

지온경사 산출을 위한 효율적인 온도검층자료 이용 방법 연구

김형찬* · 송무영**

A Study on the Effective Utilization of Temperature Logging Data for Calculating Geothermal Gradient

Hyoung Chan Kim* and Moo Young Song**

ABSTRACTS : The purpose of this study is to verify a more effective technique for calculating geothermal gradient. This study examines 370 data of temperature-logging having been collected since 1985. The data are divided into three different grades according to the type of temperature-depth plots: 204 data show typical linear gradient (Grade A); 126 data do not explicitly show the gradient because of various external effects such as water flow (Grade B); and the rest 40 data do not show the gradient at all (Grade D). The new technique for calculating geothermal gradient is to be required to use Grade-B data more effectively. This new technique includes (1) calculating the independent depth of atmospheric temperature in the earth; (2) drawing a distribution map of subsurface temperature by using Grade-A data at the independent depth; and (3) recalculating geothermal gradient of Grade-B data by using the distribution map of subsurface temperature, borehole depth, and bottom temperature of Grade-B data. As a result, 330 data--both Grade-A and Grade-B data--can be used to draw a distribution map of geothermal gradient. The map clearly distinguishes anomaly areas, and helps interpret their relations to the distribution of hot springs, geology, geological structures, and geophysical anomaly areas. These new results reveal that the average of geothermal gradients in South Korea is 25.6°C/km, when calculated according to the Kriging method.

서 론

열의 이동은 전도, 대류, 복사의 세 가지 방법에 의하여 일어난다. 이 중 지구내부의 열은 대부분 전도에 의해 이동되어 지표로 전달된다 (한옥, 1986). 그러므로 지구내부 열의 이동에 대해서는 주로 전도에 의한 연구를 하고 있다.

기본적인 열의 전도이론은 다음식으로 나타낼 수 있다. 한 매체를 통하여 흐르는 열량은

$$Q = KS \frac{T_2 - T_1}{l} t$$

Q: 열량, K: 매체의 열전도도, S: 매체의 단면적, $T_2 - T_1$: 두면과의 온도차, l: 매체의 길이, t: 열전달 시간

위식을 보면 열량 Q는 매체의 단면적 S에 비례하고 매체 양쪽 끝 두면간의 온도차 $T_2 - T_1$ 및 시간 t에 비례하며, 매체 사이의 거리 l에 반비례한다. 이때 비례상수 K를 열전도율이라 한다.

이 식을 지구 내부의 열전달 관계로 응용하면 단위면적당, 단위시간당 흐르는 열량 $q (= \frac{Q}{St})$ 를 지열류량이라고 할 때 지각의 열전도도 K와 지온경사 (geothermal gradient) ΔT 와의 관계는 $q = K \times \Delta T$ 이다. 즉, 지질의 열전도도 특성과 지온경사 산출은 지열의 특성을 파악하는 데 중요한 요소이다. 오래전부터 외국에서는 수많은 온도검층자료를 이용하여 지온경사분포도를 작성하였으며, 이를 이용하여 지열의 분포상황과 지질 및 지질구조와의 관련성을 판단하고 지열에너지 개발에 활용하고 있다. 고지열지대인 일본에서는 backarc와 forearc의 지온경사 비교연구 (Okubo, 1993)가 발표된 바 있으며, 호주에서는 석유시추공 및 지하수개발 시추공에서 얻어진 수십년간의 온도검층자료를 종합하여 호주 대륙의 분지별 특성을 연구한 바

* 한국자원연구소 지구환경연구부 (Earth Environment Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejon 305-350, Korea)

** 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National Univ., Taejon 305-764, Korea)

있다 (Cull, Conley, 1983). 국내에서는 한반도의 지열에 관한 연구가 1970년도 (장정진, 1970)에 처음 시작되었다. 그 후 부분적으로 일부지역에 대한 지열 연구가 있었으며, 한반도 주변지역의 지열류량연구 (한옥외, 1985)가 발표되었다. 최근에 한반도의 지열류량 분포도 작성연구 (임정웅 외, 1989)가 발표되면서 지속적인 자료 수집으로 보다 보강된 한국의 지열특성 (임정웅 외, 1992; Lim, 1995)에 관한 연구가 발표되었다. 그러나 전국적인 지열류량 분포를 파악하기에는 아직 자료가 부족한 편이다.

이 연구의 목적은 남한의 지열특성을 파악하기 위한 기초적인 것으로 온도검층자료 (Fig. 1)를 효율적으로 이용하여 많은 자료의 지온경사를 산출하고 이의 타당성을 파악하는데 있다. 현재 국내에 온도검층자료는 비교적 많지만 지열연구에 이용할 만한 적합한 자료는 적은 편이다. 심도별 온도검층을 하였을 때, 검층곡선이 전형적인 일직선 형태의 온도-심도 관계를 보이면 큰 문제는 없다. 그러나 지하수 유동 또는 지층 변화에 의해 불규칙한 여러가지 형태의 온도-심도 관계를 보일 경우에는 지온경사 산출이 어렵다. 그러므로 이번 연구에서 기존의 온도검층자료를 질적 분류하고 자료의 질이 어느 정도 떨어지더라도 이용할 수 있는 지온경사 산출방법을 제시하고자 하였다. 또한 양질의 지온경사 자료를 이용한 남한의 지온경사분포와 새로 개산출한 지온경사를 포함한 지온경사분포를 비교하여 적용의 타당성을 파악하고자 하였다.

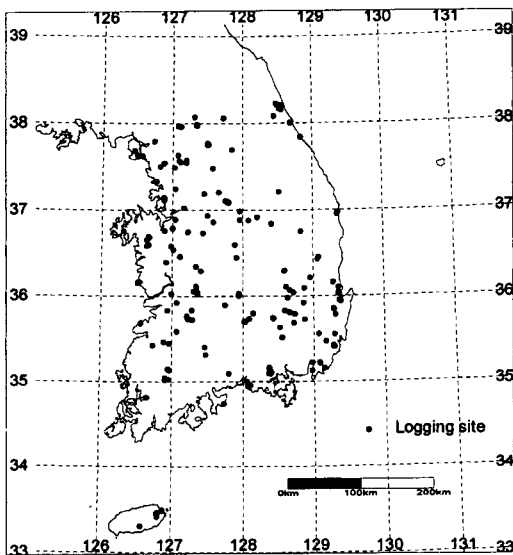


Fig. 1. Distribution of temperature logging sites.

온도검층

온도검층을 위한 시추공은 굴착 작업 후 공내의 유체가 지온과 평형상태를 이루도록 충분히 안정시켜야 한다. 굴착작업 중 공내에 Rod 및 Bit의 회전으로 공벽 및 공 바닥에 마찰열이 잔재하며, 또한 시추공을 굴착할 때 이수의 주입이 병행되어 실제의 지온을 변화 시키기 때문이다 (Hearst외, 1985). 대체로 시추당시의 계절에 따라 기온이 높은 경우, 지온보다 높은 온도를 갖는 이수를 주입하게 되며, 반면에 겨울철에 시추를 하게되면 낮은 온도의 이수가 주입된다. 이렇게 시추공에 주입되는 이수의 비자연적인 열 공급으로 인하여 시추공내의 온도는 안정적이지 못하다. 그러므로 시추굴착작업 후 지온과 물이 평형상태를 이루도록 시추공을 장기간 안정시켜야 한다. 또한 공내의 유체가 교란되지 않도록 지표에서 공 바닥으로 센서를 하강시키면서 측정하여야 한다.

이번 연구에 사용된 온도검층자료는 3종류의 온도검층기로 획득 되었다. 일반 전자온도계에 케이블을 확장시켜 센서와 연결하여 제작한 온도계와 Geologger-3400 (OYO사), RG-pclogger (Robertson Geologging Ltd.)를 사용하였다. 각 온도검층기는 표준연구소에서 검증받은 표준온도계와 비교 보정하였다. 또한 온도검층 전후의 온도를 비교 보정하였으며, 센서의 감응 정도를 고려하여 센서의 하강 속도를 조절하였다.

지온경사유형

기반암내 시추공에서의 온도검층도는 다양한 유형의 변화를 보인다. 가장 전형적인 온도검층도의 유형은 일직선상의 형태를 보인다. 그러나 파쇄대를 통하여 시추공내의 유체가 유동되는 경우에 온도검층도는 여러가지 유형의 변화가 나타난다. 또한 암석의 열전도도에 따라 심도별 온도관계의 유형이 다르다. 이러한 여러가지 유형의 변화를 분석하여 지온경사를 산출하고자 하였다.

지온경사를 구하는데 가장 적합한 경우는 시추공내에 유체의 흐름이 거의 없는 곳이다. 이러한 곳은 공내의 유체가 지온과 평형상태가 되면 지온경사는 대부분 일직선형태를 보인다 (Fig. 2(a)). 때로는 공내의 유체 흐름은 거의 없으나 지온경사가 2개이상의 직선형 형성하는 경우도 있다 (Fig. 2(b)). 이러한 경우는 시추공내의 지질이 여러층으로 구성되어 각 지층의 열전도도가 다를 때 나타나는 현상이다. 한편, 시추공내 지하

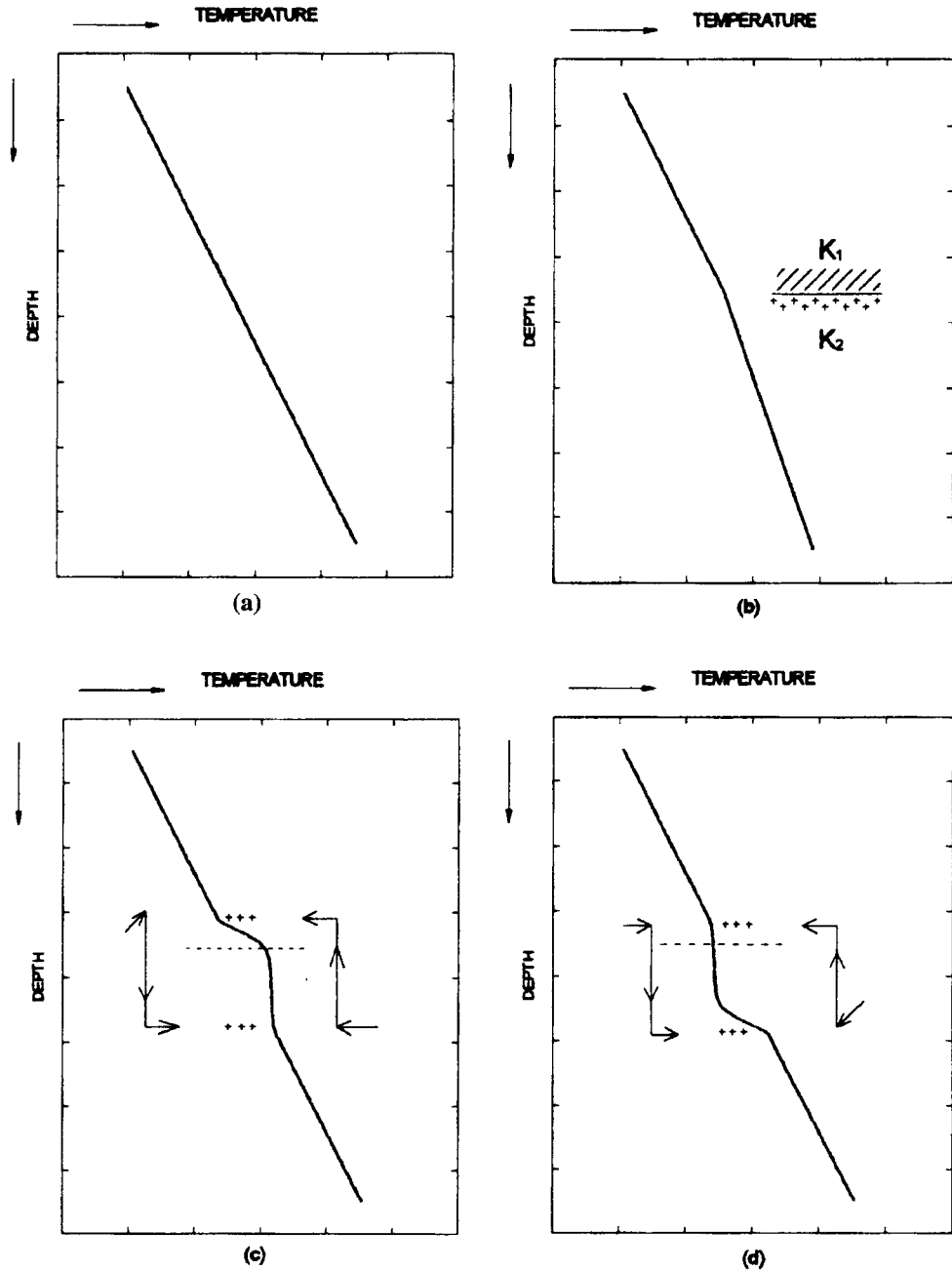


Fig. 2. Schematic temperature profile to show effect of various types of water flow (modified from Beck *et al.*, 1988).

수 유동이 있는 경우에는 Fig. 2(c), Fig. 2(d)형태로 나타난다. 일부 구간에서만 이러한 현상이 일어나면 그 구간을 제외하고 지온경사를 산출하면 되겠으나 상당히 복잡한 현상을 보이면 지온경사 산출은 불가능하다. 그리고 시추공에서 지하수가 용출하는 경우가 있다.

이러한 경우는 열 전달과정 중 대류(convection)에 의한 것으로 유체가 피압되어 열을 가지고 밖으로 나간다. 그러므로 이 때의 온도검층도를 보면 지표부근의 지온경사는 낮게 나타나며, 지온경사유형은 Fig. 2(c, d)에서 유체의 유동이 있는 부분의 유형(점선부분이 지

표)으로 나타낸다.

지온경사 산출

지온경사 산출 방법에는 여러가지가 있다. 그 중에서 가장 정확한 방법이 온도검층자료를 이용한 온도-심도 관계도에서 전형적인 일차식(Fig. 2(a))을 보이는 구간의 기울기를 구하는 것이다. Fig. 2(c), (d)경우일 때 일부 구간에서 유체의 이동에 의한 영향으로 나타나는 현상이므로 이러한 일부구간을 제외하고 일차식을 보이던 마찬가지로 기울기를 구할 수 있다.

그러나 Fig. 2(b)와 같이 2개이상의 직선식을 보이는 경우와 또는 심한 유체의 유동에 의해 일차식을 보이지 않는 경우가 있다. 이러한 경우에는 공저온도와 그 지방의 연평균기온을 적용하여 전체적인 구간의 평균 지온경사를 구하기도 한다. 그러나 연평균기온은 해마다 변하는 것이며, 직접적으로 지하 내부에서 전달된 온도가 아니므로 자료의 신뢰도가 떨어진다.

또한 심부 시추공으로 검층기가 공 바닥까지 들어가지 못하는 경우, 또는 검층기가 없을 때 측정하는 방법이 있다. 이 방법은 시추중에 이수를 주입하면서 이수의 순환시간과 이수 주입시의 온도와 순환되어 나온 이수의 온도를 측정하여 공저온도를 추정하는 것이다. 이와 같이 각 심도별 공저온도를 구하여 회귀분석법으로 일차식의 기울기를 구하는 것이다(Bodmor, 1984). 이러한 방법은 간접적인 지온경사 측정이므로 자료의 신뢰도는 가장 떨어진다.

이번 연구에서는 지하수 유동 등에 의해 불규칙한 형태를 보이는 온도검층자료를 합리적으로 이용할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 수집된 온도검층자료 중 전형적인 일직선 지온경사를 갖는 자료를 이용하여 지표온도 분포를 알아내고, 불규칙적인 온도검층자료의 공저온도와 지표온도분포도에서 그 위치를 찾아 지표온도를 구하여 지온경사를 산출하는 방법이다. 그러나 지표온도는 대기의 영향을 받기 때문에 일정한 온도를 갖는다고 볼 수 없다. 그러므로 대기의 온도가 영향을 미치지 않는 심도 (향온심도)에서의 지온 자료가 필요하다. 즉, 향온심도의 결정이 우선적으로 필요하고 그 심도에서의 지온분포를 구한다. 그 다음 향온심도에서의 지온과 공저온도 및 심도를 이용하여 지온경사를 산출하였다.

향온심도산출

우선 대기온도가 지하에 영향을 미치는 한계심도를

구하기 위하여 Fourier의 열전도 방정식을 이용하였다. 또한 대기온도 변화는 일종의 파동방정식으로 표현할 수 있으므로 두식을 복합하여 유도된 다음과 같은 이론식(Torcotte, 1982)을 적용하였다.

$$T = T_0 + \Delta T \exp(-y\sqrt{\omega/2\kappa}) (\cos \omega t \cos y\sqrt{\omega/2\kappa} + \sin \omega t \sin y\sqrt{\omega/2\kappa}) = T_0 + \Delta T \exp(-y\sqrt{\omega/2\kappa}) \cos(\omega t - y\sqrt{\omega/2\kappa}) \quad (1)$$

T: 심도 y에서의 시간중속적 온도, T₀: 지표 평균온도, ΔT: 온도변화차/2, κ: 열확산계수, ω: 각속도, y: 심도, t: 시간

윗 식을 그래프상에 도시하면 Fig. 3와 같다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 시간중속적인 온도변화의 폭은 심도(y)가 증가하면 지수적으로 감소하며, 심도에 따른 위상차는 $y\sqrt{\omega/2\kappa}$ 를 가지고 변화한다는 것을 알 수 있다. 또한 시간중속적 함수를 제외하고 지표온도 변화에 따른 심도 y에서의 온도변화폭을 T_y 라고 하면

$$T_y = \Delta T \exp(-y\sqrt{\omega/2\kappa}) \quad (2)$$

로 표시할 수 있다. 그러나 윗식은 파동방정식에서 유도되었으므로 온도변화차를 구하기 위해서 심도 y에서의 온도변화차를 T'_y 라고 하면,

$$T'_y = 2T_y = 2\Delta T \exp(-y\sqrt{\omega/2\kappa})$$

여기서 2ΔT는 지표에서의 온도변화차이므로 2ΔT=ΔT'로 표시하면,

$$T'_y = \Delta T' \exp(-y\sqrt{\omega/2\kappa}) \quad (3)$$

로 유도할 수 있다.

대전의 기온 연변화가 지중에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1993년도 대전관측소 자료(기상청, 1993)를 이용하였다. 지표면에서의 겨울철 1월 평균온도는 0.3°C이며, 여름철 7월의 평균온도는 25.6°C이다. 이를

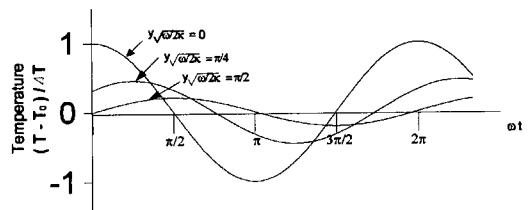


Fig. 3. The temperature variation with depth due to a time periodic surface temperature.

Table 1. Thermal diffusivity (κ) of some Common Fluids at 15°C and Atmospheric (Turcotte, 1982).

Properties	Thermal diffusivity (mm ² /s)
Air	20.2
Water	0.14
Mercury	4.2
Ethyl alcohol	0.099
Carbon tetrachloride	0.084
Olive oil	0.092
Glycerine	0.098

(1)식에

$$T_0: 12.95^\circ\text{C} \quad \Delta T: 12.65^\circ\text{C}$$

$$\omega: 1.99 \times 10^{-7} \text{ rad/s} \quad t: 31536000 \text{ s (365 day)}$$

$$\kappa: 0.756 \text{ mm}^2/\text{s}$$

을 적용하였다. 열확산계수는 편차가 최소값을 갖도록 보정하였다. Table 1을 참고로 열확산계수 2 mm²/s에서 0.01 mm²/s까지 변화 조정하여 최소편차를 갖는 열확산계수를 구한 결과 대전관측소 지표면은 0.756 mm²/s이었다. 이의 결과는 Table 2 및 Fig. 4와 같다.

열확산계수 κ 가 1 mm²/s 일때 편차는 0.363이며, κ 가 0.756 mm²/s일 때 최저편차 0.28이다. 그러므로 최저편차를 갖는 열확산계수값을 이용하여 각 심도별 온도변화를 도시한 Fig. 4에서보면 지표에서의 온도변화와 5 m심도에서의 온도변화는 약 3개월의 위상차를 가진다.

한편 지중 5 m 심도에서의 실측온도와 이론적 온도차이는 약 1.8°C가 된다. 이는 열확산계수를 인수로 한 심도 y의 함수 보정이 필요하나 이번 연구에서는 실시하지 않았다.

이와같은 방법으로 1993년도 기상연보 자료중 지중

Table 2. Result of observed and theoretical temperatures at various depths in Taejon.

대전기상관측소(지점번호133)

(단위 : °C)

심도	지표		0.05 m		0.1 m		0.2 m		0.3 m	
월	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값
1	0.30	0.30	0.50	0.53	1.00	0.76	1.70	1.22	2.60	1.67
2	3.10	1.99	2.60	2.08	2.90	2.17	3.00	2.36	3.50	2.57
3	7.10	6.63	6.20	6.54	6.40	6.47	6.10	6.34	6.40	6.24
4	14.20	12.95	12.90	12.72	12.80	12.51	12.00	12.10	11.60	11.72
5	20.40	19.28	19.20	18.96	18.90	18.66	17.90	18.08	17.00	17.52
6	24.90	23.91	24.20	23.59	23.90	23.29	23.10	22.68	21.90	22.10
7	25.60	25.60	25.00	25.37	24.70	25.14	24.20	24.68	23.40	24.23
8	24.00	23.91	24.00	23.82	23.70	23.73	23.60	23.54	23.20	23.33
9	23.90	19.28	23.40	19.36	23.10	19.43	23.20	19.56	22.60	19.66
10	15.60	12.95	15.60	13.18	15.60	13.39	16.40	13.80	16.70	14.18
11	9.40	6.63	9.70	6.94	9.70	7.24	10.50	7.82	11.50	8.38
12	1.60	1.99	2.60	2.31	2.80	2.61	3.80	3.22	4.80	3.80

심도	0.5 m		1 m		1.5 m		3 m		5 m	
월	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값	측정값	이론값
1	3.60	2.57	6.60	4.72	8.80	6.67	12.90	10.98	15.50	13.45
2	3.90	3.01	5.60	4.26	7.10	5.61	10.90	9.36	14.60	12.38
3	6.30	6.11	6.60	6.13	7.30	6.52	9.80	8.70	13.60	11.47
4	10.70	11.05	9.60	9.83	9.30	9.15	9.90	9.18	12.80	10.95
5	16.20	16.49	14.00	14.36	12.50	12.80	11.00	10.67	12.60	10.97
6	20.80	20.98	18.10	18.51	15.90	16.49	13.10	12.77	12.70	11.52
7	22.80	23.33	20.70	21.18	18.70	19.23	15.30	14.92	13.30	12.45
8	23.00	22.89	21.70	21.64	20.00	20.29	17.00	16.54	14.20	13.52
9	22.20	19.79	21.70	19.77	20.60	19.38	18.10	17.20	15.10	14.43
10	17.20	14.85	18.60	16.07	18.90	16.75	18.30	16.72	15.80	14.95
11	12.50	9.41	14.60	11.54	15.70	13.10	17.30	15.23	16.10	14.93
12	6.30	4.92	9.50	7.39	11.80	9.41	15.30	13.13	16.00	14.38

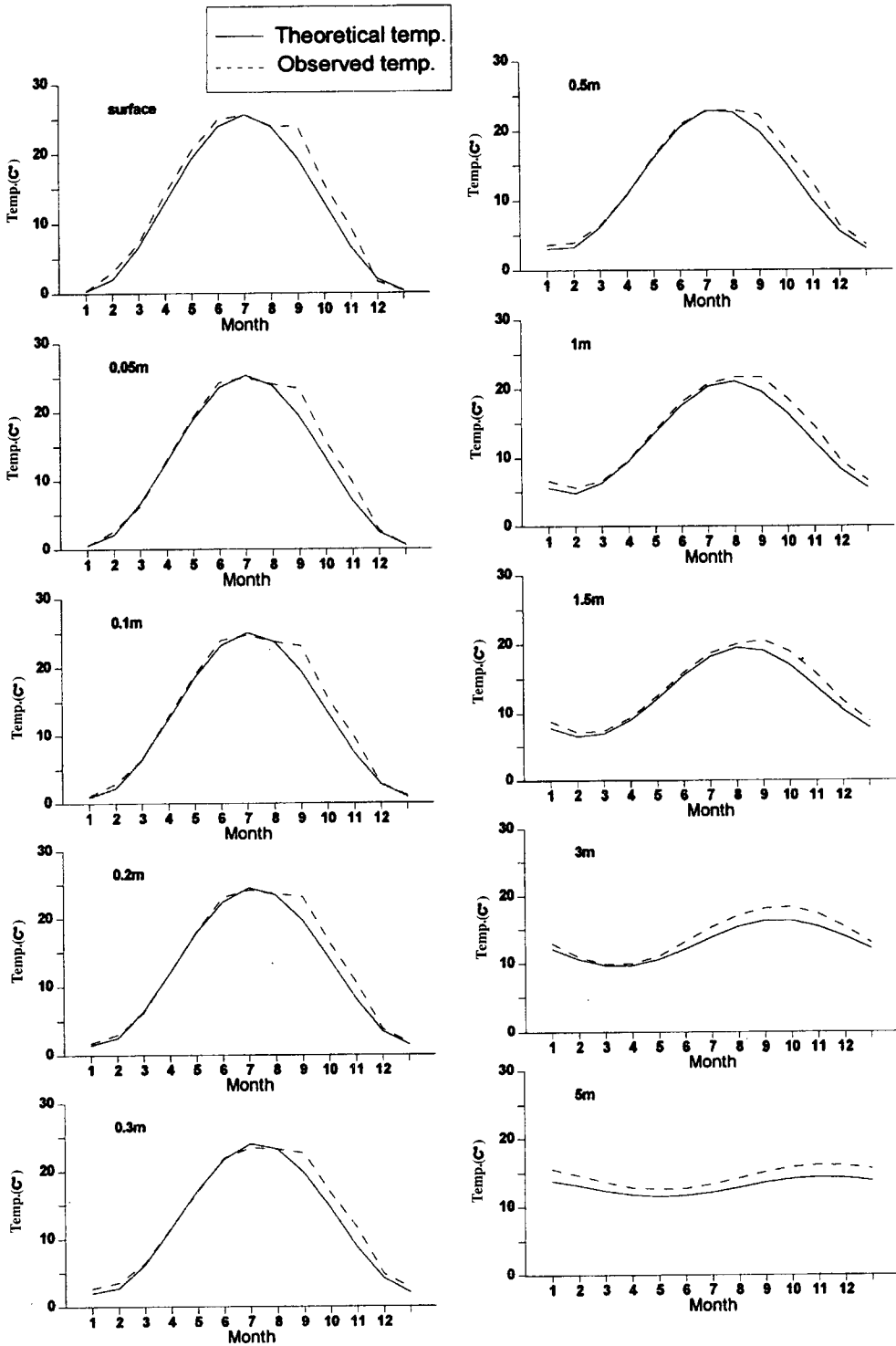


Fig. 4. Variation of observed and theoretical temperatures at surface and various depths in subsurface in Taejon.

Table 3. Estimated thermal diffusivity and standard deviation in synoptic station.

관측소	열확산계수 (mm ² /s)	편 차
춘 천	0.703	0.108
강 룡	0.850	0.601
인 천	0.600	0.169
울 룡도	0.570	0.202
수 원	0.602	0.155
대 전	0.756	0.283
부 산	0.710	0.217
목 포	1.482	0.252
여 수	0.810	0.207
제 주	1.334	0.362
평 균	0.842	

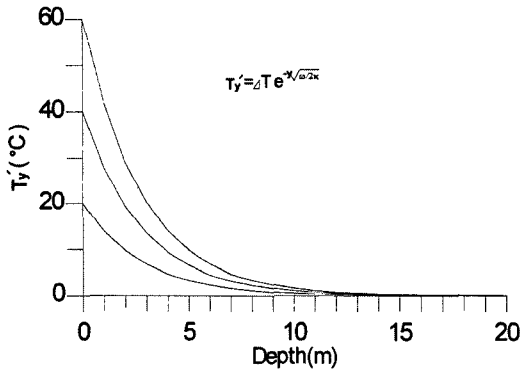


Fig. 5. Influence of atmospheric temperature to subsurface with depth.

온도 5 m 심도까지 측정된 춘천, 강릉, 인천, 울릉도, 수원, 대전, 부산, 목포, 여수, 제주지역의 기상관측소 자료를 이용하여 각 관측소의 열확산계수를 구하였다 (Table 3). 목포와 제주에서 열확산계수가 1.482, 1.334 mm²/s로 높은 값을 보이며 나머지 지점에서는 0.85~0.57 mm²/s의 값을 갖는다. 전체적인 평균값은 0.842 mm²/s이다. 이에 따라 대기온도의 영향을 받지 않는 심도를 구하기 위하여 1993년도 일 최고기온 및 최저기온과 열확산계수 평균값인 0.842 mm²/s를 적용 산출하였다.

1993년도 최저기온은 인제의 -23.6°C, 최고기온은 제주 34.5°C로 약 60°C의 기온차를 보였다. 이에따라 20, 40, 60°C의 기온차이를 가질 때, 식 (3)에 적용하여 구한 심도별 온도변화의 차이를 Fig. 5와 같이 도 시하였다. 여기서 지표에서의 온도차 60°C일 때 지하에서 온도차 0.05°C미만을 보이는 심도는 20.0 m 이

하다. 즉 20.0 m 심도 이하에서는 대기온도의 영향을 받지 않는 심도라 할 수 있으며, 이 심도에서는 지하심부로 부터 전달되는 순수한 지온을 가지고 있다고 할 수 있다.

20 m 심도의 지온분포

수집된 온도검층자료 중 전형적인 일직선 유형의 지온경사 자료를 갖는 것을 A등급 (Table 4)으로 분류하였다. A등급 온도검층자료에서 각각 20 m 심도의 지온을 선별하였으며, 한반도 전체적인 20 m 심도의 지온분포 상황을 판단하기 위해 각 측정지점 사이 구간의 특성을 예측할 수 있는 등지온선분포도 (Fig. 6)를 작성하였다. Fig. 6은 Surfer 프로그램 (Golden software Co.)을 이용하여 Kriging의 단순평균법 (linear method)으로 지온분포를 계산한 것이다. 여기서 지형적인 관계도 고려되어야 하겠으나 자료자체가 지표를 기준으로 얻어진 것이므로 보정하지 않았다. Fig. 6의 그림을 보면 전체적인 지온의 범위는 11.2~18.3°C이며, 한반도 동남부의 포항주변에서 가장 높은 지온분포를 보이고 있다. 한반도의 20 m 심도 지온의 평균값은 Kriging법의 산출 평균법을 이용할 때 14.1°C이다. 자료의 분포를 보면 일부는 집중되어 있기도 하고, 어느지역은 자료가 거의 없는 지역이 있다. 그러나 Kriging법을 이용하였을 때 자료의 빈곤지역도 지온계산이 되어진다. 그러므로 이러한 지역에 대한 지온값 이용에 대해서는 신중히 고려해야 한다. 또한 자료가 증가하면 항시 재평가가 실시되어야 한다.

지온경사분포

Fig. 6을 이용하여 A등급의 자료는 위치에 따른 항온심도 (20 m 심도)의 온도와 공저온도, 심도간에 다음과 같은 식으로 지온경사를 산출하였다 (Table 4).

$$\Delta T = \frac{T_d - T_{20}}{D - 20} \times 1000 \text{ (}^\circ\text{C/km)}$$

ΔT : 지온경사 (°C/km) T_d : 공저온도 (°C)

T_{20} : 20 m심도에서의 지온 (°C) D : 심도 (m)

Fig. 7은 A등급 지온경사자료 204개만을 이용한 한반도의 지온경사분포이며, Fig. 8은 A등급의 지온경사와 20 m심도의 지온분포를 이용하여 재산출한 지온경사 126개 (B등급)를 추가하여 작성한 지온경사 분포도이다. 이 두 그림을 비교 분석하면 다음과 같다.

Table 4. Temperature logging sites and results.

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Q'ty
1	2000001	127.0912	37.5692	580	29.2	14.6	26.2	B
2	2000002	127.0250	37.4886	742	34.3	17.1	23.9	A
3	2000003	127.0750	37.6368	796	30.1	13.5	21.4	B
4	2000004	127.0750	37.6368	862	34.8	13.5	25.1	A
5	2000005	127.1120	37.5521	814	36.2	14.7	27.2	B
6	2000006	127.1120	37.5531	498	27.1	14.6	26.3	A
7	2000007	127.1101	37.5506	668	31.6	14.4	26.4	A
8	2000008	126.8692	37.5353	672	28.3	13.3	23.3	A
9	2000009	126.8800	37.5439	762	30.4	13.5	22.9	A
10	3200001	126.8164	37.4981	542	25.1	13.4	22.4	A
11	3310001	127.0396	37.2474	700	29.0	13.0	23.4	A
12	3340001	127.1644	37.0237	598	26.6	13.6	19.3	A
13	3360001	127.4512	37.1916	797	32.0	13.4	23.4	A
14	3360002	127.4469	37.1905	788	31.7	13.5	23.5	A
15	3370001	127.6609	37.2102	816	32.7	13.3	24.2	A
16	3380001	127.5749	37.4797	604	29.9	14.6	26.3	A
17	3390001	126.8727	37.1428	690	28.7	15.5	19.1	A
18	3390002	126.8771	37.1375	700	27.7	15.2	18.3	B
19	3390003	126.8827	37.1377	706	28.4	15.1	19.3	B
20	3390004	126.8767	37.1117	644	28.9	14.4	23.2	B
21	3390005	126.8771	37.1134	638	28.2	14.4	23.0	A
22	3410001	126.5669	37.6280	688	29.1	13.5	23.3	B
23	3450001	126.7683	37.3344	654	27.2	14.0	21.0	A
24	3470001	127.1975	37.5475	192	18.2	13.9	25.0	A
25	3470002	127.1960	37.5474	374	22.4	14.4	22.9	A
26	3470003	127.1957	37.5480	236	19.1	14.1	23.8	A
27	3470004	127.1972	37.5473	524	25.8	15.0	21.4	A
28	3470005	127.1950	37.5457	700	30.1	14.4	22.9	A
29	3470006	127.1972	37.5502	656	29.0	13.7	24.0	A
30	3470007	127.1982	37.5502	170	18.1	-	-	D
31	3470008	127.1975	37.5833	730	30.8	13.1	24.8	A
32	3480001	126.7318	37.7912	676	31.1	13.1	27.5	B
33	3490001	126.4538	37.6867	644	27.9	12.3	24.9	A
34	3490002	126.4901	37.6374	818	31.5	13.8	22.2	A
35	3510001	127.0726	37.9714	710	31.0	14.2	24.0	A
36	3560001	127.5008	37.7669	936	35.7	12.9	25.1	A
37	3560002	127.5090	37.7566	784	34.1	13.3	27.3	A
38	3560003	127.4948	37.7582	668	28.4	12.3	24.8	A
39	3560004	127.5011	37.7678	960	35.9	13.0	24.3	A
40	3560005	127.4980	37.7565	102	14.7	13.1	23.3	A
41	3560006	127.4984	37.7532	660	28.8	12.5	25.8	A
42	3560007	127.5057	37.7590	508	26.7	13.2	27.9	A
43	3560008	127.5071	37.7564	746	32.9	13.0	27.8	A
44	3560009	127.5066	37.7632	630	29.4	13.5	26.3	A
45	3560010	127.5119	37.7549	582	26.8	12.5	27.0	A
46	3560011	127.5111	37.7538	850	35.3	12.5	26.7	A
47	3560012	127.4999	37.7543	765	33.0	13.0	26.1	A
48	3570001	127.1151	37.9639	592	29.1	14.3	25.3	A
49	3570002	127.3417	37.9815	494	34.8	19.1	33.8	A
50	3570003	127.3447	37.9804	158	26.3	-	-	D
51	3570004	127.3450	37.9823	370	35.0	19.0	45.7	B
52	3570005	127.3443	37.9853	500	32.8	14.7	37.9	A
53	3570006	127.3434	37.9806	216	31.2	19.0	62.0	B
54	3570007	127.3457	37.9800	428	35.5	19.0	40.4	B
55	3570008	127.3405	37.9801	258	25.5	16.4	37.8	A
56	3570009	127.3440	37.9850	500	32.6	15.1	36.5	A
57	3570010	127.3501	37.9749	190	16.9	11.8	35.7	A
58	3570011	127.3495	37.9794	226	23.5	18.9	22.4	B
59	3570012	127.3472	37.9816	670	44.3	19.0	38.9	B
60	3570013	127.3131	38.0654	704	30.2	17.5	18.6	B
61	3630001	127.7239	38.0566	688	31.1	12.6	27.6	A
62	3630002	127.7308	38.0552	698	31.0	12.2	27.9	A

Table 4. Continued.

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Qty
63	3660001	127.8434	37.6974	656	28.4	11.3	27.0	A
64	3660002	127.8423	37.6959	672	29.8	13.9	26.0	A
65	3730001	128.5183	37.2071	838	31.2	12.9	22.3	B
66	3910001	128.8386	37.8420	674	34.4	13.3	32.1	A
67	3910002	128.8276	37.8405	500	28.0	14.1	29.4	A
68	3910003	128.8325	37.8375	590	30.5	13.3	30.2	B
69	3910004	128.8263	37.8422	550	29.6	13.9	31.4	A
70	3910005	128.8372	37.8399	676	33.8	13.3	31.2	B
71	3920001	128.5090	38.2093	366	34.5	15.4	55.1	B
72	3920002	128.5512	38.1702	498	31.1	14.9	34.0	B
73	3920003	128.5074	38.2099	364	42.3	15.4	78.2	B
74	3920004	128.5053	38.2036	606	39.6	15.4	41.3	B
75	3920005	128.5109	38.2073	338	29.2	15.4	41.8	A
76	3920006	128.5066	38.2043	690	50.8	15.4	52.9	B
77	3920007	128.5098	38.2043	506	38.8	12.7	54.5	A
78	3920008	128.5007	38.2036	576	34.3	15.4	34.0	B
79	3920009	128.5289	38.1653	726	37.8	14.3	32.3	A
80	3920010	128.5333	38.1653	900	42.0	14.9	35.0	A
81	3920011	128.5509	38.1975	536	47.7	15.2	63.0	B
82	3920012	128.4807	38.2241	670	29.7	15.3	22.1	B
83	3920013	128.5014	38.2036	704	38.8	15.4	34.2	B
84	3920014	128.5461	38.2068	688	48.0	13.5	54.9	A
85	3920015	128.5420	38.2084	754	47.8	14.1	47.2	A
86	3920016	128.5679	38.1939	413	31.9	15.0	42.8	B
87	3920017	128.5092	38.2051	700	49.5	15.4	50.1	B
88	3920018	128.5519	38.1597	726	36.1	14.8	30.2	B
89	3920019	128.5553	38.1544	680	33.5	14.6	28.6	B
90	3920020	128.5078	38.2074	538	40.9	15.4	49.1	B
91	3920021	128.5492	38.2073	410	44.9	15.2	76.1	B
92	3920022	128.5479	38.1984	560	44.7	15.2	54.8	B
93	3960001	128.6874	38.0038	600	31.1	12.6	32.3	A
94	3960002	128.4482	38.0788	450	27.2	13.9	30.9	B
95	4160001	127.0139	36.5399	804	29.7	15.8	17.7	B
96	4160002	127.1098	36.4625	652	28.0	15.0	20.6	B
97	4160003	127.1077	36.4617	620	29.3	15.0	23.9	B
98	4160004	127.1095	36.4650	865	32.8	15.0	21.1	B
99	4170001	127.2213	36.7512	540	25.3	13.7	22.5	A
100	4170002	127.2206	36.7445	630	28.2	16.6	19.3	A
101	4180001	127.0025	36.7822	250	25.2	14.3	47.5	A
102	4180002	127.0025	36.7822	172	22.6	-	-	D
103	4180003	127.0025	36.7822	224	20.3	17.1	16.4	A
104	4180004	127.0025	36.7822	342	19.1	-	-	D
105	4180005	126.9820	36.5829	484	27.1	16.2	21.0	A
106	4180006	126.8893	36.7594	298	29.3	15.7	49.0	B
107	4180007	126.8888	36.7569	370	26.9	15.7	32.3	A
108	4180008	126.8888	36.7576	274	24.6	15.7	34.9	B
109	4180009	126.8903	36.7607	13	13.5	-	-	D
110	4180010	126.8899	36.7607	20	16.1	-	-	D
111	4180011	126.8900	36.7615	56	22.6	-	-	D
112	4180012	126.8890	36.7615	38	29.0	-	-	D
113	4180013	126.8891	36.7615	74	29.0	-	-	D
114	4180014	126.8886	36.7615	52	20.3	-	-	D
115	4180015	127.0374	36.8899	736	31.9	14.3	28.1	A
116	4180016	127.0003	36.7887	639	29.8	16.9	20.7	B
117	4200001	127.3344	36.3470	464	31.1	14.0	37.6	A
118	4200002	127.4047	36.2938	860	34.6	17.1	24.5	A
119	4310001	127.4332	36.7341	634	26.5	13.2	21.8	A
120	4310002	127.4342	36.7350	580	35.3	13.0	21.9	A
121	4410001	127.9585	36.9861	612	25.6	13.0	21.3	A
122	4410002	127.7867	37.0992	678	33.6	15.1	28.0	A
123	4410003	127.7940	37.0933	698	33.6	14.0	29.1	A
124	4410004	127.9592	36.9864	262	18.6	13.9	20.4	A

Table 4. Continued.

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Qty
125	4410005	127.9591	36.9886	620	27.2	13.1	24.1	A
126	4410006	127.9558	36.9876	600	25.2	13.1	21.0	B
127	4410007	127.7830	37.0971	722	35.8	13.3	31.6	A
128	4410008	127.8005	37.0894	722	34.2	14.5	27.1	A
129	4410009	127.7999	37.0862	680	34.5	14.1	31.4	A
130	4410010	127.7969	37.0896	568	30.4	14.5	29.1	B
131	4410011	127.8005	37.0863	730	34.7	14.2	28.4	A
132	4410012	127.9556	36.8837	580	26.7	13.1	24.3	B
133	4410013	127.9580	36.8872	682	29.1	13.1	24.6	A
134	4410014	127.7528	37.1062	652	32.6	13.4	30.5	A
135	4430001	128.0811	36.8772	750	32.6	13.5	26.0	A
136	4430002	128.2053	36.9132	859	33.6	13.7	26.5	A
137	4440001	128.4083	36.8390	648	28.4	11.1	27.4	B
138	4440002	128.4090	36.8380	792	31.0	11.1	25.8	A
139	4450001	127.5845	36.8600	570	27.5	14.6	23.4	A
140	4460001	127.4987	36.9366	766	31.8	13.3	25.0	A
141	4510001	126.6656	36.5961	580	30.2	14.0	28.9	B
142	4510002	126.6658	36.5961	784	35.2	14.0	27.8	B
143	4510003	126.6379	36.5860	760	31.0	13.9	23.3	A
144	4540001	126.9125	36.3969	616	26.6	14.9	19.7	B
145	4550001	126.3048	36.7566	762	31.5	14.9	21.9	A
146	4580001	126.6619	36.6848	128	31.8	16.7	67.7	B
147	4580002	126.6624	36.6839	334	40.8	-	-	D
148	4580003	126.6605	36.6874	314	36.6	16.7	62.3	B
149	4580004	126.6602	36.6869	284	38.0	17.0	83.5	A
150	4580005	126.6608	36.6881	280	32.9	16.7	45.6	B
151	4580006	126.6638	36.6847	350	42.5	17.7	76.0	A
152	4580007	126.6598	36.6809	390	31.8	15.5	43.6	A
153	4580008	126.6608	36.6855	346	44.1	-	-	D
154	4580009	126.6630	36.6853	332	47.8	-	-	D
155	4580010	126.6619	36.6844	318	42.2	-	-	D
156	4580011	126.6404	36.6506	670	32.5	14.2	27.8	A
157	4580012	126.6633	36.6848	408	48.8	19.4	73.3	A
158	4580013	126.6629	36.6848	266	38.4	-	-	D
159	4580014	126.6644	36.6913	604	43.3	16.7	52.4	B
160	4580015	126.6643	36.6915	522	43.0	15.4	40.0	B
161	4580016	126.6728	36.6844	736	34.1	15.3	27.4	A
162	4580017	126.6669	36.6917	722	39.0	16.2	32.5	B
163	4580018	126.6586	36.6911	264	22.8	16.8	24.4	B
164	4580019	126.6571	36.6885	600	35.0	16.8	31.4	B
165	4580020	126.6577	36.6891	756	39.9	16.8	31.4	B
166	4580021	126.6579	36.6884	592	34.5	16.8	30.9	B
167	4580022	126.6608	36.6878	279	32.8	16.7	62.4	B
168	4580023	126.6579	36.6879	754	40.0	16.8	31.6	B
169	4580024	126.6609	36.6852	346	44.1	-	-	D
170	4580025	126.6585	36.6806	354	25.9	15.4	30.9	A
171	4580026	126.6619	36.6844	320	42.4	-	-	D
172	4580027	126.6653	36.6842	650	49.5	16.0	53.2	B
173	4580028	126.6639	36.6836	480	48.7	15.9	71.0	A
174	4630001	126.5320	36.1624	670	29.7	14.3	23.6	A
175	4630002	126.5251	36.1621	680	19.2	14.0	23.1	A
176	4630003	126.5248	36.1638	660	29.2	13.5	24.4	A
177	4630004	126.5224	36.1621	666	29.1	13.7	23.9	A
178	4630005	126.5204	36.1637	740	31.1	14.0	23.1	A
179	4630006	126.5305	36.1621	704	29.9	13.7	23.5	A
180	4630007	126.5321	36.1633	704	-	-	-	D
181	5100001	128.9715	35.1248	602	28.4	15.5	22.3	A
182	5100002	129.0819	35.2192	204	38.4	-	-	D
183	5100003	129.0819	35.2194	169	31.0	-	-	D
184	5100004	129.0822	35.2192	230	44.0	-	-	D
185	5100005	129.0822	35.2194	280	50.0	-	-	D
186	5100006	129.0844	35.2167	120	64.1	-	-	D

Table 4. Continued.

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Q _{ty}
187	5100007	129.0828	35.2100	118	64.2	—	—	D
188	5100008	129.1476	35.1554	604	29.9	17.0	21.9	A
189	5100009	128.9679	35.2154	687	31.0	15.7	22.8	A
190	5220001	129.1763	35.4669	684	33.0	16.1	25.5	B
191	5220002	129.2805	35.4143	464	26.6	17.4	22.0	A
192	5220003	129.2847	35.4115	530	30.4	15.2	29.3	A
193	5220004	129.2849	35.4070	444	24.5	15.2	21.5	A
194	5220005	129.2939	35.4037	514	26.5	14.3	24.3	A
195	5220006	129.2850	35.4115	210	20.6	15.6	26.1	B
196	5220007	129.2769	35.4110	88	16.7	—	—	D
197	5220008	129.2772	35.4178	56	16.8	—	—	D
198	5220009	129.2772	35.4155	110	18.1	—	—	D
199	5220010	129.2771	35.4223	188	18.9	15.3	22.3	A
200	5220011	129.2765	35.4141	90	16.8	—	—	D
201	5220012	129.2806	35.4142	300	24.4	15.8	23.5	A
202	5220013	129.2953	35.5517	592	30.0	15.1	26.1	A
203	5220014	129.2961	35.5505	604	30.3	14.5	27.1	A
204	5220015	129.0703	35.5548	624	30.1	14.7	25.8	A
205	5220016	129.0705	35.5553	356	23.1	14.7	25.3	A
206	5220017	129.0716	35.5559	476	25.9	14.3	27.4	A
207	5300001	128.6663	35.8097	698	30.1	12.2	25.8	A
208	5300002	128.5985	35.8299	650	30.6	14.1	26.0	A
209	5300003	128.6504	35.8128	780	34.9	14.5	25.0	A
210	5300004	128.6320	35.9793	700	35.5	16.7	27.8	A
211	5410001	128.7364	35.7899	602	28.7	15.2	25.8	A
212	5420001	128.8742	35.7261	246	29.5	14.9	64.6	B
213	5420002	128.7224	35.6856	852	37.5	14.9	27.2	B
214	5440001	128.1438	35.7995	620	24.7	13.5	18.6	B
215	5470001	127.9466	36.0288	978	30.9	15.5	16.0	B
216	5470002	127.9487	36.0234	848	29.3	15.5	16.7	B
217	5470003	127.9458	36.0236	912	30.0	15.5	16.2	B
218	5470004	127.9458	36.0088	856	34.8	15.6	22.3	A
219	5470005	127.9417	36.0050	842	32.1	15.5	20.3	B
220	5480001	128.4263	35.7436	477	26.4	14.9	25.0	B
221	5480002	128.4327	35.7402	677	30.5	15.0	23.8	A
222	5480003	128.4259	35.7415	72	19.2	—	—	D
223	5480004	128.4193	35.7464	686	31.3	14.9	24.6	B
224	5480005	128.4192	35.7444	692	31.5	16.6	21.1	A
225	5480006	128.4367	35.7403	744	29.5	14.7	20.4	B
226	5510001	128.4011	35.1068	454	28.2	15.7	29.1	A
227	5510002	128.3974	35.1049	422	28.8	15.7	32.4	B
228	5510003	128.3957	35.1179	454	34.2	15.8	42.4	B
229	5510004	128.3693	35.1616	612	27.1	12.6	25.1	A
230	5510005	128.3720	35.1596	584	28.8	14.1	26.5	A
231	5510006	128.3830	35.1194	700	41.6	16.1	37.6	B
232	5510007	128.3850	35.1185	690	41.2	16.1	37.5	B
233	5510008	128.3872	35.1160	694	40.0	16.0	35.6	B
234	5510009	128.3830	35.1193	500	36.0	16.1	41.5	B
235	5510010	128.3832	35.1194	310	31.6	16.1	53.6	B
236	5510011	128.3836	35.1192	370	33.0	16.1	48.4	B
237	5510012	128.3843	35.1185	288	28.9	16.2	48.3	A
238	5560001	128.3717	35.0973	424	24.7	15.1	24.0	B
239	5560002	128.3713	35.0975	300	22.0	15.1	24.9	B
240	5560003	128.3662	35.0982	590	23.1	14.8	14.4	B
241	5560004	128.3772	35.0948	100	18.7	—	—	D
242	5560005	128.3844	35.0896	150	23.3	—	—	D
243	5560006	128.3660	35.0972	380	22.8	14.8	23.1	A
244	5560007	128.3633	35.0981	320	16.8	—	—	D
245	5560008	128.3846	35.0899	158	26.4	—	—	D
246	5560009	128.3846	35.0900	300	25.6	15.2	36.9	B
247	5560010	128.3843	35.0900	160	28.0	—	—	D
248	5560011	128.3717	35.0979	670	30.4	16.5	21.0	A

Table 4. Continued.

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Qty
249	5590001	128.5549	35.5153	800	36.6	15.3	27.6	A
250	5590002	128.5531	35.5115	440	27.5	15.2	29.1	B
251	5590003	128.5243	35.6327	826	36.4	15.1	26.4	A
252	5610001	129.2921	35.8444	594	29.6	14.6	26.1	A
253	5610002	129.2827	35.8509	404	25.4	14.6	28.5	A
254	5610003	129.3078	35.7831	501	27.9	14.8	27.2	B
255	5610004	129.3086	35.7797	451	25.8	14.8	25.4	B
256	5620001	129.3821	35.9513	256	22.3	18.1	17.8	B
257	5620002	129.3823	35.9503	162	23.2	—	—	D
258	5620003	129.3823	35.9505	196	24.0	—	—	D
259	5620004	129.3821	35.9510	336	24.1	18.1	19.0	B
260	5620005	129.3828	35.9502	208	23.6	18.1	29.2	B
261	5620006	129.3511	36.0310	526	42.0	18.2	47.0	B
262	5620007	129.3500	36.0317	202	24.4	18.2	34.1	B
263	5620008	129.3603	36.0339	394	38.0	18.3	52.7	B
264	5620009	129.3599	36.0345	358	35.9	18.4	52.7	A
265	5620010	129.3638	35.9486	410	28.0	18.1	26.3	A
266	5620011	129.3620	35.9485	358	26.4	16.7	30.0	A
267	5620012	129.3655	35.9474	378	26.5	18.1	23.5	B
268	5620013	129.3643	35.9502	300	25.5	17.2	30.1	A
269	5620014	129.2765	36.1604	160	32.5	—	—	D
270	5620015	129.2800	36.1597	256	33.6	16.6	72.0	B
271	5620016	129.2775	36.1574	376	36.2	16.6	55.1	B
272	5620017	129.2758	36.1611	158	30.8	—	—	D
273	5620018	129.3662	36.0206	46	39.5	—	—	D
274	5620019	129.3663	36.0205	650	53.5	18.3	55.8	B
275	5620020	129.3816	35.9503	448	25.5	18.1	17.2	B
276	5620021	129.3858	35.9358	522	28.2	17.9	20.6	B
277	5620022	129.3559	36.1019	290	30.4	17.7	47.1	B
278	5620023	129.3560	36.0375	728	50.1	18.3	45.0	B
279	5630001	128.7167	36.0419	537	29.3	14.3	29.0	A
280	5630002	128.7177	36.0414	353	22.8	12.1	32.0	A
281	5630003	128.8684	36.0879	652	32.0	14.1	28.8	A
282	5630004	128.8618	35.9180	604	33.7	14.4	33.4	A
283	5630005	128.8606	35.9159	632	33.9	14.6	32.0	A
284	5630006	128.8603	35.9186	814	40.4	15.0	32.2	A
285	5630007	128.8620	35.9206	806	40.3	14.6	36.6	A
286	5650001	129.3536	36.9720	590	29.1	14.4	25.6	B
287	5650002	129.3479	36.9503	566	29.1	14.4	26.8	B
288	5710001	128.8244	36.7485	534	26.1	14.0	24.0	A
289	5710002	128.8249	36.7477	316	20.2	13.5	24.5	A
290	5710003	128.8242	36.7486	580	—	—	—	D
291	5750001	128.9526	36.2081	502	25.4	13.8	24.5	A
292	5750002	129.0762	36.4521	716	29.6	13.5	23.4	A
293	5750003	129.0652	36.4327	710	31.4	13.6	25.9	B
294	5760001	128.5914	36.3006	816	32.6	14.1	26.1	A
295	5760002	128.5881	36.2931	334	20.4	14.0	17.3	A
296	5760003	128.5894	36.2972	698	29.8	13.1	24.8	A
297	5760004	128.5925	36.3008	726	31.0	13.7	24.5	A
298	5780001	128.6116	36.1077	980	26.9	12.4	26.0	A
299	5780002	128.6645	36.0656	580	29.9	13.9	28.6	B
300	5820001	127.8880	36.5993	696	29.5	14.1	22.7	B
301	5820002	127.9083	36.4514	668	28.6	14.6	21.5	A
302	5930001	128.0615	35.0000	628	31.3	14.9	27.0	A
303	5930002	128.1053	34.9603	610	29.6	15.5	24.1	A
304	5930003	128.0772	34.9553	782	33.5	14.8	23.9	A
305	5930004	128.0908	34.9531	697	31.9	15.7	24.0	A
306	5930005	128.0914	34.9631	596	29.0	15.5	22.9	A
307	5950001	127.8046	35.0941	738	28.4	16.1	17.1	A
308	5980001	128.0290	35.6969	502	26.0	14.1	25.3	A
309	5980002	128.0190	35.7060	640	29.6	14.5	24.3	A

Table 4. Continued

NO.	ID.NO.	Long. (deg.)	Lat. (deg.)	Depth (m)	Bottom temp. (°C)	Temp. at 20 m depth (°C)	Thermal gradient (°C/km)	Q'ty
310	5990001	128.0824	35.7371	776	31.0	12.9	24.0	B
311	5990002	128.0869	35.7351	632	29.2	12.8	26.9	B
312	5990003	128.0911	35.7349	744	31.6	12.7	26.3	A
313	6120001	126.9508	35.0246	60	16.6	15.7	24.9	A
314	6120002	126.9061	35.0202	254	21.1	15.6	23.6	A
315	6120003	126.9084	35.0299	170	19.9	15.8	20.1	A
316	6120004	126.9069	35.0239	494	26.5	16.9	21.5	A
317	6120005	126.9068	35.0232	385	23.9	15.0	24.4	A
318	6120006	126.9076	35.0265	245	19.7	15.0	20.3	A
319	6120007	126.9098	35.0264	250	20.8	15.8	21.5	A
320	6120008	126.9094	35.0164	496	27.1	15.1	25.3	A
321	6120009	126.9086	35.0315	222	19.9	15.8	20.3	A
322	6120010	126.9078	35.0473	258	21.5	15.7	25.3	A
323	6200001	126.9486	35.1456	688	29.6	15.0	21.8	B
324	6200002	126.9479	35.1457	686	28.2	15.1	19.5	A
325	6200003	126.9476	35.1458	680	29.6	15.0	22.1	B
326	6200004	126.9660	35.1312	685	30.0	14.9	22.5	A
327	6400001	126.8200	33.4667	670	27.9	16.4	17.6	B
328	6400002	126.8759	33.4900	702	32.0	16.9	22.3	A
329	6400003	126.8161	33.4611	712	29.3	16.4	18.7	B
330	6400004	126.8061	33.4561	216	16.6	-	-	D
331	6400005	126.8086	33.4586	956	33.1	12.4	22.1	A
332	6400006	126.8103	33.4522	842	31.3	16.4	18.2	B
333	6400007	126.8058	33.4564	904	31.8	16.4	17.4	B
334	6400008	126.8147	33.4133	700	28.2	16.4	17.4	B
335	6400009	126.8766	33.4908	720	31.8	14.1	25.0	A
336	6400010	126.8792	33.4892	700	31.0	14.0	25.3	A
337	6400011	126.5891	33.3015	501	25.0	16.4	18.0	B
338	6520001	127.2340	35.7319	657	31.8	14.5	28.6	A
339	6520002	127.2251	35.7354	644	31.4	14.2	27.8	A
340	6520003	127.2395	35.7351	700	31.8	13.8	27.3	A
341	6520004	127.3400	36.1083	600	27.0	16.1	17.6	A
342	6520005	127.3381	36.1165	568	25.1	16.1	16.5	B
343	6520006	127.2781	35.8375	564	25.1	14.3	19.8	B
344	6520007	127.3060	36.0561	698	28.6	14.1	21.6	A
345	6520008	127.3064	36.0554	424	22.0	15.6	16.1	A
346	6520009	127.3528	36.0561	584	27.1	13.3	24.8	A
347	6520010	127.3599	36.0212	702	30.3	12.7	25.8	A
348	6520011	127.2094	35.7672	564	27.4	15.1	23.1	A
349	6530001	127.0655	35.9224	680	29.8	14.5	23.3	B
350	6530002	126.9914	36.0264	676	29.7	14.5	23.3	A
351	6550001	127.2905	35.7252	696	29.2	14.3	22.3	A
352	6570001	127.7506	35.8947	334	19.1	12.8	21.3	A
353	6580001	126.9354	35.8316	662	33.4	14.3	30.0	A
354	6620001	127.7367	34.7389	620	30.0	14.3	24.5	A
355	6640001	127.4811	35.3115	580	28.3	14.5	24.7	B
356	6710001	127.4630	35.4013	638	28.2	14.1	23.0	A
357	6740001	126.8875	35.4636	655	28.4	14.3	21.9	A
358	6740002	126.8880	35.4642	364	21.6	13.2	25.4	A
359	6740003	126.9630	35.4463	700	29.1	13.5	22.6	A
360	6740004	126.9637	35.4474	765	30.6	14.4	20.6	A
361	6770001	126.7349	35.4230	672	29.4	14.4	23.0	B
362	6810001	127.0694	35.5889	608	29.1	14.1	25.5	B
363	6810002	127.0672	35.5850	690	29.8	14.1	23.6	B
364	6810003	127.0669	35.5886	690	28.9	14.1	22.1	B
365	6830001	126.5636	35.6852	603	28.0	14.1	23.4	A
366	6830002	126.5659	35.6871	534	26.3	14.5	23.0	A
367	6830003	126.5630	35.6868	620	28.3	15.6	21.1	A
368	6930001	126.6549	34.8102	650	28.1	15.4	19.5	A
369	6930002	126.6582	34.8094	504	24.7	15.0	20.3	A
370	6930003	126.6573	34.8127	502	24.5	15.3	19.1	A

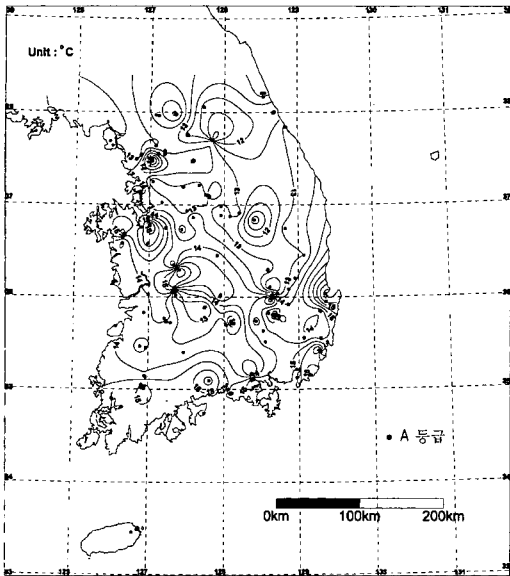


Fig. 6. Distribution of subsurface temperature at 20m depth in South Korea.

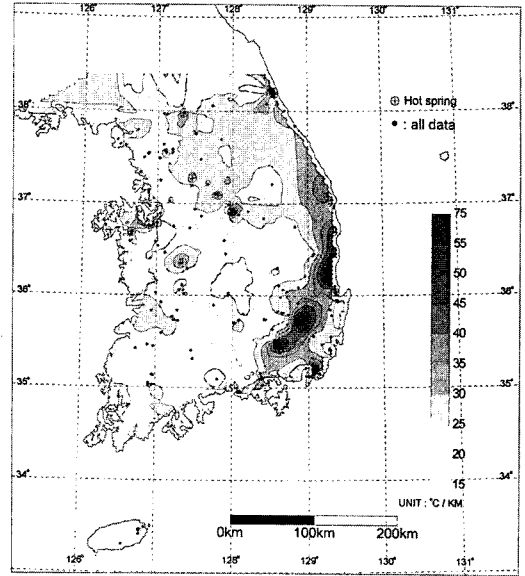


Fig. 8. Distribution of geothermal gradient by which is added recalculated data (total 330ea) in South Korea (Table 4).

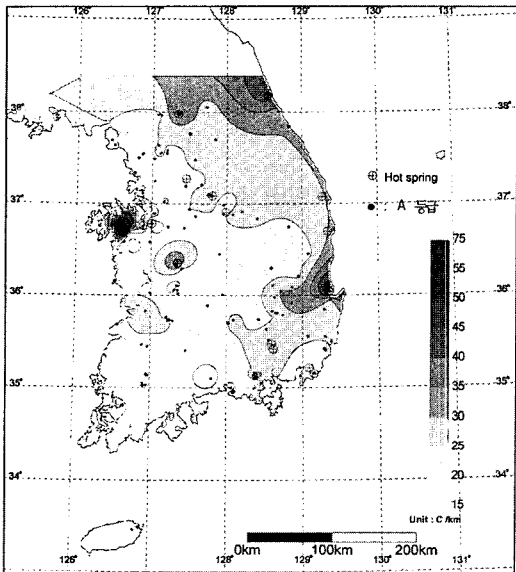


Fig. 7. Distribution of geothermal gradient by "A" graded data (204ea.) in South Korea (Table 4).

Fig. 7에서보면 30°C/km 이상의 지온경사분포가 중앙 북부-동쪽 속초부근 - 동해안변 - 포항 - 마산으로 이어지는 광역적인 분포를 보이며, 부분적으로 중서부 예산부근, 유성부근에 높은 지온경사를 보인다. 그러나 Fig. 8의 재계산방법으로 지온경사자료를 추가한 그림

을 보면 동해안변을 따라 포항 - 마산, 부산으로 이어지는 높은 지온경사분포를 뚜렷하게 보이고 있다. 또한 부분적으로 중서부 예산부근, 유성부근, 일동, 이천, 중원, 수안보에서 소규모의 높은 지온경사를 보인다. 두 그림을 비교할 때 Fig. 8이 전체적으로 구분이 뚜렷하게 나타난다. Fig. 8에서 동북쪽 해안선을 따라 경북 포항까지의 높은 지온경사분포를 보이는데 이는 남한 일대 중력이상대분포(조진동외, 1996)의 동해안 고중력 이상대와 거의 일치하게 나타난다. 이 지역은 밀도가 높은 맨틀까지의 거리가 다른 지역보다 가깝다는 해석을 할 수 있다. 즉, 지각의 두께가 상대적으로 얇은 지역이다. 지온경사는 매체의 두께와 반비례하기 때문에 지각이 얇은 지역이므로 지온경사가 높게 나타는 것으로 판단된다.

또한 포항-마산부근의 높은 지온경사분포를 보이는 곳은 제 3기 지층으로 젊은 지층이 분포하는 곳이기도 하며, 경상계 퇴적분지로서 많은 단층이 발달한 곳이기도 하다.

이와같이 새로운 지온경사 산출방법을 이용한 지온경사분포 이상대로 온천지역, 지질 및 지질구조, 지구 물리적 이상대특성과 관련성을 연계시킬수 있는 것으로 보아 향후심도 20 m 심도에서의 지온과 공저온도를 이용한 지온경사 산출 방법이 효과적임을 알 수 있다.

그러나 이러한 contouring 기법에 문제점이 있다. 한 점에서 높은 값을 보일 때 주변부근이 너무 광범위

하게 높은 값을 보인다. 일반적으로 지열이 높은 곳은 국부적으로 나타난다. 또한 자료가 없이 넓은 범위로 비어있는 지역은 단지 계산적인 값이므로 이러한 지역에서의 값은 신뢰도가 떨어진다는 것을 고려하여 판단하여야 한다.

한편 Kriging을 이용한 한반도의 지온경사 평균값은 25.6°C/km로 계산되었다. Lim (1995)에 의하면 한반도의 평균 지온경사를 26.9°C/km로 발표된 바 있다. 이는 이번 연구자료와 동일한 것을 이용한 것이나 계산 방법에 의해 서로 차이가 있다.

결 론

남한의 온도검층자료 370개를 효율적으로 이용하기 위한 지온경사 산출 방법과 이의 타당성에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 93년도 8개 기상관측소에서 관측된 5 m 심도까지의 지온을 이용하여 산출한 남한의 지표 평균 열확산계수는 0.842 mm²/s로 계산되었다.

2. 대기온도차가 60°C일 때 0.05°C미만의 온도차를 보이는 항온심도는 20 m 심도 이하이다.

3. 온도검층자료중 지온경사가 전형적인 일직선상으로 나오는 A등급 자료 204개를 이용한 남한의 지온경사분포는 이상대가 너무 광범위하게 나타나 지열이상대 규명이나 구조적인 특성을 파악하기 어렵다.

4. 항온심도 20 m에서의 지온분포를 이용하여 126개의 B등급 온도검층자료의 지온경사를 재계산할 수 있었으며, 총 330개 자료를 이용한 남한의 지온경사분포도는 뚜렷한 지열이상대의 판단이 가능하였다.

5. Kriging법을 이용한 한반도의 평균 지온경사는 25.6°C/km로 계산되었다.

앞으로 계속 자료가 수집되면 위의 결과를 재평가하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 한국자원연구소 지구환경연구부에서 수행한 온천조사자료를 이용하여 연구한 것이며, 이를 이용할 수 있게 협조해 주신 온천조사팀원에게 감사드립니다

다. 또한 교육부 거점연구소 연구비(BSRI-98-5418)의 일부지원으로 수행되었음에 감사드립니다.

참고문헌

- Beck, A.E. and N. Balling (1988) Determination of virgin rock temperatures: Handbook of terrestrial heat-flow density determination: ed. by R. Haenel, Kluwer Academic Publishers, p. 75-85.
- Bodmor, P. and Rybach, L. (1984) Geothermal map of Switzerland (Heat Flow Density), En Commission chez Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Berne, Geophysique No. 22, p. 47.
- Cermak, V., R. Haenel (1988) Geothermal map: Handbook of terrestrial heat-flow density determination: ed. by R. Haenel, Kluwer Academic Publishers, p. 261-300.
- Drury, M.J., A.M. Jessop, T.J. Lewis (1984) The detection of groundwater flow by precise temperature measurements in boreholes, Geothermics, Vol. 13, No. 3, p. 163-174.
- Hearst, J.R., Nelson, P.H. (1985) Well logging for physical properties, Mc-Graw-Hill Book Co., p. 63-83.
- J.P. Cull & D. Conley (1983) Geothermal gradients and Heat Flow in Australian sedimentary basins, BMR Journal of Australian Geology & Geophysics, 8, 329-337.
- 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, Vol. 15, No. 1, p. 1-21.
- Turcotte, D.L., G. Schubert (1982) Geodynamics Applications of continuum Physics to geological problems, Jhon Willey & Sons, New York, 450p.
- 기상청 (1993) 기상연보, 242p.
- 임정웅, 김형찬, 염병우 (1989) 한반도의 지열류량 분포도 작성연구, 과학기술처 (KR-89-(B)-12), p. 61.
- 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.
- 한옥, D.S. Chapman (1985) 한국주변지역의 지열류량과 환산지열류량에 관하여, 지질학회지, 제 21권, 2호, p. 74-78.
- 한국자원연구소 (1983-1994) 온천조사보고서, 한국자원연구소.