

한국의 지열 연구와 개발

송윤호* · 김형찬 · 이상규

한국지질자원연구원 지하수지열연구부

Geothermal Research and Development in Korea

Yoonho Song*, Hyoung Chan Kim and Sang-Kyu Lee

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

This paper summarizes the history of geothermal research in Korea since 1920s and also describes the present status of research on heat flow, origin of thermal waters and geothermal exploitation and utilization. Geothermal research in Korea has been mainly related with hot spring investigation until 1970s. It was not until 1980s before heat flow study became continuous by research institute and academia and first nation-scale geothermal gradient map and heat flow map were published in 1996. Also in 1990s, geochemical isotope analysis of Korean hot spring waters and measurements of heat production rate of some granite bodies were made. Attempts to develop and utilize the deep geothermal water has been tried from early 1990s but field scale exploitations for geothermal water was activated in 2000s. Considering recent increase of demands on both deep and shallow geothermal energy utilization, outlook on future geothermal research and development is encouraging.

Key words : geothermal, geothermal energy resources, heat flow, geothermal gradient, heat production rate

1920년대의 온천조사에서부터 현재에 이르기까지 우리나라 지열연구의 역사를 간략히 요약하고, 우리나라의 지열류량 연구 결과 및 추세, 지열의 근원 연구, 그리고 지열에너지 개발 및 활용분야에 대한 연구활동을 정리하였다. 우리나라에서의 지열연구는 1970년대까지 주로 온천조사와 관련되어 있다. 1980년대에 들어서 연구소와 학계에서 온천조사 뿐만 아니라, 지열류량에 대한 연구도 많이 수행하게 되었으며 1996년도에는 우리나라 전국적인 지온경사 분포도와 지열류량 분포도를 발간하게 되었다. 또한 우리나라 온천수에 대한 지화학적 동위원소 분석과 화강암 지대의 열생산을 측정도 1990년대에 주로 이루어졌다. 지열개발과 활용에 대한 시도는 1990년대 초반부터 시도되었으나 실제 개발을 위한 시추로 이어지게 된 것은 2000년대에 들어서야 가능해졌다. 최근의 활발한 심부 지열수 자원 개발이나 천부 지중열을 활용한 냉난방 수요의 증가 등 주변여건이 호전됨에 따라 우리나라 지열연구개발의 전망은 밝다고 판단된다.

주요어 : 지열, 지열에너지자원, 지열류량, 지온증가율, 열생산물

1. 서 론

땅이 가지고 있는 열 즉, 지열을 에너지로서 활용하고자 하는 시도는 인류 역사에서 수천 년 동안 이어져왔다. 지열에너지자원의 경제적인 활용의 시초는 아무래도 고대 로마시대의 온천에서 찾을 수 있는데, 삼국사기, 삼국유사, 동사강목 등의 많은 우리나라의 고문

헌에서도 삼국시대 초기부터 온천이 사용된 기록을 찾을 수 있다(내무부, 1983, p. 547). 이렇듯이 지열을 에너지로 활용한 역사가 장구함에 비해 지열에 대한 과학적인 연구는 서양에서도 18세기에 들어서야 가능했는데, 최초의 기록으로는 1740년에 프랑스의 광산에서 지하의 온도를 측정된 것이라고 하며(Dickson and Fanelli, 2003), 우리나라에서의 과학적인 연구의 시작은

*Corresponding author: song@kigam.re.kr

일제강점기인 1924년으로 거슬러 올라간다.

지열에너지란 지구가 가지고 있는 열에너지를 총칭 하나 요즘은 인간에 의해 발견되고 개발된, 또는 개발될 수 있는 지구의 열을 지칭하는 의미로 자주 쓰인다. 지열의 근원은 지각과 맨틀을 구성하고 있는 물질 내부의 방사성 동위원소 즉, 우라늄(U^{238} , U^{235}), 토륨(Th^{232})과 칼륨(K^{40})의 붕괴에 의한 것이 약 83%, 맨틀 및 그 하부 열의 방출 즉, 지구가 서서히 식어가는 과정에 의한 원인이 약 17%로 알려져 있으며, 지표에서 느껴지는 지열의 약 40%가 지각에 의한 것으로 추정되고 있다(Beardsmore and Cull, 2001). 물론 지표면은 기온 변화에 따라 가열과 냉각을 반복하지만, 지하 매질의 무한한 열저장 능력에 의해 지하 20 m 깊이가 이하는 이러한 일변화 또는 계절변화에 영향을 받지 않고 일정하다.

현재의 시추기술로 개발 가능한, 대륙 지각 심도 3 km 까지의 에너지 저장량은 인류가 100,000년 이상 사용할 수 있는 양이라고 하지만, 지열자원의 지역적인 편재성 및 기술의 제한으로 인하여 현재 사용되고 있는 지열에너지자원의 양은 전 세계적으로 아주 미미한 편이다(송윤호와 안은영, 2005). 특히 이중에서도 상당량이 지열발전에 의해 공급되고 있으므로 우리나라와 같이 화산활동이 없어 고온의 지열수 또는 증기의 부존을 기대할 수 없는 지역에서 지열에너지에 대한 인식은 아직까지 매우 부족한 편이다.

이러한 연유로 우리나라에서의 지열연구는 지열개발이 활발한 국가에 비해 상대적으로 매우 부족한 편이다. 그러나 온천자원의 효과적인 활용과 더 나아가 지열에너지로서의 개발 및 활용을 위한 연구가 꾸준히 진행되어왔으며, 2000년대에 들어서는 본격적으로 심부 지열수를 개발하여 지역난방에 활용하기 위한 개발 사업을 착수하기에 이르렀다. 또한 최근에는 천부 지층열을 활용한 지열 냉난방 기술의 보급이 매우 활발하게 이루어져 지열자원 활용의 분야를 넓혀가고 있으며 이에 대한 지질과학적인 연구도 본격적으로 시작되고 있어 우리나라 지열연구의 전망은 밝다고 하겠다.

이 논문에서는 우리나라 지열연구의 역사를 살펴보고, 현재까지 축적되어온 지열류량 연구 결과를 소개한다. 또한 우리나라 지열부존 특성에 대한 연구를 정리해보고 최근에 활발히 추진되고 있는 지열에너지자원 개발 및 활용 사업과 연구동향을 정리하였으며 앞으로 기대되는 연구방향을 전망해본다.

2. 우리나라 지열연구의 역사 요약

우리나라 지열연구의 시초는 역시 온천 조사로부터 시작된다. 우리나라 온천에 대한 과학적인 조사연구는 일제 강점기에 조선총독부 지질조사소에 의해 처음으로 시작되었는데, 이장에서는 각 시기별로 주요한 지열연구 역사를 간략히 정리한다.

2.1. 일제강점기

1924년에 조선총독부 지질조사소 소속 일본인 駒田 亥久雄이 동래온천에 대해 처음으로 온천조사를 수행하고 그 결과를 1924년에 조선지질조사요보 제2권으로 발간하였다. 그는 1924년에서부터 1926년까지 한반도의 대표적인 온천(해운대, 유성, 온양, 신천, 안악, 용강, 온정리, 주을, 하주을, 평산)을 거의 모두 조사하였고 특히 동래온천에 대해서는 많은 지점에서 시추탐사를 실시하여 등온도선도를 제작하였으며 조사 개시 이후 3년에 걸쳐 온도와 용출량에 대한 변동을 면밀히 관측하였다(立岩 巖, 1976). 이어 조선총독부 지질조사소에서는 1928년에 온양온천과 수안보온천, 마산온천을 조사하여 조선지질조사요보 제8권 1호로 발행하였으며, 1929년에는 금강산 유점사 온천을 조사하고 그 결과를 조선지질조사요보 제8권 제3호에 수록하였다.

온천에 대한 물리탐사는 1937년 조선총독부 광무국의 지질학자 神田四男이 평안북도 소천군 래온온천에서 전기비저항법을 실시한 이래 1943년에는 동래온천과 황해도 백천온천에서, 1944년에는 수안보온천과 함경북도의 하주온천에서 近藤忠三이 자연전위법으로 탐사했다는 기록이 동인지질광산지 제1권에 남아 있다.

2.2. 광복 이후 1970년대까지

불행히도 1945년부터 1960년까지의 지열조사연구 기록은 확인되지 않는다.

1960년에는 광복 이후 처음으로 충남 덕산온천에 대한 지열조사보고서가 발간되었는데 이는 중앙지질광물연구소가 1959년에 덕산온천에서 지질조사와 4개 공에 대한 현지에서의 온천수 시험(용출량, 토출온도), 그리고 1개 공에서 채취한 온천수의 연구실내 분석(pH, 비중, 고형물총량, KCl, NaCl, $Al_2(SO_4)_3$, Na_2SO_4 , $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, $Fe(HCO_3)_2$, $CaCl_2$, $CaSO_4$, $NaHCO_3$, Na_2CO_3 , H_2SiO_3) 등을 수행하고 교통부의 충청남도 중서부 일대 국립관광지 건설계획에 필요한 기초자료를 제공한 것이었다(이대성과 윤상규, 1960).

이후 1975년까지 국립지질조사소(현 한국지질자원연

구원의 전신)의 주도로 이천, 마금산, 덕산, 온양 척산, 유성, 도고, 오색, 백암온천 및 강화도 온수리 등에서 지질조사, 지화학조사, 지온측정, 물리탐사, 시추조사 등의 조사를 수행하여 '지질광상조사보고'에 그 결과를 수록하였다. 또한 1976년에 국립지질조사소가 정부 출연연구기관인 자원개발연구소로 개편된 이후에도 이천온천 및 유성온천 등 주로 온천에 대한 조사가 주를 이루어왔다.

온천조사가 아닌 지열조사로는 1968년에 소위 콜롬보 계획의 일환으로 한일공동 연구가 착수되어 전국에 산재한 14개 광산의 시추공과 수평갱도에 있는 시추공에서 지하증온열(지온증가열)을 측정할 것을 들 수 있는데, 이후 지질조사소의 기본사업으로 추가 수집한 총 22개 광산에서 측정한 지온증가열과 암석의 열전도도를 측정하고 자료가 양호한 18개소의 지열류량을 계산, 제시하였다. 이 결과의 일부는 국제 학술지에 발표되고 또한 연구보고서로 제출됨으로써 비로소 우리나라의 지열류량 연구의 시초가 된다(Mizutani *et al.*, 1970; 장정진, 1970). 이러한 지열류량 연구는 서정희(1976)의 지열광상에서의 특성 및 탐사를 거쳐 1980년대의 연구로 이어지게 된다.

2.3. 1980년대부터 1990년대까지

1979년부터 온천조사라는 명칭에서 벗어나 지열조사라는 용어가 자주 사용되게 되었다. 이때부터 당시 자원개발연구소에서는 포항지구(1979년 국토이용지질조사사업), 부곡지구(1980년~1982년 국토이용지질조사사업) 등 유명 온천을 포함하는 지역에 대해 정밀지질조사, 지온측정, 물리탐사(주로 전기탐사), 지하수 및 지화학조사를 수행하여 매년 조사보고서 형태로 발간하였으며, 일부를 제외하고는 한국지질자원연구원에서 이를 열람할 수 있다. 이러한 지열조사연구는 1998년까지 이어졌는데, 1996년도에 당시까지의 시추공 온도검층자료와 지열류량 측정 자료를 총망라하여 전국적인 규모로는 처음으로 지온경사분포도, 심도 1, 2 km에서의 추정온도 분포도 및 지열류량 분포도가 작성되었으며, 유명 온천수에 대한 수리지구화학적 특성을 파악하고 안정동위원소 분석자료를 통해 온천수가 천수 기원임도 확인하는 등 당시까지 한국자원연구소에 축적된 모든 결과를 집대성하게 된다(임정웅 등, 1996).

한편 1983년에 당시 내무부에서는 그때까지 온천에 대한 모든 조사자료와 연구를 집대성한 '온천지'를 발간하게 되는데, 이 책은 온천에 대한 일반적인 이론적, 온천의 종류, 수질, 지질, 성인 및 분석에 대한 정

리와 온천의 의학적인 효과와 이용방법, 우리나라의 온천 이용 실태, 우리나라 온천의 조사 분석 내용 및 온천의 개발과 보호관리에 대한 것을 총 망라하고 있다. 따라서 이 책에는 우리나라 14개 온천에 대한 지리적 요소, 지질, 지구물리학 및 지구화학적 및 수리지질학적인 분석자료가 모두 포함되어있으며 특히 삼국시대에서부터 이용되어온 온천에 대한 고문헌 자료도 잘 정리되어있다.

학계에서의 연구도 이 기간 동안 활발히 진행되었는데, 주로 지열류량과 관련된 지구물리화학적 연구가 많고(김성균, 1984; Han and Chapman, 1985; 1991; 1994; 1995; Kim, 1985; Lee *et al.*, 1986; 강대우 등, 1988; Han, 1992a; 1992b; 한옥과 김영석, 1996; 김형찬 등, 2002), 온천수의 지화학적 연구는 1990대에 들어서 많이 발표되고 있다(엄병우, 1993; Koh *et al.*, 1994; Yun *et al.*, 1998a; 1998b). 그 외 수리지질학적 연구 및 공학적 연구도 간헐적으로 있어왔으나 지속적으로 연구되지는 않은 것으로 보인다. 특히 앞서 인용문헌의 수에서도 알 수 있듯이, 육군사관학교의 한옥 교수는 미국에서 지열에 대한 연구로 박사학위를 마치고 귀국한 이후, 우리나라 지열류량 연구 및 후진 양성에 많은 공헌을 하여왔다.

1990년대에 들어서는 지열에너지를 개발하여 활용하고자 하는 사업이 시작되어 마산창원지역과 제주도 지역에서 지열개발을 위한 연구가 수행된바 있는데, 불행히도 실제 개발을 위한 시추까지 이르지 못하는 못하였다.

2.4. 2000년대

2000년 이후 우리나라 지열연구는 심부 지열수를 개발하여 실제 지역난방 및 시설영농에 활용코자하는 개발 사업과 천부 지중열을 활용한 지열에너지 냉난방 기술의 보급 등 실질적인 활용에 대한 연구가 본격화하고 있는 것이 특징이라 하겠다. 1990년대에 시도되었던 몇몇 개발 연구가 개발을 위한 시추로 연결되지 못했던 것에 비해, 2000년대에 들어서는 시추를 통한 지열수 부존의 확인을 위한 시도로 연결되었다. 대표적으로는 한국지질자원연구원에서 2003년도부터 경상북도 포항시 북부지역에서 수행하고 있는 '심부 지열에너지 개발 사업'으로 이는 지하 2 km 심도까지 굴착하여 온도 75°C 이상의 지열수를 다량으로 생산하고 이를 지역난방과 시설영농 등에 활용코자하는 사업으로 우리나라에서는 처음으로 본격적인 개발사업에 착수한 것이라 하겠다.

이와 더불어 우리나라 온천수의 지화학적 분석을 통

해 그 성인을 밝히고자 하는 연구가 계속되고 있는데 (고용권 등, 2001; 이상규 등, 2005), 이에 대하여는 4장에서 다시 서술한다. 또한 천부 지열열을 건물의 난방에 활용하는 기술의 보급이 확대되면서 이에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는데, 2000년대의 기술개발 동향에 대해서는 5장에서 자세히 다룬다.

3. 한국의 지열류량 분포

우리나라 지열류량 측정 연구는 앞서 밝힌 바 있듯이 콜롬보 계획의 일환으로 측정된 18개의 지열류량 자료로부터 시작되는데 즉, Mizutani *et al.*(1970)이 12개, 장정진(1970)에서 6개 이후, 서정희(1976)에 의해 17개가 측정되어 발표된 바 있다. 1980년대에 들어서 한국지질자원연구원의 전신인 한국동력자원연구소에서 온천조사를 수행하면서, 온천개발 목적으로 굴착된 심부 시추공에서의 온도검층을 통해 지온증가율을 계산하고 주변 암석 시료의 열전도도 측정자료를 이용해 지열류량 자료를 지속적으로 축적해왔다. 이들 자료는 임정웅 등(1989) 6개, 임정웅 등(1996) 177개, 염병우 등(1997) 30개의 자료로 발표되었으며, 1990년대 말까지 총 248개의 육상 지열류량 자료가 얻어졌다. 1996년에는 그때까지 얻어진 지온증가율 자료 및 지열류량 자료를 이용해 전국적인 지온증가율 분포도와 지열류량 분포도를 발간하였다(임정웅 등, 1996).

지열류량(q)은 지하 심부로부터 지표로 1차원적인 전도에 의해 열이 방출된다는 가정하에 다음과 같은 Fourier 법칙으로 표현된다.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (\text{mW/m}^2) \quad (1)$$

여기서 λ 는 열전도도(단위: W/m-K)이고 T 는 온도(단위: K), z 는 심도(단위: m)이며, 따라서 dT/dz 가 시추공에서의 온도검층에 의해 계산된 지온경사(즉 지온증가율의 음의 값)가 된다. 보통 지열류량의 값이 작아 milli-Watt/m²의 단위를 사용한다.

한편 암석의 열전도도는 또 다른 고유의 열물성인 열확산율 또는 열확산계수(thermal diffusivity)와 다음의 관계를 만족한다.

$$\lambda = \rho \alpha C_p \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도(kg/m³), α 는 열확산율(m²/sec), C_p 는 비열(Joule/kg-K)이다. 열전도도를 알기 위해서는 직접적으로 열전도도를 측정하거나, 열확산율을 먼저 측정한 후 밀도와 비열을 측정하여 환산하는 방법을 사

용한다. 지금까지 가장 정확한 열전도도 측정 방법은 소위 divided bar를 이용하는 것으로 알려져 있는데(김형찬, 2004), 최근에는 간편하고 빠르게 laser를 이용하여 열확산율을 측정하는 방법도 많이 사용한다(송윤호 등, 2005b).

지열류량 자료의 해석을 위한 연구는 1980년대에 김성균(1984), Han and Chapman(1985), 강대우 등(1988)에 의해 진행되어 왔으며, 90년대에 들어서 비로소 지열류량과 지질연대의 상호관련성에 대한 연구가 발표된 바 있다(Han, 1992a; 1992b). 그러나 우리나라의 지질분포가 매우 복잡함에 비해 지열류량이 측정된 지역은 편중되어 있는 결과로 우리나라 지질특성과 지열류량 분포의 뚜렷한 상관관계를 결정짓는 것은 무리 가 있었다.

우리나라에서 지금까지 축적된 지온증가율 분포도와 지열류량 분포도는, 특히 1980년대 이후에는, 주로 온천개발을 목적으로 수행된 시추공에서의 온도검층 자료에 기초하고 있다. 따라서 전체 자료 수에 비해 그 측정점이 지역적으로 상당히 편재되어 있는 문제를 안고 있다. 또한 온천개발 지역 주변의 상당수 시추공이 온천 개발에 따른 국부적인 대류 현상에 의해 지온증가율이 왜곡된 문제점 또한 안고 있다. 즉, (1)식에서 설명한 바와 같이 우리가 해석에 이용하는 지열류량은 지하 심부로부터 지표로 1차원적으로 발산하는 열 flux의 조건을 만족해야 하며, 따라서 지하로 내려갈수록 주변 암석의 열전도도에 따라 선형적으로 증가해야 하나, 파쇄대를 따라서 열수의 대류가 일어나거나 시추공에 설치된 양수펌프에 의해 심부 열수가 지표까지 연속적으로 올라오면 국부적으로 주변온도의 상승을 야기하게 된다. 따라서 온천주변지역에서의 지온증가율은 국부적으로 높은 결과를 초래하게 되는 경우가 많다.

2000년대 들어서 한국지질자원연구원을 중심으로 본격적인 지열개발연구가 수행되면서, 김형찬(2004)은 총 248개 지열류량 자료를 이용한 지열류량 분포도의 해석에 있어서 1:1,000,000 수치지질도에 근거하여 암상별, 지질연대별, 그리고 중력자료에 기초한 모호면 깊이 분포(김정우 등, 2003)와 지열류량의 상관관계 분석을 시도하였다. 이는 우리나라 최초로 전국적인 스케일에서 지열류량 분포를 지질특성과 연계하여 해석한 사례이다. 이에 의하면 암석의 연대가 젊을수록, 그리고 변성암 보다는 퇴적암 계열의 지열류량이 높으며 또한 모호면의 깊이가 얕을수록 지열류량이 높아지는 것으로 나타났다. 김형찬(2004)은 또한 지금까지 축적되어있는 화강암 지역의 열생산을 측정 자료(민병식 등,

1990; 1991; 1992)와 지열류량 자료와의 상관관계 분석도 시도하였으나 자료의 수가 부족하고 또한 화강암 분포지역과 지열류량 측정위치가 서로 상이하여 뚜렷한 상관관계를 찾을 수는 없었다.

2004년 이후로 지온증가를 분포도 및 지열류량 분포도 작성은 뚜렷한 진전을 보이는데, 2004년에는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 총 588개의 심부 시추공 온도검층자료에 근거한 지온증가를 분포도를 작성하였으며

(송윤호 등, 2004), 2005년에는 총 359개의 지열류량 자료를 이용하여 Fig. 2와 같은 지열류량 분포도를 작성하였다(송윤호 등, 2005b). 이에 따르면 지열류량의 500 m×500 m 면적대비 가중평균값은 $60 \pm 11 \text{ mW/m}^2$ 로 나타났는데, 이는 기존의 248개 자료를 이용한 결과인 $64 \pm 11 \text{ mW/m}^2$ (김형찬, 2004)보다 낮아진 것이며, 또한 전 세계 대륙 지열류량 평균값인 65 ± 11 (Pollack *et al.*, 1993)과 비교해도 약간 낮은 값이다.

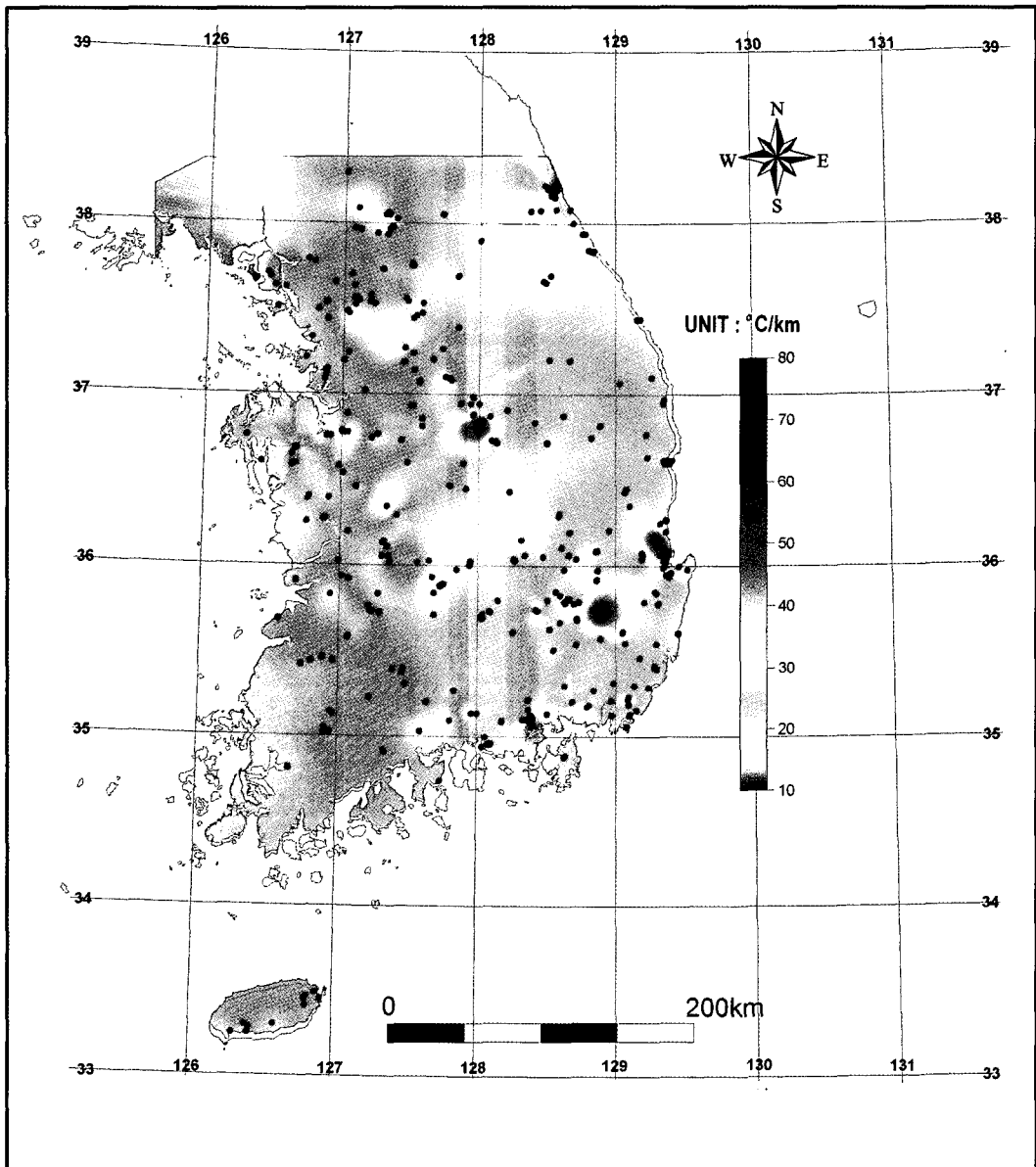


Fig. 1. Geothermal gradient map of Korea. Total of 589 sampling locations are denoted by dots (After Song *et al.*, 2004).

우리나라의 지질 분포가 매우 복잡함을 감안할 때, 앞으로 새로운 자료가 축적됨에 따라 비록 많은 차이는 아닐지라도 평균값은 계속적으로 변할 것으로 생각된다. 물론 최근의 활발한 대륙붕에서의 석유 및 가스개발 시추의 결과로 상당한 양의 지열류량 자료가 얻어져 있으나, 아직까지 체계적으로 그 자료를 해석한 연구가 발표되지 않고 있어 여기서는 논외로 하였다.

송윤호 등(2005b)에서는 새롭게 작성된 지열류량 분포도에 김형찬(2004)에서와 같은 지질특성과 지열류량

과의 상관관계 분석을 시도하였는데, 그 결과는 김형찬(2004)의 결과와 대동소이하다. Fig. 1과 Fig. 2에서 보면 일부 유명 온천 지역에서 국부적으로 높은 값이 나타나는데 이는 앞서 설명한 바와 같이 국부적인 대류에 의한 값이므로 전체적인 해석에서는 제외시킬 필요가 있다. 광역적인 관점에서 볼 때, 특이할 부분은 역시 포항에서 양산단층으로 이어지는 높은 지열류량 분포이다. 경북 포항지역은 지열류량이 높을 뿐만 아니라, 열전도도가 낮은 제3기 퇴적층이 두텁게 분포하

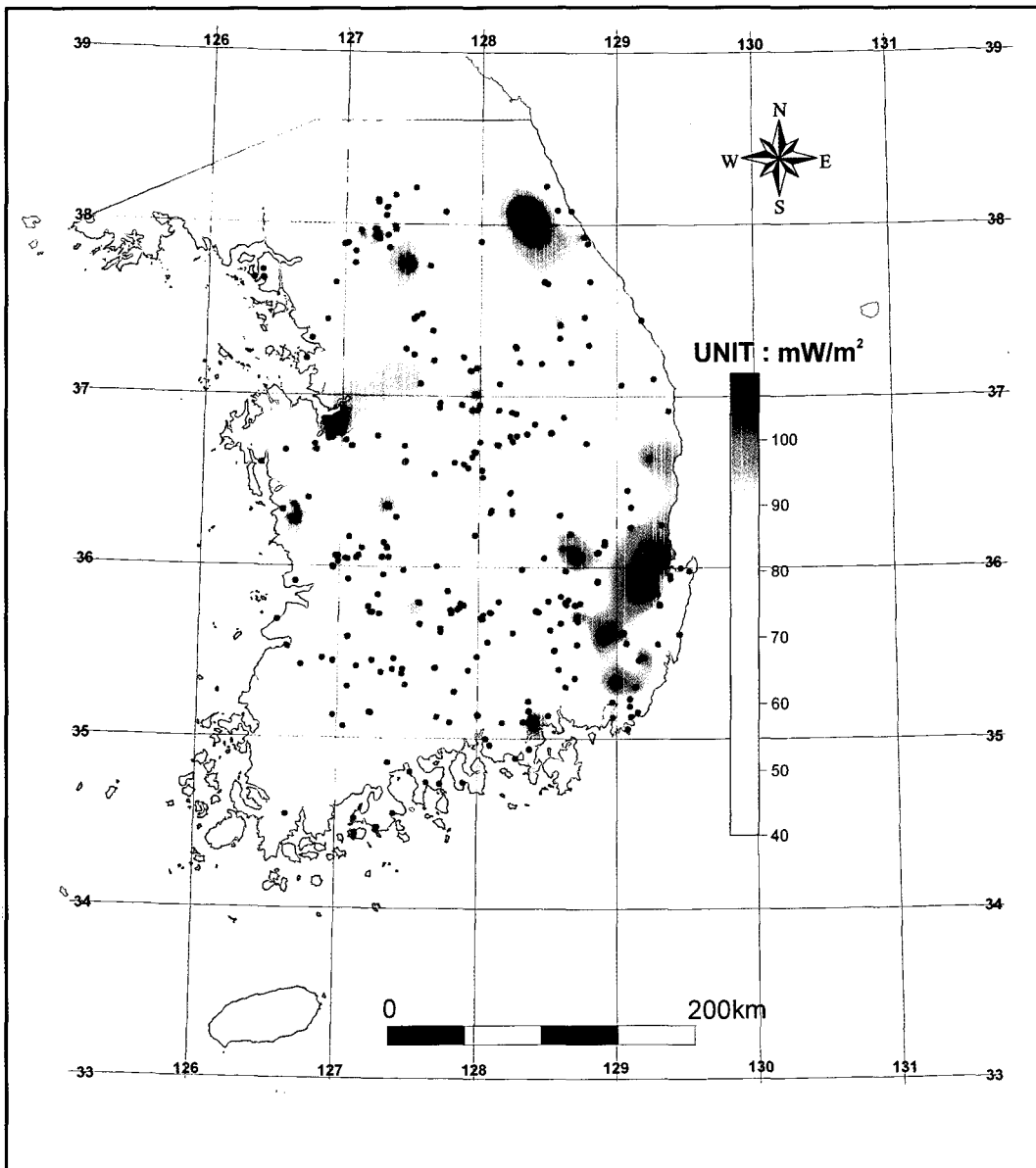


Fig. 2. Terrestrial heat flow map of Korea. Total of 359 sampling locations are denoted by dots (After Song *et al.*, 2005b).

여 지온증가율도 평균 40°C/km 이상으로 매우 높게 나타나고 있다. 양산단층 및 주변 단층대를 포함하는 지역을 따라 지열류량이 높게 나타나는 것은 단층대가 지하 심부까지 연장되어 광역적으로 열의 높은 흐름을 야기하기 때문으로 판단되며 따라서 심부 지열수의 활용가능성에 주목해야 할 것이다.

4. 우리나라 지열 근원에 대한 연구

지구화학적인 분석 연구는 온천 조사의 초창기인 일제강점기에서부터 지속적으로 이루어져 왔는데, 우리나라 전체에 대한 분석 연구는 1970년에 원자흡광분석기(Atomic Adsorption Spectrometer)의 신규 도입을 계기로 우리나라 12개 온천지역 온천수에 대한 기기분석과 화학분석을 수행하고 성분별(온도, pH, 전기전도도, 증발산사, COD, H₂S, CO₂, Ca, Mg, Na, K, Cl, F, SO₄, Fe, Mn, Al, B, Br, I, SiO₂, Cu, Pb, Zn, PO₄, NO₃, NO₂, PO₄) 특성을 제시한 “우리나라 온천수의 화학성분에 관하여”와 Li와 Sr의 분석결과를 최초로 제시한 “우리나라 온천수의 Li, Sr 함량에 관하여”가 국립지질조사소의 1971년 지질광상 제13호에 게재된 바 있다(양문열, 1971a; 1971b). 1984년에는 ICP 분광분석기와 Ion Chromatograph가 도입됨에 따라 국내 24개 지역 온천수의 양이온, 음이온 32개 성분함량과 상관관계를 제시한 바 있다(양문열 등, 1985; 성학제 등, 1985). 이러한 화학성분 분석 및 이를 이용한 우리나라 온천수의 근원에 대한 연구는 지금까지 단속적으로 이어져왔는데 전국적인 온천수를 대상으로 한 연구로는 김규환과 최형정(1998)을 들 수 있으며, 최근에는 우리나라 온천수의 희토류원소의 지구화학적 특징에 대한 분석(이승구 등, 2005) 및 Sr 동위원소비를 이용한 온천수의 상관관계 분석(송윤호 등, 2005a)으로 이어지고 있다. 이러한 연구는 지역적인 온천수의 성인에 관한 연구(Yun *et al.*, 1998a; 1998b; 고용권 등, 2001; 정찬호 등, 2004; 윤육과 조병욱, 2005)와 연계되어 우리나라 온천수의 전반적인 연령, 성인 등에 대한 체계적인 결과를 낼 것으로 기대된다.

한편, 암석학적 및 지구화학적으로 화강암의 열생산량에 대한 연구는 한국자원연구소에서 1989년부터 3년간 수행된 바 있는데, 지각내 지열을 발생시키는 근원인 방사성 동위원소(즉 U, Th, K)의 화강암내 함량을 정량화하여 이들 원소에 의해 발생하는 열생산량을 계산하였다(진명식 등, 1990, 1991, 1992), 이들에 따르면 경남의 창녕 화강암체는 평균 열생산량 2.88 μW/

m³, 마금산 암체 1.82 μW/m³, 창원-마산-의창군 일대 1.73 μW/m³, 무암사-수산 화강암체 4.57 μW/m³, 월악산 암체 4.42 μW/m³, 대야산 암체 4.24 μW/m³ 등으로 나타났다. 이러한 연구는 1990년대 전반까지 이어졌는데(신성천 등, 1994; 신성천과 지세정, 1995), 김형찬(2004)은 이러한 모든 자료를 취합한 1,868개 자료를 이용하여 열생산을 분포를 정리하고 이와 지열류량과의 상관관계 분석을 시도하였다. 그러나 앞서 서술한 바와 같이 열생산량 분포도의 샘플링 위치와 지열류량 측정위치가 서로 상이한 결과로 의미있는 상관관계 도출에까지 이르지 못하는 못하였다.

따라서 앞으로 지금까지의 각종 분석 결과를 종합하여 해석하고, 이와 화강암 지역의 열생산량 측정 결과 및 항공 방사능 분포도와와의 연계 해석, 그리고 지질 특성 및 지열류량 분포와의 상관관계 연구 등이 지속된다면 우리나라 지열 근원에 대한 보다 정리된 연구 결과가 도출될 것으로 생각된다.

5. 지열에너지 자원의 개발 및 활용

우리나라에서 지열을 에너지원으로 개발코자 하는 시도는 1960년대 말부터 그 타당성에 대한 연구결과로부터 이어져왔다(남기영, 1969; 1970; Han, 1979; 임정웅, 1982). 이러한 지속적인 시도의 결과로 1991년에는 우리나라에서 처음으로 지구물리학적, 지구화학적 탐사기법을 총동원하여 실제적인 지열개발 시추를 통해 지역난방에 까지 활용하기 위한 종합적인 연구개발 사업이 착수되었다(정승환 등, 1991; 1992). 이 사업은 당시 동력자원부로부터 ‘대체에너지기술개발사업’의 하나로 선정되어 경남 마산-창원 부근의 심부 지열수 부존 지역을 탐사하고 시추하여 실제 지역난방에 활용코자 계획되었는데, 당시로서는 매우 깊은 심도인 1.5 km까지의 탐사를 목표로 항공자력, 중력, 방사능 탐사 등 광역탐사 기술을 비롯하여 심부 물리탐사, 지하화학탐사가 동원되어 대상지역의 지열부존 가능성 및 심부 파쇄대 발달 가능성을 확인하였으며, 지열 직접이용의 성공사례인 프랑스의 경우와 비교하여 지열자원 활용의 경제성 분석까지도 시도되었다. 이 사업은 또 다른 대체에너지개발사업인 ‘제주도 지열자원 탐사 및 최적 활용방안 연구’(이상규 등, 1993; 1994; 1995)로 이어져 제주도 전역에 대해 지질과학 및 자원공학 기술이 종합적으로 동원된 조사가 이루어짐으로써, 제주도 서부 지역에서 지열부존 유망지역을 추출하고 시험 시추공의 위치를 제시하였다. 그러나 불행히도 이 두 사업은

고비용을 요구하는 시험 시추의 위험부담에 따른 정부의 인식부족으로 인해 더 이상의 연구비 지원을 받지 못하여 확인을 위한 시추로까지 연결되지 못하였다.

2000년대 들어 한국지질자원연구원의 꾸준한 노력에 의해, 2003년부터 실제 시추를 포함한 대규모 심부 지열수 자원 개발 프로젝트가 시작되게 되었으며 이에 따라 우리나라 연구기관으로서 처음으로 지열에 대한 연구를 전담하는 연구조직이 한국지질자원연구원내에서 정식으로 만들어지는 계기가 되었다. '심부 지열 에너지 개발 사업'으로 명명된 이 사업은 우리나라에서 광역적으로 제일 높은 지열류량 분포를 보이는 경북 포항지역에서(Fig. 2 참조) 심도 2 km 까지의 시추를 통하여 온도 75 이상의 지열수를 다량 개발하여 인근 아파트 지역에 집단 지역난방을 공급하고 또 시설영양 등에도 연계 활용코자 수행되고 있으며, 2006년 말까지 실제 경제성을 확인하는 목표로 수행중이다(송윤호 등, 2005a). 이 사업의 수행과정에서 지열조사, 탐사 및 개발과 관련된 많은 연구 결과가 최근 발표되고 있어(이태종 등, 2005; 임성근 등, 2005; 이승구 등, 2005; 윤육과 조병욱, 2005) 학문적인 분야에서의 활성화에도 큰 도움을 주고 있다고 판단된다. 앞으로 실제 개발에서의 성공이 이루어진다면 전국적인 지열 개발 활성화를 이끌어낼 또 하나의 계기를 마련하게 될 것으로 기대된다.

최근의 고유가 시대는 전통적인 의미에서의 지열에너지인 심부 지열수 자원에서 한단계 더 나아가 천부의 지중열을 냉난방에 이용하는 기술의 보급 확대를 불려왔다. 2000년 이후 우리나라에 보급되기 시작한 지열 열펌프(geothermal heat pump) 기술은 지하 100 m-200 m 사이의 연중 일정한 지온과 대기온도의 온도차를 이용해 여름에는 냉방, 겨울에는 난방을 하는 기술이다. 우리나라에서는 냉난방공조 기술 분야에서 이를 상업화해 최근 활발히 보급하고 있으나, 지하의 온도 변화가 그 지역의 지온증가를, 암반의 열적 특성, 그리고 지하수의 유동에 의해 절대적으로 좌우된다는 것을 고려한다면, 지질 및 자원분야에서 적극적으로 연구해야 할 주제가 확실하다. 다행히도 그간의 노력에 힘입어 최근에 지반의 열적 특성이 매우 중요함이 인식되어 한국지질자원연구원을 위시하여 몇몇 기관에서 정부 연구비를 지원받아 이러한 분야에의 연구를 수행하고 있으며, 국내 지표온도분포도 작성(구민호 등, 2006), 지중 열교환기 설계를 위한 지하 열특성 조사(심병완 등, 2006) 등의 연구가 발표되고 있다.

6. 결 론

지금까지 일제강점기의 온천조사에서부터 시작하여 우리나라 지열연구의 역사를 간략히 정리하고, 현재 우리나라의 지열류량 연구 결과 및 추세, 지열의 근원 연구, 그리고 지열에너지 개발 및 활용분야에 대한 연구를 정리하였다. 오랜 기간에 걸쳐 각 분야별로 방대한 문헌자료가 존재하는 반면에 지면의 한계 및 논의의 일관성 유지 차원에서 지금까지의 모든 연구결과를 모두 다룰 수는 없었음을 밝힌다. 앞으로 더 많은 자료를 토대로 우리나라 지열연구에 대한 완벽한 역사서가 별도로 나올 수 있기를 기대한다.

앞서 서술한 바와 같이 우리나라 지열연구의 발전은 많은 경우 온천조사의 역사와 궤를 같이하고 있다. 온천에 대한 체계적인 조사는 1981년 온천법이 제정되고 당시 한국동력자원연구소가 온천조사기관으로 지정되면서 본격적으로 활기를 띠게 되었고 2006년 5월 현재 총 325건의 온천공 조사 및 온천자원조사가 한국지질자원연구원에 의해 이루어졌다. Fig. 1 및 Fig. 2에 나타낸 우리나라 지온증가를 분포도 및 지열류량 분포도 역시 온천조사를 통해 심부 시추공에서의 온도검층이 이루어지지 않았다면 작성 불가능하였음은 명백하다 하겠다. 그러나 본 논문에서는 학문적인 분야에 초점을 맞춘 관계로, 또한 온천조사결과가 일반에게 발표되는 목적이 아니므로 온천조사에 관한 내용은 생략하였다.

최근 유가의 고공행진은 화석에너지의 97%를 수입에 의존하는 우리나라의 지속적인 발전에 심각한 장애요인이 되고 있으며, 따라서 정부차원에서 재생에너지의 개발 및 활용에 대한 관심과 지원이 날로 증대되고 있다. 이러한 시점에서 인류가 100,000년 이상 사용할 수 있는 무한한 열에너지의 저장소인 지하의 열에너지를 활용하기 위한 실제적인 기술을 제공하는 것은 지하를 전공하는 우리들로서는 매우 시급한 과제일 것이다. 지열에너지의 활용이 국가 경제적인 측면뿐만 아니라 사회적으로 중요한 것은 온실가스 배출을 줄일 수 있는 환경적인 이점일 것이다. 이 분야에 대해서 일부 전문가들이 관심을 가지고 연구를 시작하고 있으며, 그간 많이 축적되어 있는 시추공에서의 온도검층 자료를 가지고 국내 각 지역에서 고기후를 복원코자 하는 연구도 시도되고 있으므로(이영민 등, 2006) 앞으로 환경보전 차원에서의 기술 활용 증대를 위한 시도도 기대된다.

학문적인 측면에서 볼 때, 그간 많은 연구가 이루어

져 왔음에도 불구하고 아직까지 우리나라 고온성 온천수의 성인과 이를 기초로 한 순환시스템에 대한 체계적인 정리에까지는 이르지 못하고 있으며, 또한 지열류량과 지질특성과의 상관관계 분석 및 화강암체 열생산을 분포와의 연계 해석을 통한 우리나라 지열부존 특성에 대한 체계적인 결론도 아직까지는 도출되지 못하고 있다. 그러나 최근에 많이 측정되고 있는 대륙붕에서의 지열류량 자료를 포함해서 지속적인 자료의 축적과 또한 전국적인 고온 온천수에 대한 동위원소 분석 연구도 지속적으로 이루어지고 있다는 점에서, 여러 전문가들의 협동 연구가 이루어진다면 우리나라 지열 및 지열수 부존 특성에 대한 체계적인 연구 결과가 머지않아 발표될 수 있을 것으로 기대된다.

모쪼록 이 논문이 지금까지 우리나라 지열연구의 역사를 돌아보는 데 도움이 되고 또한 새로운 연구에 대한 관심을 불러일으키는 데 조금이나마 보탬이 되기를 바란다.

사 사

이 논문은 민경덕 교수님의 정년퇴임기념호를 위하여 기획되고 작성되었다. 정년퇴임기념 준비위원회의 노고에 감사드리며, 정년퇴임 후에도 민경덕 교수님이 지금까지와 같이 건강하시고 또 앞으로도 후학을 위해 힘써주시기를 부탁드립니다. 또한 이 논문은 한국지질자원연구원의 기본사업인 ‘심부 지열에너지 개발 사업’ 연구의 일환으로 작성되었음을 밝힌다.

참고문헌

강대우, Kyo, M., Kiyohashi, H. (1988) 지열지대 암석의 채취심도별 유효 열전도율과 전도열류량에 관한 연구. 대한광산학회지, 24권, p. 245-253.
 고용권, 윤성택, 김천수, 배대석, 박성숙 (2001) 부곡 지열수의 심부 환경과 지하화학 진화: 유황형 지열수의 생성과정 재해석. 자원환경지질, 34권, p. 329-343.
 구민호, 송윤호, 이준학 (2006) 국내 지면온도의 시공간적 변화 분석. 자원환경지질, 39권, p. 255-268.
 김규한, 최현정 (1998) 남한의 온천지역의 열수화 지하수의 지구화학적 연구. 지구과학회지, 19권, p. 22-34.
 김성균 (1984) 한반도 지열류량에 대한 약간의 고찰. 광산지질, 17권, p. 109-114.
 김정우, 조진동, 김원근, 민경덕, 황재하, 이운수, 박찬홍, 권재현, 황종선 (2003) 중력 이상을 이용한 한반도 모호면 추출에 관한 연구. 자원환경지질, 36권, p. 213-223.
 김형찬 (2004) 남한의 지열류량과 지질자료를 이용한 지열 이상대 해석. 이학박사학위논문, 충남대학교 대학원, 123p.
 김형찬, 이사로, 송무영 (2002) 남한지역의 암상 및 지질 시대별 지온경사를 관계 분석. 자원환경지질, 35권, p.

163-170.
 남기영 (1969) 지열의 탐사와 그 개발현황 (I). 지질광상 제9호, 국립지질조사소.
 남기영 (1970) 지열의 탐사와 그 개발현황 (II). 지질광상 제10호, 국립지질조사소, p. 62-71.
 내무부 (1983) 온천지. 722 p.
 서정희 (1976) 지열광상의 특성 및 탐사. 대한광산학회지, 13권, p. 102-109.
 성학제, 심상권, 김건한, 양문열 (1985) ICP 분광분석기에 의한 온천수중의 미량성분 분석연구. 광물선별 및 분석기술개발연구, 연구보고 85-19, 한국동력자원연구소, p. 247-268.
 송윤호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이성근, 이종철, 이병태, 박인화, 이태중, 이철우, 문상호, 김연기, 이병대, 임현철 (2004) 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구. 한국지질자원연구원 연구보고서 KR-04(연차)-08, 국무총리, 123p.
 송윤호, 안은영 (2005) 세계 지열에너지자원 활용 현황 분석과 향후 전망. 한국지구시스템공학회지, 42권, p. 287-288.
 송윤호, 이창범, 박덕원, 김형찬, 이철우, 이성근, 박인화, 이태중, 심병완, 조병욱, 염병우, 이승구, 기원서, 현해자, 손정술, 황세호, 오재호, 이운수, 박 찬, 정용복, 김통권, 이진수, 고동찬, 안은영, 윤 욱 (2005a) 심부 지열에너지 개발 사업, 한국지질자원연구원 연구보고서 OAA2003001-2005(3), 과학기술부, 147p.
 송윤호, 김형찬, 심병완, 이창범, 박덕원, 이태중, 이철우, 박인화, 임현철, 김유숙, 김연기, 이병대 (2005b) 지열자원 부존특성 규명 및 활용기반기술 연구. 한국지질자원연구원 연구보고서 OAA2004018-2005(2), 과학기술부, 101p.
 심병완, 이영민, 김형찬, 송윤호 (2006) 지중 열교환기 효율 분석을 위한 지반내 열적·수리적 특성 조사. 한국지구시스템공학회지, 43권, 인쇄중.
 신성천, 지세정, 주승환 (1994) 방사성안정동위원소와 피선트랙을 이용한 화강암의 열생산성평가 및 지열자원 탐사기술개발 (I). 동위원소지질연구 KR-94(C)1-15, 한국자원연구소.
 신성천, 지세정 (1995) 방사성안정동위원소와 피선트랙을 이용한 화강암의 열생산성평가 및 지열자원탐사기술개발 (II). 동위원소지질연구 KR-95(C)-11, 한국자원연구소, 86p.
 양문열 (1971a) 우리나라 온천수의 화학성분에 관하여. 지질광상 제 13호, 국립지질조사소, p. 42-52.
 양문열 (1971b) 우리나라 온천수의 Li, Sr 함량에 관하여. 지질광상 제 13호, 국립지질조사소, p. 50-52.
 양문열, 최상근, 성학제, 송덕영, 김건한 (1985) ICP와 Ion chromatography에 의한 한국온천수의 화학성분 조사연구. 광물선별 및 분석기술개발연구, 연구보고 85-19, 한국동력자원연구소, p. 235-246.
 염병우 (1993) Environmental hydrogeochemistry of the thermal waters in granites of the Pocheon, Gosung, Yesan, and Jungwon area. 이학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
 염병우, 김형찬, 임정용, 배두중, 이승구 (1997) 지열자원 조사연구. 연구보고서 KR-97(C)-4, 한국지질자원연구원, 50p.
 윤욱, 조병욱 (2005) 포항 흥해지역 지열대의 지하화. 한국지하수토양환경학회지, 10권, p. 45-55.
 이대성, 윤상규 (1960) 충청남도 덕산온천 조사보문. 지질광상조사연구보고 제4호, 국립중앙지질광물연구소, p. 128-135.

- 이상규, 정성남, 김호원, 김동준, 박중남, 강대우, 박인석, 이동영, 김주용, 오상훈, 진명식, 김상엽, 이진수, 이태섭, 구자학, 김광은, 구성분, 이희일, 최중호, 박영수, 임무택, 송윤호, 조진동, 박인화, 조인기, 전정수, 성기성, 신인철 (1993) 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구 (I). 한국자원연구소 931K101-113AP1, 상공자원부, 235p.
- 이상규, 정성남, 김호원, 이항렬, 김학련, 김태유, 윤운중, 이정동, 김원배, 이동영, 김주용, 진명식, 김상엽, 이진수, 박영수, 구성분, 최중호, 이희순, 임무택, 송윤호, 성기성, 박인화, 성익환, 최순학, 조병욱 (1994) 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구 (II). 한국자원연구소 941K101-113AP1, 통상산업부, 376p.
- 이상규, 황세호, 이태섭, 구성분, 최중호, 박인화, 김광은, 송윤호, 성낙훈, 성기성, 이진수, 진명식, 지세정, 이동영, 김주용, 양동윤, 성익환, 최순학, 조병욱, 김민규, 박철환, 박연준, 최성웅, 박 찬, 이현철, 김태유, 양문희, 오경준, 박경민, 김연배, 송영수, 채효석, 백길남, 송승엽, 오세영, 이희순, 김태진 (1995) 제주도 지열자원탐사 및 최적 활용방안 연구 (III). 한국자원연구소 951K101-113AP1, 통상산업부, 473p.
- 이승규, 김통권, 이진수, 송윤호 (2005) 우리나라 고온성 온천수에 함유된 희토류 원소의 지구화학적 특징. 지질학회지, 41권, p. 35-44.
- 이영민, 김형찬, 송윤호 (2006) 시추공 온도자료를 이용한 고기후 연구에 대한 개관. 자원환경지질, 39권, p. 95-102.
- 이태종, 송윤호, Uchida, T. (2005) 포항 지열개발 지역 MT 탐사 자료의 2차원 및 3차원 해석. 한국지구시스템공학회지, 42권, p. 297-307.
- 임성근, 송윤호, 이태종, Yasukawa, K., 조병욱, 송영수 (2005) SP 모니터링을 이용한 지열수 저류층 변동 해석. 한국지구시스템공학회지, 42권, p. 308-317.
- 임정웅 (1982) 지열에너지개발촉진방안연구.
- 임정웅, 염병우, 김형찬 (1989) 지열자원 평가 및 개발방안 연구. 국토이용지질조사연구 KR-89-1B, 한국동력자원연구소, p. 225-321.
- 임정웅, 이승규, 염병우, 김형찬 (1996) 지열자원조사연구. 연구보고서 KR-96(C)-17, 한국자원연구소, 82p.
- 장경진 (1970) 한국의 지열류량, 지질광상 제10호, 국립지질조사소, p. 23-30.
- 정승환, 진명식, 김성재, 조진동, 구성분, 최위찬, 김원영, 최중호, 전명순, 조인기, 박영수, 지광훈, 이진수, 지세정, 신성천, 이병주, 황상기, 이희일, 김광은, 윤 욱, 최범영, 전정수, 김유성, 김기석, 최선희 (1991) 마산·차원 부근의 대규모 지역난방을 위한 지열에너지 탐사 및 개발 연구. 한국자원연구소 연구보고서 911K101-113AP1, 동력자원부, 172p.
- 정승환, 진명식, 조진동, 최위찬, 박영수, 이진수, 김정호, 정현기, 임무택, 조인기, 지세정, 이병주, 황상기, 전정수, 지현철, 송윤호 (1992) 마산·차원 부근의 대규모 지역난방을 위한 지열에너지 탐사 및 개발 연구. 한국자원연구소 연구보고서 921K101-113AP1, 동력자원부, 167p.
- 정찬호, 박지선, Nagao, K., Sumino, H., 김규한, 허순도, 이종익, 고용권, 박종화 (2004) 한반도 온천수의 수리화학 및 영축기체기원: 대전·충청지역을 중심으로. 한국지하수토양환경학회 추계학술대회 요약집, p. 115-118.
- 진명식, 서효준, 김성재, 이진수, 신성천, 지세정, 김통권 (1990) 고온암체의 지열에너지에 관한 암석학적, 지화학적 연구 (I). 한국동력자원연구소 연구보고서, 과학기술처, 204p.
- 진명식, 서효준, 이진수, 지세정, 김성재, 김통권, 신성천 (1991) 고온암체의 지열에너지에 관한 암석학적, 지화학적 연구 (II). 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-91(T)-22, 과학기술처, 204p.
- 진명식, 이진수, 지세정, 서효준, 김상엽, 김성재, 신성천 (1992) 고온암체의 지열에너지에 관한 암석학적, 지화학적 연구 (III). 한국자원연구소 연구보고서 KR-92(T)-23, 과학기술처, 172p.
- 한욱, 김영석 (1996) 한반도와 그 주변지역의 지열류량 분포에 관한 연구. 지질학회지, 32권, p. 267-275.
- 立岩 巖 (1976) 朝鮮-日本列島地帶 地質構造論考 - 朝鮮地質調査所研究史. 東京大學出版會.
- Beardmore, G.R., and Cull, J.P. (2001) Crustal heat Flow - A guide to measurement and modeling. Cambridge Univ. Press, 324p.
- Dickson, M.H. and Panelli, M (2003) Geothermal Energy - Utilization and Technology. UNESCO, 205p.
- Han, W. (1979) A preliminary evaluation of geothermal potential of Korea with emphasis on geothermometer and mixing model. 지질학회지, 15권, p. 259-268.
- Han, U. (1992a) Heat flow and geologic age relationship. 지질학회지, 28권, p. 437-445.
- Han, U. (1992b) A study on the reduced heat flow. 광산지질, 25권, p. 153-165.
- Han, W., and Chapman, D.S. (1985) On the regional heat flow around Korea and reduced heat flow. 지질학회지, 21권, p. 74-78.
- Han, W. and Chapman, D.S. (1991) Continetal heat flow data. 지질학회지, 27권, p. 493-499.
- Han, U. and Chapman, D.S. (1994) Residual heat flow and crustal properties. 자원환경지질, 27권, p. 397-409.
- Han, U., and Chapman, D.S. (1995) Thermal isostasy: Elevation change of geologic provinces. 지질학회지, 31권, p. 106-115.
- Kim, S.G. (1985) Investigation of geothermal sites in Korea. 광산지질, 18권, p. 167-175.
- Koh, Y.-K., Yun, S.-T., and Ahn, J.-S. (1994) Environmental isotope and hydrochemical studies of geothermal waters in Korea. 한국자원공학회지, 31권, p. 388-399.
- Lee, K.-K., Han, W., and Lee, K.H. (1986) A study on the thermal structure of the Kyeongsang Basin. 지질학회지, 22권, p. 371-379.
- Mizutani, H., Baba, K., Kobayashi, N., Chang C.C., Lee, C.H., 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 flow from Earth's interior: Analysis of the global data set. Review of Geophysics, v. 31, p. 267-280.
- Yun, S.-T., Koh, Y.-K., Kim, C.-S., and So, C.-S. (1988a) Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics I: Bugok area. 자원환경지질, 31권, p. 185-199.
- Yun, S.-T., Koh, Y.-K., Choi, H.-S., Youm, S.-J., and So, C.-S. (1988b) Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics II: Jungwon and Munkyeong area. 자원환경지질, 31권, p. 201-213.