

현지 측정에 의한 남한지역의 지중유효열전도도, 보어홀 전열저항 및 초기온도 분석

노정근*, 연광석**, 송헌***

*충북대학교 기계공학부(jeonguen@chungbuk.ac.kr), **충북대학교 바이오시스템공학과(ksyon@cbnu.ac.kr),
***관동대학교 건축학부(heonsong@kd.ac.kr)

Analysis of Soil Thermal Conductivities, Borehole Thermal Resistances and Initial Soil Temperature with In-Situ Testing in South Korea

Ro, Jeong-Geun* Yon, Kwangseok** Song, Heon***

*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University(jeonguen@chungbuk.ac.kr)
**Dept. of Biosystem Eng., Chungbuk National University(ksyon@cbnu.ac.kr)
***School of Architecture, Kwandong University(heonsong@kd.ac.kr)

Abstract

Investigation of the effective soil thermal conductivity(k) is the first step in designing the ground loop heat exchanger(borehole) of a geothermal heat pump system. Another important factor is the borehole thermal resistance(R_b). Thermal response tests offer a good method to determine the ground thermal properties for the total heat transport in the ground. The first step is measured for initial soil temperature. This is done by supplying a only pump power into a borehole heat exchanger. They need to supply into water unload heat power more than 30 minutes. In this study, the initial soil temperature was found to analysis 14.1~16.0°C, the ratio was 68.7% represented. In this case of k , was 2.1~3.0 W/m.k, R_b was 0.11~0.20 m.K/W. In this work, it is also shown that the distribution of a soil thermal conductivity and borehole thermal resistance were on the influence of initial soil temperature. And soil thermal conductivity was related with factors of equation by linear least square method, borehole thermal resistance was on the influence of composite factors.

Keywords : 지열원 열펌프시스템(Geothermal Heat Pump System), 지중초기온도(Initial soil Temperature), 수직 밀폐형 지중열교환기(Borehole), 지중유효열전도도(Effective Soil Thermal Conductivity), 보어홀 전열 저항(Borehole Thermal Resistance)

1. 서 론

수직밀폐형 지중열 교환기(보어홀)의 지중 유효열전도도 측정에 관한 사항은 지식경제부 신재생에너지 설비의 지원 설치에 관한 기준1)에서 측정 관련 사항을 규정하고 있다. 이 지침서에 의하면 초기 지중온도 측정은 30분 이상 가열 없이 펌프를 구동하며 순환수 온도를 측정하도록 규정 되어 있다.

이 측정 기술로 Adam Austin²⁾은 현지 지열측정 시스템에 대한 개발을 1995년에 제시 하였으며, 이에 대한 연구는 Signhild Geglín & Bo Nordell³⁾의 지열 응답시험이 있고, Nina Mattsson과 Gilbert⁴⁾에 의한 현지 지열 응답 시험 등의 연구가 있다. 국내에서는 우 등에 의한 현지 지중열전도도 측정기술에 대한 보고서(2008년)⁵⁾가 있고, 이 등에 의한 지중유효 열전도율 해석에 사용되는 선형 열원 모델의 초기 제외 시간 결정에 관한 연구(2008년)⁶⁾와, 2010년 선형 열원법에 의한 지중유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구⁷⁾가 있다. 이와 같이 보어홀에 대해 해석 및 전열저항에 관한 연구는 많으나 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 및 지중초기온도를 다량으로 현지 측정하여 분석한 연구는 전무한 실정이다.

현지 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 및 지중초기온도를 지역별로 여러 곳을 실측하기 위해서는 지역별로 많은 천공을 하여 지중 열교환기를 설치하여야 하기 때문에 여기에는 많은 비용과 시간을 필요로하며 현실적으로는 어려움이 따른다. 또한 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 및 지중초기온도 측정시 계절에 따라 외기 온도가 $-18^{\circ}\text{C} \sim 38^{\circ}\text{C}$ 까지 다양하게 변하고, 측정 장비에 초기 주입하는 물의 온도도 $4^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 까지 계절에 따라 변하는 등 외적인 요소도 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 및 지중초기온도 실측에 어려움을 더해주고 있다. 그러므로 현지 측정에 의한 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 및 지중

초기온도를 다양하게 여러 곳 측정한 데이터를 수집하는 것이 어려웠다.

그러므로 본 연구에서는 지중열전도도 공인기관으로서 4년 동안 우리나라 100여곳 이상의 시험용 보어홀의 열응답 시험을 실시하면서 수집한 자료를 바탕으로 지중 열전도도 k , 보어홀 전열저항 R_b 및 지중초기온도 T_0 를 다양하게 분석하여 제시함으로써 우리나라 지열사업을 하시는 분들과 지열연구자들에게 기초 자료를 제공하고자 한다.

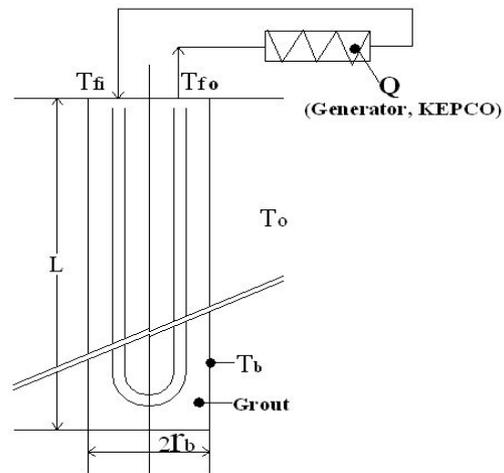


Fig. 1 Borehole with thermal response tester

2. 실험 및 방법

보어홀은 그림 1에서 보이는 바와 같이 반경 r_b 와 수직길이 L , 그리고 보어홀 내부에 투입된 U-관으로 이루어지며 보어홀 내부 공간은 벤토나이트와 물을 혼합하여 그라우팅 처리되었다. 초기에 보어홀의 깊이 측정 장치를 이용하여 깊이를 측정하고 현지용 지중열전도도 측정 장치를 지중열교환기에 설치하였다. 현지용 지중열전도도 측정장치는 일정 열원을 공급하기 위한 전원공급장치와 히터, 물탱크, 유량계, 펌프, 온도센서, 데이터 기록장치, 컨트롤러 전류계, 전력전압조정장치 등으로 구성되어 있다. 지중초

기온도를 측정하기 위해 1시간 이상 유체를 무부하 상태로 순환하면서 장착된 온도센서를 이용하여 측정 기록하였다. 그 후 2관식의 경우 50~80 W/m 범위에서 일정한 열량을 48시간 이상 연속으로 공급하며, 유체의 입·출구 온도차는 3.5~7°C 범위 내에서 유지되도록 하였다.

선형열원법을 이용한 지중 열전도도, 보어홀 전열저항 분석을 위해 수식(1) - (11)을 이용하였다.

보어홀 유체 온도(T_f)는 입구온도(T_{fi})와 출구온도(T_{fo})를 평균하여 사용한다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (1)$$

선형열원 모델은 Carslaw와 Jaeger⁸⁾에 의하여 다음과 같은 근사식으로 표현될 수 있다.

$$T_o - T(r, t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (2)$$

여기서 $T(r, t)$ 는 시간 t 에서 열원으로부터 거리 r 에 있는 매질의 온도이며 $\alpha (=k/\rho c)$ 는 매질의 열확산율이고 ρ 와 c 는 각각 매질의 밀도와 비열을 나타낸다. 식 (2)로부터 $r = r_b$ 인 보어홀 벽면온도 T_b 를 구하면

$$T_b = T_o - \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

보어홀 전열저항 R_b 는 다음과 같다.

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (4)$$

T_f 에 관한 식으로 정리하면

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (5)$$

식 (5)는 T_f 와 $\ln t$ 에 관한 1차식이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = bx + c \quad (6)$$

식 (6)에서

$$b = \frac{Q/L}{4\pi k} \quad (7)$$

$$x = \ln t \quad (8)$$

$$c = b \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (9)$$

지중열전도도 k 는 식 (7)로부터

$$k = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (10)$$

보어홀 전열저항 R_b 는 식 (9)로부터 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$R_b = \frac{L}{Q} \left[c - b \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \right] \quad (11)$$

3. 초기온도 및 열응답 시험 분석

Table. 1 Specification of borehole for In-situ testing

	149m under	150~170 m	171~200 m	201m over
Type	Single U-Pipe Size: 30A	Single U-Pipe Size: 30A	Single U-Pipe Size: 40A	Single U-Pipe Size: 40A
Borehole diameter	0.15 m	0.15 m	0.15 m	0.15 m
Grout	Bentonite : Water = 1: 5 Conductivity : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 Conductivity : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 Conductivity : 0.7 W/m · K	Bentonite : Water = 1: 5 Conductivity: 0.7 W/m · K
Rate	7.6%	82.2%	10.2%	0%

표 1은 본 연구에 사용된 시험용 보어홀 100여곳 이상의 일반적인 사양이다. 이 표에서 보면 보어홀 길이는 70m~200m를 사용하였고 150m~170m 사이가 82.2%로 나타났다.

이결과로 보아 우리나라의 지열 이용 보어홀 길이는 150m 전후를 가장 선호하는 것으로 판단된다. 최근에는 200m의 보어홀 길이를 세종시를 비롯한 일부 지역에서 사용하고 있으며 그 비율은 점차 증가하여 지중열전도도 측정 건수의 10.2% 비율을 나타내었다. 형식으로는 2관식의 U 파이프를 사용하였고 170m 이하에서는 30A 규격을 사용하였으며, 170 m 를 초과하였을 경우 40A 규격파이프를 사용하고 있었다. 그라우트의 벤토나이트와 물의 비율은 작업자에게 의뢰한결과 벤토나이트와 물의 비율을 1:5로 혼합하여 사용한 것으로 확인 하였다. 하지만 그라우팅의 주입상태는 작업장에 따라 차이가 많은 것으로 나타났으며, 많은 곳에서 보어홀의 그라우팅 처리가 추가적으로 일어나고 있는 것을 확인하였다.

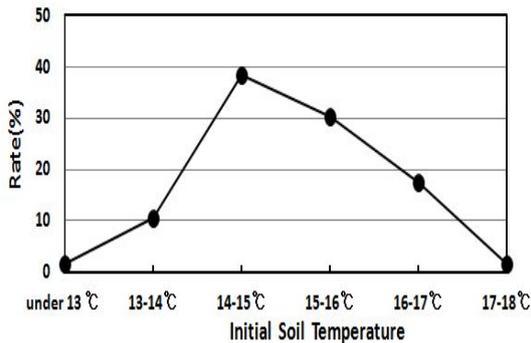


Fig. 2 Distribution of initial soil temperature

그림 2에서는 전체 시험용 보어홀에 대해 초기온도를 측정하여 그 분포율에 대한 분석 결과를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 우리나라의 지중 초기온도는 14.1°C ~15.0°C 사이가 38.3 %로 가장 많았으며, 15.1°C ~16.0°C 사이가 35 %를 나타내었다. 이와 같이 우리나라의 지중초기온도는 일반적으로 14.1°C ~16.0°C가 68.7 %를 차지하고 있었다. 측정 시험공중 지중초기온도가 가장 낮은 곳은 12.8°C를 나타내었고 지역은 강원도 화천 간동 지역이었다. 측정 시험공중 지중 초기온도

가 가장 높은 곳은 17.7°C로 경북 포항 남구의 지역이었다.

그림 3에서는 전체 측정데이터에 대해 지역별 계절별의 측정 현황을 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 지중열을 이용한 지역별 측정 분포율을 보면 경기도 지역이 27.2 %로 가장 많았으며 그중에서도 계절은 가을에 11.9 %로 높은 분포율을 나타내고 있다. 또한 충북지역에서는 전체 8.5%의 분포율 중 겨울에 5.1 %를

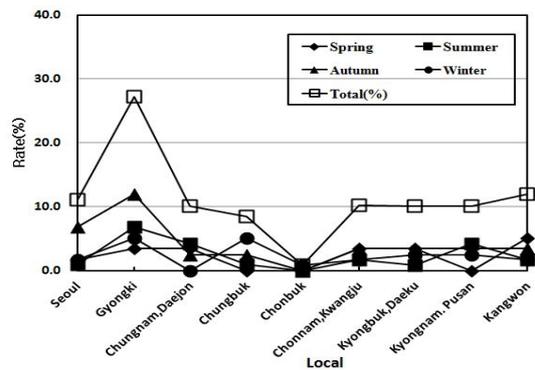


Fig. 3 Distribution of local and seasonal by In-situ testing in south Korea

나타내어 겨울에 공사가 물려 있음을 알 수 있다. 전북지역이 측정 분포율이 낮게 나타난 것은 주로 그 지역에 있는 측정 기관에 의뢰하여 측정하였기 때문에 통계에 적게 잡힌 것으로 사료된다.

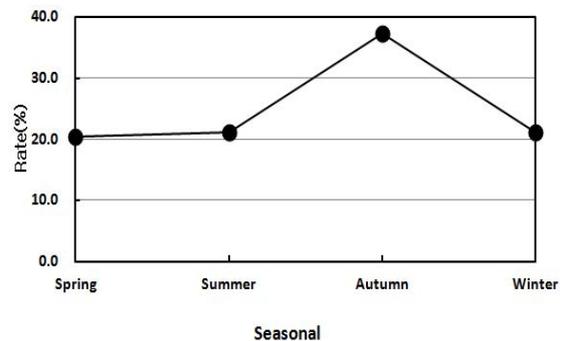


Fig. 4 Establishment of seasonal for geothermal heat pump

그림 4는 전체 지중열 측정 데이터에 대해 계절별로 측정 분포율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 가을에 측정분포율이 37.3%로 공사가 집중된 것으로 분석된다. 가을을 제외하고 봄, 여름, 겨울은 약 21%전후로 일정하였다. 이것은 우리나라의 지중열 이용 정부지원금이 가을에 집중적으로 지원되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 선형열원법에 의한 k 값 분석

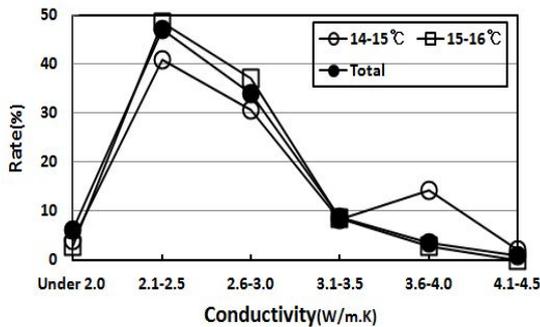


Fig. 5 Distribution of soil thermal conductivity

그림 5에서는 지중열 측정 전체 데이터에 대해 지중열전도도의 분포를 분석한 결과를 나타내었다. 이 결과는 지중열전도도의 크기에 따른 분포를 전체와 우리나라의 초기온도가 가장 많이 분포되어 있는 14.1°C ~ 15.0°C, 15.1°C ~ 16.0°C 구간에서 각각의 분포율로 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 지중열전도도의 분포는 2.1~2.5 W/m.K 구간이 47%로 전체의 절반 가까이를 차지하였으며 그 다음으로 2.6~3.0 W/m.K 구간이 33.9%를 나타내었다. 이것으로 보아 우리나라 토양의 지중열전도도는 2.1~3.0 W/m.K 구간에 집중되어 있는 것으로 판단되었다. 또한 초기온도가 집중된 14.1°C ~ 15.0°C 일 때 지중열전도도 분포는 2.1~2.5 W/m.K 구간 40.8%, 2.6~3.0 W/m.K 구간 30.6% 였고, 초기온도 15.1°C ~ 16.0°C 구간에서 지중열전도도 분포는

2.1~2.5 W/m.K 에 48.6%, 2.6~3.0 W/m.K 사이에 37.1%로 나타났다. 이와 같이 지중열전도도의 분포 경향은 전체로 볼 경우와 초기온도 집중 구간으로 볼 경우 동일한 경향으로 판단되었다.

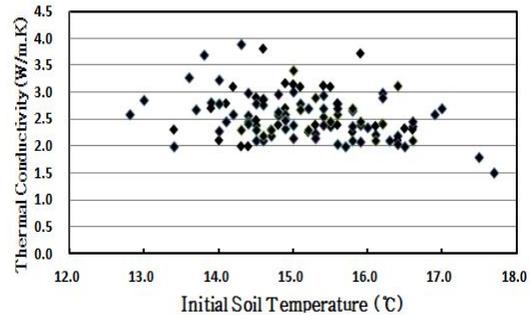


Fig. 6 Relation of distribution between Initial soil temperature and soil thermal conductivity

그림 6에서는 초기온도와 지중열전도도의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 지중초기온도는 12.7°C ~ 17.6°C 까지 분포되어 있었으며, 지중열전도도는 가장 낮게는 1.7 W/m.K 에서 가장 높게는 3.9 W/m.K 사이에 분포하였다. 초기온도는 지중열전도도의

Table. 2 Analysis of data at the same Initial soil temperature by In-situ testing

Initial Soil Temp. (°C)	k (W/m.K)	R_b (m.K/W)	b (°C)	c (°C)	Q/L (W/m)
14.0	2.1	0.143	2.73	3.00	72.0
	2.29	0.141	2.14	6.221	61.6
	2.79	0.114	1.80	7.727	63.0
	2.79	0.168	1.76	11.202	61.7
	3.24	0.149	1.84	11.668	74.9
14.5	2.1	0.133	2.81	2.514	74.5
	2.31	0.154	2.17	7.527	63.0
	2.4	0.185	2.08	10.421	63.8
	2.48	0.151	1.90	8.949	59.3
	2.9	0.185	1.69	13.406	62.2
14.9	2.33	0.100	2.21	4.362	64.7
	2.5	0.186	2.01	11.560	63.9
	2.5	0.193	2.05	11.796	64.8
	2.6	0.185	1.92	12.075	63.4
	3.17	0.173	1.28	14.30	51.1

집중분포에는 영향을 미친 것으로 나타났으며 같은 초기온도 일지라도 표 2에서와 같이 지중열전도도가 다른 여러 경우의 값은 선형최소자승법에 의한 직선식((6)식) 기울기, b 의 값이 작고, 절편, c 의 값이 클수록 지중열전도도는 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 지중열전도도는 직선식의 기울기와 절편에 의한 영향을 받는 것으로 판단되었다.

5. 선형열원법에 의한 R_b 값 분석

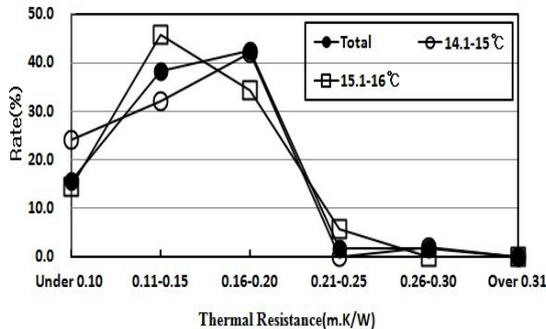


Fig. 7 Distribution of borehole thermal resistance

그림 7에서는 지중열 측정 전체 데이터에 대해 보어홀 전열저항의 분포율분석 결과를 나타내었다. 이 그림은 보어홀 전열저항의 크기에 따른 전체분포와 우리나라의 초기온도가 가장 많이 분포되어 있는 14.1°C ~ 15.0°C, 15.1°C ~ 16.0°C 구간에서의 각각의 분포율을 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 보어홀 전열저항의 전체분포는 0.11~0.15 $m.K/W$ 구간이 38.3 %, 0.16~0.20 $m.K/W$ 구간이 42.6 %를 나타내었다. 이것으로 보아 우리나라 보어홀 전열 저항은 0.11~0.20 $m.K/W$ 구간에 집중되어 있는 것으로 판단되었다. 또한 초기온도가 집중된 14.1°C ~ 15.0°C 일 때 보어홀 전열저항의 분포는 0.11~0.15 $m.K/W$ 구간에서 32.0%, 0.16~0.20 $m.K/W$ 구간이 42.0 %였고, 지중초기온도 15.1°C ~ 16.0°C 구간에서 보어홀 전열저항 분포는 0.11~0.15 $m.K/W$ 에

45.7 %, 0.16~0.20 $m.K/W$ 사이에 34.3 %로 나타났다. 이와 같이 보어홀 전열저항의 분포경향도 지중열전도도의 분포율 경향과 유사하게 0.11~0.20 $m.K/W$ 에서 집중적으로 분포하는 것을 알 수 있었다.

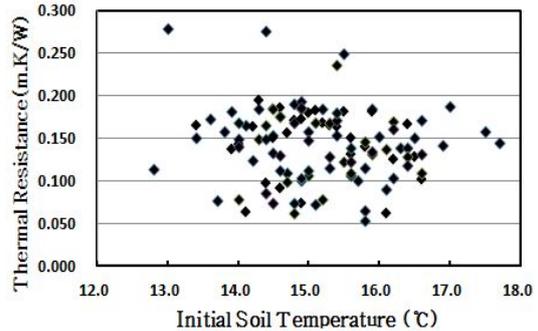


Fig. 8 Relation of distribution between Initial soil Temperature and soil thermal resistance

그림 8에서는 초기온도와 보어홀 전열저항의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 초기온도가 12.7°C ~ 17.6°C 일 때 보어홀 전열저항은 가장 낮게는 0.053 $m.K/W$ 로부터 가장 높게는 0.279 $m.K/W$ 사이에 분포 하였다. 하지만 초기온도가 보어홀 전열저항의 집중분포에는 영향을 미친 것 같으나 표 2에서와 같이 동일한 지중초기온도 일지라도 보어홀 전열저항이 다른 것은 어느 특정인자와의 상관관계를 찾을 수 없었고, 여러 변수들의 복합적인 요소에 의한 영향을 받는 것으로 판단되었다.

6. 결 론

현지 측정에 의한 남한지역의 지중유효열전도도, 보어홀전열저항 및 지중 초기온도 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 지중 초기온도는 14.1°C ~ 15.0°C 사이가 38.3 %로 가장 많았으며, 15.1°C ~ 16.0°C 사이가 35 %를 나타내었으며, 14.1°C ~ 16.0°C 가

- 68.7 %를 차지하였다.
- (2) 지역별 지중열 이용 분포도는 경기지역이 27.2 %로 가장 많았으며 계절별로는 가을에 37.3%의 이용율을 나타냈다.
 - (3) 지중열전도도의 분포는 2.1~2.5 $W/m.K$ 구간이 47 %로 전체의 절반 가까이를 차지하였으며 그다음으로 2.6~3.0 $W/m.K$ 구간이 33.9 %를 나타내었다.
 - (4) 보어홀 전열저항의 전체분포는 0.11~ 0.15 $m.K/W$ 구간이 38.3%, 0.16~0.20 $m.K/W$ 구간이 42.6 %를 나타내었다.
 - (5) 지중초기온도는 지중열전도도와 보어홀 전열저항의 집중분포에 영향을 미쳤으며, 지중열전도도는 선형최소자승법에 의한 직선식의 기울기와 절편의 값에 크게 영향을 받았으나 보어홀 전열저항은 어느 특정인자와의 상관관계는 찾을 수 없었고, 여러 변수들의 복합적인 요소에 의한 영향을 받는 것으로 판단되었다.

후 기

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 지식경제부, 에너지관리공단, 신재생에너지센터, 신.재생에너지 설비의 지원등에 관한 기준 및 지침, pp. 117-121. 2011.
2. Adam Austin, Development of an In Situ System for Measuring Ground Thermal Properties, Degree of Master of Science OSU., 1995
3. Signhild Geglín & Bo Nordell, Thermal Response Tests of Boreholes-Results From In Situ Measurements, The Second Stockton International Conference March 16-17, 1998
4. Nina Mattsson, Gilbert Steimmann and Lyesse Laloui, In-Situ Thermal Response Testing- New Developments, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007
5. 한국에너지기술연구원, 현지 지중열전도도 측정기술, 지식경제부, 2008.
6. 이세균, 우정선, 김대기, 지중유효열전도율 해석에 사용되는 선형열원모델의 초기제외시간 결정에 관한 연구, 에너지공학, 제 17권, 제3호, pp. 167-174, 2008.
7. 이세균, 우정선, 노정근, 선형열원법에 의한 지중 유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석, 한국태양에너지학회논문집, Vol. 30, No. 4, pp. 71~78. 2010.
8. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.