

남한지역의 암상 및 지질시대별 지온경사를 관계 분석

김형찬^{1*} · 이사로² · 송무영³

¹한국지질자원연구원 환경지질연구부, ²한국지질자원연구원 국가지질자원정보센터, ³충남대학교 지질학과

Relationship Analysis between Lithology, Geological time and Geothermal Gradient of South Korea

Hyoung Chan Kim^{1*}, Saro Lee² and Moo Young Song³

¹Department of Environmental Geology, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30, Kajeong-dong, Daejeon 305-350, Korea

²National Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 30, Kajeong-dong, Daejeon 305-350, Korea

³Department of Geology, Chungnam National Univ., Taejon, Korea

The purpose of this study is to analyze the relationship between geology and geothermal gradient in South Korea using GIS. For the analysis, 352 temperature logging wells were constructed to spatial database and the relationships between geothermal gradient and geological time and lithology were analyzed using the overlay the wells layer and 1:1,000,000 scale geological map layer. The average of the geothermal gradient of South Korea is 29.34°C/km. In the geologic sequence, Cenozoic strata has 39.70°C/km, Mesozoic strata has 30.63°C/km, Paleozoic strata has 22.32°C/km, Proterozoic strata has 23.15°C/km, and Archean strata has 24.34°C/km geothermal gradient value. In the lithological aspect, plutonic rocks have 33.96°C/km, sedimentary rocks have 24.78°C/km and sedimentary and volcanic rocks have 26.85°C/km geothermal gradient value. The result can be used to develop geothermal energy and hot spring as a reference.

Key words : geological time, lithology, geothermal, geothermal gradient, GIS

본 연구에서는 남한 지역의 암상과 지온경사를 상관관계를 GIS를 이용하여 분석하였다. 이러한 분석을 위해 352개의 시추공 온도검층자료가 공간 Layer로 구축되었고, 이러한 공간 Layer 및 1:1,000,000 축적의 지질도 공간 Layer를 중첩하여 지온경사를 및 암상별, 지질시대별 관계를 파악하였다. 그 결과 남한 지역의 평균 지온경사를 값은 29.34°C/km이었다. 지질시대별로는 신생대 지층이 39.70°C/km, 중생대 지층이 30.63°C/km, 고생대 지층이 22.32°C/km, 원생대 지층이 23.15°C/km, 시생대 지층이 24.34°C/km의 지온경사를 값을 가졌다. 암상 종류별로는 심성암이 33.96°C/km, 퇴적암이 24.78°C/km, 퇴적암과 화산암이 26.85°C/km 지온경사를 값을 가졌다. 이러한 결과는 지열 및 온천개발 시 기초자료로 사용될 수 있다.

주요어: 지질시대, 암상, 지열, 지온경사, GIS

1. 서 론

지구는 지각, 맨틀, 핵으로 구분되며, 지구내부에서 고온의 열이 지표로 방출되고 있다. 이는 상부지각과 맨틀에 U, Th 및 K등 주기가 긴 방사능동위원소가

농집되어 있으며, 이러한 방사능 동위원소가 붕괴하며 발생된 열이 지표로 방출되는 것이다. 이와 같이 지구 내부의 열이 지표로 전달되는 과정은 주로 암석을 매체로 전달되는 열전도가 대부분이며, 부분적으로 지하수 또는 마그마와 같이 유체가 지각의 약한 부분을 통하여 전달되는 열대류가 있다. 즉 지열은 매체인 지질의 특성에 따라 열전달의 차이가 나타난다. 이와 같은

*Corresponding author: khc@kigam.re.kr

특성을 가지고 있는 지열을 파악하고자 오래 전부터 외국에서는 수많은 온도검층 자료를 이용하여 지온경사 분포도를 작성하였으며, 이를 이용하여 지열의 분포상황과 지질 및 지질구조와의 관련을 판단하고 지열 에너지 개발에 활용하고 있다.

최근에는 대부분의 선진국에서 지열류량 연구가 활발해져 어느 지역의 암석 열전도도를 알게되면 그 지역의 지온분포를 파악할 수 있도록 지열류량 분포도가 작성되어 있다. 고지열지대인 일본에서는 일본의 지온경사분포연구로서 backarc와 forearc의 지온경사 비교 연구(Okubo, 1993)가 발표된 바 있다. 미국, 영국, 일본 등에서는 지열류량 분포도가 만들어져 있으며, 유럽일대의 지열류량 분포도가 만들어져 있을 뿐만 아니라 전세계에 대한 지열류량 자료가 계속적으로 추가되어 해마다 갱신되는 지열류량 분포도가 나오고 있다. 국내에서는 한반도의 지열에 관한 연구가 1970년도(장정진, 1970)에 처음 시작되었다. 그 후 부분적으로 일부지역에 대한 지열 연구가 있었으며, 한반도 주변지역의 지열류량 연구(한 옥과 Chapman, 1985)가 발표되었다. 최근에 한반도의 지열류량 분포도 작성연구(임정웅 등, 1989)가 발표되면서 지속적인 자료 수집으로 보다 보강된 한국의 지열특성(임정웅 등, 1992; Lim, 1995)에 관한 연구가 발표되었다. 그러나 전국적인 분포를 파악하기에는 아직 자료가 부족한 편이다.

따라서 본 연구의 목적은 남한지역의 지질별 지열특성을 파악하기 위한 것으로 국내 온도검층 자료를 이용해 지온경사율을 지질시대별, 암상별로 상관관계를 비교 분석하는 것이다. 이를 위해 전국에 분포하고 있는 심부 시추공 중 352개(온천조사보고서, 1983-1997)의 시추공에 대한 온도검층자료를 분석하였다. 이 연구에 이용된 시추공 자료가 온천개발공이 대부분이므로 일반적으로 특별히 지온이 높은 지역의 자료로 생각하기 쉽다. 그러나 우리나라 온천은 온천법 상 용출 온도 25°C를 기준으로 하며, 심도에 대한 기준은 없기 때문에 심부 시추공을 굴착하여 온천을 개발하고 있다. 그러므로 온천의 분류를 하자면 심부 지하수형 온천과 균열성 온천으로 구분하고 있다. 이 연구에서 이용된 대부분의 시추공 온도검층 자료는 심부지하수형 온천 개발공이며, 균열성 온천지역(예 : 부곡온천, 수안보온천, 동래온천 등)의 자료는 포함되지 않았다.

지온경사율 산출은 자료의 신뢰도가 높은 전형적인 온도심도 관계도를 보이는 것을 분류하였으며, 신뢰도가 낮은 자료는 Fourier의 열전도 이론식과 파동방정식을 이용하여 유도(Turcotte, Schubert, 1982)된 이론

식을 적용하여 지중온도 분포를 파악하고 지온경사를 산출하였다(김형찬과 송무영, 1999). 또한 지온경사와 지질시대 및 암상을 비교하기 위하여 1:1,000,000 지질도를 이용하였다.

2. 지열의 열전달관계와 지온경사 산출

지구상에서 열 전달 작용은 전도가 대부분을 차지하고 있다. 대륙지각과 암편에서의 열 전달은 암석내의 방사성동위원소의 붕괴에 의한 열과 대륙 하부의 맨틀로부터 상승하는 열이 지각을 매체로하여 지표로 방출되는 열전도에 의하여 주로 지배된다.

지열조사에 가장 기본적인 조사는 시추공 공내 검층이다. 이번 연구에서는 1983년도부터 1997년도까지 공내검층을 실시한 시추공의 온도검층 자료를 이용하여 지온경사율을 산출하였다. 사용기기는 디지털 온도계에 게이블을 확장시켜 제작한 온도계, Geologger 3400, 3030(OYO사), Pc-logger(Robertson Geologging사)를 이용하였다. 이러한 기기는 모두 실내에서 표준온도계($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$ at 30°C)와 비교보정을 하였다.

지온경사율 산출 방법에는 여러 가지가 있다. 그 중에서 가장 정확한 방법은 온도검층 자료를 이용한 온도심도 관계도에서 전형적인 일차식을 보이는 것의 기울기를 구하는 것이다. 경우에 따라 일부 구간에서 유체의 이동에 의한 영향으로 나타나 변화하는 경우가 있다. 이러한 경우는 그 구간을 제외하고 일차식을 보이던 지온경사율을 구할 수 있다. 그러나 2개 이상의 직선식을 보이는 경우와 또는 심한 유체의 유동에 의해 일차식을 보이지 않는 경우가 있다. 이러한 경우에는 공저온도와 그 지방의 평균기온을 적용하여 전체적인 구간의 평균 지온경사율을 구하기도 한다. 이러한 방법은 광범위한 지역의 평균이므로 자료의 신뢰도가 떨어진다. 이번 연구에서 이용한 지온경사율 산출은 대기온도가 지하에 미치는 한계심도를 20 m(김형찬과 송무영, 1999)로 정하여 지금까지 실시한 온도검층 자료 중 전형적인 직선을 보이는 자료의 20 m 심도의 온도분포를 파악하였다. 그리고 조사대상공의 위치에 대한 지하 20 m 심도의 온도를 구하여 공저온도와 관계로 지온경사율을 구하였다.

2.1. 공간 DB 구축

지온경사율과 지질과의 상관관계 분석을 위해 먼저 수집된 온도검층자료를 이용하여 공간 DB로 구축하였다. 이에 사용된 소프트웨어는 ARC/INFO 8.0 및

Table 1. Database structure table of geothermal data.

Name	Data Type	Length	Description
ID NO.	Integer	8	Identification number
VOL.	Integer	3	Reference report volume
LOCATION	Text	50	Well location address
Long.	Float	8	Longitude
Lat.	Float	8	Latitude
Easting	Float	8	X location in UTM coordinate
Norting	Float	8	Y location in UTM coordinate
tmx(m)	Float	8	X location in TM coordinate
tmy(m)	Float	8	Y location in TM coordinate
HOLE	Text	10	Regional hole name
Bd	Integer	4	Hole depth
Gr	Float	8	Geothermal gradient
INT.T	Float	8	Subsurface temp. at 20 m depth
100t	Float	8	Temperature at 100 m depth
Bbt	Float	8	Bottom temperature
Qt	Integer	1	Data Quality
SER.NO	Integer	4	Serial number

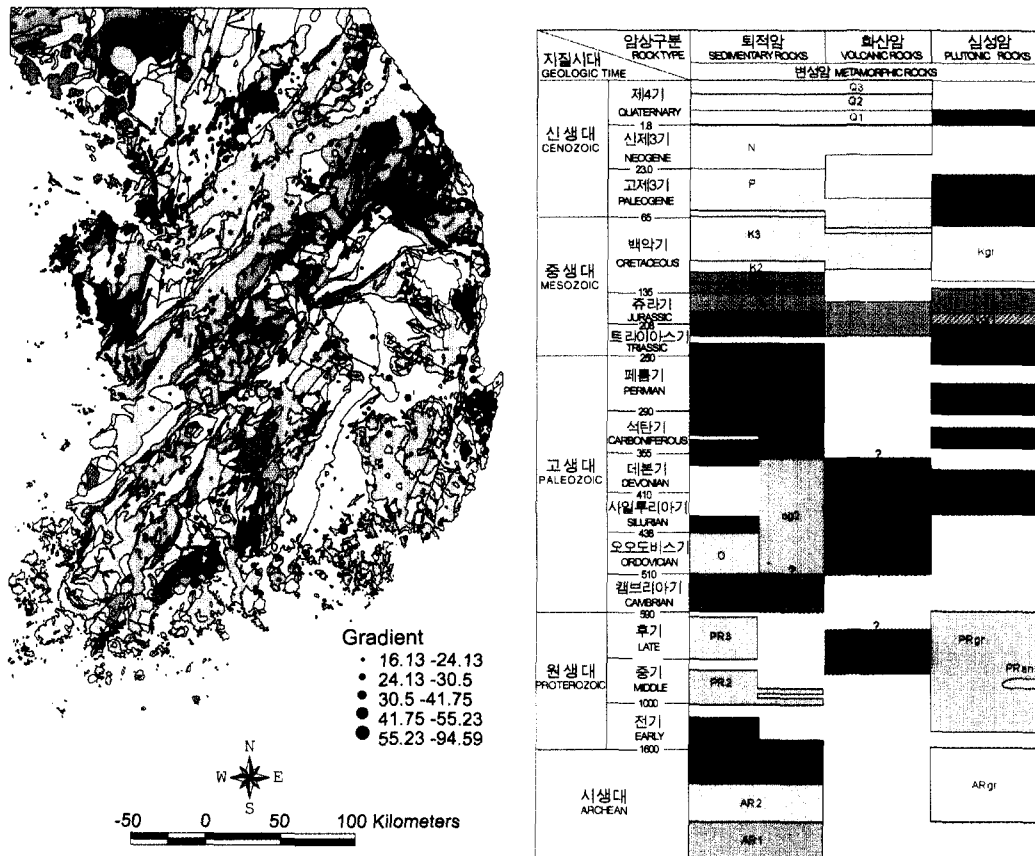


Fig. 1. Location of temperature logging sites on the geological map of South Korea.

Table 2. Geothermal gradient per geological time and rock type.

Symbol	Geologic Time	Rock type	Stratigraphic Units	No. well	Average of geothermal gradient (°C/km)	Standard Variation	Area (km ²)	Area ratio (%)
J ₁	Traissic Jurassic	Sedimentary	Deadong Gp.	0	0.00	-	711.56	0.66
K ₁	Mesozoic	Sdimentary	Sindong Gp., Hanbongsan Gp., Paekchon Gp., Pongchombong Gp., Seson Gp.	7	23.36	312.69	3543.47	3.29
Kgr	Mesozoic	Volcanic	Amnokgang Comp., Pongsan Comp., Namsan Granite	26	31.73	1439.77	4922.51	4.57
Tgr	Mesozoic	Volcanic	Hysan Comp., Pyonggang Comp.	1	26.88	-	1300.10	1.21
Jgr	Mesozoic	Volcanic	Daebo Granite, Tanchon Comp.	124	34.84	1501.58	23208.61	21.52
Jgr ₁	Mesozoic	Volcanic	Foliated Granite	4	22.94	166.30	3289.55	3.05
J ₂	Traissic Jurassic	Sedimentary Volcanic	Jasong Gp.	0	0.00	-	14.45	0.01
K ₀	Mesozoic	Sedimentary	Mygok Fm.	0	0.00	-	2.10	0.00
K ₃	Mesozoic	Sedimentary Volcanic	Yucheon Gp., Jaedok Gp.	42	24.10	409.24	12260.30	11.37
K ₂	Mesozoic	Sedimentary	Hayang Gp., Pongwasan Gp., Neungju Gp., Jinan Gp.	46	26.49	472.97	8888.41	8.24
PR ₃	Proterozoic	Sedimentary	Sangwon Gp., South Tape, Jikyon Gp., Sadangu Gp., Mukchon Gp., Kulyon Gp., Tean Fm.	0	0.00	-	4574.34	4.24
PR ₂	Proterozoic	Sedimentary	Sangwon Gp., North Type, Jikhyon Gp., Sadangu Gp., Yeoncheon Gp., Jangrak-Euiam Gp.	9	23.15	346.81	2905.89	2.69
PRgr	Proterozoic	Plutonic	Buncheon Granite, Hongjesa Granite, Ssancheong Anorthosite (PRan), Riwon Comp., Sakju Comp., Pyoksong Comp., Ongjin Comp., Eason Granite Gneiss, Yonsan Comp.	0	0.00	-	2881.45	2.67
PRv	Proterozoic	Volcanic	Proterozoic Basic Volcanic Rocks	0	0.00	-	7.97	0.01
PRan	Proterozoic	Plutonic	Sancheong Anorthosite	0	0.00	-	237.03	0.22
PR ₁	Proterozoic	Sedimentary	Seosan Gp., Yuli Gp., Machollyong Gp., Musan Gp., Hwanghea Gp.	0	0.00	-	2208.02	2.05
Q ₁	Cenozoic	Quaternary Volcanic	Sedimentary Basalt, Trachytes	0	0.00	-	462.50	0.43
Pgr	Cenozoic	Plutonic	Hangmusan Comp., Pongsan Comp., Namsan Granite	0	0.00	-	120.57	0.11
N	Cenozoic	Sedimentary Volcanic	Hangyong Gp., Yeonil Gp.	9	39.70	1163.50	557.10	0.52
Q ₃	Cenozoic	Quaternary Volcanic	Sedimentary Pumice, Marine Sediments	0	0.00	--	1.99	0.00

Table 2. Continued.

Symbol	Geologic Time	Rock type	Stratigraphic Units	No. well	Average of geothermal gradient (°C/km)	Standard Variation	Area (km ²)	Area ratio (%)
P(T)	Cenozoic	Sedimentary	Anju Gp., Janggi Gp.	0	0.00	-	441.41	0.41
	Paleogene	Volcanic						
ARgr	Archen	Plutonic	Rangrim Granite, Andol Comp., Ryonhwasan Comp.	0	0.00	-	78.80	0.07
AR ₂	Archen	Sedimentary	Granitic Gneiss	8	20.94	344.60	5416.97	5.02
AR ₃	Archen	Sedimentary	Porphyroblastic Gneiss	6	24.65	226.07	2934.57	2.72
AR ₁	Archen	Sedimentary	Rangrim Gp., Gneiss, Migmatic Gneiss	41	24.96	554.87	16168.72	14.99
	Ordovician							
PALv	Pareozoic	Volcanic	Paleozoic Basic Volcanic Rocks	0	0.00	-	166.48	0.15
	Silurian							
	Devonian							
Og ₃	Pareozoic	Carboniferous	Sedimentary Ogcheon Gp.	1	24.63	-	534.16	0.50
	Permian							
PALgr	Pareozoic	Plutonic	Namgang Comp., Chongjin Comp., Tumangang Comp.	0	0.00	-	560.29	0.52
	Carboniferous							
	Devonian							
S	Pareozoic	Sedimentary	Koksan Fm., Wolyangri Fm., Headongri Fm.	0	0.00	-	76.12	0.07
D-C	Pareozoic	Sedimentary	Rimjin Gp.	0	0.00	-	655.69	0.61
P-T	Pareozoic	Sedimentary	Tuman Gp.	1	21.22	-	1030.21	0.96
	Mesozoic							
E	Pareozoic	Sedimentary	Yangduk Gp., Jungwa Gp., Hukgyo Gp., Mujin Gp., Kopung Gp.	0	0.00	-	1017.38	0.94
	Ordovician							
Og ₂	Pareozoic	Sedimentary	Ogcheon Gp.	5	21.18	425.92	1111.83	1.03
	Silurian							
	Devonian							
Og ₁	Pareozoic	Sedimentary	Ogcheon Gp.	3	21.92	196.27	892.17	0.83
O	Pareozoic	Sedimentary	Great Limestone Gp., Singok Gp., Mandal Gp., Sangsori Gp.	2	25.19	185.26	1883.81	1.75
	Ordovician							
C-T	Pareozoic	Sedimentary	Pyeongan Gp.	0	0.00	-	516.89	0.48
	Permian							
	Carboniferous							

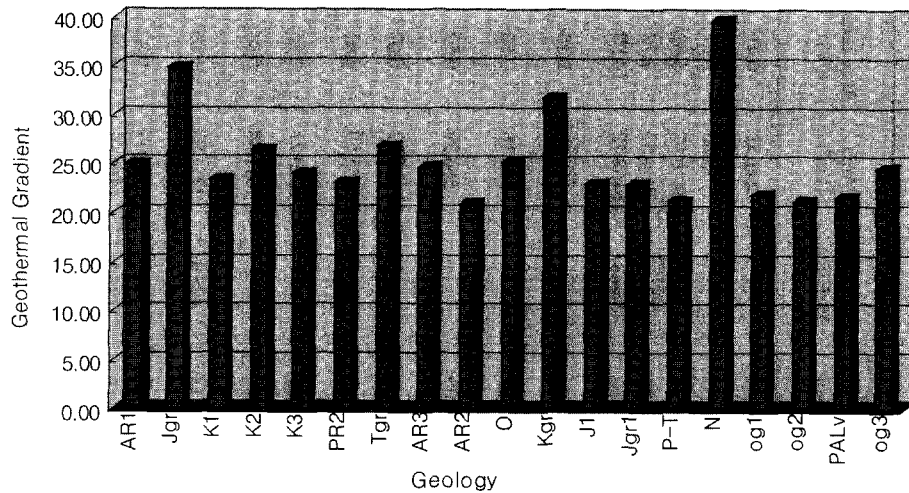


Fig. 2. Average value of geothermal gradient per geology.

ArcView 3.1이다. 온도검층 자료의 DB 구조는 Table 1과 같이 ID, 위치, 지역명, 위경도, UTM, TM 좌표 값, 지온경사율, 지표온도(시작 온도) 등으로 구성되어 있다. 이러한 온도검층자료 공간 DB는 점 속성을 가지며, 자료형태는 Shape 형태이다. Shape 자료 형태는 ArcView에서 사용되는 자료 형태로 그 구조가 간단하고, 소스가 공개되어 있어서 여러 GIS 프로그램과 호환성이 뛰어나서 본 연구에서 사용하였다. 그리고 연구지역인 남한지역의 1:1,000,000 지질도(최위찬 등, 1995)를 공간 DB로 구축하였다. 이러한 지질도 공간 DB는 면 속성을 가지며, 역시 자료형태는 Shape 형태이다. 이러한 온도검층자료 및 지질도 자료의 공간 분포는 Fig. 1과 같다.

2.2. 지온경사율과 지질자료의 관계 분석

지온경사율과 지질과의 연관성 분석을 위해 먼저 지온경사율 및 암상, 지질 및 지질시대와의 관계를 각각 분석하였다. 지온경사율의 최소값은 16.13°C/km 최대값은 94.59°C/km 전체 수는 352개, 평균은 28.95°C/km, 표준편차는 11.4°C/km이다. 먼저 지질자료에 지온경사율 자료를 중첩 분석하여 지온경사율 값을 각 암상별 및 지질시대별로 지온경사율 값을 구하였으며 이것을 지온경사율 자료 개수로 나누어 각 암상별과 지질시대별로 지온경사율 평균값을 구하였다. 이렇게 구한 각 암상별 및 지질시대별 지층의 지온경사율 평균값 및 표준편차값은 Table 2와 같다. 그리고 연구지역인 남한지역(제주도 제외)에 대해 각 암상별 및 지질시대별 면적 분포, 면적 비율도 Table 2에 포함되어 있다.

시추공이 분포하지 않는 지역을 제외한 전체 평균 지온경사율을 값은 29.34°C/km이며, 최소값은 20.94°C/km, 최대값은 39.70°C/km이다. 여기에서 구한 평균 지온경사율을 값은 시추공이 분포하는 지역을 대상으로 계산된 것이므로 우리나라 전체에 대한 평균 지온경사율을 값이 아니라는 것을 고려해야 한다. 즉, 지질과의 관계로 산출된 값이다. 이러한 지질별 지온경사율 평균값을 비교해 보면 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 지온경사율 값을 지질시대별 및 암상별로 분석하였다. 지질시대별 지층의 평균 지온경사율 값을 신생대 지층이 39.70°C/km, 중생대 지층이 30.63°C/km, 고생대 지층이 22.32°C/km, 원생대 지층이 23.15°C/km, 시생대 지

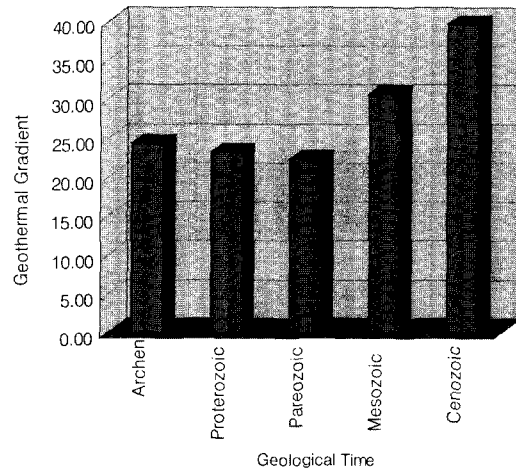


Fig. 3. Average value of geothermal gradient per geological time.

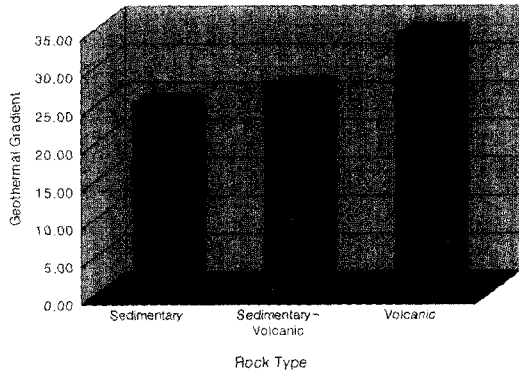


Fig. 4. Average value of geothermal gradient per rock type.

층이 24.34°C/km 값을 보인다(Fig. 3). 즉 신생대 지층이 가장 높고, 중생대, 시생대, 원생대, 고생대 지층 순이며, 시생대, 원생대, 고생대 지층은 22-24°C/km로 비슷한 값의 분포를 보인다. 따라서 시대가 오래될수록 지온경사율을 값이 적어진다는 것을 알 수 있다. 좀더 구체적으로 살펴보면 신생대 신제3기 지층에서 39.70°C/km, 중생대 주라기 지층에서 34.84°C/km, 중생대 백악기 지층에서 31.73°C/km 등 30°C/km가 넘는 상대적으로 높은 지온경사율 값을 갖는다. 반면에 시생대, 고생대 오오드비스기, 사일루리아기, 데본기 지층에서 20.94°C/km, 고생대 페름기, 중생대 트라이아스기 지층에서 21.22°C/km, 고생대 캄브리아기 지층에서 21.92°C/km 등 상대적으로 낮은 지온경사율 값을 보인다.

암상별로 평균 지온경사율 값은 화성암이 33.96°C/km, 퇴적암이 24.78°C/km, 퇴적암, 화산암이 26.85°C/km 값을 보인다(Fig. 4). 따라서 심성암 분포 지역이 지온경사율 값이 가장 높았다. 그리고 구체적인 암상별 평균값 분포를 보면 합경층군, 연일층군에서 39.70°C/km, 대보화강암, 단천복합체에서 34.84°C/km, 압록강복합체, 불국사화강암에서 31.73°C/km 등 30°C/km이 넘는 상대적으로 높은 지온경사율 값을 갖는다. 반면에 화강암질 편마암에서 20.94°C/km, 옥천층군에서, 21.18°C/km, 두만층군에서 22°C/km 등 상대적으로 낮은 지온경사율 값을 보인다.

3. 결론 및 토의

본 연구에서는 남한지역을 대상으로 지온경사율 및 지질과의 상관관계를 분석하였다. 즉 지온경사율과 지질시대, 지온경사율과 암상과의 관계를 정량적으로 분석하였다. 분석 방법은 남한 지역의 지질도 및 총 352

개 공에서 측정된 지온경사율 값을 중첩 분석하였다. 그 결과 남한지역의 전체 평균 지온경사율 값은 29.34°C/km이다. 지온경사율 값을 지질시대별 및 암상별로 분석한 결과, 지질시대별 지층의 평균 지온경사율 값은 신생대 지층이 39.70°C/km, 중생대 지층이 30.63°C/km, 고생대 지층이 22.32°C/km, 원생대 지층이 23.15°C/km, 시생대 지층이 24.34°C/km 값을 보인다. 즉 신생대 지층이 가장 높고, 중생대, 시생대, 원생대, 고생대 지층 순이며, 시생대, 원생대, 고생대 지층은 22-24°C/km로 비슷한 값의 분포를 보인다. 따라서 시대가 오래될수록 지온경사율 값이 적어진다는 것을 알 수 있다. 암상별로 평균 지온경사율 값을 심성암이 33.96°C/km, 퇴적암이 24.78°C/km, 퇴적암, 화산암이 26.85°C/km 값을 보인다. 따라서 심성암 분포 지역이 지온경사율 값이 가장 높았다.

한편 지질시대가 서로 다른 지층이 동일 지역에 층을 이루고 암상의 변화도 나타날 수 있다. 이러한 경우에는 각각의 지층마다 지온경사율과 열전도도가 다르게 나타날 것이다. 그러나 지열류량은 어느 특정지역의 고유의 값을 가지고 있다. 즉, 지열류량에 대한 지온경사율과 열전도도는 서로 반비례하므로 특정지역의 심도별 지열류량 값은 비슷한 값을 갖는다. 그러므로 앞으로는 지열류량 산출 및 이에 대한 연구가 더욱 필요하다.

본 연구의 결과는 1:1,000,000의 지질도와 지온경사율의 관계를 분석한 것이다. 그러므로 광범위한 결과일 수 있으나 개략적인 남한 지역의 지온경사율 분포 파악을 통해 지열개발 및 온천개발 등의 기초자료로 활용될 수 있다. 또한, 향후 좀 더 많은 지온경사율 자료와 보다 정밀한 지질조사 자료를 이용하고, 지질구조 및 모호면 깊이 등 지열과 관계될 수 있는 요인들과 지열과의 상관관계 분석을 하면 정확한 지열 및 온천 개발 적지 선정에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

김형찬, 송무영 (1999) 지온경사 산출을 위한 효율적인 온도검층자료 이용방법 연구. 자원환경지질학회지, 32권, 5호, p. 503-517.
 임정웅, 김형찬, 염병우(1989) 한반도의 지열류량 분포도 작성연구. 과학기술처(KR-89-(B)-12), 61p.
 임정웅, 염병우, 조병욱, 김형찬, 이종민(1992) 한국온천의 지열적 특성연구, 과학기술처(KR-91-(B)-3), p. 21-28.
 장정진 (1970) 한국의 지열류량. 지질광상, 10, 국립지질광물연구소, p. 23-29.
 최위찬 (1995) 1:1,000,000 지질도, 한국자원연구소.
 한 욱, D.S. Chapman (1985) 한국주변지역의 지열류량

- 과 환산지열류량에 관하여. 지질학회지, 제21권, 2호, p. 74-78.
- 한국지질자원연구원(1983-1997) 온천조사보고서, 한국지질자원연구원.
- Lim, J.U. (1995) Geothermal Potential in the Republic of Korea : Terrestrial heat flow and geothermal energy in ASIA: ed. by M.L. Gupta and M. Yamano, Oxford & IBH PUBLISHING CO., p. 442-449.
- Okubo, Y. (1993) Temperature gradient map of the Japanese islands. Journal of the Geothermal Research Society of Japan, v. 15, n. 1, p. 1-21.
- Turcotte, D.L. and Schubert G. (1982) Geodynamics Applications of continuum Physics to geological problems. Jhon Willey & Sons, New York, 450p.

2002년 8월 17일 원고접수, 2002년 4월 26일 게재승인.