

## 우물관정(SCW: Standing Column Well)형 지열 냉난방 시스템 설계를 위한 지중열 해석에 관한 연구

\*권 익상<sup>1)</sup>, \*\*이 건중<sup>2)</sup>, \*\*김 태원<sup>2)</sup>

### Research for geothermal analysis on design of Standing Column Well type system

\*Iksang Kwon<sup>1)</sup>, \*\*Kwonjoong Rhee<sup>2)</sup>, \*\*Taewon Kim<sup>2)</sup>

**Abstract** : This thesis identified basic design elements(Sustained Yield, Depth of Well, Separation Distance between wells) regarding installation of Standing Column Well, Geothermal Heat pump System by dynamic analysis.

**Key words** : Geothermal Heat pump System(지열히트펌프 시스템), Standing Column Well(우물관정), Sustainable Yield(적정채수량), Permissible Yield(허용채수량), Bleeding(배출수)

#### Nomenclature

C : specific heat, kcal/kg · hr · °C  
h : thermal conduction rate, kcal/m hr · °C

#### Subscript

SCW: Standing column well  
COP: Coefficient of performance  
EER: Energy efficiency ratio

### 1. 서론

지하수를 이용하는 지열히트펌프 적용방식 중 우물관정(SCW: Standing column well)방식은 지하수 관정을 이용하여 물을 순환시킴으로서 직접 열교환을 수행하는 방식으로 경제성이 우수하고, 유지보수가 타 방식에 비하여 용이하다. 우물관정형 지열시스템 방식은 국내에 시작한 것이 불과 몇 년 정도로, 비교적 수온이 안정적인 지하수를 이용하며, 국내의 지질구조에 적합한 것은 물론 좁은 공간에서도 설치가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 기존 냉난방 설비에 상대적으로 높은 초기투자비와 관련 법적, 기술적 기준의 부재 그리고 지하수에 대한 환경영향 평가를 실시해야

하는 등 충분한 연구와 체계가 이루어지지 않아 우려하는 목소리가 적지 않다. 지열시스템을 최적 설계하기 위하여 적용 건물의 냉난방 부하를 정확하게 계산해야 되는 것은 물론, 지중 열교환기 매설지역의 토양의 성질, 시추공 간격 등과 같은 다양한 변수를 고려해야 한다. 지중 열교환기 설계가 어려운 점은 설치하고자 하는 장소의 토양 또는 암반에 대한 열물성을 알고 있어도 이들의 수분함량 변화라든지 암반내 절리/파쇄대를 통한 지하수의 흐름으로 인한 지중 열교환기 성능변화에 대한 예측이 곤란하다는 것이다. 지하수 개발시 우물 개발 가능여부 혹은 사용여부, 그리고 설계를 위한 참고 자료 확보를 위하여 지반 보고서를 작성하는데 지하수 열원으로 사용하기 위해서는 적정 채수량, 수질, 지질조사, 지하수 온도, 지하 양수량, 우물깊이, 우물간 이격거리가 포함되어야 한다. 수질 및 지질, 지하수 온도는 지하수 개발시 측량 및 분석에 의하여 직접 산출이 가능하다. 그러나 적정 채수량, 우물깊이, 우물간 이격거리 산출은 역학적으로 분석하여 산

1) 농협중앙회 총무부

E-mail: yesno333@naver.com

Tel: (011)9843-5180 Fax: (02)2080-5933

2) (주) 티이엔

E-mail: t1@ten-i.com

Tel: (043)279-7052-60 Fax: (043)279-7050

출되어야 하나, 아직 분석되어 규명된 사례가 없고 경험치로서 외국에 사례가 일부 있을 뿐이다. 본 논문에서는 우물관정형 지열히트펌프시스템을 설치하기 위한 기본 설계요소(적정채수량, 우물 깊이, 우물간 이격거리)를 역학적으로 분석하여 규명하였다.

## 2. 지하수 열원 시스템의 설계

### 2.1 지하 양수량 산출

지하수의 적정 양수량을 산출하는 방법은 크게 두 가지 방법이 있는데, 열역학적으로 해석하는 방법과 양수시험 결과로 양수량을 구하는 방법이 있다. 처음 설계시에는 열역학적으로 해석(2.1.1 참조)을 하여 설계를 하고, 지하수를 천공 완료한 후에는 양수시험 결과(2.1.2 참조)로 그 우물의 적정여부를 판단하여야 한다. 즉 양수시험으로 산출한 적정채수량은 열역학적 해석으로 산출한 적정채수량보다 커야 사용이 가능하다.

#### 2.1.1 열역학적 해석으로 산출

Fig. 1과 같이 지하수 흡입 및 토출의 순환량과 온도차이로서 산출한다.

$$Q_1 = G_1 \cdot C(T_1 - T_2) \quad (1)$$

$$Q_2 = G_2 \cdot C(T_1 - T_G) \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_2 \text{ 이므로}$$

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot (T_1 - T_2)}{T_1 - T_G} \quad (3)$$

여기서  $Q_1$  : 지중열교환기 인입과 토출의 열량 차이(kcal/h)

$Q_2$  : 지중열교환기 인입과 지하수의 열량 차이(kcal/h)

$G_1$  : 지열순환펌프 유량(kg/h)

$G_2$  : 지하수 적정 채수량(kg/h)

$C$  : 물의 비열(kcal/kg·°C)

$T_1$  : 지중열교환기 인입온도(°C)

$T_2$  : 지중열교환기 토출온도(°C)

$T_G$  : 지하수 평균 온도(°C)

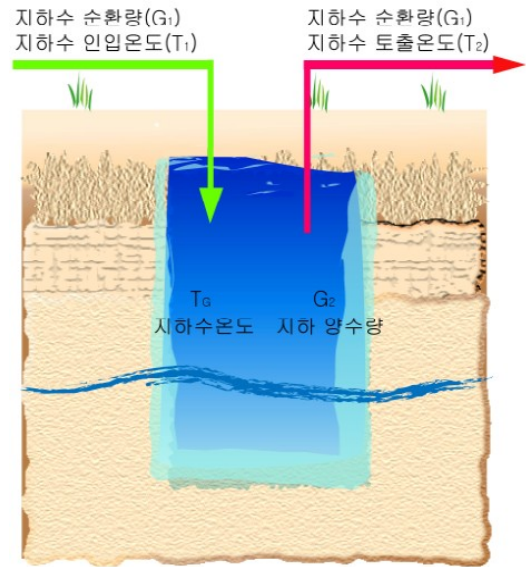


Fig. 1 지하 양수량 산출 방법

#### 2.1.2 양수시험에 의한 산출

적정채수량을 산출해야 필요한 지하수 열량을 구할 수 있다. 지하수 개발완료시 작성하는 양수시험 결과표(Table.1 및 Fig. 2 참조)에 의하여 적정채수량을 계산식 혹은 그래프를 이용하여 산출하고 그 성능을 확인할 수 있다. 적정채수량은 양수시험 결과에 의하여 측정되며, 우물 깊이의 1/3 지점에서 측정을 한다. 적정채수량은 아래와 같이 식 (1)에 의한 산출 방법과 Fig. 2와 같이 그래프를 이용한 산정방법의 결과치를 비교한 결과 서로 유사하게 산출되었다.

##### (1) 계산식에 의한 적정채수량 산출

단계양수한 시험 자료를 예를 들면(Table. 1 참조), 1단계 양수량 32m<sup>3</sup>/day으로 양수할 때 수위강하는 19.48m이었으나 한계양수량 63m<sup>3</sup>/day에서의 우물 수위강하는 38.94m이었으므로, 이때의 가채수량은

$$Q_2 = Q_1 \times \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

$$Q_2 = 32 \times \frac{38.94}{19.48} = 50.78 \text{ m}^3/\text{day}$$

로 산정된다. 이것은 한계양수량의 80% 범위로서 우물의 한계양수량에 대한 적정채수량을 개략적으로 파악하는데 도움이 된다.

여기서  $s_1$  : 1단계 수위 강하,

$s_2$  : 4단계 수위 강하,

Q<sub>1</sub>: 1단계 양수량

Table. 1 양수시험 결과치의 예

구 분	양수시작 시간(min)	양수량 Q (m <sup>3</sup> /day)	지하수위 (m)	수위 강하 (m)
단계양수	1	0	36.68	19.48
	2	120	43.47	26.27
	3	240	54	34.95
	4	360	63	38.94
	5	480	72	59.42
장기양수	0	50	17.2	33.82
수위회복	2880			

(2) 그래프를 이용한 적정채수량 산출

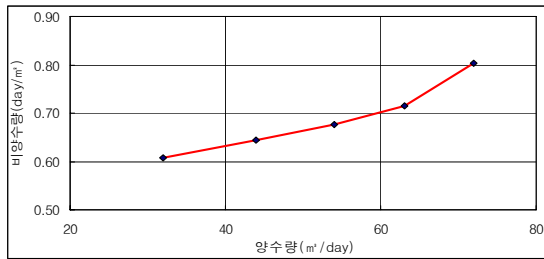


Fig. 2 양수시험 결과 예  
(농협중앙회 지반보고서 자료 32P)

일반적으로 변곡점의 양수량을 한계양수량이라고 하는데 이것은 우물 능력의 적정한계를 나타내는 것이므로 적정양수량이라고 할 수 있다. 즉 적정양수량은 우물효율을 극대화시키는 우물별 최적양수량을 의미한다. 그러나 지하수법 시행령에서 요구하는 적정채수량은 장기적으로 지하수를 채수하더라도 채수량이나 수질에 별로 변동이 없는 정도의 양수량을 의미하므로 우물의 적정채수량과는 다르다고 보아야 한다. 그러므로 적정채수량(Sustained yield)은 지역 내 지하수 함양조건, 인근 우물의 수리 간섭, 잠재오염원의 영향 등을 고려하여 적정양수량 범위 내에서 결정하는 허용채수량(Permissible yield)이라고 할 수 있다. 적정채수량은 한계양수량의 80% 범위로 보면 된다. 따라서 63m<sup>3</sup>/day × 80% = 50.4m<sup>3</sup>/day가 적정채수량이다.

## 2.2 우물 깊이 산출

우물의 깊이는 지하수의 적정채수량, 지하수의 온도, 그리고 열교환 시간과 밀접한 관계가 있다. 미국의 실험 Data를 가지고 선정하였으나 미국과 우리나라의 지질 및 지하수의 조건이 다르므로 국내의 사례를 가지고 기준을 확립하는 것이 시급하다 하겠다.

Table. 2와 같이 배출수(Bleeding) 10%를 감안할 때는 16m, 배출수(Bleeding) 없을 때는 23m를 기준한다.

- ① 배출수(Bleeding)를 감안할 때 :  
 우물깊이(m)=필요냉방부하(RT)×16m (5)
- ② 배출수(Bleeding)가 없을 때 :  
 우물깊이(m)=필요냉방부하(RT)×23m (6)

Table. 2. 우물깊이 실험 Data

구 분	SCW without bleed	SCW with 10% deadbleed control
*Concord, NH	25m	18m
*Harrisburg, PA	32m	21m
*Boston, MA	22m	14.6m
*Portland, OR	16m	10m
*Birmingham, AL	20m	16m
**수원카톨릭대학		18m
**오창U플랫폼		16m
Average	<b>23m</b>	<b>16m</b>

\* Data from Modeling of standing column wells in ground source heat pump systems by ZENG DENG

\*\* Data provided by TEN Co., Ltd.

## 2.3 우물간 이격거리 산출

독일에서 개발한 Feedflow란 프로그램으로 지하수의 흐름을 시뮬레이션으로 모사할 수 있는데 아래와 같은 조건(Table. 3. 참조)으로 입력하였을 때 10m 이격거리에서는 우물간 영향이 없는 것으로 나타났다. 따라서 국내에서의 우물간 이격거리는 실제 시뮬레이션한 거리에다가 20% 이상 안전율을 감안하는 것이 좋다.

Table. 3. 시뮬레이션 입력 Data(예)

심도	m	400m
우물 관경	mm	200mm
파이프 내경	mm	100mm
암반의 열전도도	W/m-K	3.73
공극율		0.1
투수계수	m/day	$3.354 \times 10^{-3}$
파이프 내경	mm	100mm
수중순환펌프 유량	lpm	3.73

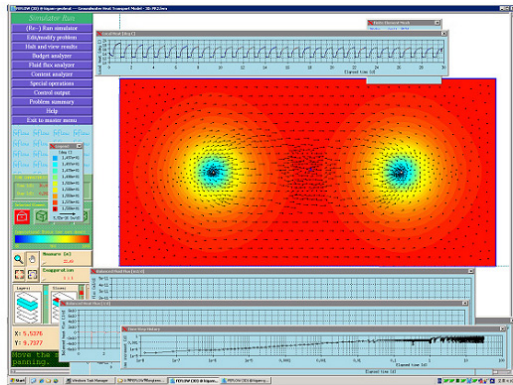
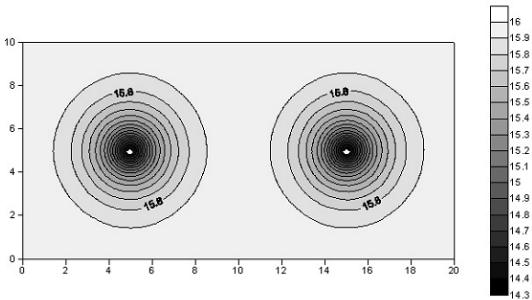


Fig. 3 SCW 내 공벽 측정온도 및 시뮬레이션 모델링 화면

## 2.4 우물에서 회수하는 총에너지

(총열전달량) 계산 : 지하수 열교환기의 설계

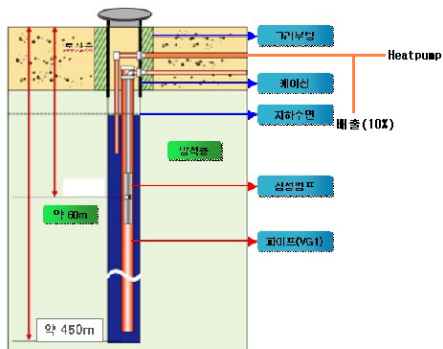


Fig. 4 지하수 열교환기 대략도

## ○ 열전달 방식

- ① 순환유체를 통한 열대류
- ② 보어홀 암석을 통한 열전도
- ③ 배출(Bleeding)을 통한 열대류

이중 보어홀 암석을 통한 열전도는 총열전달량에서 미세하므로 무시해도 좋다. 계산방식은 다음과 같다.

- ① 유체를 통한 열대류( $Q_1$ ) : 순환량과 온도차로 산출

$$Q_1 = C \cdot G \cdot \Delta T \quad (7)$$

- ② 보어홀 암석을 통한 열전도

$$Q_2 = h \cdot A \cdot (T_o - T_s) \quad (8)$$

- ③ 배출(Bleeding)을 통한 열대류

$$Q_3 = C \cdot G \cdot \Delta T = Q_1 \cdot 10\% \quad (9)$$

∴ 총 열전달량은 ① + ② + ③이 된다.

여기서

C : 물의 비열(kcal/kg · hr · °C)

G : 지하수 순환량(리터/시간)

$\Delta T$  : 지하수 인입 및 배출수의 온도차(°C)

h : 열전도율(kcal/m · hr · °C)

A : 보어홀의 내벽 전열면적(m<sup>2</sup>)

To : 순환수의 평균온도(°C)

Ts : 보어홀 내벽 온도(°C)

## 4. 결론

다양한 지열이용 냉난방 시스템 중, 지열(지하수)에너지는 현실적으로 가장 신뢰성 있고, 경제성이 확보된 에너지로 자리 잡아 가고 있다. 그러나 우물관정(Standing Column Well) 방식은 지열업계에서 사용은 하고 있으나 학술적으로 정립된 바 없다. 이에 본 논문에서는 기본적으로 설계에서 필요한 지하수 필요량, 우물깊이, 우물간 거리를 역학적으로 혹은 실험적인 데이터로 정리하여 소개하였다.

우물관정방식은 타 방식에 비하여 좁은 환경의 우리나라에 적합한 방식이라 할 수 있겠다. 우물관정방식의 경쟁력 확보를 위해서는 지중열의 학술적 해석과 지하수 오염을 막는 친환경적인 설비의 설치, 그리고 배출수(Bleeding)의 이용이 무엇보다도 중요한 과제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 지속적인 기술개발과 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문이 작성되도록 도와주신 한국지질자원연구소 이태종 박사님, 그리고 충주대학 홍기배 교수님께 감사드립니다.

### References

- [1] ZHENG DENG, 2004, Feet per ton for different ground heat exchange. p251
- [2] Thesis The flow of groundwater (Chapter 3) [Environmental Engineering]
- [3] A practical study on the ground heat pump with standing column well(Summary of Final Report) 2006. 7
- [4] Geotechnical Report by National Agricultural Cooperative Federation p32-33 2007.