

# 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 개요

김진상\*

공형진\*\*

\*대일이엔씨기술(주) 상무이사, \*\*지열인력양성센터 사무국장

## 1. 서론

스탠딩컬럼웰 방식(Standing Column Well Type) 지중열교환기(Ground Heat Exchanger)는 우물 안에 고인 물을 이용하여 지중과 열교환을 수행하는 방식으로, 보편적으로 널리 사용되는 수직밀폐루프 방식(Vertical Closed Loop Type) 지중열교환기와 유사한 원리로 구동하는 동시에 서로 상이한 특징을 갖는다.

이 두 가지 방식에서 구조적으로 큰 차이를 보이는데, 수직밀폐루프 방식은 시추공 내부에 U자관 형태의 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 설치하고 빈 공간을 그라우트 재료를 이용하여 채우는 방식에 비하여, 스탠딩컬럼웰 방식은 지하수 우물에 바닥 부근까지 연결된 파이프가 설치되며 우물의 형태를 그대로 유지한다. 수직밀폐루프 방식은 시스템 내부에 포함된 작동유체가 순환하는데 비하여, 스탠딩컬럼웰 방식에서는 블리딩(Bleeding)을 이용하여 시스템 내부로 새로운 지하수를 유입시켜서 성능을 강화할 수도 있다.

블리딩이 없는 스탠딩컬럼웰 방식의 열교환 메카니즘은 수직밀폐루프 방식과 유사하다. 기동이나 정지 시점을 제외하고 정지시나 운전시나 지하수 수위는 변동이 없으며, 지하수가 외부로 도입되지 않는다. 열교환기 내부에 고인 지하수를 작동유체로 사용하여 바닥에서 상부까지 순환시키면서 지중과 순환유체 사이에서 열전도가 주도

하는 열교환이 이루어진다. 이러한 열교환 방식은 수직밀폐 방식과 같은 원리이다.

이러한 스탠딩컬럼웰 방식의 지중열교환기는 수직밀폐루프 방식에 비하여 설치 면적이 적다는 장점으로 인하여 지중열교환기 설치 면적이 부족한 곳에서 유리한 방식이다. 반면에 수중펌프의 교체와 같이 지중열교환기의 주기적인 유지보수가 필요하다는 단점도 있다.

수직밀폐루프 방식 지중열교환기는 보어홀 시추가 경제성이 있는 대부분의 경우에 적용이 가능한데 비하여, 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 적합한 여건을 가진 현장에서 적절한 설계 및 엔지니어링 기술을 통해서만 성공적으로 적용될 수 있으므로, 이 방식의 적용을 위해서 현장여건에 대한 검토가 필수적이다.

## 2. 개요

### 2.1 역사

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 연구 또는 기술개발을 통하여 탄생한 것보다는 산업현장에서 적용되어 효과를 얻어서 발전되었다. 지하수 히트펌프(Groundwater Heat Pump)는 지하수 수량이 히트펌프의 용량을 결정하는데, 지하수 수량이 적은 경우에 이를 원래 우물에 다시 주입하였으며 시도하여 보았으며, 시간이 경과한 후에 관정 안에 고인 지하수의 온도가 급격하게 변하

게 되어 사용할 수 없게 되며, 이를 해결하기 위하여 일부를 외부로 보내는 블리딩을 적용하게 되었다. 이는 오늘날 사용되는 스탠딩컬럼웰 방식과 동일하다.

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 1970년대에 미국 북동부의 Maine주 Bangor시에서 시작되었다.<sup>[6]</sup> New England 지역(미국의 북동부지역으로 New York주 동쪽에 위치한 6개주)에서 널리 보급되기 시작하였다. 이 지역에 기반을 두고 있는 Water Energy Distributors사의 Carl Origo가 보급을 위하여 노력하였다. New England지역은 일반적으로 균열암반 구조가 30 ~ 50 m 깊이로 잘 발달되어 있으며, 지하수의 수량은 적은 편으로 일반적으로 가정용 정도의 용량이다.<sup>[7]</sup>

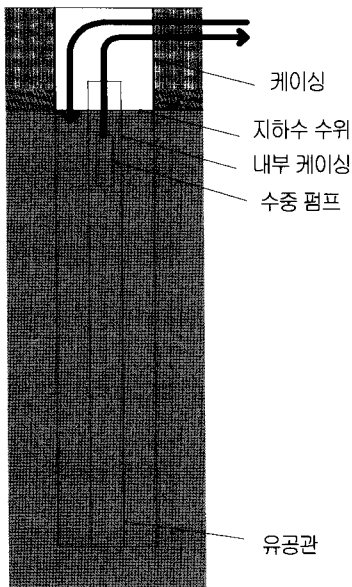
산업계에서 경험적인 방법(Rules of Thumb)으로 스탠딩컬럼웰 방식의 설계와 시공이 시행되다가, 2002년도에 뉴욕시가 지열히트펌프 매뉴얼을 발표하였다. 뉴욕시의 각 지역을 구분하여 지하수 히트펌프, 스탠딩컬럼웰 방식 또는 수직밀폐루프 방식 중에서 어떤 방식이 적합한지를 표시하였으며, 스탠딩컬럼웰의 시공과 설계에 관하여

정리하였다.<sup>[1]</sup>

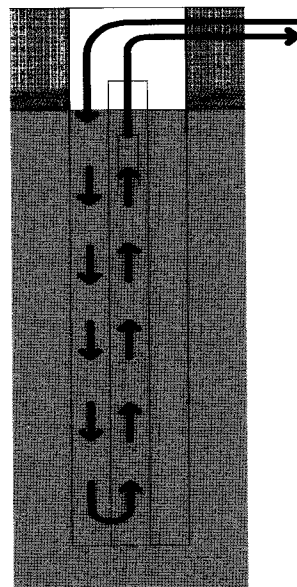
스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 적용이 지속적으로 증가하여 왔으며, 이는 주로 뉴 잉글랜드 지방을 중심으로 뉴욕주, 펜실바니아주를 중심으로 미국의 동부 지역에 보급되어 왔으며, 우리나라를 비롯하여 중국 및 유럽 등지에서도 보급된 것으로 알려져 있다.

## 2.2 구조

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 200 mm내외의 직경과 600 m(2,000 ft)이내의 깊이의 우물을 이용한다. 우물의 벽면은 케이싱이 필요한 구간을 제외하고 나머지 구간은 케이싱을 하지 않은 나공 상태로 유지한다. 우물의 내부에는 지하수 수위에서부터 우물의 바닥 부근까지 파이프를 설치하여 파이프와 우물 사이의 중공(Annulus)을 흐르는 지하수와 파이프 내부를 흐르는 지하수가 연결하여 흐를 수 있게 한다. 이 우물 내부의 파이프를 내부 케이싱(Internal Casing), 슬리브(Sleeve), 쉬라우드(Shroud)등 여러 가지 명칭으로 불린다.(그림 1)



[그림 1] 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 구조



[그림 2] 열교환기 내부의 지하수의 이동

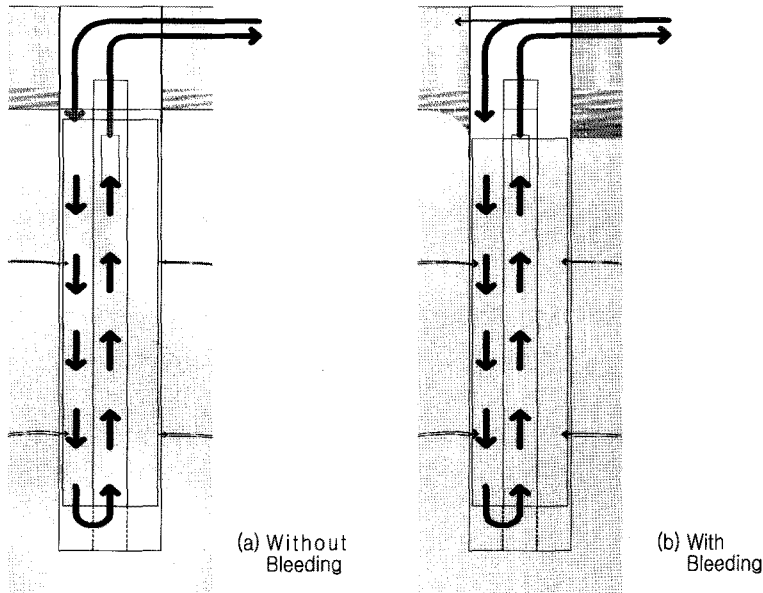
일반적으로 슬리브 내부에 지하수 수위 아래에 설치한 수중펌프를 통하여 떠올려진 지하수가 열교환기에서 열교환을 수행한 후에 다시 관정의 상부로 되돌려 보내진다. 지하수는 관정의 상부에서 하부로 이동하면서 지중과 열교환을 수행하고 관정 하부에서 슬리브의 유공관을 통하여 슬리브 내부로 유입되고 수중펌프에 의하여 슬리브를 통하여 그림 2와 같이 순환한다.

### 2.3 열전달

#### 2.3.1 블리딩을 수행하지 않는 경우

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 일반적으로 블리딩을 수행하는 상태에서 지중열교환기로서 역할을 수행한다. 블리딩을 수행하지 않는 경우에는 열전도(Heat Conduction)이 주도하는 열전달이 일어난다. 블리딩을 수행하지 않는 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 수직밀폐루프 방식 지중열교환기와 거의 동일한 방식으로 작동한다. 지하수 관정 내부에 고인 지하수는 열교환기의 상부에서 하부까지 지중과 직접 접촉하면서 순환하면

서 열교환을 수행하는데, 이는 수직밀폐루프 방식에서 고밀도폴리에틸렌 파이프 내부를 순환하는 것과 같다. 지중열교환기가 작동하는 동안에 슬리브 외부와 지중사이 공간에 있는 지하수의 수위는 지중의 지하수 수위와 같은 수위를 유지하며, 이로 인하여 지중으로부터 지중열교환기 내부로 유입되는 지하수는 없다. 단지 암반 균열을 통하여 지중열교환기를 통과하는 지하수가 미치는 영향이 수직밀폐루프 방식 지중열교환기와 다른 점이다. 열전달이 발생하는 control volume을 표시하면 그림 3에서 열교환기 내부에 고인 물기둥 중에서 지하수의 순환이 발생하는 부분으로 점선으로 표시된 사각형과 같다. 지하수의 수위가 일정하므로 대수층으로부터 Control Volume으로 들어온 지하수 수량과 같은 양이 Control Volume에서 빠져나가 대수층으로 돌아가므로, 지나가는 지하수량 만큼이 이류(Advection)로서 열전달에 영향을 미친다. 블리딩이 없는 경우인 그림 3(a)에는 대수층을 통하여 열교환기를 통과하는 지하수 수량이 영향을 미치나, 일반적으로 대수층의 두께가 두텁지 않고, 대수층을 통과하는 지하수의



[그림 3] 지중열교환기 내부의 유체의 이동

속도가 매우 낮은 경우에는 이수가 열전달에 영향을 미치는 것으로 보기 어렵다.

### 2.3.2 블리딩을 수행하는 경우

블리딩은 냉방이나 난방 운전시에 과도한 운전으로 인하여 순환 유체인 고인 지하수의 온도가 일정 범위 밖으로 나가게 되면 수행하는데, 블리딩을 수행하면 주변의 지하수를 유입시키면서 열교환기 내부에 있는 지하수의 온도를 회복시키는 역할을 수행한다. 블리딩을 수행할 때 외부로 보내는 지하수의 양은 경우에 따라 매우 다르며 일반적으로 5 ~ 30%범위에 있다. 블리딩이 없는 경우에는 지중열교환기로 유입되는 지하수 수량이 없는 반면에, 블리딩을 사용하는 경우에는 블리딩을 통하여 외부로 보내지는 유량 만큼이 관정으로 유입되며, 이때 열교환기 내부의 수위는 주변 지중의 수위보다 낮다(Draw-down).

## 3. 설계 및 연구

### 3.1 설계

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 설계는 경험적인 방법에 의존하는 경우가 많았다. 2002년도에 뉴욕시에서 발행한 지열히트펌프 매뉴얼<sup>[1]</sup>에서 설계와 시공에 관하여 규정하였다. 스탠딩컬럼웰 방식의 설계 방법은 수직밀폐루프 방식과 유사하다. 우선 지중열교환기에 에너지의 저장하고 이용하는 건물의 부하(피크와 에너지)정보를 확보한다. 이러한 부하는 건물에너지 시뮬레이션 프로그램을 이용한다.

건물의 부하를 단순히 냉방과 난방의 피크 부하 또는 설계 부하로 인식하는 경우가 많다. 예를 들면 지중열교환기를 설계를 냉난방 설계 부하 100 RT(350 kW)를 기반으로 설계하려고 하며, 건물의 에너지 사용량을 제대로 입력할 필요가 없는 지중열교환기 설계 프로그램이 널리 보급되면서 에너지 사용량이 반영되지 않는 경우가 많다. 동일한 100 RT의 냉난방 능력을 갖지만 건물

의 목적에 따라, 그리고 운전 프로파일에 따라, 그리고 제어방식에 따라 지중열교환기로 전달되는 에너지량은 크게 달라진다. 건물 용도, 운전 프로파일, 제어방식 등을 고려하지 않고 확실적인 지중열교환기 적용은 적절한 지중열교환기의 설계를 보장할 수 없다. 연구에서는 정해진 부하를 가하여 지중열교환기가 몇 W/m의 능력을 갖는다고 이야기 하기도 한다. 그리고 경험에 의존하는 설계를 수행하는 지중열교환기가 냉난방 능력 몇 kW(또는 몇 RT) 건물에 적용되는 지중열교환기 설계에서 가장 큰 영향을 크게 미치는 것은 지중열교환기에 저장되거나 추출하여 이용하는 에너지량과 관련이 깊은 건물의 에너지 부하로서 주로 월별 사용량으로 표현한다. 지중열교환기 설계 프로그램에서는 건물 에너지 부하를 히트펌프 유니트의 성능을 반영하여 지중 에너지 부하로 변환하여 지중열교환기를 설계한다.

일반적으로 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 열전도가 주도하는 열전달을 수행하므로 가장 단순한 이론인 선형열원(Line Source)이론을 적용하는 것이 일반적이며, 설계 프로그램으로는 Lund대학에서 개발한 알고리즘을 기반으로 IGSHA(International Ground Source Heat Pump Association)에서 배포하는 GLHEPro를 사용할 수 있다.<sup>[1]</sup>

지중열교환기 설계 프로그램을 사용하기 위해서는 지중열전도율과 지중온도에 대한 정보를 필요로 한다. 선형열원 이론에 근거한 도구를 사용하여 설계하기 위해서는 선형열원 이론 기반의 시험을 수행하여 지중의 설계 데이터를 구한다.

선형열원 이론에 근거한 지중열교환기 설계는 스탠딩컬럼웰 방식의 블리딩을 제대로 반영하지 못한다. 이를 반영하는 시뮬레이션이 개발되어, 이를 건물에너지를 연계하여 설계에 적용할 수 있는 설계도구의 필요성이 높다. 블리딩과 같이 새로운 기능을 탑재한 새로운 도구를 사용하기 위해서는 새로운 도구의 알고리즘에 적합한 시험을 수행하여 시험데이터를 확보하는 것이 필

요하다.

ASHRAE RP-1119<sup>[2]</sup>에서 도출하여 조사를 수행한 설계인자는 다음과 같다.

- 지중 열전도율
- 지중 비열
- 지중 온도 구배
- 보어홀 표면 거칠기
- 보어홀 직경
- 보어홀 케이싱 깊이
- 슬리브 직경 및 열전도율
- 블리딩
- 블리딩 제어 방식
- 보어홀 깊이
- 보어홀 유동 방향
- 지중 수리전도율

### 3.2 지중의 열전도율

블리딩 모델과 이의 제어를 반영한 설계도구가 개발되면 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 설계를 한 수준 더 높아질 것이다. 그러나, 현재 시점에는 선형열원 이론에 근거한 설계도구인 GLHEPro등을 사용하는 것이 현실적이다. 열전달 방식 중에서 열전도만을 고려한 선형열원 이론에 근거한 설계도구에서 사용되는 지중의 열전도율은 선형열원 이론에 근거한 방식을 구현하는 시험장치를 적용하여 구한다. 여기에 적용된 시험장치는 선형열원 이론을 기반으로 지중의 열전도율을 구할 수 있도록 고안되어 있어야 한다. 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기에서 열전도율은 이를 구성하는 암석 자체의 열전도율을 기준으로, 지하수로 채워진 공극의 효과, 지하수의 이류로 인한 효과, 벽면의 표면 거칠기로 인한 효과, 그리고 기타 국부적인 유동으로 인한 효과 등이 추가되어 있다. 이와 같은 이유에서, 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기에 대하여 선형열원 이론을 근거로 구한 열전도율은 암석자체의 열전도율보다 높은 값을 갖는다.

일반적인 스탠딩컬럼웰 방식은 슬리브와 관정

사이 공간을 비워두는 반면에, Geohil 방식은 사이 공간을 잔자갈 등을 사용하여 채우는데, 열교환기의 열교환기 면적이 증가하는 것과 같은 이유로 선형열원 이론에 근거한 지중의 열전도율이 일반적인 스탠딩컬럼웰 방식보다 높은 값을 갖는다.

### 3.3 연구

스탠딩컬럼웰 방식 열교환기의 거동에 대한 연구는 다른 방식에 비하여 매우 부족한 편이다. 수적으로 적음에도 불구하고, 실험적으로, 이론적으로, 그리고 수치적으로 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 주로 열입력에 대한 지중온도 또는 고인 지하수 온도에 대한 거동을 연구하였다.

1979년도에 Bose는 Geothermal Well이라는 명칭으로 스탠딩컬럼웰 방식과 비슷한 구조의 열교환기에 대한 시험적인 연구를 시작으로 여러 연구가 시행되었으며, 이에 관한 비교 검토 분석도 수행되었다.<sup>[3]</sup> Spitler는 ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration, Air-Conditioning Engineers)에서 지원 하는 Research Project 1119로 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기에 대한 조사 및 연구를 수행한 바 있다.<sup>[3],[4]</sup>

설계에 사용될 수 있는 도구와 연구용 도구의 차이점은 건물이나 설계 대상의 냉난방 설계부하는 물론이고 에너지부하(일반적으로, 월별 에너지사용량)를 반영하여 지중열교환기의 길이를 계산하는 것이다. 지중열교환기 설계 도구에는 지중의 특성값과 더불어 건물에서 매달 사용하는 냉난방 에너지량과 매달 냉난방 부하값이 입력되어야 한다.

동적 시뮬레이션 프로그램인 HVACSIM+가 스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기의 모델링에 사용되었다.<sup>[3]</sup> EnergyPlus나 TRNSYS등과 같은 동적 시뮬레이션 프로그램도 활용될 수 있으며, 이를 활용하는 경우에 신뢰도 높은 지중열교환기의 모델링과 해석을 수행할 수 있다. 동적 시뮬레이

선을 이용하여 설계하는 경우에 건물의 에너지 모델링을 수행하여야 하며, 또한, 지중열교환기 설계에서는 20년 정도의 주기로 시뮬레이션이 필요함으로 인하여 동적 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 것은 상당히 많은 시간이 소요되어 비현실적인 것으로 보인다. 일반적으로 건물의 에너지 분석은 1년 동안의 에너지 분석을 수행하는데, 프로그램의 방식과 건물 모델의 규모에 따라 다르지만, 시뮬레이션에 많은 시간이 소비된다. 그러나, 지중열교환기 설계에서는 건물 모델과 지열 모델을 1년이 아니라 20년 동안 분석을 수행하여야 한다. 또한 지중열교환기 설계도구가 아닌 에너지분석도구인 동적 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 경우에는 열교환기의 길이 등의 관련된 인자를 변화시키면서 여러 차례 수행하여야 조건을 만족하는 설계값을 얻을 수 있으므로, 이 작업은 상당히 많은 시간이 소요된다.

#### 4. 주요 체크 포인트

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 지하수가 거의 가득 채워진 우물인 동시에 지중열교환기이다. 설계, 시공, 그리고 유지관리 측면에서 우물로서 그리고 지중열교환기로서 두 가지 역할을 원활하게 수행하도록 한다. 아래 항목 이외에도 펌프의 선정, 수배관 시스템에서의 수도손실등과 같이 다른 지중열교환기와 동일하거나 유사한 내용의 검토도 중요하다.

##### 4.1 우물의 수명

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 반영구적인 수명을 유지하며, 이를 위하여 우물이 붕괴하지 않고 유지하여야 한다. 이를 위해서 단단한 암반으로 구성된 지역에서 적용되어야 하며, 표토층이 얇고 암반이 잘 발달된 지역에 적합하다.

##### 4.2 지하수의 수위

우물에 고인 지하수 수위가 지표에 가까운 지역

에서 적합한 방식이다. 지하수 수위가 낮은 경우에는 지하수를 퍼 올리는데 많은 에너지가 소비되게 되며, 이는 전체적인 시스템COP가 낮아지게 된다. 지하수 수위가 일정한 수위를 유지하는 것 또한 중요하다. 지중열교환기의 수명기간 동안에 일정 수준이상의 수위를 유지하도록 검토한다.

##### 4.3 지하수의 수량

냉난방 부하의 피크가 발생할 때에는 블리딩이 지중열교환기의 성능을 향상시킬 수 있다. 블리딩 수량 이상의 지하수 생산능력을 확보하여야 원활한 운전을 수행할 수 있다. 지중에 저장되거나 추출되는 열량은 냉방 모드가 난방 모드의 약 2배에 달하며, 업무용 건물에서 냉방 피크부하가 난방 피크부하가 훨씬 큰 것이 일반적이므로 업무용 건물에서는 냉방시에 블리딩을 검토할 필요가 많다.

##### 4.4 슬리브의 시공

PVC 파이프 등을 슬리브 재료로 사용하는 경우가 많다. PVC 파이프는 4 m길이로 생산되므로 PVC파이프의 접합 개수가 100여 개에 달한다. 시추된 우물은 완전한 직선이나 직각을 이루고 있다고 볼 수 없으며, 시추에 사용하는 드릴 파이프의 굽힘 강도에 따라서 진직도가 떨어질 가능성이 있다. 굽은 보어홀 내부에서 슬리브 시공이 적절하게 수행되는지 확인이 필요하다.

##### 4.5 우물의 유지보수

반영구적인 지중열교환기의 특성으로 인하여 우물의 유지 보수가 매우 중요하다. 주기적으로 수중펌프의 교체가 필요하며, 우물 하부에 누적된 이물질의 주기적인 제거를 위한 현실적인 방안의 수립도 필요하다.

#### 5. 결론

스탠딩컬럼웰 방식 지중열교환기는 우물이자 열

교환기로서 작동한다. 우물에 고인 물을 순환하여 열교환기로서 작동하기 위해서는 우물을 거의 가득 채운 지하수가 필요하며, 반면에 지하수의 수량은 블리딩을 원활하게 수행하기 위한 만큼 필요하다. 반영구적인 수명을 유지하기 위해서는 우물이 붕괴하지 않고 유지할 수 있는 단단한 암반 구조를 가지고 있어야 하며, 유지 보수를 위한 방안도 수립되어야 한다.

스탠딩컬럼웰 방식은 해당 지역의 여건을 검토하여 적합한 지역에 적용하여야 한다. 수직밀폐루프 방식은 대부분의 지역에 적용이 가능한 반면에 스탠딩컬럼웰 방식은 조건은 만족하는 지역에서만 적용이 가능하다.

지하수 방식 지중열교환기는 지하수의 수량에 따라서 히트펌프 시스템의 용량을 결정할 수 있는데 비하여, 스탠딩컬럼웰 방식은 지중에 저장되고 이용되는 건물의 에너지 사용량이 설계에 큰 영향을 미친다.

블리딩 등을 고려하는 정확도가 높고 현실적인 설계도구의 개발이 절실하다. 현재에는 선형열원 이론에 근거한 설계 도구가 사용되고 있다. 선형열원 이론의 설계도구를 사용하는 경우에는 여기에 맞는 시험을 통하여 지중 데이터를 확보한다.

일정한 능력을 갖는 지중열교환기로서 뿐만 아니라 건물과 연계된 시스템으로서 적절하게 설계되는 것이 중요하다. 실제 건물에 적용되는 지중열교환기는 건물의 에너지량을 반영하여 설계한다. 유지보수를 수단을 갖추면 경우에는 스탠딩컬

럼웰 방식 지중열교환기는 설치 면적이 적은 점 등의 장점을 살려서 성공적으로 적용될 것으로 예상된다.

### 참고문헌

1. "Geothermal Heat Pump Manual", New York City Department of Design and Construction, 2002
2. "R&D Studies Applied to Standing Column Well Design" Spitler, J. et.al., ASHRAE 1119-RP, 2002, ASHRAE
3. "Modeling of Standing Column Wells In Ground Source Heat Pump System", Deng, Z., 2004, Oklahoma State University
4. "Standing Column Well형 지열원 히트펌프 시스템", 김진상, 2005년 5월, 지열이용기술연구회 워크샵
5. "Geothermal Earth Coupling Options and Design & Construction Methods", Carl Orio, September 2008, ASHRAE Boston Chapter
6. "Bringing Geothermal to the City", Water Well Journal, December 2010, pp27-31
7. "Getting up to Speed New England's Ground Water Resources", US EPA