 때 열의 원인은 지하 심부이므로 1차원적 접근은 타당하다. 식 (1)의 음수는 열이 온도가 낮은 방향으로 흐르기 때문이다.

이와 같은 열전도 이론을 지구 내부에서 열이 지표로 전달되는 과정에 적용하면, 심부의 열이 지층을 매체로 단위 면적당 흐르는 열량, 즉 지열류량을 구할 수 있다. 그러므로 암석의 열전도도와 시추공 내에서의 심도별 온도측정자료로 지온경사를 구하면 지열류량을 계산할 수 있다.

또한 지열류량과 지질특성과 비교 분석하기 위해서 지구조도와 수치지질도가 필요하다. 이번 연구에서는 1995년에 작성된 1:1,000,000 한국지질도(한국자원연구소, 1995)를 이용하여 남한 부분만 수치지질도를 작성하여 비교 분석 하였다.

2. 연구 방법

이 연구는 앞에서 기술한 바와 같이 지열과 관계가 깊은 지질학적 특성을 지열류량과 비교해 보고자 하였다.

면 속성을 갖는 지질도에 대해 점 속성을 갖는 지열류량 자료가 어디에 놓이는 가를 분석하기 위해 교차분석(tabulate analysis)을 실시하였다. 교차분석은 면 속성의 주제도에 점 속성의 자료를 얹어 해당되는 점 속성의 자료에 대한 면 속성의 정보를 추출하는 것이다. 분석 결과물은 행과 열로 분석할 점의 위치에 해당하는 면 속성의 유무가 표시되는 데이터베이스 파일로 출력된다. 본 연구에서는 GIS가 기본 도구로 사용되었으며, GIS 프로그램인 ArcInfo 8.1과 ArcView 3.2를 이용하여 분석하였다.

2.1. 지열류량 산출과 D/B 구축

지각에서의 지열 생성 과정은 시간과 공간에 따른 온도의 변화로 나타난다. 그러므로 가장 기초적인 지열류량 측정 방법은 지표면 근처에서의 온도측정이다. 지열류량은 지구내부로부터 지표로의 열 흐름이기 때문에 암석의 열전도도와 지온경사를 측정하면 바로 계산

된다. 이렇게 단순한 개념임에도 불구하고 지온경사와 열전도도로부터 지열류량을 유도하는 과정은 복잡하다. 과거부터 실시해온 지열류량 측정은 기기의 발달과 연구자들의 개개의 특성, 예를 들어 해양지각에서의 지열류량을 연구하는 학자, 암석의 열전도도를 주로 연구하는 학자, 시추공 공내 온도 측정을 하여 지온의 분포를 연구하는 학자 등 각자의 전문성을 가지고 연구되어 일관성이 없다는 지적이 많았다. 이에 따라 Stein (1995)은 지열류량 측정에 필요한 많은 요소들의 기준을 제안했다. Table 1와 같이 보통지역의 지열류량값은 0~125 mWm⁻² 범위에 놓이며, 지열류량이 최고로 높은 지역은 활화산 주변이다. 이와 같이 특별한 지역의 경우 지열류량은 200 mWm⁻²이내이다. 또한 모든 암석의 열전도도는 1~5 Wm⁻¹°K⁻¹범위에 속한다. 5 Wm⁻¹°K⁻¹ 이상의 열전도도로 측정되었다면 측정기기 및 측정방법에 문제가 있을 것으로 의심해 봐야 한다. 지온경사의 허용범위도 10~80°C km⁻¹이다. 80°C km⁻¹이상의 지온경사를 보이는 곳은 특별한 이유가 있을 것으로 다시 한 번 확인해야 한다. 즉, 파쇄대를 통한 지열수의 유입으로 주변의 암석 온도를 높인 결과로, 대류 작용이 있는 것으로 봐야 한다. 그러나 열전달은 전도, 복사, 대류가 있으나, 앞서서도 언급 한 바와 같이 지열류량은 전도에 의한 지열전달을 논하는 것이다. 따라서 이 연구에서도 지열류량 측정 요소 허용범위를 Table 1의 기준으로 하여 모든 자료를 선택하였다.

앞서 기술한 바와 같이 지열류량은 지온경사와 열전도도의 곱으로 계산된다. 암석의 열전도도를 측정하기 위해서 과거에는 액체의 용융점을 이용한 Schröder법 (Mizutani *et al.*, 1970)을 많이 사용했으며, 가장 정확하다고 알려진 열전도도 측정법인 “divided bar apparatus” (Haenel *et al.*, 1988)가 국제적인 표준 장치이다. 그러나 이 장치는 국내에는 없으며 기타 방법으로 측정된 자료는 이 실험장치로 측정된 결과와 엄격한 비교 분석이 요구된다. 이번 연구에 사용된 열전도도 측정 장비는 QTM(Quick Thermal conductivity Meter)으로 Box probe 법을 이용하였다. 이 장비 역

시 “divided bar apparatus”와 비교 연구가 되었던 것으로 동일 시료를 이용하여 비교 분석한 결과 재현성은 각각 ±5%, ±2%, 확실성은 함수시료인 경우 ±5%, ±4%, 건조시료에서는 ±10~20%, ±4%로 모두 “divided bar apparatus”가 우세한 것으로 분석되었으며, QTM도 비교적 정확한 편으로 평가되었다(Galson *et al.*, 1987). QTM을 이용한 측정 방법은 암석 시료를 단일 평면으로 만들고, 그 면상에 열선이 들어있는 Box probe를 밀착시켜 전류를 흘려준 후, 시간에 따른 Chromel alumel thermocouple의 출력을 읽어 열전도도를 산출하는 방법이다.

일반적으로 각종 암석의 열전도도는 Zoth and Haenel (1988)이 발표한 Fig. 1에서와 같이 편차가 매우 큰 편이다. 실제로 같은 종류의 암석이라도 열전도도의 차이가 많이 나므로 어떤 암석이 열전도도가 높고 낮은 지를 정확하게 규정하기는 어렵다.

이번 연구를 위해 남한의 지열류량 측정값으로는 총 252개 지점의 자료가 측정 및 수집되어 있다. 이것은 Mizutani *et al.* (1970), 장정진 등(1970), 그리고 서정희(1976) 등의 자료, 총 35개의 자료도 추가한 것이며, 과거에는 cgs 단위로 사용되었으나 최근에는 SI 단위를 사용하므로 SI 단위로 환산하여 재편집하였다. 1989년 이후부터 측정된 지열류량자료는 217개 자료이며(임정용 등, 1989; 임정용 등, 1996; Lim and Kim, 1997; 염병우 등, 1997), 모두 직접 측정된 것이나, 1989년 이후 보고된 지열류량 자료에 약간의 오류가 있어 이번 연구에서 수정 보완하였다. 또한 과거의 자료 35개와 1989년 이후 자료 217개의 지열류량 자료는 측정기기가 서로 달라 오차가 있을 수 있어 서로 보정을 해야 할 필요가 있으나 그 당시의 측정기기를 입수하기는 불가능하므로 발표된 자료 그대로 이용하였다. 1989년 이후의 지열류량 자료는 지온경사자료(김형찬 등, 2002)와 시추공의 코아 또는 주변의 암석 시료를 채취하여 열전도도를 측정하여 지열류량을 계산하였다. 이때 열전도도 측정은 QTM을 사용하였다. 또한 원활한 자료 처리를 위해서 총 252개의 지열류량

Table 1. Thermal property statistics in the continental areas (after Stein, 1995).

Theraml property	Symbol	Range
Heat flow	q ₀	0~125 mWm ⁻²
Vertical temperature gradient	dT/dy	10~80°Ckm ⁻¹
Thermal conductivity of continental sediments	K ₀	1.0~5.0 Wm ⁻¹ °K ⁻¹
Heat generation	H	0~8×10 ⁻⁶ Wm ⁻³
Specific heat	C	0.85~1.25 kJkg ⁻¹ °C ⁻¹
Density of crustal rocks and lithosphere	ρ	2,200~3,400 kgm ⁻³

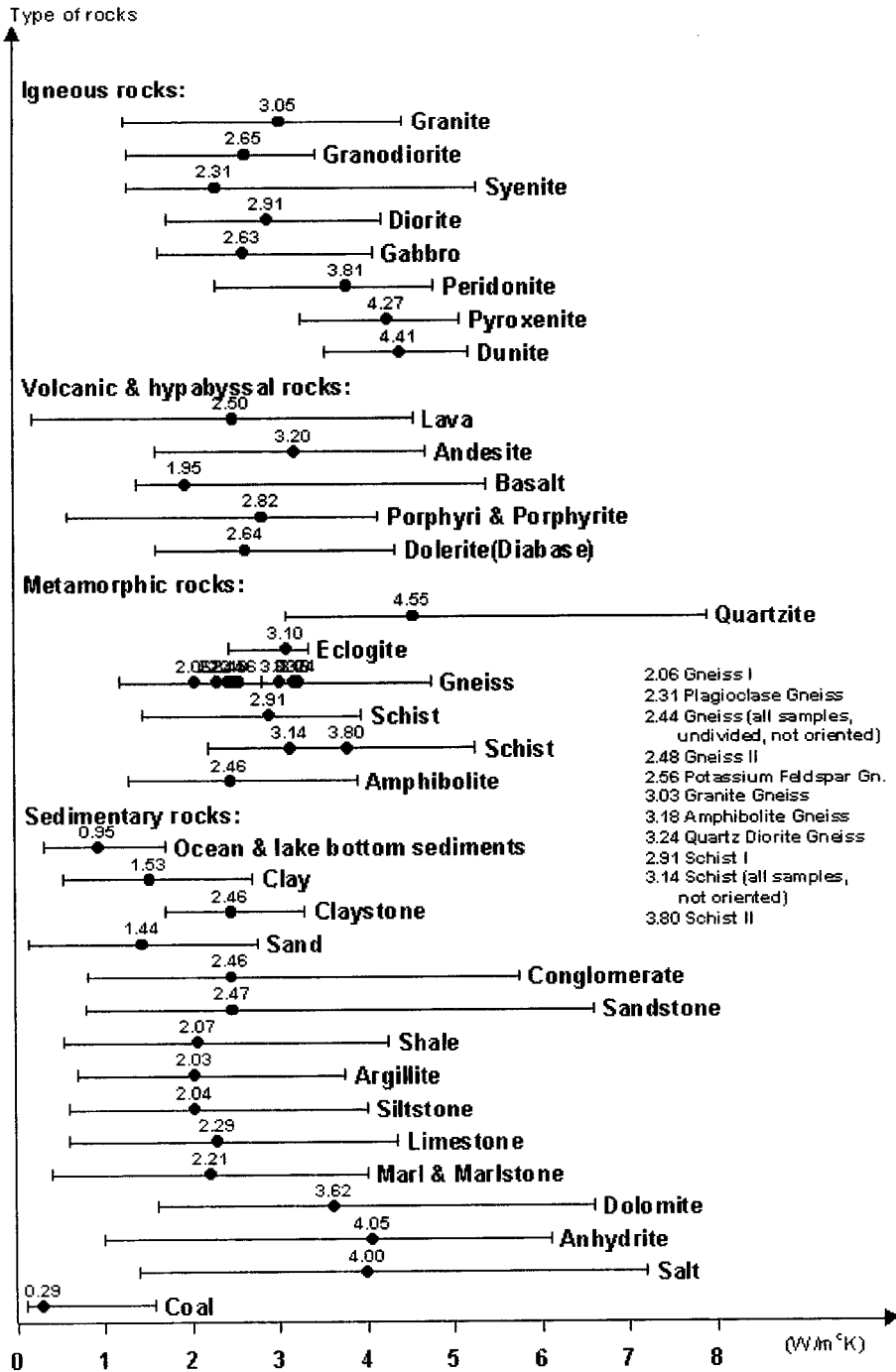


Fig. 1. Thermal conductivity of different rocks at room temperature according to Cermak and Rybach, Kappelmeyer and Haenel (Zoth and Haenel, 1988).

자료중에서 대륙붕 4개와 제주도 자료 1개를 제외한 총 247개의 지열류량 자료를 이용하였다.

지열류량 데이터베이스 구축은 각 자료의 일련번호,

고유번호(Sn), 위경도 좌표(longitude, latitude), 암석의 열전도도(thermal conductivity), 지온경사(thermal gradient), 지열류량(heat flow), 자료의 출처(reference)

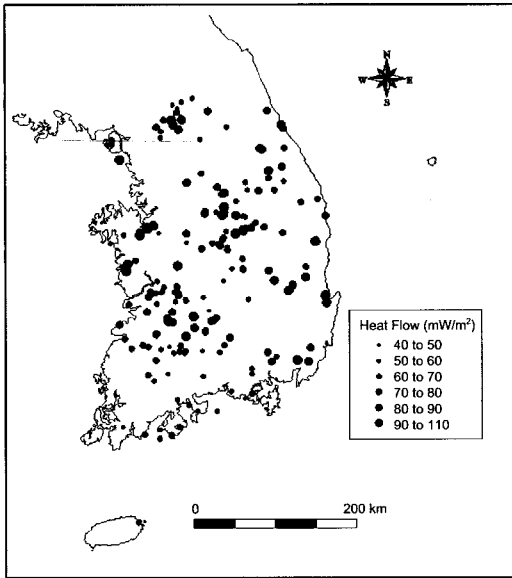


Fig. 2. Location map of heat flow measurements in South Korea.

등으로 구성되어 있다. 지열류량 자료 공간 데이터베이스는 점 속성을 가지며, 자료형태는 shape 파일 형태로 작성하였다. 지열류량의 측정 위치는 Fig. 2와 같다.

2.2. 수치지질도 작성

이 연구를 위하여 한반도 전체 대한 1:1,000,000 지질도(한국자원연구소, 1995)에서 자료처리를 위해, 남한에 관한 부분만 지질도를 재편집하였다. 남한의 1:1,000,000 수치지질도는 Fig. 3과 같다.

이 수치지질도는 ArcInfo8.1과 ArcView 3.2 소프트웨어를 이용하여 작성하였으며, 여기에는 면 속성에 위치, 지질시대, 암상구분, 암종기호가 포함되어 있다. 앞으로 1:250,000 지질도 또는 1:50,000 지질도 등 정밀한 지질도가 이용되면 보다 정밀한 분석이 가능할 것이다.

2.3. 지열류량과 수치지질도 교차분석(tabulate analysis)

GIS가 일반 DBMS(data base management system)

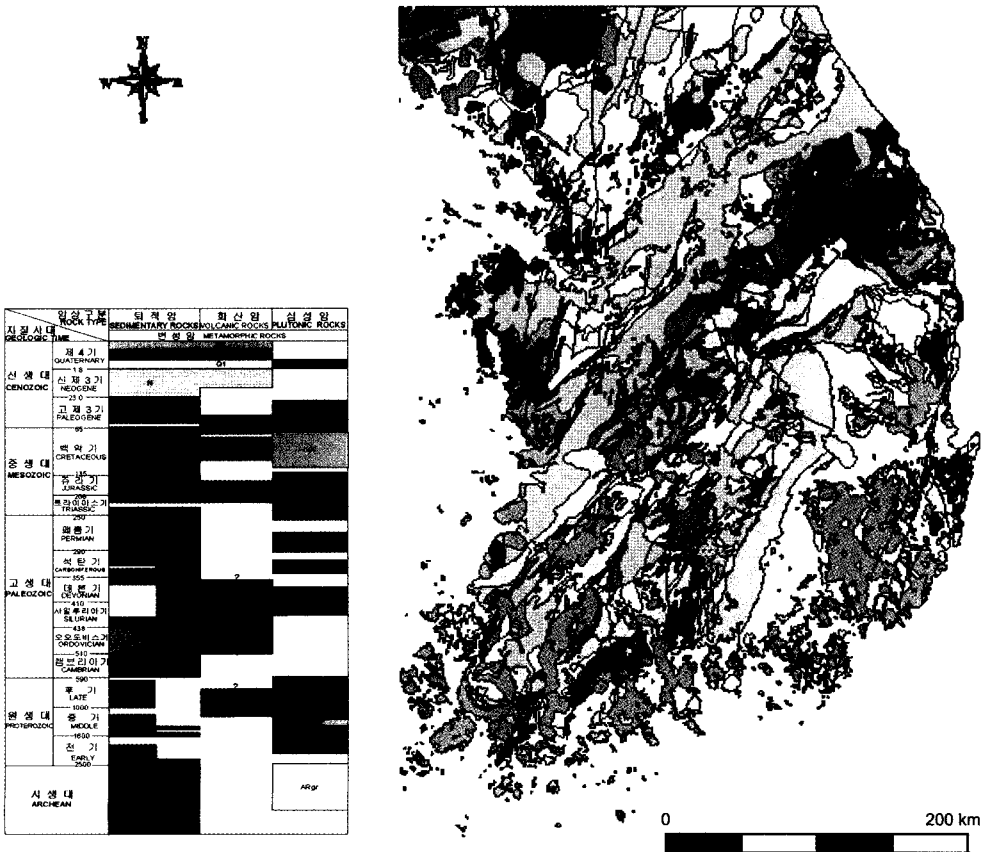


Fig. 3. Digital geologic map of South Korea made by ArcInfo Software using polygon property (KIGAM, 1995).

와 다른 점은 위치자료를 처리한다는 것이다. 그 중에서도 어느 대상과 접하고 있는 대상들의 검색, 일정한 거리 내에 있는 대상의 검색 등이 위치자료에 의해서 수행될 수 있다. 이와 같이 위치로 접해 있는 대상을 검색하는 기능이 근린분석(neighborhood analysis)이며, 이중 일정한 거리 내에 있는 지역을 표시하는 것을 일반적으로 버퍼링 분석(buffering analysis)이라 한다. 이러한 버퍼링 분석은 점이나 선 속성을 갖는 주제도(thematic map)에 대해 일정거리내의 영역을 표시하기 위한 것으로 새로운 주제도를 생성한다. 새로 만들어진 주제도는 점 및 선 속성을 일정거리를 반경으로 하는 면 속성을 갖도록 만들어지며, 일정거리 이상은 공백으로 표시된다.

이번 연구에서 이용된 자료는 Fig. 2와 같이 점 속성을 갖는 지열류량 자료, Fig. 3과 같은 면 속성을 갖는 지질도 자료이다. 분석 대상은 지열류량 자료이므로 점 속성을 유지해야 하며, 비교 대상은 면 속성을 가져야만 점 속성 자료가 없어져 분석이 가능하다. 이렇게 만들어진 면 속성을 갖는 주제도들에 대해 점 속성을 갖는 지열류량 자료가 어디에 놓이는가를 분석하기 위해서는 교차 분석 또는 평면 분석(tabulate analysis)이 필요하다. 교차 분석은 면 속성의 주제도에 점 속성의 자료를 얹어 해당되는 점 속성의 자료에 대한 면 속성의 정보를 추출하는 것이다. 분석 결과물은 열(row)과 오(column)로 분석할 점의 위치에 해당하는 면 속성의 유무가 표시되는 데이터베이스 파일로 출력된다. 이러한 결과물을 통계 처리하여 각각의 면 속성별 점 자료의 특징뿐만 아니라 반대로 점 속성별 면 속성의 특징을 분석할 수 있다. 이러한 분석은 수작업으로도 가능하나 방대한 자료의 경우 시간적으로나 정확도에 있어서 상당히 큰 효과를 얻을 수 있다. 최근에는 인터넷을 통한 다양한 정보를 실시간으로 전달 및 수집할 수 있는 인터넷 GIS까지 개발되어 네트워크가 연결되어 있는 곳이면 어디서든지 이용할 수 있도록 되어 있다.

이번 연구에서는 GIS 도구 중 하나인 ArcView 3.2를 이용하여 분석하였다. 이 프로그램들은 여러 가지 프로그램과 호환성이 좋으며, 분석 기능이 다양하고, 그래픽이나 결과 파일이 엑셀 파일이나 텍스트 파일로 편집할 수 있기 때문이다.

3. 연구 결과

Fig. 2에서보면 우리나라의 지열류량 이상대는 아산만 주변, 보령, 유성, 진안, 울진, 포항, 부산 지역과 포천, 속초, 충주, 수안보 등 지역에서 나타난다. 이러

한 이상대 주변에는 대개 온천이 발달되어 있었거나 새로 개발되어 있는 곳이다. Fig. 2에 이용된 자료 중 온천자료는 제외하였으나 전형적인 지온경사를 보이는 경우는 자료를 이용하였다. 일부 지역에는 자료가 없어 앞으로 좀더 많은 자료 수집으로 보완해야 할 것이다. 전반적인 남한의 평균 지열류량 값은 $64 \pm 14 \text{ mWm}^{-2}$ 로 계산되었다. 이 값은 전 세계 대륙 내부에서의 10,337개의 자료의 지열류량 평균값 65 mWm^{-2} (Pollack *et al.*, 1993)과 거의 비슷한 값이다.

이번 연구 결과 Table 2에서 알 수 있듯이, 남한의 지열류량값은 최소 54 mWm^{-2} , 최대값은 91 mWm^{-2} 이며, 각각 암상별로 차이를 나타낸다. 가장 높은 지열류량 값(91 mWm^{-2})을 보이는 곳은 신생대 퇴적암인 제3기 연일층군이 분포하는 지역으로 상부에 셰일, 사암, 미고결된 이암층과 하부에 역암층이 나타나는 지역이다. 특히 연일층군 하부는 백악기에 관한 불국사 화강암류와 부정합으로 분포하는 장기층군의 조면암 및 조면암질 응회암이 분포한다(염상호 등, 1964). 이 지역의 자료수가 2개뿐이기 때문에 신뢰도는 떨어지나 이에 대한 부연 설명은 지질시대별 지열류량과의 상관관계에서 논하였다. 그 다음은 중생대의 트라이아스기~쥬라기의 남포층군(대동층군)과 회동리층군의 퇴적암층에서 높은 지열류량(87 mWm^{-2})을 보인다. 중생대 백악기 퇴적암층인 신동층군, 하양층군, 진안층군에서는 $75 \sim 77 \text{ mWm}^{-2}$ 로 비교적 높은 지열류량을 보인다. 반면에 원생대 변성퇴적암층인 서산층군에서 50 mWm^{-2} , 고생대 말기인 페름기 또는 트라이아스기~쥬라기 초기에 관한 엽리상 화강암류(foliated granites) 분포지역에서 54 mWm^{-2} 로 가장 낮은 지열류량을 보였다. 이 결과에 따르면 퇴적암류 분포지역이 화성암이나 변성 퇴적암류 분포지역보다 상대적으로 더 높은 지열류량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 암상을 퇴적암류, 화산성 퇴적암류, 화산암류, 심성암류 및 변성암류로 구분하여 각각의 지열류량을 분석해 보았다. 그러나 순수한 화산암류 분포지역의 지열류량 자료는 없었으므로 화산암류와 관계된 지질은 화산쇄설성 퇴적암류로 분류하였다. Fig. 4에서와 같이 퇴적암류가 분포하는 지역에서 74 mWm^{-2} 로 가장 높은 지열류량을 나타내며, 퇴적암류 및 화산암류가 분포하는 지역이 62 mWm^{-2} , 심성암류 분포지역에서 63 mWm^{-2} 으로 변성암류 분포지역이 61 mWm^{-2} 로 나타났다. 화산암류 분포지역을 제외하더라도 상성적으로 심성암류 분포지역이 높은 지열류량을 보일 것으로 예상하였으나 퇴적암류가 분포하는 지역의 지열류량이 높

Table 2. Average heat flow values with respect to geologic settings.

No.	Geologic symbol	No. of data	\bar{q}_0 (mWm^{-2})	S.D.	Geologic settings	Rock type	Stratigraphic Units
1	Q3	-	-	-	Cenozoic	Sed./Vol.	Pumice, Marine Sediments
2	Q2	-	-	-	Cenozoic	Volcanic	Basalt, Volcanic rocks, Trachytes
3	Q1	-	-	-	Cenozoic	Volcanic	Basalt, Trachytes
4	N	2	91	10	Cenozoic	Sedimentary	Yeonil Gp.
5	P(T)	-	-	-	Cenozoic	Sed./Vol.	Janggi Gp.
6	Pgr	-	-	-	Cenozoic	Plutonic	Namsan Granite
7	K3	23	62	14	Mesozoic	Sed./Vol.	Yucheon Gp.
8	K2	17	75	11	Mesozoic	Sedimentary	Hayang Gp., Neungju Gp., Jinan Gp.
9	K1	1	77	-	Mesozoic	Sedimentary	Sindong Gp.
10	K0	-	-	-	Mesozoic	Sedimentary	Myogog Fm.
11	Kgr	18	64	8	Mesozoic	Plutonic	Bulgusa granite
12	Jgr	101	64	14	Mesozoic	Plutonic	Daebo Granite
13	Jgr1	10	60	5	Mesozoic	Plutonic	Foliated Granite
14	J1	4	87	20	Mesozoic	Sedimentary	Daedong Gp.
15	Tgr	6	54	9	Mesozoic	Plutonic	Hesan Comp.
16	P-T	2	67	3	Paleozoic	Sedimentary	Pyeongang Gp.
17	C	3	67	7	Paleozoic	Sedimentary	Pyeongang Gp.
18	D	1	59	-	Paleozoic	Sedimentary	Rimjin Gp.
19	S	1	87	-	Paleozoic	Sedimentary	Hoedongri Fm.
20	O	3	65	14	Paleozoic	Sedimentary	Great Limestone Gp.
21	E	4	63	9	Paleozoic	Sedimentary	Yangdug Gp.
22	PALv	-	-	-	Paleozoic	Volcanic	Paleozoic Basic Volcanic Rocks
23	Og3	1	60	-	Paleozoic	Metamorphic	Ogcheon Gp.
24	Og2	8	62	18	Paleozoic	Metamorphic	Ogcheon Gp.
25	Og1	4	68	23	Paleozoic	Metamorphic	Ogcheon Gp.
26	PR3	-	-	-	Proterozoic	Metamorphic	Taen Fm.
27	PR2	-	-	-	Proterozoic	Metamorphic	Yeoncheon Gp., Jangrag-Euiam Gp.
28	PR1	2	50	2	Proterozoic	Metamorphic	Seosan Gp., Yuli Gp.
29	PRgr	1	65	-	Proterozoic	Plutonic	Buncheon Granite, Hongjesa Granite, Sancheong Anorthosite(PRan), Seosan granitic gn.
30	AR3	5	62	12	Archean	Metamorphic	Porphyroblastic Gneiss
31	AR2	5	61	12	Archean	Metamorphic	Granitic Gneiss
32	AR1	25	60	15	Archean	Metamorphic	Gneiss, Migmatitic Gneiss

게 나타났다. 이러한 이유는 퇴적암류가 지하 심부로부터 상승하는 지열 및 화성활동으로 인한 잔류열을 보존하는 덮개암(cap rock) 역할을 하고 있기 때문이며, 반면에 심성암류 분포지역은 지표에 노출되어 자체 내에 가지고 있던 열이 직접 방출되는 것으로 생각된다. 변성암 분포지역은 대체로 오래된 암석으로 신생대, 원생대 및 고생대에 생성된 것이기 때문으로 판단된다.

한편 Table 3에서와 같이 외국의 경우 신생대 화성암류에서 $97 mWm^{-2}$ 의 높은 지열류량 값을 보인다. 남한에서는 과거에 중생대 백악기 화강암으로 알려졌던 포항 주변에 분포하는 흑운모화강암이 최근 동위원소에 의한 암석 절대연령 측정 결과 39.7~59.5 Ma로 에오세 전기~중기의 화강암으로 알려져 이 지역은 높은 지열

류량 값을 보일 것으로 예상되며, 실제 북서부 신광지역의 3개의 시추공 온도검층결과 공저온도가 각각 $32.5^{\circ}C$ (160 m 심도), $33.6^{\circ}C$ (256 m 심도), $36.2^{\circ}C$ (376 m 심도)로 지온경사를 계산할 때 $47\sim97.5^{\circ}C km^{-1}$ 로 상당히 높은 값을 보인다(김형찬 등, 1992). 이 지역의 암석 열전도도자료가 없어 지열류량 산출이 불가하였으나 일반적으로 화강암의 열전도율을 고려하면 $90 mWm^{-2}$ 이상의 지열류량을 보일 것으로 예측된다. 즉, 이번 연구에서 신생대 화강암류 분포지역의 지열류량 값이 포함되지 않아 위와 같은 결과가 나타났을 수 있으며 앞으로 이 지역에 대한 중점적인 연구가 필요하다.

지층의 시대별 차이에 따라 지열류량의 상관관계를 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서와 같이 가장

Rock type	Heat Flow (mWm ⁻²)	Number of data	Standard deviation
Sedimentary	74	38	14
Sedimentary/Volcanic	62	23	14
Plutonic	63	135	12
Metamorphic	61	51	15

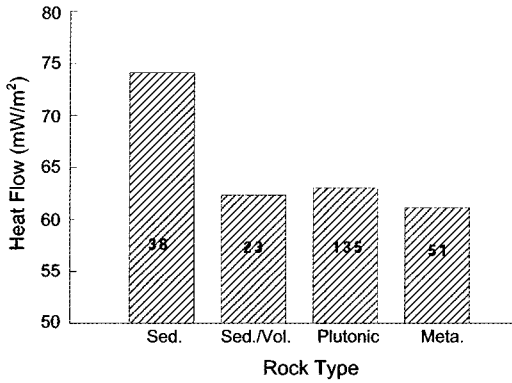


Fig. 4. Result of average heat flow values of rock types.

Geologic settings	Heat Flow (mWm ⁻²)	Number of data	Standard deviation
Archean	61	35	14
Proterozoic	55	3	8
Paleozoic	65	27	14
Mesozoic	65	180	14
Cenozoic	91	2	10

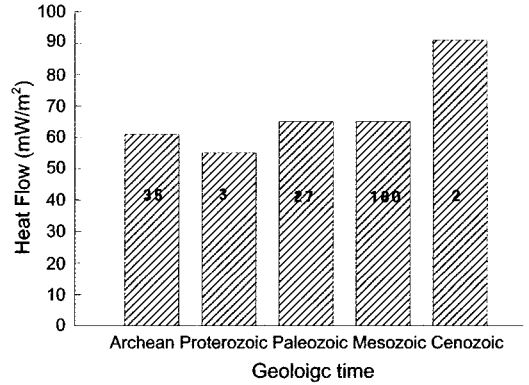


Fig. 5. Average value heat flow values with geologic settings.

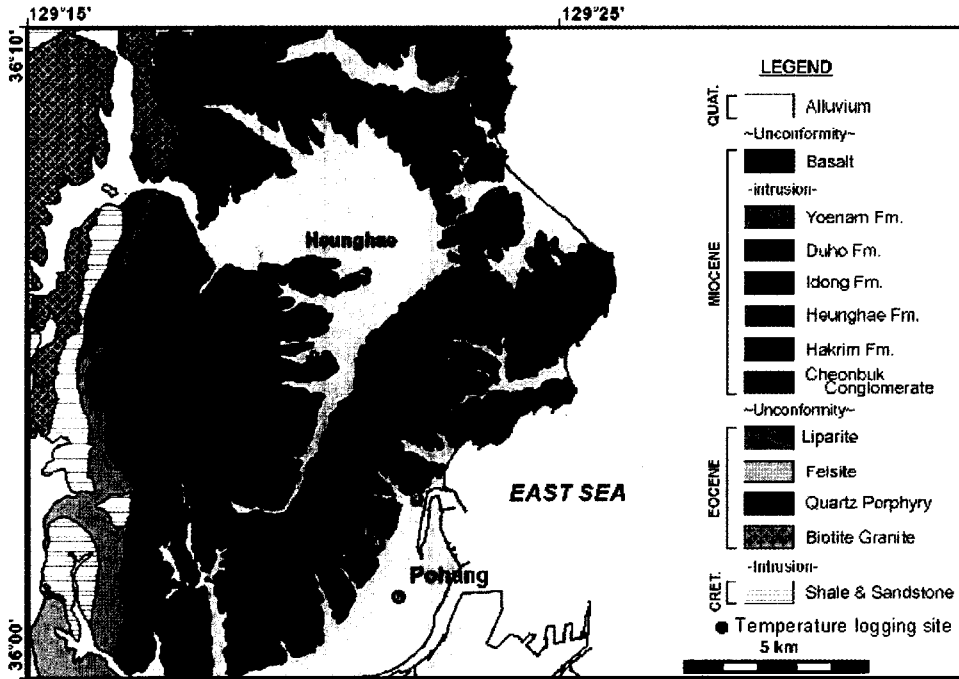


Fig. 6. Map of the temperature logging sites in the Cenozoic area.

고기인 사생대에서 원생대, 고생대, 중생대, 신생대의 지열류량 평균값은 각각 61, 55, 65, 65, 91 mWm⁻²로 나타났다. 원생대의 자료수가 3개밖에 안되므로 신뢰도는 떨어지며, 신생대의 경우는 지열류량 자료수가

2개이나 Fig. 6 및 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 포항 주변의 신생대 지층에 굴착된 시추공 11개의 온도검층 결과를 보면 지온경사가 40~60°C km⁻¹으로 상당히 높은 편이고 이 지역 2개의 지열류량 자료의 암

석 열전도도는 각각 $1.99, 2.7 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 로 측정되었는데 일반적으로 암석의 열전도도가 최소 $2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 내외이므로 지열류량도 80 mWm^{-2} 이상으로 계산될 것으로 예상된다. 그러므로 신생대 퇴적암 지역의 자료가 비록 2개밖에 되지 않지만 지열류량 91 mWm^{-2} 은 이 지역의 지열류량 값을 대표하고 있는 것으로 판단했다. 또한 Han and Chapman(1985)은 우리나라의 지열류량 자료 26개를 이용하여 한반도의 지열류량 특성을 발표한 바 있는데 선캄브리아기 지질분포지역의 평균 지열류량값이 54 mWm^{-2} , 중생대 지질분포지역은

68 mWm^{-2} 로 나타났다. 이들 자료와 이 연구의 결과와 비교하면 선캄브리아기인 시생대 지역에서 61 mWm^{-2} 로 높게 계산되었으며, 중생대지역에서 65 mWm^{-2} 로 약간 낮게 계산되었다. 이는 자료수의 증가로 차이가 있으나 전반으로 비슷한 경향을 나타낸다.

4. 결 론

남한의 제주도과 해양의 지열류량 자료를 제외한 총 247개의 지열류량 자료와 지질 및 지질시대에 대한 상관관계를 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 지질의 특성에서는 암석의 종류별 비교에서 퇴적암 분포지역에서 74 mWm^{-2} 로 가장 높은 지열류량을 보였으며, 변성암 분포지역에서 낮은 61 mWm^{-2} 의 지열류량을 보였다. 화산퇴적암류나 심성암류 분포지역에서는 각각 $62, 63 \text{ mWm}^{-2}$ 의 지열류량을 보였다. 화산성 지열이 없는 남한에서의 지열 특징은 중생대 화성암류의 방사성원소 붕괴 열에 의한 지열 또는 화성활동에 의한 잔류열이 퇴적암류에 덮혀 열이 보존되어 있기 때문으로 볼 수 있다.

2. 지질시대별 지층과 지열류량간의 상관관계는 가장 신기에 속하는 신생대 지층이 분포하는 지역에서 가장 높은 91 mWm^{-2} 의 지열류량값을 보였다. 그 다음 중생대, 고생대 지층이 분포하는 지역으로 65 mWm^{-2} 이며, 고기인 원생대, 시생대 지층이 분포하는 지역이 각각 $55, 61 \text{ mWm}^{-2}$ 로 가장 낮은 지열류량을 보였다.

Pollack *et al.*(1993)이 세계의 지열류량의 특성을 지질시대와 암종별로 분류하여 제시한 바가 있어 Table 3과 같이 남한의 지열류량 자료와 비교해 보았다. 세계의 지열류량 자료를 보면 전반적으로 지질시대가 젊을 수록 대체로 높은 지열류량을 보이고 있으며 퇴적암류

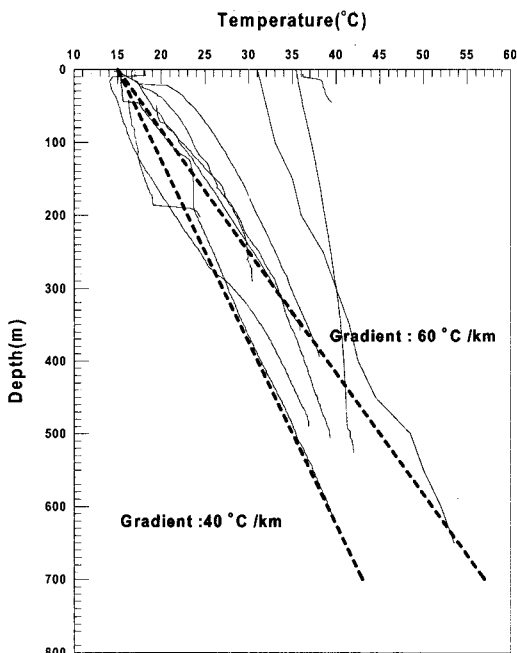


Fig. 7. Temperature-depth profile of 11 boreholes in the Cenozoic area.

Table 3. Global average heat flow values (after Pollak *et al.*, 1993) and South Korea data according to geologic settings.

Geologic time and Rock type	Global data		South Korea data		
	Average heat flow (mWm^{-2})	Number of Data	Average heat flow (mWm^{-2})	S.D.	Number of Data
Subaqueous continental undifferentiated (lakes, continental shelf and slope)	77.7 ± 53.6	295			
Cenozoic sedimentary and metamorphic	63.9 ± 27.5	2912	91	10	2
Cenozoic igneous	97.0 ± 66.9	3705			
Mesozoic sedimentary and metamorphic	63.7 ± 28.2	1359	70	16	45
Mesozoic igneous	64.2 ± 28.8	1591	63	12	135
Paleozoic sedimentary and metamorphic	61.0 ± 30.2	403	65	14	27
Paleozoic igneous	57.5 ± 20.5	1810			
Proterozoic	58.3 ± 23.6	260	55	8	3
Archean	51.5 ± 25.6	963	61	14	35

나 변성암류 보다는 화성암류가 높은 지열류를 나타내고 있다. 그러나 남한의 자료를 보면 지질시대별 지열류량은 세계의 지열류량과 비슷하게 보이고 있으나, 암상과 비교해 볼 때 세계의 지열류량 자료는 신생대 화성암류에서 높게 나오며, 반면에 남한은 화성암류 분포지역보다는 퇴적암류 분포지역에서 높게 나타나고 있다. 이는 앞서 서술한 바와 같이 노출된 화성암류보다 퇴적암류에 의해 덮혀있는 지역이 하부의 화성암류의 방사성원소 붕괴 열 또는 화성활동에 의한 잔류열을 잘 보존하고 있기 때문이다. 또한 남한에 분포하는 신생대 화강암류 분포지역에 대한 자료가 포함되지 않아 문제가 있다. 앞으로 1 : 1,000,000 지질도의 수정이 필요하며, 또한 포항 주변에 분포하는 신생대 화강암류 지역에 대한 지열류량 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 지열자원 부존 특성 규명 및 활용기반기술 연구 사업의 지원으로 수행되었으며 참여 연구원들에게 감사를 드린다. 특히 이 논문에 특별히 관심을 가지고 상세하고 꼼꼼한 지적과 조언을 해주신 한옥 교수님께 깊이 감사드린다.

참고문헌

- Galson, D.A., Wilson, N.P., Scharli, U. and Rybach, L. (1987) A comparison of the divided-bar and QTM methods of measuring thermal conductivity. *Geothermics*, v. 16, p. 215-226.
- Han, W. and Chapman, D. S.(1985) 한국 주변 지역의 지열류량과 환산지열류량에 관하여. *대한지질학회지*, 21권, p. 74-78.
- Haenel, R., Rybach, L. and Stegena, L.(1988) *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*. Kluwer Academic Publishers, p. 87-124.
- Lee, K.K., Han, U. and Lee, K. (1986) A study on the thermal structure of the kyeongsan basin. *Journal of the geological society of Korea*, v. 22, p. 371-379.
- Lim, J.U. and Kim, H.C. (1997) Heat flow in South Korea. *CCOP Technical Bulletin*, v. 26, p. 85-91.
- Mizutani, H., Baba, K., Kobayashi, N., Chang, C.C., Lee, C.H. and Kong, Y.S.(1970) Heat flow in Korea. *Tectonophysics*, v. 10, p. 183-203.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J. and Johnson, J.R.(1993) Heat loss from the earth's interior: analysis of the global dataset. *Rev. Geophys.*, v. 31, p. 267-280.
- Stein, C.A.(1995) Heat flow of the earth, *Global earth physics, A handbook of physical constants*. AGU reference shelf 1, p. 144-158.
- Turcotte, D.L. and Schubert, G.(1982) *Geodynamics - Applications of continuum physics to geological problems*. John Wiley & Sons, New York, 450p.
- Zoth, G. and Haenel, R.(1988) Thermal conductivity, *Handbook of terrestrial heat-flow density determination with guideline and recommendations of the international heat flow commission*. KLUWER Academic Pub., p. 449-466.
- 구민호, 한옥, 권병두(1993) 공주분지 주변지역의 지열상태에 관한 연구. *한국지구과학회지*, 14권, p. 58-66.
- 김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동(1995) 경상북도 경주갑포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr 연대. *지구과학회지*, 16권, p. 272-279.
- 김형찬, 이사로, 송무영 (2002) 남한지역의 암상 및 지질시대별 지온경사를 관계 분석. *자원환경지질*, 25권, p. 163-170.
- 김형찬, 임정웅, 강필중(1992) 영일 신광지구 온천종합조사보고서. *한국자원연구소*, 92-5(No. 87), 159p.
- 서정희 (1976) 지열광상의 특성 및 탐사. *대한광산학회지*, 13권, p. 102-109.
- 송무영, 김형찬, 전의선(1993) 국내 일부석재의 열전달 특성 연구. *한국지구과학회지*, 17권, p. 458-464.
- 엄상호, 이동우, 박봉순(1964) 한국지질도 1 : 50,000 포항 지질도폭설명서. *상공부 국립지질조사소*, 21p.
- 염병우, 김형찬, 임정웅, 배두중, 이승구(1997) 지열자원조사연구. *한국자원연구소*, 연구보고서 KR-97-(C)-4, 59p.
- 임정웅, 김형찬, 염병우(1989) 한반도의 지열류량 분포도 작성연구, *과학기술처*, KR-89-(B)-12, 61p.
- 임정웅, 이승구, 염병우, 김형찬(1996) 지열자원조사연구. *한국자원연구소*. 연구보고서 KR-96-(C)-17, 82p.
- 장정진(1970) 한국의 지열류량. *지질광상*, 10권, 국립지질광물연구소, p. 23-29.
- 한국자원연구소(1995) 한국지질도 (1 : 1,000,000).

2004년 1월 28일 원고접수, 2004년 8월 9일 게재승인.