Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2012. 10), Vol. 23, No. 5, pp. 551~558
DOI: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.5.551

단독주택의 지열시스템 적용 가능성에 대한 연구

신철수 · 장태익†
한국교통대학교 항공기계설계공학과

A Study on Geothermal System Applicability of a Detached House

CHEULSOO SHIN, TAEIK JANG†
Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju City, Korea

Abstract >> Due to high oil prices and global warming problems, researching an alternative energy source and decreasing the energy usage will be the key in the future. Unlike other alternative energy sources, geothermal energy is less dependent on the surrounding environment. Geothermal energy is the ideal energy source for buildings due to the simple and space saving installation. The system is semi permanent once it is installed and this will help reduce the energy usage in controlling the climate in buildings. Geothermal energy does not emit carbon dioxide and other gases that are harmful to the environment. Therefore geothermal energy will be the key in solving high oil prices and a decrease in fossil fuels by applying the geothermal energy system to homes to counter future energy crisis.

Key words : Geothermal(지열), CFD(computational fluid dynamics : 전산유체역학), Load calculation(부하계산), Heat pump(히트펌프), Exergy(엑서지)

Nomenclature

H_s : generation sensible heat load per resident man, m^2
H_l : generation latent heat load. per resident man
I_g : heat gain of glass typical solar radiation
H_g : glass solar radiation load, m^2/s
H_n : overall heat transmission load at glass temperature differential
K : coefficient of overall heat transmission
κ_s : shading coefficient
H_w : external wall or overall heat transmission load for roof
ETS : equivalent outdoor temperature difference

Subscripts

ms : man sensible load
ml : man latent load
el : exothermic light load
we, wi : external wall or inner wall

1. 서 론

정부의 녹색정책에 힘입어 지열 히트펌프시스템의 개발 및 보급이 급격히 증가하고 있다. 그러나 지열 히트펌프시스템 이용기술에 있어서는 히트펌프 유니트의 개발과 시스템의 제어 및 최적설계기술 등

†Corresponding author : janghan0553@naver.com
[접수일 : 2012.10.5 수정일 : 2012.10.25 게재확정일 : 2012.10.26]
Copyright ⓒ 2012 KHNES

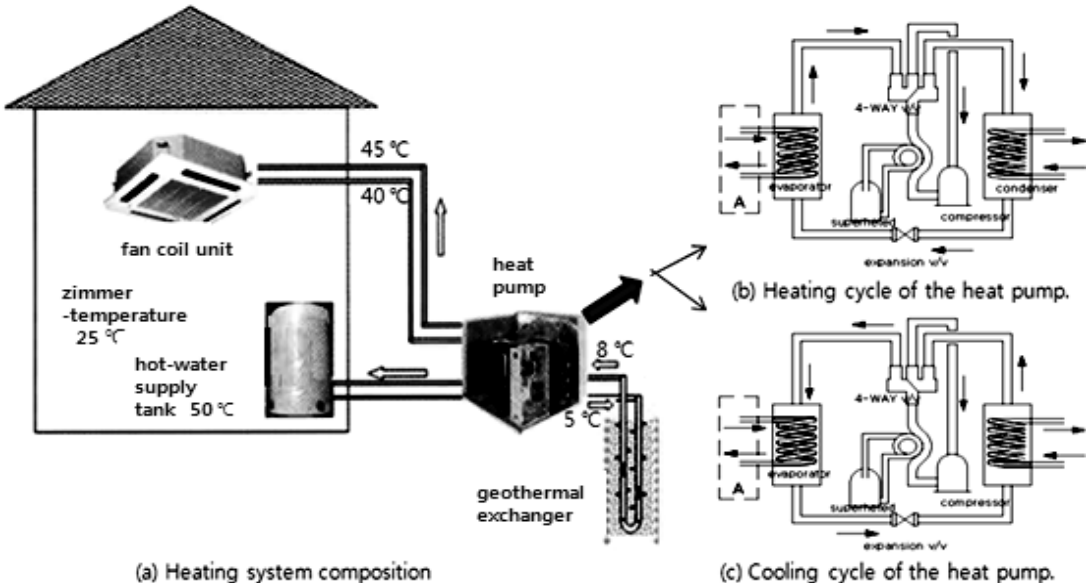

Fig. 1 The heat pump system for house supplying

의 미비로 제한적이다[1]. 따라서 이에 대한 기술개발 필요성이 매우 크고 이것이 선행되어야 지열을 이용한 신재생에너지 보급도 원만히 수행될 것이다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 단독주택에 대한 지열을 이용한 히트펌프의 적용가능성을 살펴보고, 이에 맞는 적절한 히트펌프 시스템의 구성 및 히트펌프의 용량을 제시, 차후 개발자 및 연구자로 하여금 보급 타당성을 확보하는데 도움을 주고자한다[2]. 특히 단독주택이나 농어촌지역과 같은 소규모 주택 및 사회복지시설 등에 신재생에너지 설비시스템을 설치하여 공급을 확대시키면 건축물의 에너지 사용비용을 보다 절약할 수가 있게 된다.

2. 지중열의 활용 및 히프펌프 구성

대표적인 지중열원에 대한 재생에너지 시스템으로는 히트펌프 시스템이 있다. Fig. 1(a)는 난방을 위한 지열 히트펌프의 구성을 보여주고 있다. 이때 지열과 히트펌프시스템을 적절히 이용하면 냉방 시에는 히트싱크(heat sink)로, 난방 시에는 히트소스(heat source)로써 건축물의 냉·난방이 동시에 가능한 복합형 냉·난방시스템이 된다[2,3]. 따라서 이와 같은 히트펌프시스템을 단독주택에 적용할 경우 계절에 관계없이 쉽게 사용할 것으로 보이며, 지열의 활용성도 매우 크게 될 것으로 판단된다.

2.1 난방 사이클 구성의 히트펌프

Fig. 1(b)는 본 연구를 위해 설정한 표면식 히트펌프의 난방 사이클 구성과 주요부품의 열교환 관계를 보여주고 있다. 그림에서 히트펌프 내부의 증발기를 지나는 차가운 액체냉매는 그림의 A부로 연결된 지중열교환기 내의 순환유체로부터 열을 흡수하고 증기냉매로 상변화 한다. 히트펌프 냉매의 증발과정에서 온도가 강하된 부동액은 지열열교환기를 순환하면 다시 온도를 회복하게 되는 사이클이다.

2.2 냉방 사이클 구성의 히트펌프

Fig. 1(c)는 본 연구를 위해 설정한 지열 이용의 표면식 냉방 사이클 구성과 주요부품의 열교환 관계를 보여주고 있다[4,5]. 그림에서, 난방 사이클과는 반대로

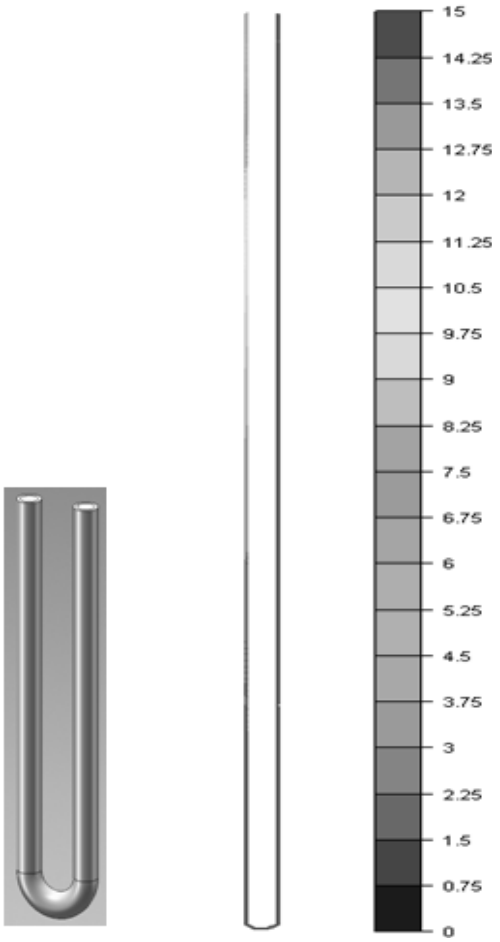

Fig. 2 Inset PE tube for modeling and analysis of temperature change use to CFDesign

히트펌프 내부의 열교환기인 응축기를 지나는 뜨거운 기체냉매는 부동액이 그림의 A부로 연결된 지중열교환기 내의 순환유체로 열을 방출하고 액체냉매로 상변화 한다. 응축과정 후 온도가 상승된 부동액은 지중열교환기인 지중 파이프를 순환하며 온도가 하강하게 된다[5].

2.3 지중열교환기의 열교환과 온도변화 해석

지중열교환기의 열전달에 의한 온도분포를 해석하기 위한 상용 프로그램은 미국 INC의 "Blue Ridge Numerics" 버젼의 CFDesign이며, 해석으로부터 열교환 및 온도변화를 관찰하였다. 즉, Fig. 2(a)와 같은 모델을 기준으로 시뮬레이션을 실시하였고, 관의 재료는 PE(polyethylene pipe)관으로, 깊이는 150m로 하였다. 열교환을 위해 사용된 PE관의 관경은 25mm, 순환냉매는 에틸렌글리콜(ethylene glycol)을 선택하였다[5,6]. 그리고 프로그램의 입력 경계조건은 Table 1과 같다.

Table 1 A property of matter on the PE tube & circulating refrigerant of inside PE tube

	Ethylene glycol	PE pipe
Conductivity	252 W/m·K	0.4 W/m·K
Density	1113.1 kg/m^3	955 kg/m^3
Specific Heat	2,415 J/kg·K	1,303 J/kg·K

Fig. 2(b)는 해석결과로 얻어진 관내의 온도분포를 색으로 구분하여 보여주고 있다. 그림에서 유동계산을 위한 격자의 수는 193,000개 정도로 입력 초기의 온도는 4℃, 순환 유량은 34[ℓ/min]이다. 이때, 출구의 압력조건은 절대압 1bar의 값을 사용하였다. 그 결과 땅의 지열온도로부터 관으로 열전달이 발생하여 평형에 도달한 후 관의 내부 표면온도 15℃로 유지된다는 가정이 있을 때, 초기 히트펌프의 관 출구 즉 지열관 입구온도 4℃가 100m지점에서 14℃, 150m 지점에서 15℃가 됨을 보였다. 이것은 주어진 경계 조건에서 관

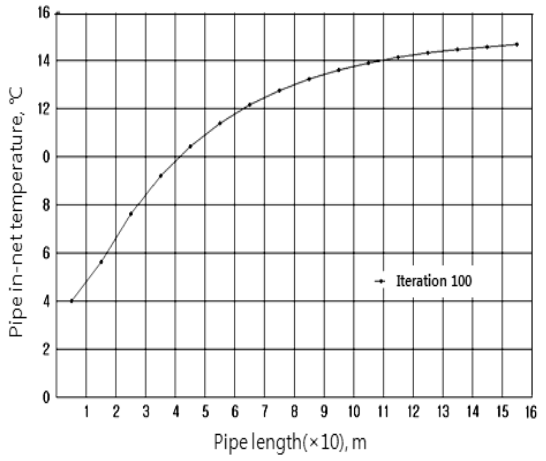

Fig. 3 The temperature diagram in antifreezing liquid of vertical PE pipe

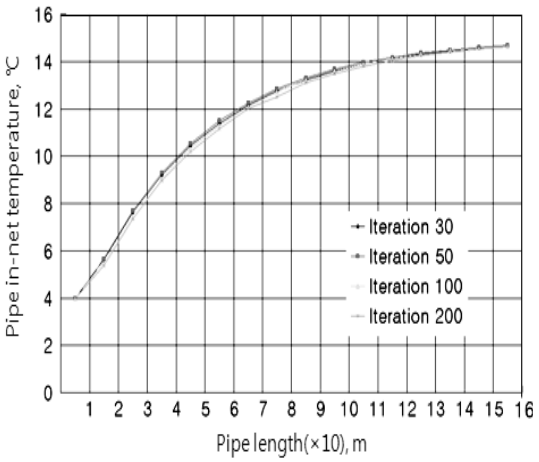

Fig. 4 A temperature distribution chart at iteration changes in antifreezing liquid of vertical PE pipe

내의 냉매 유동유체가 대지와 열교환을 하면서 150m까지는 온도변화가 상승하다가 그 이상에서 일정하게 수렴됨을 보이는 것으로 관의 깊이는 지중 150m 정도 이상을 유지시켜야 열교환 후 완전하게 평형이 유지되면서 지중온도와 같게 됨을 알 수가 있었다.

Fig. 3은 프로그램 수행 반복횟수 100 일 때 얻어진 지열관내 순환냉매의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 100m 지점까지는 온도상승의 변화가 뚜렷이 보이다가 이후로는 서서히 상승하여 15℃로 일정하게 유지됨을 알 수가 있다. 이것은 지열관의 수직깊이가 주어진 경계조건일 때 150m 정도 되어야 함을 말해주는 것이다.

Fig. 4는 같은 모델의 동일조건으로 실행수를 각각 30회, 50회, 100회, 200회 반복할 경우 얻어진 온도분포이며, 그 결과 횟수변화에 대하여 미미한 온도변화의 차이는 보이나 수렴정도에 큰 영향을 주지 않음을 알 수가 있다. 이러한 결과와 경향은 해석 시 반복횟수 결정에 적용할 수 있을 것이다.

3. 단독주택 지열시스템 적용 가능성

3.1 적용 건축물의 개요

앞서 분석한 냉·난방 설비시스템과 해석된 지중열

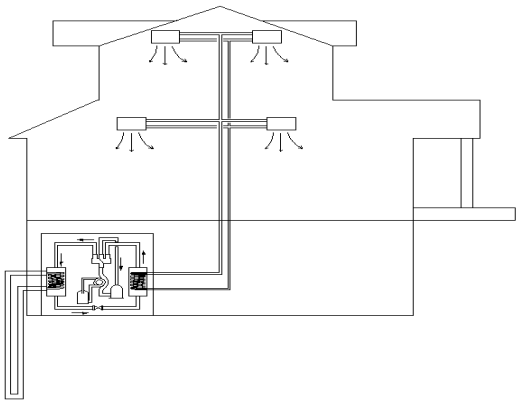

Fig. 5 A detached house with air conditioning used the geothermal heat pumps

교환기를 기준으로 건축물의 개략적인 설비계획은 다음과 같다. 즉, 주택의 외부 환경조건의 기준을 위해 한국 중부지역을 기준으로 단독주택을 모델로 선정하였고, 주택의 대지는 200m^{2}이며 연면적은 약 219m^{2}으로 건물의 1층과 2층을 각각 139.85m^{2}와 79.13m^{2}로 구분하였다. 이러한 조건으로 지열에너지 이용의 수직 밀폐형 히트펌프시스템을 적용시켜 냉·난방을 동시에 하는 것으로 하였다.

3.2 주택 경계조건 및 냉·난방시스템 구성

건축물의 부하량 계산 시간대는 냉방 시에는 일사부하가 강한 오후 2시를 기준으로 하였으나, 난방의 경우 통상 일사부하는 계산하지 않아도 되므로 시간대는 고려하지 않았다. 여름철과 겨울철 각각의 실내 설정온도는 26℃와 20℃로(국토해양부에서 제시한 기준 값)하였으며, 외기 온도기준의 경우는 중부지역(청주)의 연평균 치를 고려하여 여름철은 32.5℃, 겨울철은 -12.1℃로 정하였다[4,6]. 외벽 및 옥상의 일반 콘크리트 두께는 300mm이며, 단열을 위해 100mm 두께의 보온재와 15mm 두께의 석고보드를 사용하였다. 실내 재실인원의 경우는 상시 1층 2명과 2층 3명으로 제한하였다.

Fig. 5는 본 연구를 위해 설계된 단독주택의 지열 히트펌프를 이용한 여름철 건물 내의 냉방시스템 설

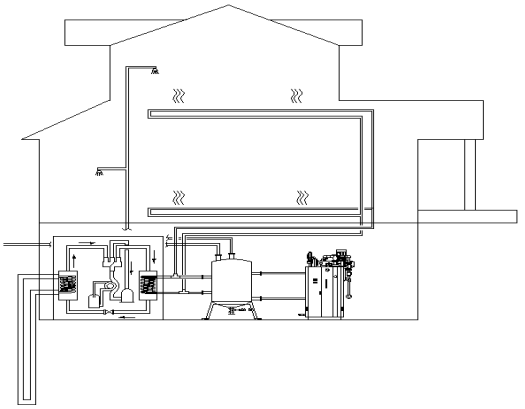

Fig. 6 A detached house with heating and hot water used the geothermal heat pumps

계 단면도이며, 지열에너지를 활용한 히트펌프를 사용한 경우의 냉방상황을 보여주고 있다[6,7]. 이때 사용된 공조용 취출기는 시스템 냉·난방겸용의 열교환기이다. Fig. 6 역시 동일 건물에 지열에너지를 활용한 히프펌프에 의한 난방 및 온수공급 시스템을 보여주고 있다[6,7].

4. 단독주택 냉·난방부하 계산

4.1 실내 냉방부하

연구를 위해 설계된 건축물에서 여름철 실내 냉방부하 계산에 영향을 미치는 요소를 고려할 때 부하계산에 적용 가능한 관계식은 다음과 같다. 즉, 유리창을 통해 실내로 들어오는 일사량의 경우는 각 실의 주된 방향이 어디인지에 따라 시간대별로 큰 차이가 발생하므로 유리창으로부터 투과일사부하는 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$H_g = \kappa_s \cdot A_g \cdot I_g \tag{1}$$

또한 유리창을 통한 온도차에 의한 관류열부하는 유리, 새시 등으로 인해 계산이 복잡하므로 본 연구에서는 통상 실무적으로 정하여 사용하는 식 (2)를 사용하였고, 문의 경우도 같은 방법을 적용하였다.

$$H_n = \kappa_g \cdot A_g \cdot (t_o - t_i) \tag{2}$$

따라서 유리창을 통한 열부하는 일사에 의한 직접열취득 식 (1)과 온도차에 의한 열관류 식 (2)의 합이 된다.

다음, 지붕 외벽과 같이 태양의 영향을 직접적으로 받는 벽체를 통한 열부하의 계산은 식 (3)으로부터 계산하였다.

$$H_w = K \cdot A \cdot ETD \tag{3}$$

이 식의 EDT는 실내·외온도차이다.

여름철 틈새바람의 양을 정확히 계산하는 것은 어려워 각 창문과 새시 종류별 실험치와 경험치 등에 따른 개략치로 계산하는 것이 일반적이며, 식 (4)를 통해 구할 수가 있다. 따라서 식 (4a)는 실내 및 외기의 온도차($t_i - t_o$)로 계산하는 현열량이고, 식 (4b)는 절대습도차($x_i - x_o$)로 구하는 잠열량이다.

$$Q_s = 0.29 Q(t_i - t_o) \tag{4a}$$

$$Q_l = 720 Q(x_i - x_o) \tag{4b}$$

위 식에서 사용된 틈새바람의 풍량 Q는 본 연구에서 환기횟수법으로 구하였다. 이 외에도 실내 자체에서 생성되는 인체 발열부하, 조명 및 각종 기기의 발열부하 등도 고려되어야 한다. 따라서 인체 발열부하는 다음 식 (5)로 계산하였다.

$$Q_{ms} = N_p \cdot H_s \tag{5a}$$

$$Q_{ml} = N_p \cdot H_l \tag{5b}$$

식 (5a)는 인체의 현열부하, 식 (5b)는 인체의 잠열부하이다. 그리고 조명으로부터의 발열부하도 고려하여야 하며, 각종 기기에 의한 발열량도 고려대상이나 본 연구에서는 고려하지 않았다.

4.2 실내 난방부하

난방부하의 계산에 영향을 미치는 요소는 냉방에 비해 상대적으로 적다. 따라서 겨울철 난방 시 실내 온도가 실외보다 높게 되면 벽, 천장, 지붕, 바닥, 창문, 문 등의 구조를 통하여 실내의 열이 실외로 손실되며, 이 온도차에 의한 손실열량은 다음 식 (6)으로부터 계산 된다.

$$Q_{wo} = K \cdot A \cdot k_1 k_2 \cdot (t_i - t_o) \tag{6a}$$

$$Q_{wi} = K \cdot A \cdot (t_i - t_m) \tag{6b}$$

이 식의 (6a)는 외벽(지붕에도적용)을 통한 열손실량이고, 식의 (6b)는 내벽, 내창, 천장에서의 열손실를 구하는 식이다.

5. 단독주택용 히트펌프 엑서지 계산과 시스템구성 및 용량결정

본 연구에서 단독주택용 히트펌프는 물-물방식을 선택하였고, 이 밀폐사이클에 열역학 제1법칙을 적용시켜 사이클을 해석하였다. 구성요소에 대한 비가역손실은 다음과 같이 엑서지(exergy)해석을 수행하여 해결하였다.

5.1 비가역 엑서지량 계산

냉동사이클 해석은 검사체적에 대한 정상상태 열역학 제1법칙 식에 엑서지를 고려한 다음 식 (7)을 사용하였다[5,9].

$$\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} = \sum_e \dot{m}_e ex_{fe} - \sum_i \dot{m}_i ex_{fi} + I\dot{R}_{cv} \tag{7}$$

위 식의 엑서지는 다음과 같이 냉매 단위질량당 식을 적용하였다. 이때, 각 구성요소에 따른 난방 시 입력엑서지 및 출력엑서지를 구한 식은 다음과 같다. 즉, 입력엑서지는

$$\frac{\dot{E}_{\Xi}}{\dot{m}_R} = (h_2 - h_1) + \frac{\dot{m}_{w.eva}}{\dot{m}_R}(ex_{fwA} - ex_{fwB}) \tag{8}$$

이고, 출력엑서지는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{E}_{XO}}{\dot{m}_R} = \frac{\dot{m}_{w.con}}{\dot{m}_R}(ex_{fwD} - ex_C) \tag{9}$$

또, 냉방 시의 입력엑서지 및 출력엑서지의 크기는 다음 식과 같다[6,7]. 입력엑서지는

$$\frac{\dot{E}_{\Xi}}{\dot{m}_R} = (h_2 - h_1) + \frac{\dot{m}_{w.con}}{\dot{m}_R}(ex_{fwC} - ex_{fwD}) \tag{10a}$$

이고, 출력엑서지는 다음 식을 사용하였다.

$$\frac{\dot{E}_{XO}}{\dot{m}_R} = \frac{\dot{m}_{w.eva}}{\dot{m}_R}(ex_{fwB} - ex_A) \tag{10b}$$

따라서, 히트펌프시스템의 주요 성능을 나타내는 지표로는 엑서지효율 Φ와 난방성능계수 COP_h 및 냉방성능계수 COP_c가 있고, 엑서지효율 Φ은 다음 식과 같이 엑서지 출력과 입력의 비로서 계산하였다[5-9].

$$\Phi = \frac{\dot{E}_{XO}}{\dot{E}_{\Xi}} \tag{11}$$

5.2 단독주택용 히트펌프 구성 및 용량

위와 같이 히트펌프 설계에서 주요 고려사항은 시스템에서의 비가역성과 성능계수이다. 이 비가역 값을 적절히 감소시켜 시스템효율을 높이고 동일조건일 때 성능계수를 크게 하도록 히트펌프 설계에 주의를 기울여야 한다. 이때 구성부품의 손실은 팽창밸브, 증발기, 응축기, 압축기 순으로 커지는 것으로 계산되었다. 따라서 본 연구에서는 Table 2와 같은 사양을 기준으로 Fig. 7과 같은 지열시스템구성을 위한

Table 2 A specifications of heat-pumps in the floating instrument detached house

Cooling and heating capacity		21.0 KW	
Pipe diameter		15, 19, 25 mm	
Refrigerant		410-A	
Demand capacities	Cooling	Underground-water	4.1 RT
	Heating	Underground-water	3.45 RT

히트펌프를 설계하였고, 각 구성요소의 역할과 고려사항은 다음과 같다.

압축기의 경우에는, 밀폐형 스크롤 압축기를 선정하였다. 이것으로부터 루프로 냉매를 순환시키고 냉매에 필요로하는 압력과 온도를 높여 증발시키데 적절하다고 판단되었다. 이때 압축기의 출구 냉매온도는 80~90℃ 정도로 시스템에서 열교환을 통해 공급수를 가열하여 난방수로 공급된다.

응축기의 경우는, 압축기에서 나오는 고온고압의 냉매가스를 지열수로 응축시키게 된다. 이때 냉매의 응축잠열을 이용하여 난방 시에는 순환되는 온수를 가열 40~50℃정도의 난방수로 공급하고, 냉방 시에는 지열수를 가열 땅속으로 응축열을 버리는 역할을 수행하도록 하였다. 이때 응축기도 이중관형 열교환기를 사용하였다.

팽창변의 경우는, 냉매를 단열팽창 시키게 되므로 냉매의 증발을 보다 쉽게 하고 저압의 혼합(액체+기체)냉매를 만들어주는 역할을 할 수 있는 것으로 선정하였다. 증발기의 경우는, 팽창변에서 나오는 저온저압의 혼합냉매가스로 물이나 지열수를 증발시키고 이때 증발잠열을 이용한다. 난방 시에는 지열수를 냉각시켜 땅속으로 증발열을 버리는 역할을 하고, 냉방 시에는 순환되는 냉수를 냉각시켜 냉방에 사용하도록 이중관형 열교환로 설계하였다.

이상과 같은 점들을 고려한 단독주택용 히트펌프 시스템의 주요사양은 Table 2와 같고, 이것의 냉동용

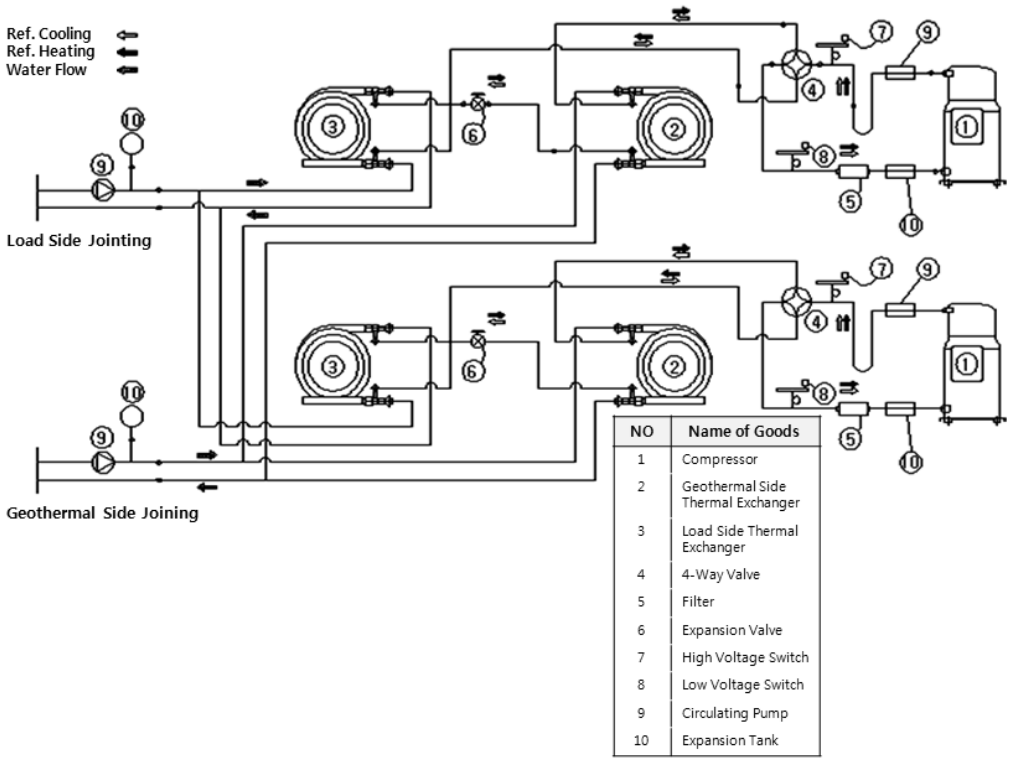

Fig. 7 A design drawing on the exchanging of a water-to-water in heat pump system for house supplying

량 크기는 6RT급의 주거용 물-물열교환 방식이며, 2개의 압축기 구동방식으로 설계하였다.

6. 결론 및 고찰

지열을 이용한 냉·난방시스템을 구성하여 단독주택에 그 적용가능성을 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 지열을 이용한 히트펌프에서 열교환기의 수치해석 결과 관의 깊이 약 150m 까지는 지중과 열교환이 계속 발생하였다. 이 후 지중관과 지열이 평형이 유지되어 온도가 같게 됨을 알 수 있었다.
2) 지중관 입구 약 4℃의 냉매가 150m 지점부터는 이후 15℃ 값이 고정되어 나타났다. 이러한 결과는 예상치 8℃ 보다는 높아 해석과정에서 더 많은 연구가 필요함도 알게 되었다.
3) 구성된 시스템에서 엑서지의 출력과 입력의 비가 전체 부품 손실률을 제외한 값과 같은 것으로 보아 시스템효율 향상을 위해서는 부품손실을 최소화하여야 됨을 알 수 있었다.
4) 모델로 제시한 단독주택용 냉·난방 용량 크기를 고려할 때 히트펌프 6RT급이 적정한 설계기준으로 평가된다.

따라서 연구에서 설계 제시된 6RT급 히트펌프의 성능평가는 다음 연구에서 발표할 것이다.

참고문헌

1. C. K. Park, Y. Komazaki, Y. Suda, “Thermodynamic Efficiencyn of Meter Hydride Heat Pump”, Trans. of the Korean Society of Hydrogen and New Energy Society, Vol. 3, No. 2, 1992, pp. 1-7.
2. J. H. Park, “Research on the Cooling Evaluation of ground water heat pump system for private house”, MS thesis, Kyungpook National University, Deagu, Korea, 2007.
3. H. S. Dong, “Analysis for geothermal heat pump system”, MS thesis, Kumoh National Institute of Technicology, Gyeongbuk, Korea, 2004.
4. J. K. Lee, “Cooling Performance of a Ground Source Heat Pump System”, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 16, N.1, 2007, pp. 441-446.
5. S. W. Woo, “A Performance Prediction of a Vertical-Type Geothermal Heat Exchan -ger by CFD Analysis”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, 2007, pp. 117-125.
6. Y. S. Kim, “Evaluation on the Cooling Performance of Geothermal-energy Using Heat Pump System in Mixed-use Residential Building”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 4, 2006, pp. 9-16.
7. S. K. Lee, J. S. Woo, J. G. Ro, “Fist and Second Law Analysis of Water-to-Water Heat Pump System”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No .4, 2007b, pp. 87-95.
8. Y. G. Jung, S. W. Kim, K. H. Kim, S. D. Choi, T. I. Jang, C. M. Whang, 2009, “SA study on the hydrogen supply for variation in output from a metal hydride canister”, Trans. of the Korean Society of Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 218-223.
9. R. L. Liang, T. Kuehn, “Irreversi -bility Analysis of a Water-to-Water Mechanical Compression Heat Pump”, Energy, Vol. 16, No. 6, 1991, pp. 883-896.