

우물관정(Standing Column Well)형 지열 냉난방시스템의 기술적용 방안에 관한 연구

권익상 *, 홍기배 **, 김태원 ***

* 농업협동조합중앙회(기술역), ** 충주대학교 에너지시스템공학과 교수, *** (주)티이엔 대표이사

1. 서론

우물관정(SCW: Standing column well)방식의 지열 설비는 지하수 우물을 이용하여 냉난방 순환수를 직접 열교환 한다. 시공이 비교적 간편하며, 시공비가 효율에 비하여 적게 소요되기 때문에 경제성이 우수하고, 우물관정 속의 설치물에 대한 유지보수가 타 방식에 비하여 용이하다. 이 방식은 최근에 국내에서 시공되기 시작하였으며, 비교적 수온이 안정된 국내의 지질구조에 적합한 것은 물론 좁은 공간에서도 설치가 가능하다는 장점이 있다. 본고에서는 관련 참고문헌과 실증 단지의 데이터, 그리고 연구결과를 토대로 하여 우물관정형 지열시스템을 설치하기 위한 지반조사의 내용, 설계에 필요한 기본요소인 적정 채수

량, 수질, 지질, 지하수 온도 등의 산출방법 및 기준을 함께 제시하였다. 또한 지열시스템을 이용하여 실제 설계에 반영할 수 있는 냉난방방식의 종류를 소개하고자 한다.

2. 본론

2-1. 지반조사 및 설계시 착안사항

전체적인 우물관정형 지열시스템 구축을 위한 Process는 다음과 같다.

• 지반조사

- ① 지질조사
- ② 수온조사
- ③ 수질조사
- ④ 지하수량조사

• 설계

- ① 냉,난방 부하계산
- ② 단위기계 설계
- ③ 우물의 설계
 - 총 회수에너지(열전달량)
 - 우물깊이
 - 우물간 이격거리

• 설치(시공)

- ① 우물 천공
- ② 단위기계 제작



- ③ 단위기계 설치
- ④ 배관설치

• 시운전

- ① 단위기계 시운전
- ② 종합 시운전 : COP 산출
(Heat Pump 출력, 소비전력 측정)

2-1-1 지질 조사

시추공이 비교적 발달하여 안전한 암석이면서 암반대수대가 비교적 양호하게 발달된 지층은 화강암류이며, 냉각수가 공내 순환시 붕괴의 우려성이 있는 부적절한 암석은 퇴적암과 화산분출암류이다. 시추공이 붕괴될 경우에는 시추공의 위치를 변경하던가 혹은 시추공 내부를 보완해야 한다.

2-1-2 수온 조사 및 산출

지하수온은 적정채수량과 함께 지하수 열량을 구하는데 가장 큰 중요한 요소가 된다.

우물관정의 심도에 따른 온도는

$$Y = 0.0247X \times 12.56 \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 인입되는 냉각수 온도가 난방시에는 약 10℃ 전후, 냉방시에는 약 30℃임으로 지하수의 수온은 10 ~ 20℃가 적당하다. 우리나라의 경우는 실제 100m 당 약 1.6 ~ 8.35℃ 온도차이가 크므로 실제 우물의 수온을 측정하여 사용하는 것이 바람직하다.

2-1-3 수질조사

지하수를 이용하려면 기준치 이상의 수질이이어야

<표 1> 냉난방순환수(지하수) 수질기준
: 공동주택 난방수 수질기준

pH	Ca 경도(ppm CaCo ₃)	탁도(FTU)
8 이상	20 이하	10 이하

한다. 수질 조건이 나쁘면 열교환기는 내식성 있는 재질로 상향 조정해야 한다. 배관 오염시는 시스템 성능이 저하될 수 있으며, 자주 청소해주어야 한다.

- pH : 산과 알카리의 세기로 나타내며 산성 (pH6 이하)일 때에 금속의 부식 가속화
- Ca경도(탄산칼륨 경도) : 스케일(석회석) 생성 정도
- 탁도 : 용해되지 않은 부유물질의 총합으로 부식이나 스케일이 발생하는 경우 증가

2-1-4 지하수량 조사 및 산출

지하수량을 산출하는 방법은 크게 두 가지 방법이 있는데, 열역학적으로 해석하는 방법과 양수 시험 결과로 구하는 방법이 있다. 처음 설계시에는 열역학적으로 해석을 하여 설계를 하고, 지하수 천공 완료한 후에는 양수시험 결과로 그 우물의 사용 및 성능 적정여부를 판단하여야 한다. 즉 양수시험으로 산출한 적정채수량은 역학적 해석으로 산출한 적정채수량 이상이어야 사용이 가능하다.

가) 열역학적 해석으로 산출

우물에서 회수하는 총에너지는 지하수가 가진 에너지와 같은데 이 조건으로 필요한 지하수량을 계산할 수 있다. 우물에서 회수하는 총에너지는 순환유체를 통한 열대류, 보어홀 암석을 통한 열전도 그리고 배출(Bleeding)을 통한 열대류가 있다. 계산방식은 다음과 같다.

- ① 유체를 통한 열대류(Q₁) : 순환량과 온도차로 산출

$$Q_1 = C \cdot G \cdot \Delta T \quad (2)$$

- ② 보어홀 암석을 통한 열전도는 미세함으로 생략을 해도 무방하다.

③ 배출(Bleeding)을 통한 열대류

$$Q_3 = C \cdot G \cdot \Delta T = Q_1 \cdot 10\% \quad (3)$$

∴ 총 회수에너지는 $Q_u = ① + ② + ③$ 이 된다.

여기서

C : 물의 비열(kcal/kg · hr · °C)

G : 지하수 순환량(리터/시간)

ΔT : 지하수 인입 및 배출수의 온도차(°C)

h : 열전도율(kcal/m · hr · °C)

A : 보어홀의 내벽 전열면적(m²)

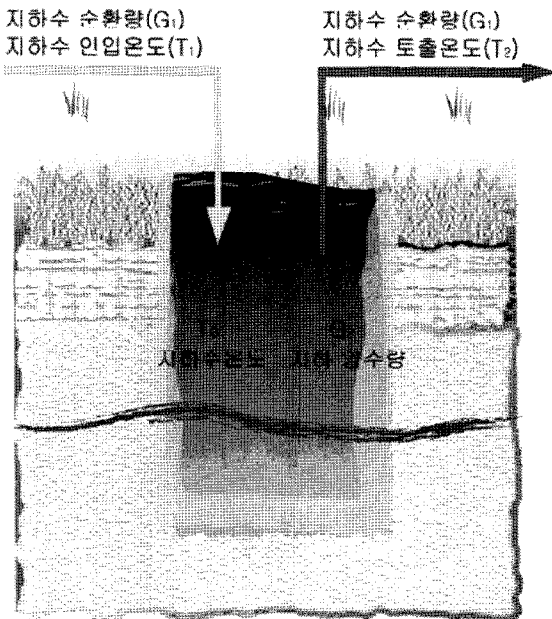
T₀ : 순환수의 평균온도(°C)

T_s : 보어홀 내벽 온도(°C)

필요한 지하수량은 그림 1과 같이 지하수 흡입 및 토출의 순환량과 온도차이로서 산출한다.

$$Q_1 = G_1 \cdot C (T_1 - T_2) \quad (4)$$

$$Q_2 = G_2 \cdot C (T_1 - T_G) \quad (5)$$



[그림 1] 지하 양수량 산출 방법

$$Q_1 = Q_2 \text{ 이므로}$$

$$G_2 = G_1 \cdot (T_1 - T_2) / (T_1 - T_G) \quad (6)$$

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)

나) 양수시험에 의한 산출

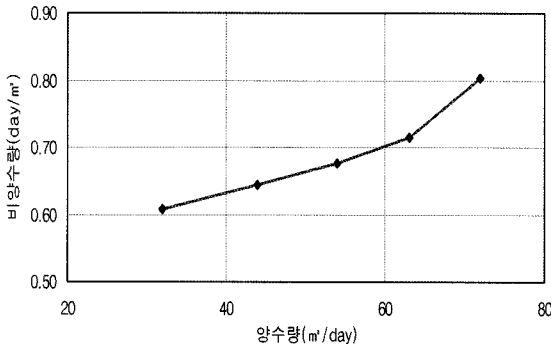
적정채수량을 산출해야 필요한 지하수 열량을 구할 수 있다. 지하수 개발 완료시 작성하는 양수 시험 결과표(표 2 및 그림 2 참조)에 의하여 적정 채수량을 계산식 혹은 그래프를 이용하여 산출하고 그 성능을 확인할 수 있다. 적정채수량은 양수 시험 결과에 의하여 측정을 한다.

(1) 기채수량에 의한 적정채수량 산출

단계 양수한 시험 자료를 예를 들면(표2 참조)

<표 2> 양수시험 결과치의 예

구분	양수시작시간 (min)	양수량 Q (m ³ /day)	지하수위 (m)	수위 강하 (m)
단계양수				
1	0	32	36.68	19.48
2	120	44	43.47	26.27
3	240	54	52.15	34.95
4	360	63	56.14	38.94
5	480	72	59.42	42.22
장기양수	0	50	17.2	33.82
수위회복	2880			



[그림 2] 양수시험 결과 예

1단계 양수량 32 m³/day으로 양수할 때 수위강하는 19.48 m이었으나 한계양수량 63 m³/day에서의 우물 수위강하는 38.94 m이었으므로, 이때의 가채수량은

$$Q_2 = Q_1 \times (s_2/s_1)^{2/3} \quad (7)$$

$$= 32 \times (38.94/19.48)^{2/3} = 50.78 \text{ m}^3/\text{day}$$

로 산정된다.

여기서 s_1 : 1단계 수위 강하,
 s_2 : 4단계 수위 강하,
 Q_1 : 1단계 양수량

(2) 그래프를 이용한 적정채수량 산출

일반적으로 변곡점의 양수량을 한계양수량이라고 하는데 이것은 우물 능력의 적정한계를 나타내는 것이므로 적정양수량이라고 할 수 있다. 즉 적정양수량은 우물효율을 극대화시키기는 우물별 최적양수량을 의미한다. 그러나 지하수법 시행령에서 요구하는 적정채수량은 장기적으로 지하수를 채수하더라도 채수량이나 수질에 별로 변동이 없는 정도의 양수량을 의미한다. 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% 범위

로 보면 된다. 따라서 $63 \text{ m}^3/\text{day} \times 80\% = 50.4 \text{ m}^3/\text{day}$ 가 적정채수량이다.

(3) 수두경사를 이용하는 방법

Darcy는 1856년에 상수도의 여과모래실험에서 흡속의 투수법칙을 발견하였다. 그것이 Darcy의 법칙인데 이 방법은 천공을 세 곳 이상 측정을 한 후 그 결과로 양수량을 계산하는 방법이다.

$$Q = K \cdot A \cdot dh/dl \quad (\text{Darcy 법칙}) \quad (8)$$

$$Q = A v_d \quad (\text{속도 방정식}) \quad (9)$$

이들 식에서,

Q : 물의 흐름율

K : 투수계수

A : 흐름방향의 수직 단면적

dh/dl : 수두경사

v_d : Darcy 속도

5) 우물의 깊이

우물의 깊이를 산정하는 방법은 양수량, 수온 등 여러 가지 요인이 복합되어지기 때문에 전 세계적으로 확정된 것은 없다. 그러나 설계 혹은 제작 설치에 있어서 계량화된 이론이 적용되지 않고서는 선부른 투자나 사용에 있어서 불안감을 가중시키고 목적 달성에 착오를 일으키기 쉽다. 가장 기본적으로 설계 용량을 이론적으로 확인하고 검토하는 것이 무엇보다 중요하다 할 것이다. 우물 깊이의 산정은 지하 양수량과 관계가 깊다. 즉 깊을수록 양수량이 많다. 우물은 적정채수량과 우물의 깊이 두 가지 기본 조건을 모두 충족시켜야 할 것이다.

가) 양수량으로 산정하는 방법

우물관정형 지열시스템에 있어서 우물깊이의 정확한 산출은 무엇보다 중요하다. 우선 우물의 깊이는 지하수량과 수온에 직접 영향을 미친다. 또한 우물은 최초 기동시 급격한 수위저하가 발생되지 않도록 수위를 안정시키며, 운전시 시스템성

<표 3> 우물깊이 실험 Data

구분	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
평균	23m	16m

능을 안정시키고 부하 변화에 따라서 즉각적인 대응이 필요하다. 기동시 빈 배관을 채울 수 있는 지하수량과 운전시 시스템을 안전화할 수 있는 순환량, 그리고 여유량이 필요하다.

나) 실험 DATA에 의한 선정 방법

우물의 깊이는 미국의 실험 Data를 가지고 선정 하였으나 미국과 우리나라의 지하수의 조건(수온, 지하수량 등)이 다르므로 국내의 사례를 가지고 기준을 확립하는 것이 시급하다 하겠다. 표 3과 같이 배출수(Bleeding) 10%을 감안할 때는 16 m, 배출수(Bleeding) 없을 때는 23 m를 기준한다.

- ① 배출수(Bleeding)를 감안할 때 :
 $\text{우물깊이(m)} = \text{필요냉방부하(RT)} \times 16 \text{ m} \quad (10)$
- ② 배출수(Bleeding)가 없을 때 :
 $\text{우물깊이(m)} = \text{필요냉방부하(RT)} \times 23 \text{ m} \quad (11)$

6) 우물의 이격거리

1일 우물의 총회수에너지 : $Q \times 8 \text{ hr} = 1,000 \times (\pi d_w^2) L_w / 4 \times \Delta T \times \text{함수율} \quad (12)$

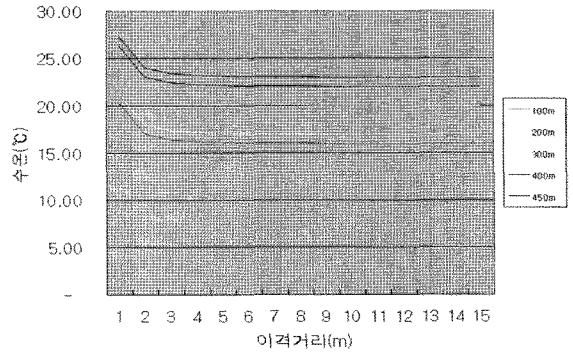
여기서

L_w : 우물의 총 깊이

d_w : 우물의 수온이 영향을 미치는 거리

즉 우물간 이격거리

함수율 : 지질(암반)이 함유하고 있는 수분의 양



[그림 3] 우물의 이격거리에 따른 지하수위의 변화

(12)식에 의하여 ΔT 구한 다음 지하수온을 예측할 수 있다. 아래 그림과 같이 우물의 반경 3 ~ 5m 이상이 되면 열교환에 따른 지중 온도의 영향이 미비하다는 것을 알 수 있다.

$3 \sim 5 \text{ m(반경)} \times 2 \times \text{여유량(20\%)} \approx 10 \text{ m}$
 따라서 우물과 우물간 이격거리는 약 10 m 이상이면 적정하다 할 수 있다.

2-2. 실증실험 결과 및 적용방안

가. 지하수 개발 프로세스

그림 4-1

나. 시스템 대략도 및 열교환기 설치

그림 4-2, 그림 5

다. 우물관정 지열시스템 적용방안

그림 6 ~ 10

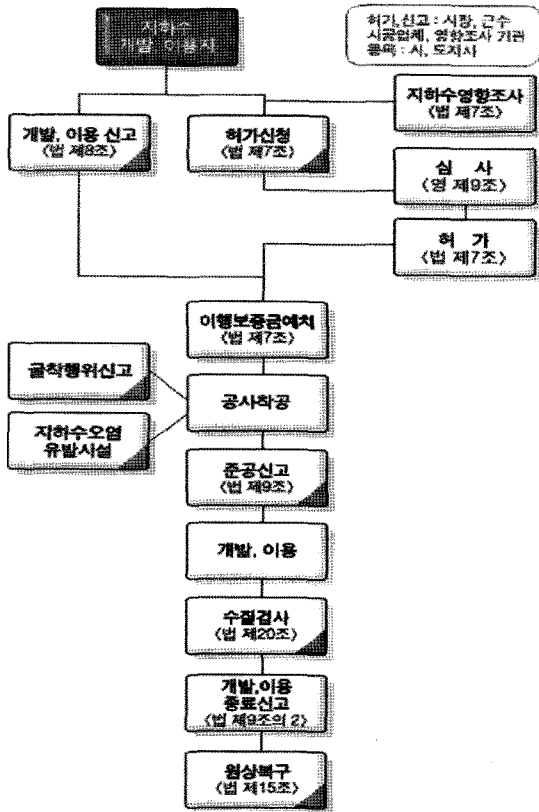
라. 실증실험 결과

1) COP

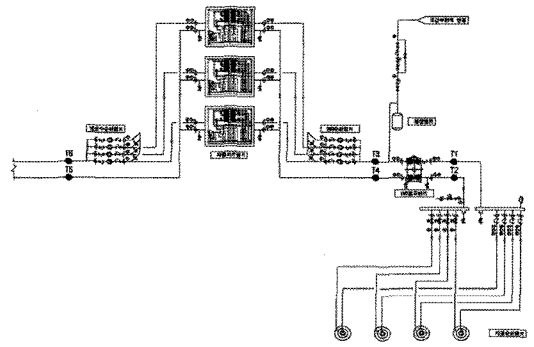
그림 11

2) 지하수열교환기 출입구 온도

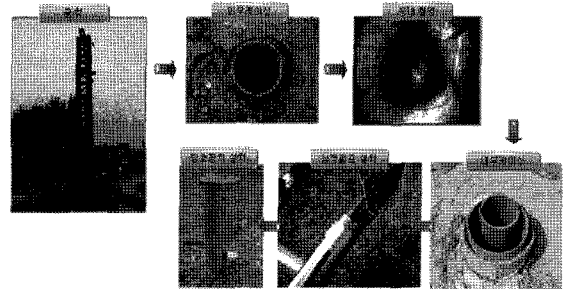
그림 12



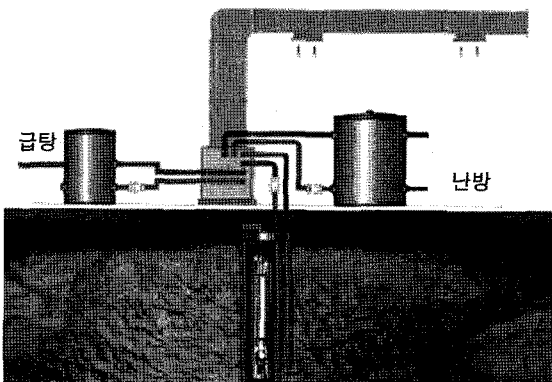
[그림 4-1] 지하수 개발 프로세스



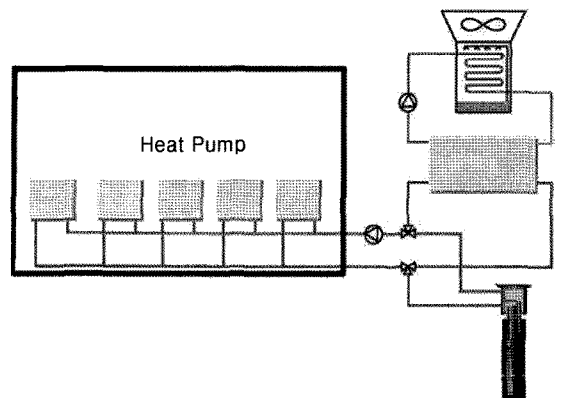
[그림 4-2] 지열시스템 대략도



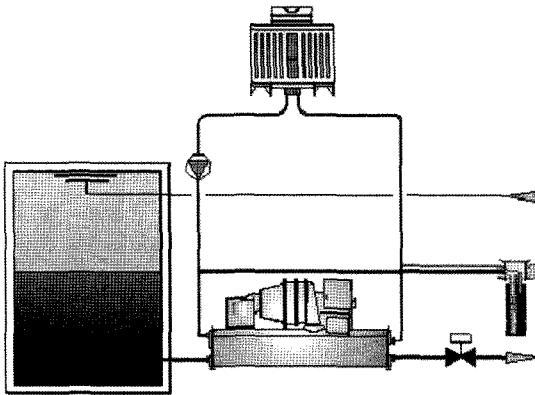
[그림 5] 천공 및 열교환기 설치과정



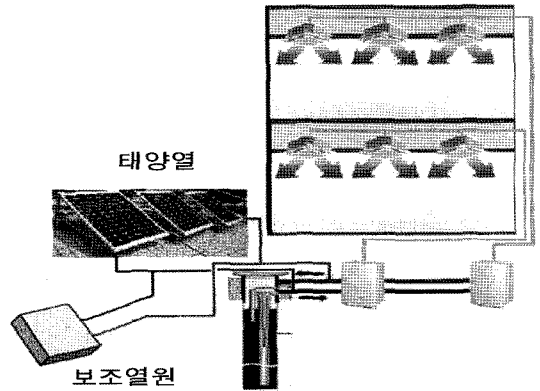
[그림 6] 축열조를 이용한 일반적인 지열시스템



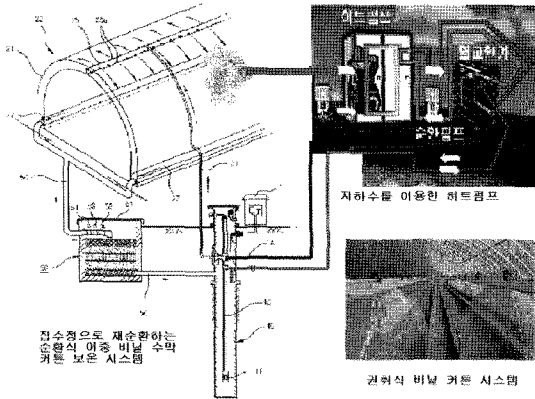
[그림 7] 냉각탑과 지열을 병행한 시스템



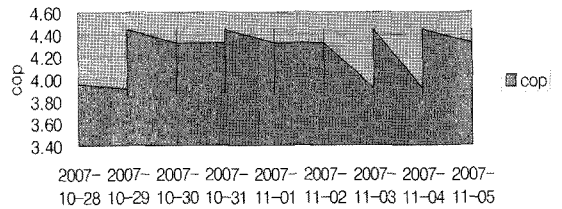
[그림 8] 수축열(빙축열)과 연계한 시스템



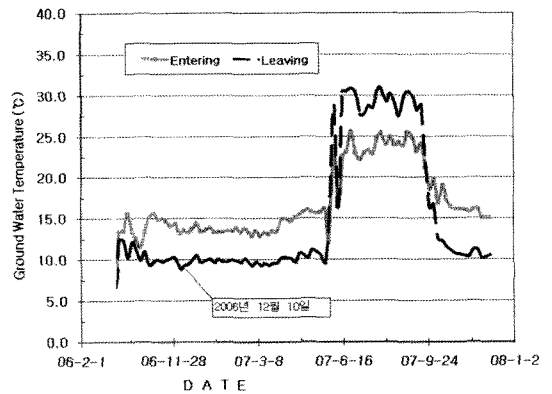
[그림 9] 태양열 등 보조열원과 연계한 시스템



[그림 10] 원예용 비닐하우스(수막시스템)와 연계한 시스템



[그림 11] COP



[그림 12] 지하수열교환기 출입구 온도

3. 맺음말

우물관정형 지열 냉난방 시스템은 다양한 지열 시스템 중에서도 지하 시공이 비교적 간편하고 유지 보수가 편리하여, 현실적으로 신뢰성 있고, 경제성이 확보된 안정적인 지열 에너지 이용 방법이다.

본고에서는 우물관정형 지열 냉난방 시스템의 실제 적용을 위한 기본적인 지하조사 방법과 최초 계획, 설계에서 필요한 지하수의 적정채수량, 우물깊이, 우물간 거리, 수온 등을 역학적으로 혹은 실험 데이터를 이용하여 정리 소개하였다. 또한 우물관정형 지열 냉난방 시스템을 실제 적용

하는 방안에 대해서도 소개하였다. 국토가 좁고 화석 에너지 자원이 부족한 우리나라의 여건에서 우물관정방식은 타 방식에 비하여 우리나라 여건에 적합하고, 시공 비용에 비하여 비교적 효율이 높고 친환경적인 지열 냉난방 방식이라 할 수 있으며, 냉각탑, 태양열과 같은 다른 열원 및 시스템

과 병행하여 설치 사용할 때 그 효율은 극대화 될 수 있다.

참고문헌

1. ZHENG DENG, 2004, Feet per ton for different ground heat exchange. p251
2. 地下水工學 Iichirou Koro著 p17~19
3. 지열펌프냉난방시스템 한정상외 p4-13 ~ 4-14
4. 우물관정형 지열냉난방시스템 설계를 위한 지중열 해석에 관한 연구 권익상외 p1-4