

# 트랜시스를 이용한 지열 응답 함수 경계 조건 검증 및 시뮬레이션 모델 개발에 관한 연구

## Verification of the Boundary Conditions Used for Generating g-functions and Development of a TRNSYS Simulation Model Using g-functions

김 의 중(Eui-Jong Kim)<sup>†</sup>

프랑스 리옹 국립 응용 과학원(INSA de Lyon) 에너지-열 공학 센터

Center for Energy and Thermal Sciences of Lyon, INSA de Lyon, Villeurbanne 69621, France

(Received June 10, 2014; revision received July 3, 2014; Accepted: July 6, 2014)

**Abstract** To verify different boundary conditions on the borehole wall, which are commonly used for generating g-function, the well-known TRNSYS simulation model, DST (Duct STorage), is employed. By letting the fluid circulation determine the borehole wall conditions, a DST-based g-function is induced with numerical processes proposed in this work. A new TRNSYS module is also developed to accommodate g-function data and predict dynamic outlet fluid temperatures. Results showed that the modified g-function, which is different from Eskilson's original g-function, is closer to the DST-based g-function. This implies that the uniform heat transfer rates over the height can be used for good approximation. In fact, simulations with the modified g-function showed similar results as the DST model, while Eskilson g-function case deviated from the DST model as time progressed.

**Key words** g-function, Differences in boundaries(경계 조건 차이), DST(덕트 스토리지 모델), TRNSYS simulation model (트랜시스 시뮬레이션 모델)

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: eui-jong.kim@insa-lyon.fr

### 기호설명

- $B$  : 지열 교환기 배열 간격 [m]
- $c$  : 비열 [J/kg°C]
- $D$  : 지열 교환기의 매설 깊이 [m]
- $H$  : 각 교환기 길이 [m]
- $h$  : 관내 열전달 계수 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $k$  : 열전도율 [W/m°C]
- $M$  : 총합 질량 유량 [kg/s]
- $\dot{m}$  : 질량 유량 [kg/s]
- $n$  : 지열 교환기 수
- $q$  : 교환기 단위 길이 당 평균 열류 [W/m]
- $R$  : 열 저항 [m°C/W]
- $S$  : 보어 홀 형태 계수
- $r$  : 반경 [m]
- $T$  : 온도 [°C]
- $t$  : 시간 [sec]
- $V$  : 체적 [m<sup>3</sup>]

$\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

### 하첨자

- $b$  : 보어 홀(borehole)
- $d$  : 하강 관(down-flow)
- $f$  : 유체(fluid)
- $g$  : 그라우트(grout)
- $i$  : 유체 입구 측(inlet)
- $o$  : 유체 출구 측(outlet)
- $p$  : 파이프(leg of U-tube)
- $s$  : 지중(soil)
- $u$  : 상승 관(up-flow)

### 1. 서 론

지열 교환기 열펌프 시스템은 안정적인 효율로 건물의 냉난방 시스템으로 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 널리 보급되고 있으며, 최근 다른 기술에 비해 설치비가 적게 들어 도시의 계간 열저장 장치로 각광을 받고 있다.

그러나 지층이 차지하는 크기와 이에 따른 열용량이 크고 안정적인 시스템 설계와 운용을 위해서 최소 10년 이상 장기간 운전애 따른 영향을 평가해야 한다. 따라서 대상 영역의 직접 계산 보다는 일정한 물리적 자극에 따른 시스템의 응답을 미리 계산하여 이를 이용하는 응답 함수 법이 효과적이다.

Eskilson<sup>(1)</sup>은 비교적 단순한 2차원(r, z) 수치 모델을 이용한 단일 지열 교환기의 응답 함수를 계산하고 이를 특정 배열 하에서 공간 중첩(Spatial Superposition)하여 전체 평균 응답 함수를 계산하였다. 얻어진 지열 응답 함수 g-function은 아래 식(1)의 우측 항 g로 표현되며, 해당 지층 열전도율(k<sub>s</sub>)에서 평균 온도 변화 T<sub>b</sub>-T<sub>s</sub> (보어 홀 온도-초기 지층 온도)와 평균 열전달(q(W/m))과의 관계를 설명한다.

$$T_b = T_s + \frac{q}{2\pi k_s} \times g(t/t_s, r_b/H, B/H) \quad (1)$$

이후 해석(Analytical) 모델인 FLS(Finite-Line Source)<sup>(2)</sup>가 g-function 생성을 위해 자주 사용되고 있다. FLS를 보다 효과적으로 사용하기 위해 Lamarche와 Beauchamp<sup>(3)</sup>은 전체 적분 함수 개수를 줄이면서 높이에 평균 온도를 구할 수 있는 수식을 제안하였고 이후 Claesson과 Javed는<sup>(4)</sup> 스펙트럴(Spectral) 기법을 이용하여 FLS를 변형하여 사용하였으며 Cimmino와 Bernier<sup>(5)</sup>은 FLS의 라플라스 변환을 제안하였다.

한편 Fossa<sup>(6)</sup>는 기존 Eskilson에 의해 제안된 g-function과 FLS를 이용한 함수 사이에 차이가 존재하는 것을 밝혔으며 Cimmino와 Bernier<sup>(7)</sup>는 이를 해법의 차이가 아닌 g-function을 계산할 때 사용된 경계 조건이 다르기 때문이라고 설명하였다. 즉 Eskilson의 g-function에서 사용된 경계 조건이 FLS 기반에서 흔히 사용되고 있는 경계 조건에 비해 평균 열류에 따른 온도 변화가 작게 나타난다고 밝혔다.

Kim<sup>(8)</sup>은 이 두 가지 경계 조건의 차이를 자세히 설명하고, EED<sup>(9)</sup>를 비롯한 대부분의 지열 교환기 설계 도구가 Eskilson의 g-function 기반으로 계산이 수행되고 있다고 언급하면서, 지열 교환기 설계 길이 계산 방법에 대해 연구하였다. 시험 결과 서로 다른 경계 조건 따른 g-function의 차이가 최종 설계 길이에서 약 11%까지 차이를 야기한다고 밝혔다.

최근 대두된 이러한 경계 조건 문제에서 차이가 발생하는 경우는 교환기 수가 많고 특성 시간(t<sub>s</sub>) 대비 운전 기간이 큰 구간일 때이다. 때문에 실험적 방법이나 상세한 3D 모델을 통해서 검증하기가 쉽지 않아서 현재 두 경계 조건 중 어느 값이 좀 더 실제와 가까운지는 지열 분야의 연구 과제로 남겨져 있다.

이에 본 연구에서는 잘 알려진 수치 모델을 사용하

여 실제에 보다 가까운 경계 조건을 유도하고 얻어진 g-function과 위의 두 경우를 비교하고자 한다. 또한 g-function 데이터를 직접 이용하는 시뮬레이션 모델을 제안하고 이를 이용하여 서로 다른 g-function 사용 시 시뮬레이션 결과를 비교하려고 한다.

## 2. 경계 조건에 따른 g-function 차이

Fig. 1은 Eskilson이 제안한 g-function과 Cimmino와 Bernier에 의해서 제안된 g-function(이하 Modified g-function이라 명칭) 사이의 경계 조건 설정 차이를 설명한 것이다. 두 경계 조건 모두 각 열교환기의 평균 보어 홀 온도(T<sub>b</sub>)는 동일하다고 가정하였다. 이는 지열 교환기 시스템의 일반적 배열인 병렬식에서 입구 측 온도가 동일하기 때문에 보어 홀 외벽 온도(T<sub>b</sub>) 사이의 온도차가 크지 않을 것이라는 가정에 기인한다. 따라서 각 교환기의 열류 값은 차이가 생기며 그림에서 볼 수 있듯이 중앙에 위치한 열교환기의 경우 열 중첩 현상으로 교환기 주변 온도가 상대적으로 높으므로 열류 값은 외곽 교환기에 비해 작게 된다. 이러한 지열 교환기 사이의 공통된 기본 가정 아래 각 교환기의 높이에 따른 경계 조건은 서로 다르게 설정되었다. Eskilson g-function에서는 높이에 따른 온도가 동일할 것이라고 가정하였으나 Modified g-function에서는 열류가 동일하다고 설정하였다.

이러한 경계 조건의 차이는 서론에서 언급했듯 시간 스케일이 커질 때 차이를 야기하며 이는 본 연구를 위해 사용된 g-function을 나타낸 Fig. 2에서도 확인할 수 있다. 각각 37개 19개의 열 교환기를 원형 배열로 배치하고 각 교환기 사이의 간격이 5 m일 때의 위의 두 경계 조건하에서의 결과를 나타낸다.

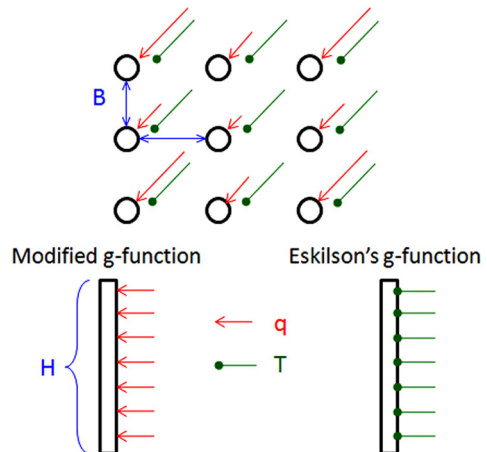


Fig. 1 Boundary conditions between the modified and Eskilson g-functions.

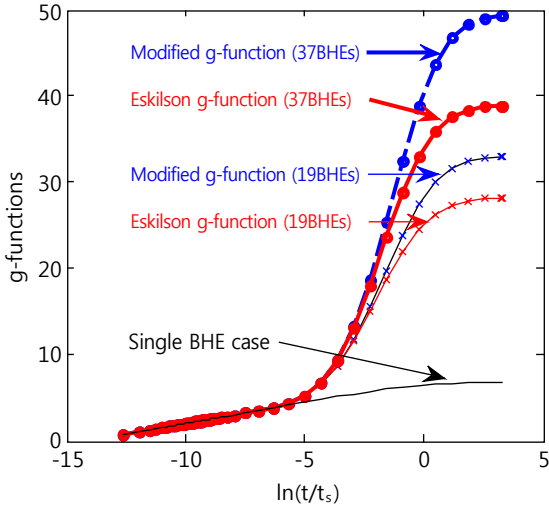


Fig. 2 g-functions for 37- and 19-BHEs cases under different boundary conditions.

그림에서 약  $\ln(t/t_s) = -6$ 에서부터 단일 열교환기의 g-function과 차이를 보이게 되며 이는 이웃 열교환기와의 열 중첩 현상에 기인한다. 약  $\ln(t/t_s) = -4$ 에서부터 두 경계 조건사이의 차이가 시작되어  $\ln(t/t_s) = 0$  부근에서는 경계 조건 사이의 차이가 현저하게 보인다. 이는  $H = 100$  m,  $a = 0.080$  m<sup>2</sup>/day일 때 운전 후 약 40년을 가리킨다.

### 3. DST 모델을 이용한 g-function 검증

#### 3.1 트랜시스 DST 모델

Hellstrom<sup>(10)</sup>이 제안한 3D 수치 시뮬레이션 모델인 DST (Duct Storage)는 지열 교환기를 이용한 열저장 시스템 시뮬레이션 목적으로 개발된 것으로 구분된 세 영역을 따로 계산하여 중첩하는 방식을 택하고 있다. 이는 매우 복잡한 가정과 계산을 요구하며 Chapuis와 Bernier는 논문<sup>(11)</sup>에서 DST 모델의 계산 구조를 상세히 설명하였다. 현재 DST 모델은 트랜시스 Type 557로<sup>(12)</sup> 변환되어 제공되고 있다.

개발자가 설정한 가정에 의해 DST 모델은  $V_{DST} = \pi \times n \times H \times (0.525 \times B)^2$ 로 표현되는 저장 부피만을 파라미터로 사용할 뿐 지열 교환기 위치를 특정할 수 없다. 즉 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실린더 형 저장 공간( $V_{DST}$ )에 각 지열 교환기가 균일하게 배열되는 가정 아래서만 계산되므로 이외의 배열 형태에 대해서는 많은 오차가 생길 수 있다. 반면 효율적인 수치 모델을 적용하여 특별히 장기간에 걸친 시뮬레이션에 큰 장점이 있으므로 DST 모델은 지열 교환기와 시스템을 결합한 동적 시뮬레이션용으로 자주 사용되고 있다. 뿐만 아

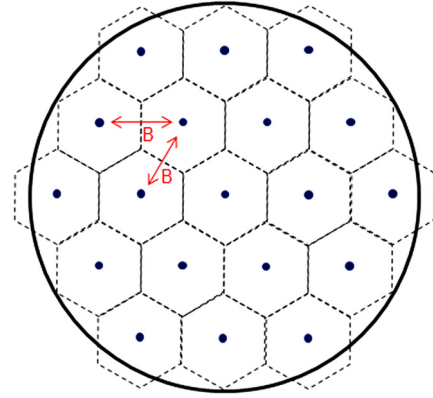


Fig. 3 Schematic of the 19 boreholes configuration in the DST model.

니라 해당 배열에서는 안정적인 값을 나타내므로 새롭게 개발된 모델의 벤치마킹 용도로도 널리 사용되고 있다(Bertagnolio et al.,<sup>(13)</sup>).

#### 3.2 DST를 이용한 g-function 유도 방법

DST 모델을 이용하여 g-function을 유도하는 방법을 제안하고자 한다. DST를 이용한 응답 함수를 구하고자 한 아이디어는 우선 DST 모델이 앞에 언급했듯 수십 개의 지열 교환기를 계산하는데 계산 효율이 좋을 뿐만 아니라 모델이 보여 홀과 지중 공간 그리고 U-tube내 순환 유체까지를 모두 포함하고 있어 모델 스스로가 유체 순환에 따른 물리적 관계에 의해 보여 홀 외벽의 높이별 온도를 결정할 수 있다는 데에서 출발하였다.

트랜시스를 이용하여 시간 간격마다 전체 열 교환기를 통해 전달된 총 시간별 에너지  $Q(W)$ 를 반복 계산을 통해서 일정하게 유지하면서 시간에 따른 평균 보여 홀 외벽 온도를 유추하여 식(1)의 g값을 계산한다.

여기서 투입 에너지  $Q(W)$ 은 다음 식(2)를 통해 구할 수 있다. 식(1)에서 필요한 단위 길이 당 열류  $q(W/m)$ 는  $Q$ 값을 열 교환기 높이  $H$ 와 총 열교환기 개수  $n$ 으로 나누어 계산할 수 있다.

$$Q = Mc_f(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (2)$$

트랜시스 DST 모델(Type 557)은 기본적으로 유체 입구 측 온도와 유량에 따른 출구 측 온도만을 제공하므로 g-function 계산을 위해 필요한 보여 홀 외벽 온도 ( $T_b$ )는 다음의 식(3)을 이용해서 계산하였다. 여기서  $T_f$ 는 U관내의 평균 유체 온도로  $T_f = (T_{f,o} + T_{f,i})/2$ 를 이용하여 계산한다.

$$T_b - T_f = qR_b \quad (3)$$

보어 홀 열 저항  $R_b$ 는 Remund<sup>(14)</sup>에 의해 제안된 식 (4)를 사용하였으며 여기서  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 는 U관의 위치에 따른 기하학 변수로 각각 17.44268와 -0.6052를 사용한다. 본 연구의 시뮬레이션에 이용된 물성치를(Table 1 참조) 그대로 사용하여 구해진  $R_b$  값은 0.1090이다.

$$R_b = \frac{\ln(r_{p,o} - r_{p,i})}{4\pi k_p} + \frac{1}{4\pi r_{p,i} h_f} + \frac{1}{S_b k_g}, \quad (4)$$

$$S_b = \beta_0 \left( \frac{r_{b,c}}{r_{p,o}} \right)^{\beta_1}$$

#### 4. g-function 이용 시뮬레이션 모델 개발

##### 4.1 유체 및 보어 홀 모델

본 연구에서는 g-function이 제공하는 평균 보어 홀 온도( $T_b$ )를 경계 조건을 하는 보어 홀(grout+fluid) 모델을 제안한다. 보어 홀 외벽과 U관 사이 그라우트(grout)는 U관의 형태와 위치를 고려한 2차원 수치모델로 구성하였으며 사용 격자와 해석 방법은 Kim et al.<sup>(15)</sup>에 의해 개발된 영역 분할과 모델 축소(Reduction) 기법을 그대로 이용하였다. 따라서 그라우트 모델은 식(5)와 같은 일반적인 스테이트-스페이스(state-space) 모델로 표현된다.

$$X = AX + BU \quad (5)$$

$$Y = CX + DU$$

위의 행렬 ABCD를 정의하는 방법은 위에서 언급한 참고 문헌<sup>(15)</sup>에 상세히 소개되었다.

식(5)에서 입력 값은  $U = \{q_d, q_u, T_b\}$ 를 사용하며 반대로 출력 값은  $Y = \{T_{p,o,d}, T_{p,o,u}, q\}$ 와 같다. 위에서 언급했듯  $T_b$ 는 g-function을 통해 제공되고 전체 지열 교환기 U관의 각 지관(leg) 평균 온도( $T_{f,d}, T_{f,u}$ )와 상응하는 열류 값( $q_d, q_u$ )은 다음에서 설명할 유체 모델과의 반복 계산을 통해 정의되며 수렴 후 지중으로의 열류  $q$ 는 다시 g-function 모델(제 4.2절 참조)의 입력 값으로 제공된다.

U관의 각 지관에 대해 단순 유체 모델을 정의했으며 이는 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\rho_f c_f A_f \frac{dT_{f,d(u)}}{dt} = \frac{(T_{p,o,d(u)} - T_{f,d(u)})}{2R} + \frac{2\dot{m}c_f(T_{f,i(o)} \mp T_{f,d(u)})}{H} \quad (6)$$

여기서 유체 유동과 지관을 모두 포함한 총합 열 저

항  $R$ 은 식(4)의 그라우트 항을 제외한 앞의 두 항을 그대로 사용하였다. 식의 온도 변수의 하첨자 괄호와 이중 부호(∓)의 아래 부호는 U관의 리턴(upward flow case) 지관을 가리킨다.

$T_{p,o,d}, T_{p,o,u}$ 는 위의 그라우트 모델의 출력 값을 이용하고 반대로 그라우트 모델에 필요한 열류 값  $q_d, q_u$ 은 위 식으로 계산된 지관별 유체 평균 온도와 지관의 파이프 외벽 온도  $T_{p,o,d}, T_{p,o,u}$ 값의 차이를 총합 열 저항  $R$ 로 나누어 계산할 수 있다. 참고로 각 지관의 평균 유체 온도  $T_{f,d(u)}$ 값은 각 지관 양 끝 온도의 중심 값을 사용한다.

##### 4.2 g-function을 이용한 보어 홀 외벽 온도의 결정

이 장에서는 앞서 설명한 g-function을 이용하여, 전체 열교환기 평균 열류  $q$ 로부터  $T_b$ 를 계산하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

우선 g-function은 Cimmino와 Bernier<sup>(5)</sup>에 의해 개발된 Fig. 4와 같은 프리 프로세서를 사용하여 계산하며 이 프로세서로 앞서 설명한 두 경계 조건에서의 g-function을 모두 구할 수 있다. 또한 DST 모델과는 달리 사용자가 자유롭게 지열 교환기를 배열하고 이에 대한 g-function 값을 계산할 수 있는 장점이 있다.

식(1)의 g-function은 일정한 열류  $q$ 값으로부터 유도된 함수로 실제 시뮬레이션에서는  $q$ 값이 시간에 따라 변화하기 때문에 g-function을 이용할 때 이를 고려하여야 한다.

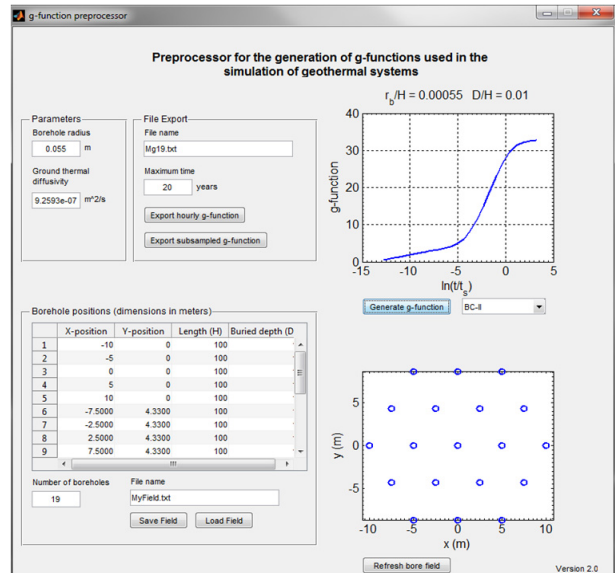


Fig. 4 Pre-processor developed by Cimmino and Bernier<sup>(5)</sup> for M. and E. g-functions.

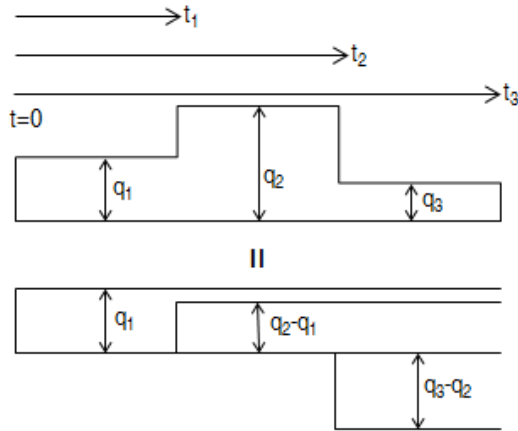


Fig. 5 Principle of the temporal superposition.

예를 들어 Fig. 5와 같이 시간에 따라 변화하는 열류  $q_1, q_2, q_3$ 는 시간 중첩(temporal superposition)을 예상하여  $q_1, q_2-q_1, q_3-q_2$ 로 표현할 수 있고 새롭게 표현된 열류 값을 식(1)에 대입하고 식(7)과 같이 시간 중첩 방법을 이용하면 보어 홀 외벽의 평균 온도 변화  $\Delta T_b (= T_s - T_b)$ 를 계산할 수 있다.

여기서 예를 들어  $g_{t_3-t_1}$ 의 값은 Fig. 2에서  $\ln((t_3-t_1)/t_s)$ 에 해당하는 g-function값을 찾아서 그대로 사용하면 된다.

$$\Delta T_b = \frac{q_1}{2\pi k_s} g_{t_3-0} + \frac{q_2 - q_1}{2\pi k_s} g_{t_3-t_1} + \frac{q_3 - q_2}{2\pi k_s} g_{t_3-t_2} \quad (7)$$

### 4.3 트랜시스 Type 개발

위의 그라우트 모델, 유체 모델 및 g-function 시간 중첩 프로세스를 모두 포함한 새로운 트랜시스 시뮬레이션 모델을 개발하였다. Fig. 2와 같은 g-function을 데이터 쌍으로 정리한 텍스트 파일과 보어 홀의 형상, 지중 물성치 등이 파라미터 값으로 사용된다. 개발된 모델은 다른 시스템 모델과 결합하여 사용할 수 있으며 이 때 주 입력 값은 유체 입구 측 온도와 유량이며 출력 값은 출구 측 온도가 된다.

## 5. 결 과

본 연구에서는 트랜시스 시뮬레이션을 위해 지열 교환기 모델에 필요한 입구 측 온도를 합성 비대칭 부하 프로파일(Synthetic asymmetric load profile)<sup>(13)</sup>을 이용하여 재생하였다. 이 부하 프로파일은 지열 교환기 모델 사이의 비교 목적으로 자주 사용되고 있으며, 수학적 함수에 의해 표현되어 쉽게 재생할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 냉방이 우세한 건물에 해당하

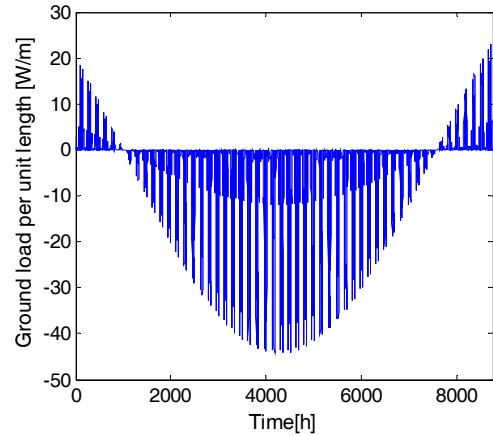


Fig. 6 Synthetic asymmetric load profile.

는 지중 부하 프로파일을 이용하였으며 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 시간별  $q$ 로부터 식(8)과 같이 지열 교환기의 입구 측 유체 온도를 계산할 수 있다. 시뮬레이션 기간 동안 유량은 지열 교환기 당 0.2 kg/s로 설정하였다.

$$T_{f,i} = T_{f,o} + \frac{qH}{mc_f} \quad (8)$$

그 외 시뮬레이션에 필요한 물성치 등의 입력 값은 Table 1에 정리하였다. g-function은 Fig. 3의 원형 배열된 19개의 지열 교환기와 외곽으로 한 층이 더 추가된 37개 교환기에 대해 서로 다른 두 경계 조건에 대해서 값을 생성하였다(Fig. 2 참조).

Table 1. Geometries and properties of the boreholes and soil

Parameter	boreholes
Borehole height, $H$	100 m
Distance between boreholes, $B$	5 m
Borehole radius, $r_b$	0.055 m
U-tube inner radius, $r_{p,i}$	0.013 m
U-tube outer radius, $r_{p,o}$	0.016 m
Center-to-C. distance of tubes	0.047 m
Pipe conductivity, $k_p$	0.4 W/m°C
Grout thermal conductivity, $k_g$	2.0 W/m°C
Grout volumetric heat capacity	3.9 kJ/kg°C
Soil conductivity, $k_s$	2.0 W/m°C
Soil diffusivity, $a$	0.080 m <sup>2</sup> /day
Undisturbed soil temp., $T_s$	10°C
Fluid conductivity, $k_f$	0.49 W/m°C
Fluid density, $\rho_f$	1022 kg/m <sup>3</sup>
Fluid specific heat capacity, $c_f$	3960 J/kg°C
Fluid mass flow rate, $\dot{m}$	0.2 kg/s
Film coeff. inside the pipe, $H_f$	857 W/m <sup>2</sup> °C



### 5.1 DST를 이용한 g-function 검증 결과

제 3.2절에서 설명한 방법을 이용하여 DST 기반의 g-function을 생성하고 이를 앞서 설명한 두 가지 경계 조건을 이용한 함수와 비교하였다. Fig. 7은 이 결과를 나타낸 것으로 Fig. 2에 DST 기반 g-function을 겹쳐서 보여주고 있다. 위의 세 가지 경우(1-, 19-, and 37-BHEs) 모두 시간 스케일이 크지 않을 때는 모든 경계 조건에 대하여 서로 유사한 결과를 보이거나 시간 스케일이 커지면서 차이를 보이고 있다. 특별히 교환기의 수가 커질수록 차이가 두드러진다.

결과로 보아 Modified g-function값이 Eskilson g-function에 비해 DST로 유도한 g-function값에 가까운 것을 알 수 있다. DST 모델이 보어 홀 외벽의 경계 조건을 특정하지 않고 유체 순환에 의해서 내부적으로 외벽 온도를 결정한다는 점, 응답 함수 기법과는 달리 지열 교환기와 주변 물리적 현상을 비교적 직접적으로 묘사하고 있다는 점에서 높이별 동일한 열류 경계 조건 (Modified g-function)이 보다 실제와 가깝다고 추측할 수 있다.

그러나 위의 실험이 제한된 배열(원형)에서만 행해졌고 DST 모델의 경우 직접적으로 높이별  $T_b$ 를 측정할 수 없어 식(3)과 같은 대안을 사용하는 등 불확실성이 여전이 내재하고 있어 실제 물리현상의 이해를 위해서는 추가 연구가 요구된다. 본 결과는 한편으로는 DST 모델의 장기간 시뮬레이션 결과에 대한 문제 제기로도 환원될 수 있다.

### 5.2 시뮬레이션 모델 결과 비교

Fig. 8은 식(8)을 입력 값으로 사용한 20년간의 시뮬레이션 결과이다. DST 모델로 트랜시스 Type 557을

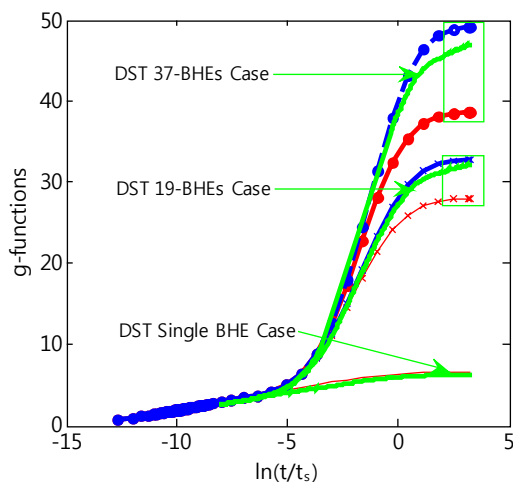


Fig. 7 DST-based g-functions(1-, 19-, and 37-BHEs cases).

그대로 이용하였고, 서로 다른 경계 조건의 g-function 비교를 위해서 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델에 두 g-function을 따로 대입하여 시뮬레이션을 수행하였다.

위쪽 그래프는 20년 동안의 출구 측 온도 차이를 비교한 것이고 아래 측 그래프는 마지막 1년간의 유체 출구 온도를 비교한 것이다. Modified g-function(M. g-function)을 이용한 모델의 시뮬레이션 결과와 DST 모델 결과는 기간 내내 일정한 변동을 유지하면서 비슷한 차이를 유지하지만 Eskilson g-function(E. g-function)은 시간이 경과하면서 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 결과로 확인했듯 DST 기반 g-function이 M. g-function과 유사하기 때문일 것이다. 개발된 트랜시스 시뮬레이션 모델은 장기간에 걸친 시뮬레이션에서 안정적인 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

한편 DST 모델과 본 시뮬레이션 모델의 차이가 일정한 변동 패턴( $\pm 1^\circ\text{C}$ )을 나타내는 것은 잘 알려진 현상으로<sup>(16)</sup> 이는 보어 홀 열용량 효과에 기인한다. 즉 DST 모델은 그라우트 등의 열용량을 계산에서 제외시켰지만 본 시뮬레이션 모델은 보다 정밀하게 보어 홀 내의 열용량을 모두 계산에 포함시켰다(식(5)~식(6) 참조).

이어서 Fig. 9는 37개의 지열 교환기 시뮬레이션 결과이다. 전반적으로 Fig. 8과 비슷한 양상을 보이나 Fig. 7에서 본 것과 같이 g-function값이 보다 크기 때문에 출구 측 유체 온도가 Fig. 8에 비해 높고, DST와 E. g-function 사이의 함수 값 차이가 19개의 교환기 경우에 비해 더 크므로 시간 경과에 따른 온도차이의 폭이 더 커지는 것을 알 수 있다(그림의 위쪽 그래프). 즉 E. g-function을 이용한 시뮬레이션 모델의 경우 20년 이후 DST 모델과 약  $2^\circ\text{C}$ 의 정도의 차이를 보인다.

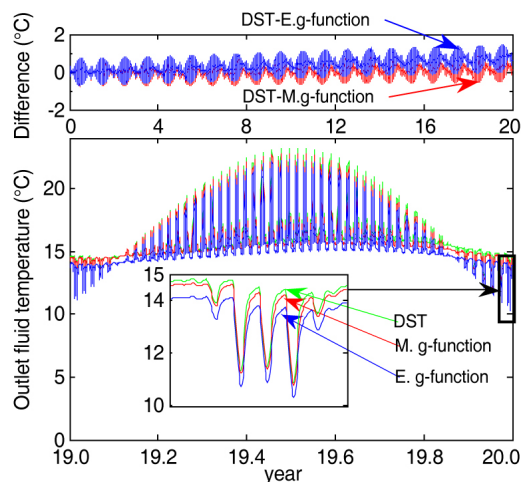


Fig. 8 20-year simulation for 19-BHEs case.

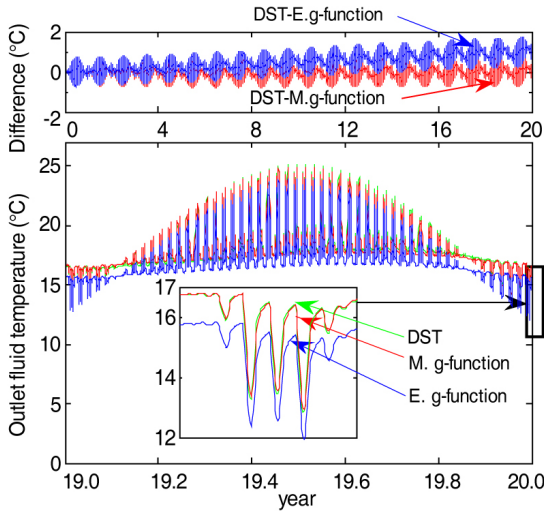


Fig. 9 20-year simulation for 19-BHEs case.

### 5.3 g-function에 대한 고찰

위의 결과(Fig. 8~Fig. 9)는 지열 교환기 수가 클수록 두 경계 조건 사이의 결과 차이가 크다는 것을 보여준다. 그러나 Fig. 7에 나타나는 차이에 비해(Fig. 7의 점선 박스 참조) 시뮬레이션 결과의 차이 폭이 크지 않다는 것을 확인할 수 있다.

g-function을 보다 자세히 살펴보기 위해서 Fig. 10과 같이 시간대별 위치를 표시하였다. 첫 번째 선은 1년, 두세 번째 선은 각각 10, 20년 후의 g-function값을 나타낸다. 그림의 확대 부분을 보면 10년과 20년이 지난 후 두 경계 조건 사이의 차이가 정상 상태 값 차이에 비해서는 크지 않다는 것을 알 수 있다.

보다 일반적인 비교를 위해 Fig. 11과 같이 다음 세 가지 경우에 대한 g-function 차이를 비교하였다 : (B, H) = (5, 100), (2, 100), (2, 50) m. 처음 그래프(B = 5, H = 100)는 위의 Fig. 10의 케이스를 그대로 옮겨 놓은 것이고 두 번째는 지열 교환기 사이의 거리를 2 m로 줄인 경우, 그리고 세 번째는 위처럼 사이 거리를 좁히고 동시에 지열 교환기의 길이 H를 100 m에서 50 m로 줄인 경우이다. 여기서 세 번째 그래프에서 시간 위치(1y, 10y, 20y)가 변경된 이유는 g-function은 x축으로 특성 시간  $t_s$ 에 대하여 무차원화 된 시간 축을 사용하고  $t_s$ 는 H의 함수이기 때문이다( $t_s = HF/(9a)$ ).

그림에서 열교환기가 서로 가까울수록 그리고 지열 교환기의 길이가 짧을수록 두 경계 조건의 차이는 두드러진다. 10년 시간 축을 기준으로 비교해보면 B값이 2 m로 줄면서 두 경계 조건의 차이는 첫 번째 그래프에 비해 약 1.5배 증가하며 다시 H가 반으로 줄어들면서 차이가 약 두 배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 각 지열 교환기의 길이가 비교적 짧고 수많은 교환기를

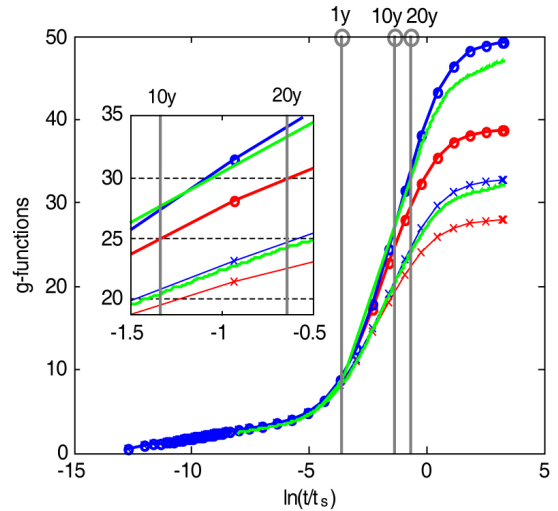


Fig. 10 Time points in g-functions for 1, 10, and 20 years.

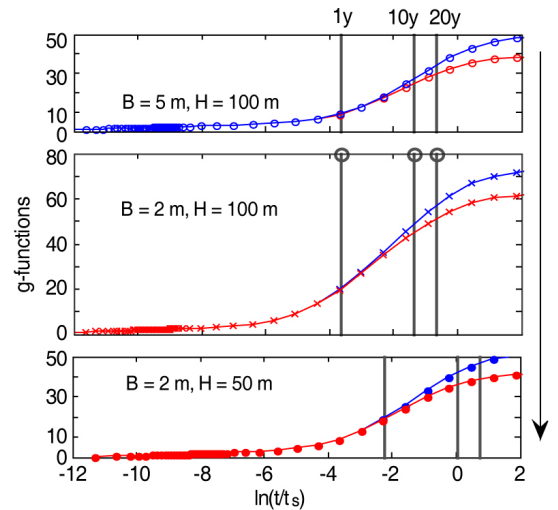


Fig. 11 g-functions with time points for 3 cases(B, H) = (5, 100), (2, 100), (2, 50) m

서로 가깝게 배치하는 지열 교환기를 이용한 계간 저장 시스템<sup>(17)</sup> 설계 및 분석에서 Modified g-function을 이용한 결과를 충분히 고려해야 함을 말한다.

## 6. 결 론

지열 교환기 설계와 분석에 널리 사용되어져 온 지열 응답 함수 g-function은 계산에 사용된 경계 조건에 따라 함수 값의 차이가 발생한다. 본 연구에서는 잘 알려진 트랜시스 DST 모델을 기반으로 g-function을 재생하고 이를 통하여 경계 조건을 검증하고자 하였다. 또한 g-function을 사용하여 직접 동적 시뮬레이션이 가능한 트랜시스 모델을 제안하였다.

결과로, DST를 이용하여 얻어진 g-function은 기존 Eskilson g-function보다는 보어 홀 외벽 경계 조건으로 동일한 열류 값을 사용한 Modified g-function과 매우 유사한 값을 보였다. 개발된 트랜시스 모델을 이용한 20년 간의 시뮬레이션 결과 DST 모델과 Modified g-function을 이용한 모델이 유체 출구 온도를 예측하는데 비슷한 결과를 나타냈으며 Eskilson g-function의 경우 시간 경과에 따라 그 차이가 증가하였다.

본 연구에서는 실제에 가까운 보어 홀 외벽 경계 조건을 찾아가는 첫 시도으로써, 당장 사용이 가능한 모델을 이용한 연구 방법론을 제시하였다. 향후 보다 상세한 3D 모델 및 실험을 통한 측정 값을 이용하여 추가적인 경계 조건에 대한 연구가 필요하다.

그러나 본 연구를 통해서 일반적인 모델 벤치마킹 용도로 사용되는 DST 모델과 새로운 Modified g-function 사이의 유사성이 밝혀졌으므로 지열 교환기 설계 및 시스템 분석에서 Modified g-function을 고려하는 것이 필요하다.

## References

1. Eskilson, P., 1987, Thermal analysis of heat extraction boreholes, Ph.D. thesis, University of Lund, Lund, Sweden.
2. Zeng, H. Y., Diao, N. R., and Fang, Z. H., 2002, A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers, *Heat Transfer-Asian Research*, Vol. 31, No. 7, pp. 558-567.
3. Lamarche, L. and Beauchamp, B., 2007, New solutions for the short-time analysis of geothermal vertical boreholes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 7-8, pp. 1408-1419.
4. Claesson, J. and Javed, S., 2011, An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades, *ASHRAE Transaction*, Vol. 117, No. 2, pp. 279-288.
5. Cimmino, M. and Bernier, M., 2013, Preprocessor for the generation of g-functions used in the simulation of geothermal systems, *Proceedings, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, pp. 2675-2682.
6. Fossa, M., 2011, The temperature penalty approach to the design of borehole heat exchangers for heat pump applications, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 6, pp. 1473-1479.
7. Cimmino, M. and Bernier, M., 2014, A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 641-650.
8. Kim, E. J., 2014, Impact of different boundary conditions in generating g-function on the sizing of ground heat exchangers, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 263-268.
9. Hellström, G., Sanner, B., 1994, Software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction, *Proceedings, Calorstock Conference*, Espoo/Helsinki, Finland, pp. 195-202.
10. Hellström, G., 1991, Ground heat storage : thermal analysis of duct storage systems Ph.D. thesis, University of Lund, Lund, Sweden.
11. Chapuis, S. and Bernier, M., 2009, Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers, *Proceedings, 11th International IBPSA Conference*, Glasgow, UK, pp. 599-606.
12. Hellström, G., Mazzarella, L., and Pahud, D., 1996, Duct ground heat storage model for TRNSYS, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Lund, Sweden.
13. Bertagnolio, S., Bernier, M., Kummert, M., 2012, Comparing vertical ground heat exchanger models, *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 5, No. 6, pp. 369-383.
14. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance : Laboratory and field studies, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, No. 1, pp. 439-445.
15. Kim, E. J., Roux, J. J., and Kuznik, F., 2014, Decomposition and coupling of soil domain for modeling vertical ground heat exchangers using the state model size reduction technique, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 69, No. 1-2, pp. 155-164.
16. Shirazi, A. S. and Bernier, M., 2013, Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 352-364.
17. Drake Landing Solar Community, Borehole thermal energy storage (BTES), <http://www.dlsc.ca/borehole.htm>.