

보어홀 전열저항이 보어홀 길이에 미치는 영향에 관한 연구

이세균*, 우정선**

*충북대학교 기계공학과(leesk@chungbuk.ac.kr), **한국에너지기술연구원(jswoo@kier.re.kr)

A Study of the Effect of Borehole Thermal Resistance on the Borehole Length

Lee, Se-Kyoun* Woo, Jung-Son**

*Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk National University(leesk@chungbuk.ac.kr)

** Korea Institute of Energy Research(jswoo@kier.re.kr)

Abstract

The effect of borehole thermal resistance on the borehole length is studied. In performing this work a new concept BLRR(borehole length reduction rate) is developed based on the line source model. The solution of line source model is shown to be valid through the comparison with the data of thermal response test. It is shown that BLRR is a function of soil thermal conductivity(k) and borehole thermal resistance(R_b). The value of BLRR increases with increasing k , which means reducing R_b is more effective when k is high. The reduction of borehole length with change of R_b is easily estimated with BLRR. The validity of BLRR is also examined with EED analysis.

Keywords : 지중열원 열펌프 시스템(Ground Source Heat Pump System), 수직 밀폐형 지중열 교환기(borehole), 지중 열전도율(Soil Thermal Conductivity), 보어홀 전열저항(Borehole Thermal Resistance), 보어홀 길이 감소율(Borehole Length Reduction Rate)

1. 서 론

지중열원 열펌프 시스템은 효과적인 냉난방 설비이나 이 시스템 설치에 필요한 지중열 교환기는 고가의 장비로서 시스템의 초기투자비를 대폭 증가시키는 문제가 발생된다. 지중열 교환기는 수평형과 수직형이 있으나 땅이

좁은 우리의 현실에는 수직형이 적당하며 현재까지 수직밀폐형 지중열 교환기가 주로 사용되고 있다. 이 수직 밀폐형 지중열 교환기를 보어홀(borehole)이라고 한다. 처음에는 50m 보어홀이 주로 사용되었으나 점차 고심도화 하여 현재는 150m가 많이 사용된다. 보어홀 설치에는 상당한 천공비용이 소요되며 이 천공비용

투고일자 : 2009년 08월 21일, 심사일자 : 2009년 08월 25일, 게재확정일자 : 2009년 10월 18일
교신저자 : 이세균(leesk@chungbuk.ac.kr)

은 보어홀 총 길이에 따라 증가하므로 지중열 설계에서는 보어홀 총 소요길이를 줄이는데 관심을 갖게 된다.

보어홀의 총길이는 여러 요인들에 영향을 받지만 그 중에 지중열전도율과 보어홀 전열저항이 가장 큰 요인이 된다¹⁾. 지중열전도율은 주어진 자연 조건이므로 인위적 변경이 불가능하지만 보어홀 전열저항²⁾은 설계 및 시공방법에 따라 상당한 변화가 가능하므로^{3),4)} 이에 관심을 가질 필요가 있다. 그러나 일반적으로 지중열 건설사들이 이에 관심을 적게 가지는 이유는 보어홀 전열저항이라는 개념 자체를 막연하게 인식하고 있을 뿐 아니라 전열저항의 감소를 통하여 얻어지는 이득을 구체적으로 모르고 있기 때문이다.

본 연구에서는 선형열원 이론⁵⁾에 따른 보어홀 길이와 전열저항 관계식을 도출하고 이 식을 기반으로 전열저항 감소시 얻을 수 있는 이득, 즉, 소요길이 감소효과를 정량적으로 산출할 수 있는 BLRR(borehole length reduction rate, 보어홀 길이 감소율)이란 새로운 개념을 도출하고자 한다. 단, 이와 같은 해석이 선형열원 모델이라는 단순식에 기반을 두기 때문에 먼저 이 식의 신뢰성 확인을 위하여 시험용 보어홀 실험자료를 이용하여 신뢰성 검증을 수행한다.

2. 선형열원모델

보어홀은 그림 1에서 보는 바와 같이 수직 길이 L , 반경 r_b 로 이루어진다. 보어홀은 내부에 폴리에틸렌 U-관을 매설한 후 그라우팅 처리하며 매설된 관 내부로 보어홀 유체를 순환시켜 지중토양과 열교환을 하게 한다.

지중에 매설된 관과 주위 토양사이의 열전달 관계는 선형열원 방법(line source method)⁵⁾의 적용과 Carslaw 와 Jaeger⁶⁾의 근사화 과정을 통하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

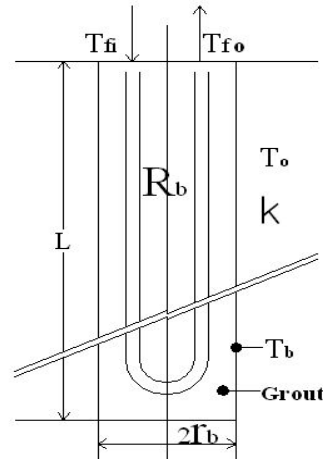


그림 1. 보어홀

$$T_o - T(r,t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (1)$$

식 (1)에서 T_o 는 지중 초기온도, $T(r,t)$ 는 열원으로부터의 거리 r , 시간 t 에서의 온도이며 k 는 지중 토양의 열전도율(또는 유효열전도율), Q 는 토양으로부터 열흡수율, L 은 보어홀 길이이다. 따라서 Q/L 은 보어홀 단위 길이 당 열흡수율이 된다. 또한 윗식의 α 는 토양의 열확산율(thermal diffusivity)이다. 식 (1)로부터 보어홀 벽면($r=r_b$)의 온도

T_b 를 구하면

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

그림 1에서 보어홀 유체의 유입, 유출 온도인 T_{fi} 와 T_{fo} 는 그 차이가 크질 않아 다음과 같이 평균온도 T_f 를 정의하여 사용하며 이 T_f 를 보어홀 유체온도라고 한다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (3)$$

이렇게 정의된 보어홀 유체온도 T_f 와 보어

홀 벽면온도인 T_b 사이에 보어홀 전열저항 R_b 를 다음과 같이 정의한다.²⁾

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

그림 1에서 R_b 는 보어홀 설계와 관련된 내부 인자 이므로 보어홀 내부에 표시 하였고 외부 인자인 k 와 T_o 는 보어홀 외부에 표시 하였다.

식 (2)와 식 (4)로부터 T_f 를 다음과 같이 구 한다.

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

식 (5)는 지중열 흡수의 경우(즉, 난방의 경우)이며 냉방 또는 열전도율 측정을 위한 열응답시험의 경우에는 열 방출이 되므로 열전달의 방향이 반대가 된다. 그러나 열방출의 경우도 관례적으로 열전달률 Q 를 양의 값으로 나타내며 이 경우 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$T_f = T_o + \frac{Q}{L}R_b + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (6)$$

식 (5) 또는 (6)은 무한매질 속에서 무한히 긴 하나의 선형열원에 의하여 이루어지는 해이므로 주위에 유사한 열원이 존재한다면 열간섭에 의하여 다소의 오차가 발생할 수 있다. 그러나 연중 열흡수와 열방출이 같은 평형시스템(balanced system)에서는 지중온도교란은 반경 3m를 넘어가지 않는다는 연구결과도 있으며²⁾, 따라서 일반적으로 보어홀 간격을 5m 정도로 설치하는 국내의 경우 지중부하특성이 매우 편중되어있지 않다면 식 (5) 또는 (6)의 적용은 큰 무리가 없을 것으로 사료된다. 그러나 실제의 보어홀이 U-관에 의하여 약간 비대칭형으로 이루어지고 지중토

양과 열물성치가 매우 다른 그라우트 영역이 존재하는 등 선형열원과 다소 다른 점이 있어 이 식들을 적용하기에 앞서 그 신뢰성 검증이 필요하다. 본 연구에서는 2개의 시험용 보어홀의 열응답 시험자료를 통하여 식 (6)의 신뢰성 검증을 수행한다.

3. 식 (6)의 신뢰성 검증

식 (6)의 신뢰성을 검증하기 위하여 2개의 시험용 보어홀의 열응답 시험 자료를 이용한 표 1은 시험용 보어홀의 사양으로 지중 초기온도(T_o), 보어홀 반경(r_b), 보어홀 길이(L), 방출열량(Q), 시험시간(t_e) 및 보어홀 전열저항(R_b)과 지중토양의 열전도율(k)로 이루어져 있다. 이 중 R_b 와 k 는 시험자료의 해석결과로서 해석방법에 따라서 그 값이 다소 달라질 수 있는 수치이다. 본 연구에서는 본 논문의 저자들이 개발한 수치해석 방법인 SPAN(soil property analysis, numerical)을 사용하였다. SPAN은 일차원 수치모델과 계수 추정법을 결합하고^{7),8)} 4.5시간의 초기 제외 시간을 적용한 프로그램으로 이 방법의 해석결과 신뢰도는 타 방법에 비하여 높은 것으로 나타났다⁹⁾.

표 1. 시험용 보어홀의 사양

Borehole No.	T_o (°C)	r_b (m)	L (m)	Q (kW)	t_e (hr)	k (W/m.K)	R_b (m.K/W)
1	15.34	0.065	102.2	6.713	50	3.231	0.1736
2	15.66	0.075	102.0	6.736	48	3.202	0.1694

표 2는 보어홀 1에 관하여 보어홀 유체온도의 측정값(T_{fm})과 식 (6)에 의한 계산값(T_{fc})을 비교하고 있다. 표에서 계산값의 오차를 나타내는 기준으로 채택한 $er\%$ 는 다음과 같이 정의된 계수이다.

$$er\% = \frac{|T_{fm} - T_{fc}|}{T_{fm}} \times 100 \quad (7)$$

표 2. 시간에 따른 보어홀 유체온도의 측정값과 계산값의 비교(보어홀 1)

시간 (hr)	T_{fm} (°C)	T_{fc} (°C)	er% (%)
1	25.36	28.47	12.26
2	27.79	29.59	6.48
3	29.14	30.24	3.77
4	29.99	30.71	2.4
5	30.61	31.07	1.5
10	32.30	32.19	0.34
20	33.80	33.31	1.45
30	34.46	33.97	1.42
40	34.86	34.43	1.23
50	35.24	34.8	1.25

표 2에 의하면 er%는 초기시간에는 크나 시간의 경과에 따라 급격히 감소하여 5시간 정도 지나면 약 1.5%로 줄어들고 이때부터는 대략 이 범위의 오차수준에 머물고 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 초기 오차가 큰 것은 그림 1에서 보이는 실제 보어홀이 완벽한 1차원적 형상은 아니며 또 주위에 그라우트 영역이 있는 등 선형열원과 다소 다른점이 있기 때문이다. 따라서 이와 같은 차이를 극복하고 1차원적 열거동을 형성하기 위해서는 다소간의 시간이 필요하다. 표 3에서는 보어홀 2에 관한 비교값을 보이고 있다. 여기서도 er%는 표 2와 유사한 경향을 보인다. 단, 여기서는 약 20시간까지 er%는 계속 감소하며 20시간서부터 대략 일정한 오차수준을 유지하고 오차범위도 표 2보다 훨씬 적게 나타나고 있다. 이것은 아마도 k 와 R_b 의 값이 보어홀 1보다 더 정밀하게 추정된 결과 때문이 아닌가 생각된다. 그러나 대략 1%대인 표 2의 오차범위도 충분히 허용범위 내로 사료되며 따라서 식 (5) 또는 (6)의 선형열원 해석은 대략 초기 10시간 이후부터는 신뢰성 있는 해를 제공 하는 것으로 볼 수 있다.

표 3. 시간에 따른 보어홀 유체온도의 측정값과 계산값의 비교(보어홀 2)

시간 (hr)	T_{fm} (°C)	T_{fc} (°C)	er% (%)
1	24.07	28.11	13.9
2	26.96	29.25	8.5
3	28.25	29.91	5.9
4	29.13	30.39	4.3
5	29.78	30.75	3.3
10	31.52	31.89	1.2
20	32.91	33.03	0.4
30	33.80	33.69	0.3
40	34.17	34.17	0
48	34.59	34.47	0.4

4. 보어홀 전열저항과 길이의 관계

본 연구에서는 다음과 같은 조건하에서 보어홀 전열저항과 보어홀 길이의 관계를 해석한다.

부하조건 : 난방

지중부하 : 일정

총 가동시간(t_e) : 4개월($\approx 10,368,000$ sec)

지중 조건

초기온도 : $T_o = 15^\circ\text{C}$

체적비열 : $\rho c = 2.16\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$

지중열전도율 : $k = 2 \sim 4\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$

보어홀

반경 : $r_b = 0.075\text{m}$

전열저항 : $R_b = 0.1 \sim 0.3\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$

보어홀 유체의 최종 온도 :

$T_{fe} = 1 \sim 7^\circ\text{C}$

위에서 지중부하가 일정하다고 한 것은 총 가동시간(t_e) 동안 일정열량 Q 를 지중으로부터 연속적으로 흡수함을 의미한다. 또한 위의 T_{fe} 는 시간 t_e 에서의 보어홀 유체온도를 의미한다.

부하가 난방이므로 식 (5)를 사용하게 되고 시간 t_e 에서 온도 T_{fe} 를 적용하여 다소 변형시키면 다음과 같은 표현이 될 수 있다.

$$\frac{L}{Q} = \frac{R_b + \frac{1}{4\pi k} (\ln \frac{4\alpha t_e}{r_b^2} - 0.5772)}{T_o - T_{fe}} \quad (8)$$

식 (8)에서 보면 단위 지중부하당 소요되는 보어홀 길이(L/Q)는 주어진 조건($\rho c, t_e, r_b$) 하에서 R_b, k, T_{fe} 의 함수로 나타남을 알 수 있다.

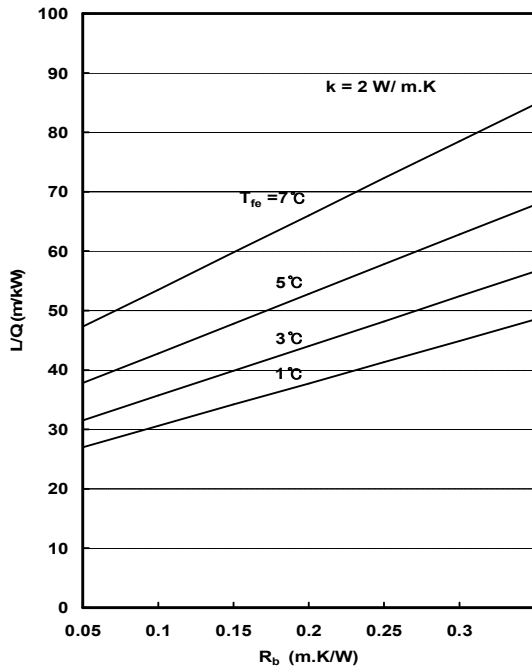


그림 2. 전열저항에 따른 보어홀길이의 변화($k=2\text{ W/m}\cdot\text{K}$ case)

그림 2~4는 주어진 k, T_{fe} 값의 조건하에서 R_b 에 따라 L/Q 가 어떻게 변화해 나가는지를 보여준다. 그림에서 보면 변화는 직선적으로 나타나는데, 이것은 T_{fe} 에 따라 경사도가 결정되기 때문이다. 일반적으로 R_b 의 감소에 따라 보어홀 길이의 감소가 어떻게 이루어지는가에 관심은 있으나 이에 관하여 해답이 될

뚜렷한 기준이 없었다. 따라서 본 연구에서는 $BLRR$ (borehole length reduction rate, 보어홀 길이감소율)이라는 새로운 개념을 다음과 같이 정의하여 이에 관한 해답으로 제시하고자 한다.

$$BLRR = \frac{(L/Q)_{R_b} - (L/Q)_{0.9R_b}}{(L/Q)_{R_b}} \times 100 \quad (9)$$

식 (9)에서 알 수 있듯이 $BLRR$ 은 동일한 온도조건 하에서(즉, T_{fe} 가 동일한 경우) R_b 를 10% 감소시킬 때 얻을 수 있는 보어홀 길이 감소율을 %로 나타낸 것이다. 즉, 예를 들어 R_b 를 40%정도 감소시킬 수 있다면 이때의 길이감소 효과는 식 (9)에서 구한 $BLRR$ 에 4 배를 해줌으로써 대략 구할 수 있다. 이러한 추산이 가능한 것은 동일온도 조건하에서 R_b 에 따라 L/Q 가 직선적으로 나타나는 특성이 있기 때문인 것이다.

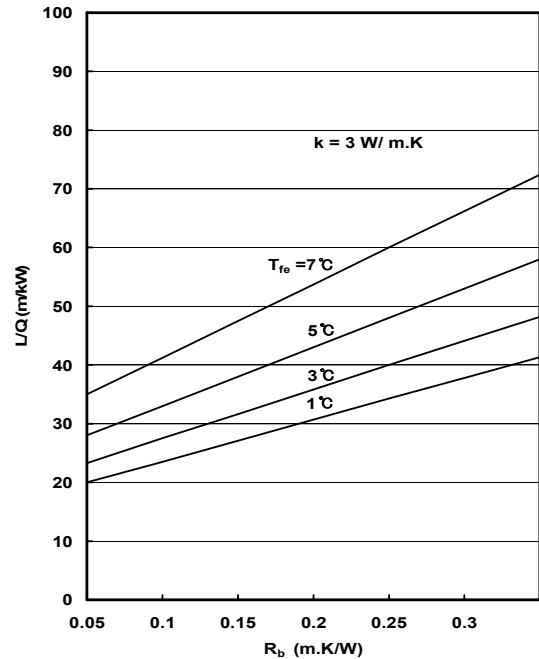


그림 3. 전열저항에 따른 보어홀 길이의 변화($k=3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ case)

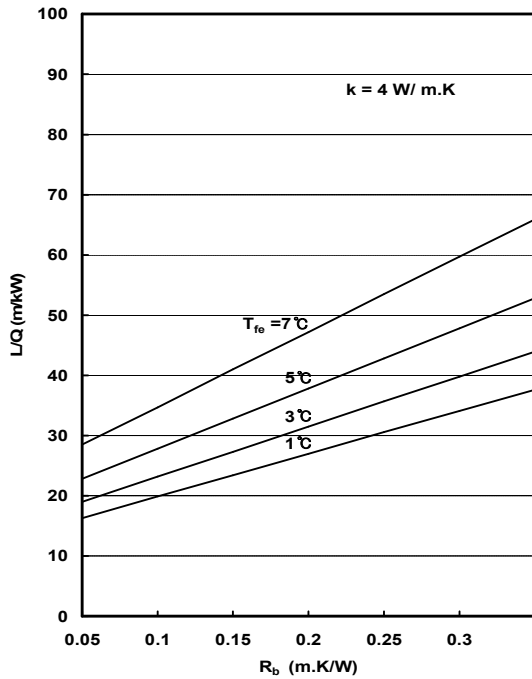


그림 4. 전열저항에 따른 보어홀 길이의 변화($k=4\text{ W/m}\cdot\text{K}$ case)

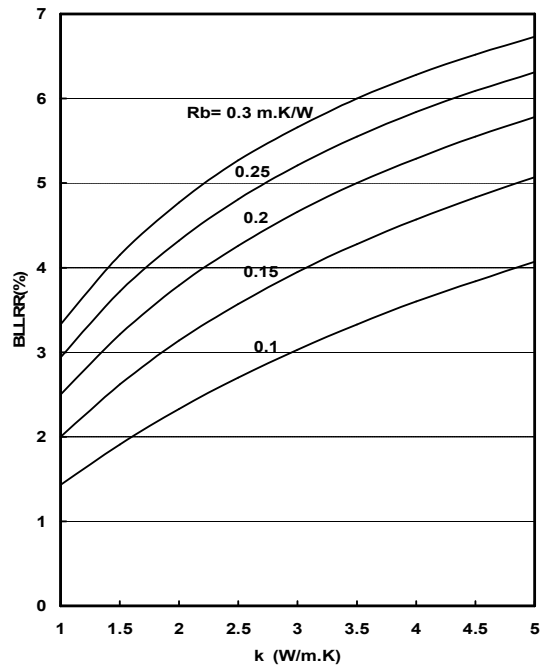


그림 6. 지중열전도도에 따른 BLRR의 변화

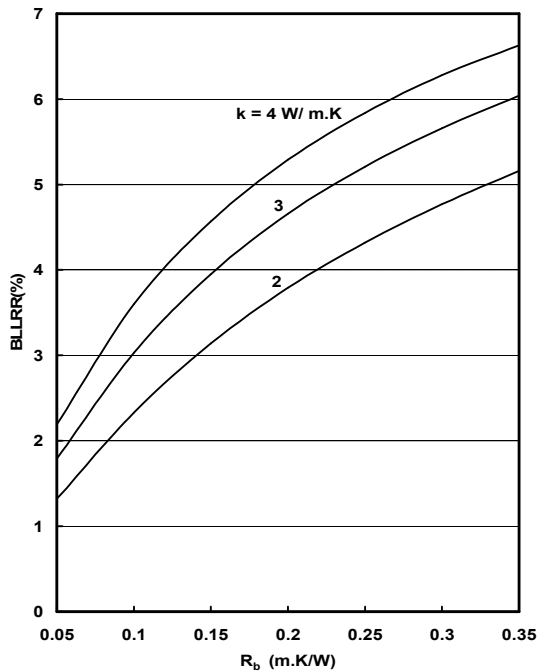


그림 5. 보어홀 전열저항에 따른 BLRR의 변화

그림 5에서는 주어진 k 값 하에 R_b 에 따른 $BLRR$ 의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 보어홀 길이감소효과는 k 값이 클수록 그 효과가 크다. 예를 들어 $R_b=0.2\text{ m}\cdot\text{K/W}$ 인 보어홀의 경우 $k=3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 토양에서의 $BLRR=4.66\%$ 로 $k=2\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 인 토양의 $BLRR=3.79\%$ 보다 높다. 이것은 토양에서의 열확산이 높으면 보어홀에서의 열전달 효과도 함께 커지는 상승작용에 기인된 것으로 생각된다.

그림 6은 독자의 편의를 위하여 그림 5와 동일한 내용을 좌표를 바꾸어 k 값에 따른 $BLRR$ 의 변화를 보여주고 있다. 그림 5 또는 6을 통하여 보어홀 전열저항 감소에 따른 길이감소효과를 추산할 수 있고 따라서 이 그림들은 보어홀 설계에 주요 참고자료로 활용될 수 있다(6절의 예 참조).

5. 지중열 설계프로그램(EED) 해석과의 비교

그림 5 또는 6의 $BLRR$ 은 선형열원이라는

단순 열모델과 함께 위에서 제시한 단순 난방 조건하에 산출된 결과로서 그 적용의 일반성에 관한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 지중열 설계프로그램 중 신뢰성이 비교적 높고 오래된 EED(earth energy designer)¹⁰⁾를 이용하여 검증을 수행한다. EED는 설계프로그램이므로 지중조건, 부하조건, 총가동연수 등을 구체적으로 명기하여야 하며 여기서 사용된 기본적인 변수들은 다음과 같다.

- 지중토양 및 보어홀 :
 - $k=3W/m \cdot K$,
 - $\rho c=2.16MJ/m^3 \cdot K$, $T_o = 15^\circ C$
 - $R_b=0.2m \cdot K/W$, $L=100m$
- 냉방기간 : 5, 6, 7, 8월(120일)
난방기간 : 11, 12, 1, 2월(120일)
- 냉, 난방 기간중 지중부하는 보어홀 단위 길이당 20W(즉, 20W/m)로 일정
- 총 가동연수 : 20년

표 4. EED 해석결과

보어홀	부하	BLRR(%)
단일	평형	4.8
단일	난방	4.5
단일	냉방	4.5
다중	평형	4.4
다중	난방	3.8
다중	냉방	3.8

표 4는 위와 같은 조건하에서 산출된 EED 해석결과를 보이고 있다. 이 표에서 단일이라 함은 보어홀 하나의 경우이고 다중이라 함은 보어홀 여러개의 경우(여기서는 10개 적용)이다. 또한 부하조건에서 평형이라 함은 지중 부하(즉, 지중 채열률)가 냉방과 난방기간 중 같음을 의미하며 여기서 냉방이란 난방이 없는 냉방 전용, 난방이란 냉방이 없는 난방 전용의 경우(즉, 부하가 한쪽으로 편중된 경우)를 의미 한다. 또한 다중 보어홀의 경우 보어홀 간격은 일반적으로 권장하는 5m를 적용하

였다. EED의 계산과정은 먼저 보어홀 길이가 주어진 상태에서 보어홀 유체온도를 구한다음, 동일한 최대, 최소 온도조건하에서 보어홀 전열저항을 10% 줄여서 보어홀 길이를 구한 후 두 길이의 비로서 BLRR을 구하게 된다.

표 4에서 보면 단일 보어홀 시스템의 BLRR이 다중 시스템보다 다소 높게 나타나고 있는데 이것은 보어홀 간의 다소의 열적 간섭의 결과로 생각된다. 또한 부하조건은 평형의 경우가 난방 또는 냉방 전용보다 BLRR이 다소 높는데 이것은 총 사용기간 20년 동안 부하가 편중되어 지중 온도가 한쪽으로 편향 되므로써 보어홀 전열저항의 효과가 다소 줄어들었음을 의미한다 하겠다. 우리나라는 냉방과 난방기간이 뚜렷하여 일반적으로 지중열 부하조건은 평형에 가깝다. 따라서 표 4의 단일평형 또는 다중평형의 BLRR=4.8% 또는 4.4%는 그림 5의 BLRR=4.66% ($k=3W/m \cdot k$, $R_b=0.2m \cdot K/W$ 인 경우)에서 과히 멀지 않으며 따라서 본 연구의 주요 해인 그림 5 또는 그림 6의 결과는 일반적으로 그 적용에 큰 무리가 없는 것으로 사료된다.

6. 보어홀 전열저항에 영향을 주는 인자들

보어홀에 사용되는 관수, 뒤채움재의 열물성치, 이격기(spacer clip) 사용 여부 등은 전열저항에 큰 영향을 주는 인자들이다. 이 외에 보어홀 직경도 다소 영향을 주는 것으로 나타났다. 표 5에서는 이러한 영향들을 종합하여 그 효과를 나타내었다⁹⁾. 표 5를 이해하기 위하여 첫줄의 관수를 예로 들면 2관식의 전열저항을 100%로 보았을 때 4관식은 약 40% 감소하여 60%정도 된다는 것이다. 또한 이표에서 관수를 제외한 뒤채움재, 이격기, 보어홀 직경 등에 관한 영향은 전부 2관식을 기준으로 추정된 값이다. 표 5를 그림 5 또는 6과 더불어 사용한다면 보어홀 길이감소효과를 쉽게 추산 할 수 있다.

표 5. 전열저항에 영향을 주는 인자들 및 그 효과

관수	2관	4관
	100%	60%
뒤채움재	벤토나이트	벤토나이트+실리카샌드
	100%	80%
이격기	사용무	사용
	100%	60~70%
보어홀 직경	0.15 m	0.13 m
	100%	90%

예를 들어 $k=3 W/m \cdot K$, $R_b = 0.2 m \cdot K/W$ 인 경우 그림 5에서 보면 $BLRR=4.66\%$ 로 나타남으로 2관식 보어홀을 4관식으로 변경하여(표 5에서 보면 R_b 는 40%정도 감소됨) $R_b = 0.12 m \cdot K/W$ 로 줄인다면 길이감소효과는 $4.66\% \times 4 = 18.64\%$ 정도로 나타나는 것으로 추산된다.

7. 결 론

본 연구에서는 보어홀 전열저항의 개선에 따라 나타나는 길이감소효과를 추정할 수 있는 방법을 연구하고 이를 위하여 지중열전도율과 보어홀 전열저항의 함수로 표현되는 $BLRR$ 이라는 새로운 개념을 제시하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 선형열원 해석과 보어홀 열거동의 측정결과를 비교한 결과 약 10시간 이후부터는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- (2) 선형열원 모델을 기반으로 $BLRR$ 이라는 새로운 개념이 제시되었다.
- (3) 이 $BLRR$ 은 k 값에 따라 그 값이 증가한다. 따라서 k 가 높은 지역에서는 R_b 감소에 따른 효과가 더욱 커짐을 알 수 있다.
- (4) 본 연구의 결과는 다중 보어홀의 경우 평형시스템에서는 잘 적용되나 부하가 편중되면 다소의 오차를 보였다.

후 기

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지

원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 우정선, 김대기, 이세균, 지중열원 열펌프 시스템의 난방성능 해석, 설비공학 논문집, 제16권, 제12호, pp. 1175~1182, 2004.
2. Claesson J. and Eskilson P., Conductive Heat Extraction to a Deep Borehole: Thermal Analysis and Dimensioning Rules, Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 509~527, 1988.
3. Remund, C. P., Borehole Thermal Resistance : Laboratory and Field Studies, ASHRAE Transactions : Symposia, CH-99-2-1, pp. 439~445, 1999.
4. Kavanaugh, S. P. and Allan, M. L., Testing of Thermally Enhanced Cement Ground Heat Exchanger Grouts, ASHRAE Transactions : Symposia, CH-99-2-2, pp. 446~450, 1999.
5. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump, ASHVE Transactions, Vol. 47, pp. 119~122, 1948.
6. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.
7. 이세균, 김대기, 우정선, 박상일, 1차원 모델에 의한 지중열교환기의 열거동 해석, 한국태양에너지학회논문집, Vol. 25, No. 1, pp. 97~104, 2005.
8. 이세균, 우정선, 노정근, 김대기, 1차원 수치모델과 현지측정에 의한 지중열전도율 및 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구, 설비공학 논문집, Vol. 18, No.10, pp. 783~790, 2006.
9. 우정선, 이세균 외, 현지 지중열전도도 측정 기술(최종보고서), 지식경제부, 2008. 5.
10. Hellstrom G. and Sanner B., PC-programs for Borehole Heat Exchanger Design, Asterweg 2, D-35633, Lahnu, Germany, 2000.