전남대학교 CHONNAM NATIONAL UNIVERSITY

지반 조건과 지열벽의 기하학적 형상에 따른

지열벽 열적 성능의 전역민감도 분석

전남대학교 건축공학전공 건축종합설계 1

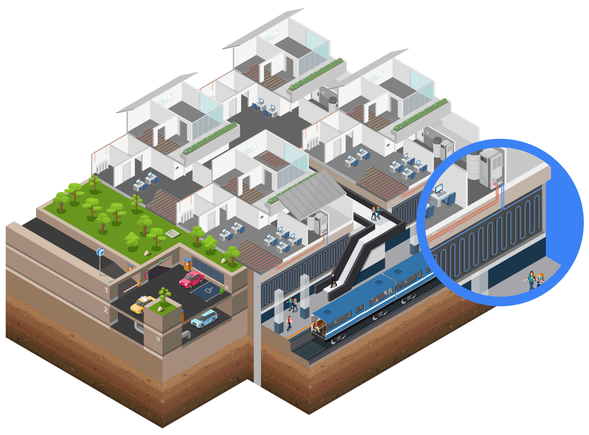
215041 고아현, 213246 박준영, 200835 최선우

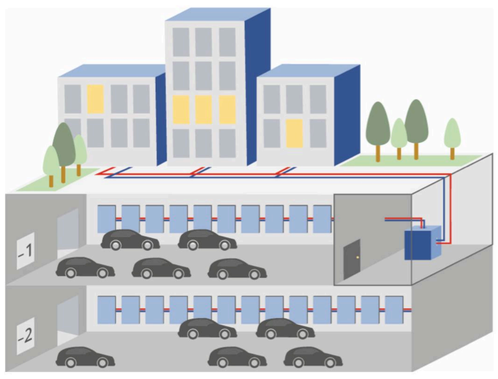
Introduction

전 세계적으로 에너지 소비의 주요 분야는 전력, 산업, 운송, 건물, 농업 등 5개 분야이며 이 중 건물 분야의 에너지 소비는 30%를 차지한다. 특히 난방이나 급탕과 같은 열 소비 부문의 탈탄소화는 건물 부문의 탄소 저감에 중요한 역할을 할 것으로 평가된다. 지열원 시스템은 냉난방 부문에서 에너지 절감이 가능해 건물에 소요되는 에너지 소비량을 매우 합리적으로 조정할 수 있는 재생에너지시스템이다. 건물과 인접한 구조물에 지열교환시스템을 매립하는 지열벽 (Energy wall) 기술은 공간 활용성을 높이고 초기 시공비를 절감할 수 있어 기존 지열교환기의 단점을 보완할 수 있다. 그러나 지열벽의 열적 성능은 파이프의 기하학적 형상, 토양의 열물성, 유량 조건 등 다양한 인자에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 이를 정확히 이해하고 최적화 하는 설계 방법론 개발이 요구된다.

Originality

본 연구는 수직밀폐형 지열교환기는 달리 지반 구조물로서의 역할과 지열교환기로서의 기능을 동시에 수행한다는 점에서 완전히 차별된다. 기존의 수직형, 수평형 지열교환기는 공간적 / 경제적 단점이 확실하다. 그러나 지열벽의 경우 벽체의 한쪽만을 지열원으로 사용하고 반대쪽은 지반구조물 설치 목적 (지하철, 지하주차장 등)에 따라 활용되므로 지열벽 시스템에 문제가 생길 경우에 최소한의 비용으로 대응할 수 있는 새로운 지열시스템이다.





1 Key stone

Infinite plane source 모델에서 열교환기 순환 유체의 초기 입구온도, 비정상상태 토양과 열교환, 정상상태 지열벽 형상에 따른 열교환을 이용해 파이프를 순환하는 유체의 출구온도를 도출할 수 있다. 지열벽의 열적 성능은 얼마만큼 열을 잘 흡열하고 방열하는지에 따르므로 열적 성능 자체를 파이프 출구 온도로 설정하여 이를 주어진 수식을 이용하여 모델링 한다. 그러나 최근 국외에서 수행된 연구의 논문은 매우 제한적이고 초기 단계에 머무르고 있으며 국내에서는 전무하다. 특히 수식의 형상 계수의 값이 유효하지 못하다. 본 연구의 첫번째 key stone은 주어진 평면열원 해석적 모델을 모델링 하며 형상 계수 수식을 유효한 값으로 전환하는 것이다. 전환된 shape factor 수식은 열역학에서 사용되는 cylinder shape factor 수식을 차용하였다.

1 Outlet fluid temperature

$$T_{\text{out}}(t) = T_{\text{in}} + \frac{q_p}{2\lambda} \cdot g(x,t) + \frac{q_p}{\lambda_W \cdot S_F}$$

2 Shape Factor

[기존 shape factor]

$$SF = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{\sinh\left(\frac{\pi(W-c)}{s}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi D}{2s}\right)}\right)} - \frac{s}{W-2c}$$

Shape Factor (SF) : -0.2677420531499547

term1 (sinh(pi * (W - c) / s)) : 45.7308
term 2 (sinh(pi * D / (2 * s))) : 0.04910

→

[변경된 cylinder shape factor]

$$SF = \frac{2\pi L}{\ln\left(\left(\frac{l}{\pi r}\right)\sinh\left(\frac{2\pi D}{l}\right)\right)}$$

Shape Factor : 10.584

3 Key stone

기존에 수행된 국외 연구에서는 실제 파이프 입출구 온도와 계산상의 파이프 입출구 온도를 비교하여 정확도를 검증하는 제한적인 연구였다. 따라서 본 연구는 전역민감도분석을 통한 지열벽 열적 성능에 영향을 미치는 입력 파리미터를 정량화 하는 실용적인 방법론을 3번째 key stone으로 제안한다.

Input parmeters

토양 열전도율 [W/m·K]
토양 밀도 [kg/m³]
토양 열용량 [J/(kg·K)]
파이프 직경 [m]
파이프 간 간격 [m]

→

Output PDF

→

Sensitivity indices

토양 열전도율
토양 밀도
토양 열용량
파이프 직경
파이프 간 간격

Process

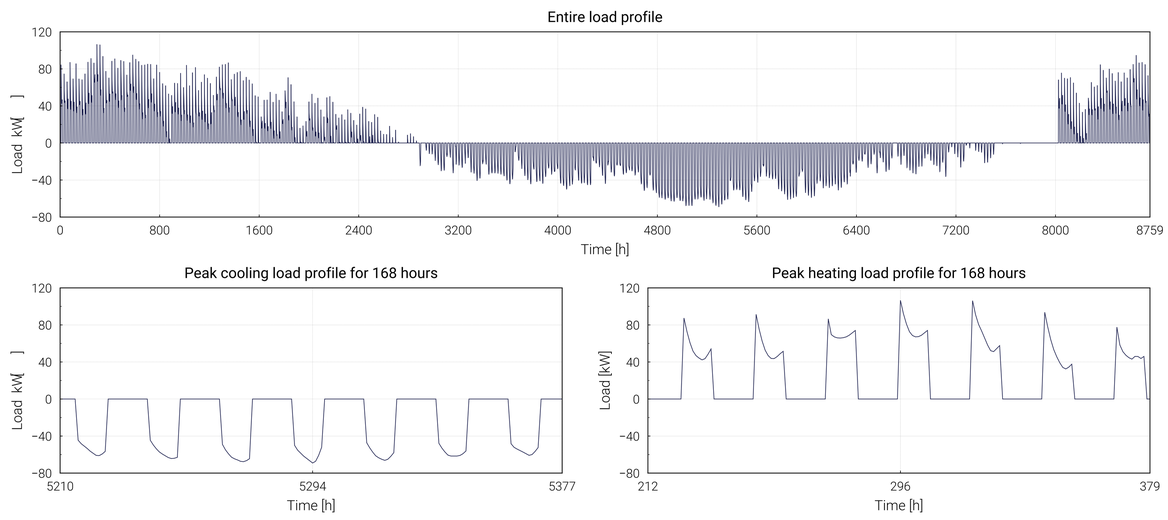
Plane source modelling → Load model → Global Sensitivity Analysis

2 Key stone

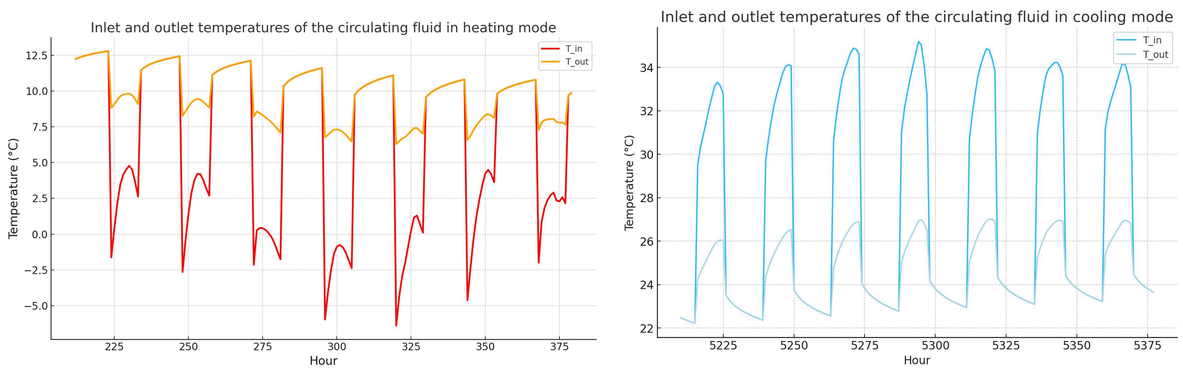
열류 q는 계절 부하나 실내 부하에 따라 달라지는 비정상상태인 것을 고려하여 동적 열류로 가정하는 것이 더 현실적이다. 따라서 기존 수식에서 정적 열류로 사용된 q를 시간에 대한 중첩 형태로 재정의하며 해당 열류는 건물 열환경 시뮬레이션 툴인 Open Studio와 Energy Plus를 활용하여 모델링 하였다. 본 연구에 활용된 지열벽의 지오메트리는 다음과 같은 건물과 지열벽으로 모델링 했으며 건물의 지하주차장의 지열벽이 지열원시스템으로 활용되는 것을 가정한다.

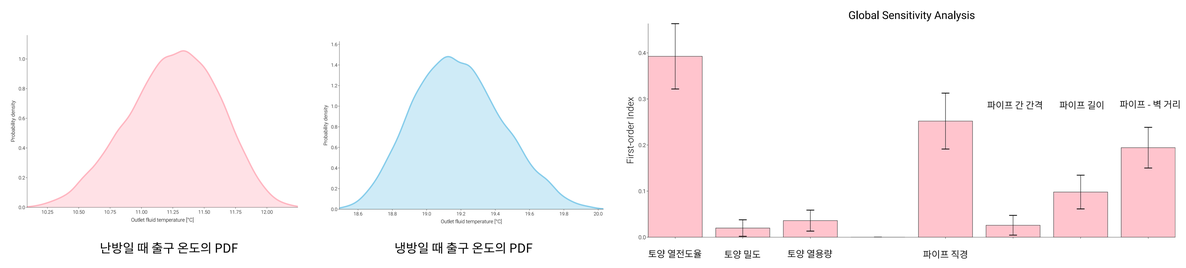
- Sketch Up + Open Studio를 이용해 4층의 10 m x 15 m x 4 m의 opened office 건물 설계
- 날씨 데이터는 광주광역시, 지열벽 면적은 1600 m²로 가정하여 1년 동안의 열류 [w] 도출
- 동적 열류 q_p는 발생 열류 Q에 지열벽의 면적을 나누어 계산

$$T_{\text{out}}(t_N) = T_0 + \sum_{n=1}^{N_t} \frac{q_p(t_n) - q_p(t_{n-1})}{2\lambda} \cdot g(t_N - t_{n-1}) + \sum_{n=1}^{N_t} \frac{q_p(t_n) - q_p(t_{n-1})}{\lambda_W S_F}$$



Analysis





Energy plus로 얻은 부하로 파이프 입출구 온도를 모델링 한 결과 겨울철과 여름철 모두 평균적으로 5도 ~7도의 입구온도와 출구온도의 차이를 보인다. 이러한 결과값에 어떤 지열벽의 입력 파라미터가 가장 영향력이 큰 지 전역민감도분석을 통해 정량화 하였다. 전역민감도분석 결과, 토양의 요소에서는 토양 열전도율이, 지열벽의 형상 요소에서는 파이프 직경과 파이프와 벽 간의 거리가 가장 영향력이 컸음을 시사한다.

Conclusion

본 연구는 기존 국외 사례 연구와 다른 형상 계수를 사용하여 유효한 값을 얻을 수 있었으며 동적 열류를 활용하여 보다 현실적인 조건을 고려하였다. 또한 전역민감도분석을 통해 지열벽 성능에 영향을 미치는 입력 파라미터의 기여도를 정량적으로 확인하였다. 이러한 결과로 향후 연구에서는 다양한 조건에서 활용할 수 있는 입력 파라미터의 표준화를 진행할 계획이다. 그러나 본 연구는 열류 도출 공간 및 지열벽의 면적이 모두 실제 사례가 아닌 가정된 값으로 실제 지반구조물 사례에 대한 연구 또는 표준화가 필요하다는 점에서 한계점이 있다.