

공기열원 히트펌프를 위한 공기식 지중 열교환기(GAHX) 설계 및 분석 연구

이광섭 · 류남진* · 강은철** · 이의준**†

과학기술연합대학원대학교 재생에너지공학과, *(주)탐솔 기술연구소,
**한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부

Ground Air Heat Exchanger Design and Analysis for Air Source Heat Pump

Kwang-Seob Lee, Nam-Jin Lyu*, Eun-Chul Kang**, and Euy-Joon Lee**†

Department of Renewable Energy Engineering, University of Science and Technology, Daejeon, Korea

*Technical Research Center, Tapsol, Hwaseong, Korea

**Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Korea

Abstract

A ground air heat exchanger (GAHX), also called earth air heat exchanger is a useful technology to be integrated with other renewable energy technologies. In this study, ground-air heat exchanger system for the air source heat pump is introduced. The purpose of this study is to design the volumetric flow rate and the length of GAHX system. A GAHX length model equation has been developed and used for calculation. GAHX thermal efficiency are recommended as 75% and 85% in order to optimize pipe length. 2,750 m³/h, 2,420 m³/h of volumetric flow rate on 88.3m, 111.7m length are suggested for providing 7.5kW thermal capacity. And the number of path is recommended more than two to minimize pressure drop. For future study, advanced model equation study with ground thermal behavior and a more efficient GAHX design will be considered.

Key words: Ground Air Heat Exchanger(공기식 지중 열교환기), Air Source Heat Pump(공기열원 히트펌프), GAHX Thermal Efficiency(GAHX 열효율), Model Equation(모델식)

기호설명

De : 지중 열교환기 파이프 외경(mm)
 Di : 지중 열교환기 파이프 내경(mm)
 Re : 레이놀즈 수

Nu : 누셀트 수
 Pr : 프란틀 수
 Va : 공기의 유량, CMH(m³/h)
 T : 온도(°C)
 Cp : 공기의 비열(J/kg°K)
 R : 열저항(mK/W)
 S : 유효 열교환면적(m²)
 Ks : 총 열전달 계수(W/m² °K)
 Q : 열량(W)
 ΔT : 온도차(°C)
 \dot{m} : 질량유량(kg/s)

†Corresponding author

Tel: +82-42-860-3511

E-mail: ejlee@kier.re.kr

접수일: 2016년 02월 22일

심사일: 1차:2016년 03월 29일, 2차:2016.04.26

채택일: 2016년 05월 06일

그리스 문자

λ	: 열전도도(W/m °K)
ε	: 열교환 효율
ρ	: 공기의 밀도(kg/m ³)
ν	: 공기의 동점성 계수[(m ² /s) × 10 ⁻⁶]
α	: 공기의 대류 열전달 계수(W/m ² °K)

하첨자

a	: 공기
i	: 입구 측
o	: 출구 측
cd	: 열전도
cv	: 열대류

1. 서 론

공기식 지중 열교환기(GAHX; Ground Air Heat Exchanger)는 지중 공기열을 이용하여 건물의 난방 및 환기부하를 저감시켜 주는 요소로서 많이 이용되고 있다. 외기가 지중 열교환기를 통과할 때 외기열을 회수하거나 실내열을 지중으로 방출하면서 난방부하 저감이 이뤄짐과 동시에 실내 환기량도 충족시켜 준다. 또한 건축물의 지반공사 시 지하공간에 설치가 용이하기 때문에 별도의 천공이 필요한 수직형 지중 열교환기보다 초기비용이 적게 발생한다. 이러한 장점을 이용하여 독일에서는 Ecoair Ground Air Heat Exchange System에 공기식 지중 열교환기(GAHX)를 적용하는 기술을 소개하고 있다 [1]. 위 기술은 건물의 환기 난방부하를 저감시키는 기술로써 공기식 지중 열교환기를 통해 생산된 열을 직접 실내로 유입시킴으로써 난방부하 및 환기부하를 저감시킨다. 이 밖에도 공기식 지중 열교환기를 히트펌프의 열원으로 활용하는 기술이 소개되고 있다. Kang[2]의 학술논문에서는 공기식 지중 열교환기를 통과한 외기의 온도상승에 따른 히트펌프의 성능개선 효과를 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 보여주었다.

본 연구에서는 공기식 지중 열교환기를 히트펌프 시스템과 연계할 때 히트펌프 열원으로써 요구되는 공기식 지중 열교환기의 최적 열량을 설계 해석하였다. 본 연구는 공기식 지중 열교환기를 활용하여

저유량의 환기시스템의 용도가 아닌 고유량을 요구하는 히트펌프 열원으로 설계하는 연구이다. 또한 9 kW급의 공기열원 히트펌프 시스템에 필요한 약 7.5 kW의 열원측 열량을 생산하기 위하여 공기식 지중 열교환기의 최적 길이 산정과 적정 유량을 설계 해석하였다.

2. GAHX 설계

공기식 지중 열교환기는 일반적으로 Fig. 1과 같이 지표면에서부터 지중으로 1 m에서 3 m 깊이에 파이프를 수평형으로 매설하여 설치한다. 외기온도보다 지중의 온도는 변화폭이 좁기 때문에 냉난방에 필요한 에너지원으로 이용이 가능하다. 공기식 지중 열교환기는 지중에 매설된 파이프를 통하여 외부공기가 팬 작동에 의해 지중을 통과할 때 외기온도와 지중온도의 온도차를 이용하여 에너지를 생산하는 원리이다.

이러한 공기식 지중 열교환기의 설계에 관한 연구는 지난 20년간 다양하게 진행되어 왔다[3]. Hollmuller [4], Lee[5]는 TRNSYS와 Energy Plus에 공기식 지중 열교환기를 적용시킬 수 있는 모델을 개발해 왔지만, 초기 설계단계에서 공기식 지중 열교환기의 설계를 할 수 있는 모델은 많이 연구되지 않았다 [6,7]. 본 연구에서는 환기부하 절감을 위한 저유량의 공기식 지중 열교환기가 아닌 히트펌프 유량을 대응할 수 있는 고유량의 공기식 지중 열교환기에 관한 연구로 수행하였다. 본 연구에서는 공기열원 히트펌프의 열원으로 적용가능한 공기식 지중 열교환기를 설계하고자 열전달 모델식을 바탕으로 공기열원 히트펌프의 필요 용량에 맞는 공기식 지중 열

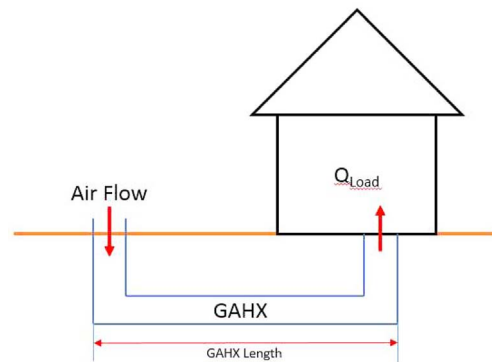


Fig. 1. Ground air heat exchanger diagram.

교환기의 관로(Path)의 설계, 길이 및 유량 산정을 수행하였다.

2.1 GAHX 모델식

공기식 지중 열교환기의 길이를 설계하는 모델식은 Vlad[6]와 Paepel[7]의 계산식을 참조하여 작성하였으며, 수식 (1)부터 (4)는 기본적인 열역학 및 유체역학 공식들을 활용하였다. 열교환기의 길이를 산정하기 위해 필요한 입력데이터들은 파이프의 외경 및 내경, 열전도도, 열효율, 공기의 유량, 밀도 및 동점성 계수 등이 있으며, Table 1에 정리하였다.

Table 1의 입력데이터들을 바탕으로 지중 열교환기 길이 산정에 필요한 값들을 계산할 수 있다. 공기의 유속과 질량유량은 Table 1의 공기의 유량과 파이프의 내경 그리고 공기의 밀도를 통해 계산할 수 있다. 지중 열교환기의 출구온도의 경우 파이프의 열교환 효율을 얼마나 설정하는 지에 따라 산정되며 열교환 효율은 지중 열교환기의 입출구 온도 차에 따라 결정되며, 지중 열교환기의 길이와 유량 설계에 큰 영향을 주어 2.2 절을 통해 최적의 효율 산정을 고려하였다.

아래의 식 (1)은 관내의 유동에서 레이놀즈 수(Re)와 프란틀 수(Pr)를 이용하여 누셀트 수(Nu)를 구하기 위해 이용한 계산식이다.

$$Nu = 0.0214(Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4} \quad (1)$$

Table 1. Input data for GAHX model equation

Property	Symbol	Value	Unit
Pipe diameter(exterior)	De	250	mm
Pipe diameter(interior)	Di	240	mm
Thermal conductivity	λ	0.19	W/m °C
Pipe thermal efficiency	ε	0.75/0.85	-
Volumetric flow rate	V_a	2,750/2,420	CMH
Inlet air temperature	$T_{a,i}$	-10	°C
Air density	ρ	1.205	kg/m ³
Kinematic viscosity	ν	15.11	(m ² /s)×10 ⁻⁶
Prandtl's number	Pr	0.713	-
Specific heat capacity	C_p	1005	J/kg °C
Air thermal conductivity	λ_a	0.0257	W/m °C
Soil temperature	t_s	0	°C

대류 열전달 계수(α)를 구하기 위하여 아래 식 (2)를 활용하였다.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{Di} \quad (2)$$

전도 열저항(R_{cd})과 대류 열저항(R_{cv}) 값을 구하는 식은 각각 식 (3)과 식 (4)에 나타내었다.

$$R_{cd} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{De}{Di} \quad (3)$$

$$R_{cv} = \frac{1}{\pi Di \alpha} \quad (4)$$

앞서 계산한 열저항 값을 이용하여 총 열전달계수(K_s)를 산출하기 위해 식 (5)를 활용하였다[6].

$$K_s = [\pi Di (R_{cd} + R_{cv})]^{-1} \quad (5)$$

식 (6)을 이용하여 유효 열교환 면적(S)을 산정한다[6]. 여기에서 ΔT_m 은 지중온도와 입구온도 대수 평균온도차(LMTD)이다.

$$\dot{Q} = K_s \cdot S \cdot \Delta T_m = C_p \cdot \dot{m} \cdot (T_{a,i} - T_{a,o}) \quad (6)$$

계산식을 이용해 최종적으로 얻을 수 있는 값들을 Table 2에 표시하였다.

계산식을 활용하여 계산된 Table 2의 데이터를 바탕으로 최종적으로 유효 열교환 면적(S)을 산정하

Table 2. Output data for GAHX model equation

Property	Symbol	Unit
Air velocity	u	m/s
Air mass flowrate	\dot{m}	kg/s
Outlet air temperature	$T_{a,o}$	°C
Temperature difference	Δt	°C
Reynolds number	Re	-
nusselt number	Nu	-
Convective heat transfer coefficient	α	W/(m ² °C)
Conductive thermal resistance	R_{cd}	m °C/W
Convective thermal resistance	R_{cv}	m °C/W
Overall heat transfer coefficient	K_s	W/(m ² °C)
Heat gain or loss	\dot{Q}	W
Logarithmic mean temp. between air and soil	ΔT_m	°K
Heat transfer surface	S	m ²

였다. 파이프의 길이를 산정하기 위한 식은 다음과 같다[6].

$$L = \frac{S}{\pi D_i} \quad (7)$$

여기에서, L 은 지중 열교환기의 길이, S 는 유효 열교환 면적, D_i 는 파이프의 내경이다. 수식에 사용된 계산식을 바탕으로 입력된 조건에 따른 출력 값을 자동적으로 계산하도록 공기식 지중 열교환기 (GAHX) 설계 시트를 Table 2와 같이 제작하였다.

2.2 GAHX 열효율 최적화

GAHX의 열효율은 아래의 식 (8) 같이 정의된다[6].

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_s - T_{a,i}} \quad (8)$$

여기에서 ΔT 는 지중 열교환기 입출구의 온도차, T_s 는 지중온도, $T_{a,i}$ 는 지중 열교환기의 입구온도이다. 지중 열교환기의 효율은 지중 열교환기를 통해 나올 수 있는 최고 온도차(지중온도-입구온도) 대비 출력 온도차(출구온도-입구온도)를 의미하며, 이 효율은 높을수록 좋지만 일정 효율이상으로 효율을 높이기 위해서는 지중 열교환기 길이가 기하급수적으로 증가하게 된다. 그리하여 최적의 효율을 찾아내기 위해 모델식 (1)~(8)을 바탕으로 열교환 효율과 길이의 상관관계를 알아보기 위해 유량을 고정시킨 뒤 열효율 달성을 위한 필요길이를 계산하였다.

Fig. 2는 파이프의 길이에 따른 열효율을 나타낸

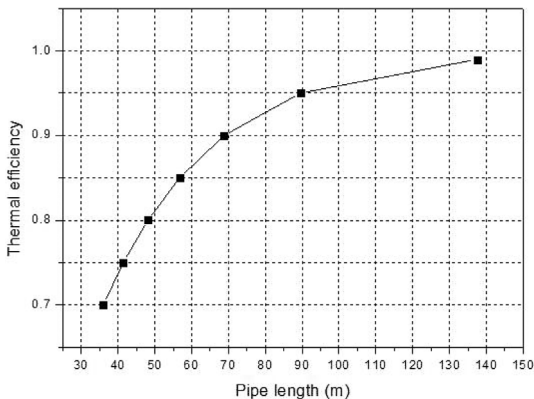


Fig. 2. GAHX thermal efficiency on pipe length.

것으로 열효율 약 85% 부근에서 파이프의 길이가 선형적으로 증가하다가 점차 증가율이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉 상대적으로 파이프의 길이가 길어지면 효율은 증가하지만 열효율 85% 이후부터는 더 높은 온도를 얻기 위해 상대적으로 긴 파이프가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 길이와 유량 산정의 최적화를 위해 열효율 75%에서 85%의 범위를 지중 열교환기의 열교환 효율로 선정하였다.

2.3 압력손실

일반적으로 동일한 단면적을 갖는 덕트 또는 원관에서 유로가 길어지고 유속이 빨라지면 그에 따른 압력손실이 커지게 된다. 따라서 길이 계산을 위해 모델식 (1)~(8)을 이용하지만, 관로의 유량이 커지고 길이가 길어지면 압력손실이 크게 발생하기 때문에 유량과 길이의 최적화를 위해 압력손실의 계산이 필요하다. 압력손실의 계산은 덕트의 마찰손실을 계산하는데 주로 쓰이는 베르누이 방정식을 활용한 압력손실 계산방법을 이용하여, 직경은 일정하며 파이프가 수평인 상태로 가정하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\Delta P = f \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{\gamma \cdot V^2}{2g} \quad (9)$$

여기에서, ΔP 는 압력손실, f 는 마찰계수, l 은 관의 길이, D 는 관의 직경, γ 공기의 비중량, V 는 유체의 속도, g 는 중력가속도이다. 위 식을 이용하여 관의 설계 길이에 따른 마찰손실을 계산하였으며, 팬의 정압성능과 소비동력에 맞게 관로의 설계가 가능하도록 하였다.

3. GAHX 설계 결과

2장에서 개발된 모델식에 적용하기 위한 실험장치의 사양은 Table 3에 표시하였다.

실험장치의 설치 위치는 충남 계룡시 인근으로 겨울철 설계 외기온도 조건을 -10°C , 지중온도는 0°C 로 가정하였다. 설계조건에서 7.5 kW의 열용량을 생산하기 위해 필요한 유량은 다음 계산식에 의해 산정하였다.

$$Q = C_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T \quad (10)$$

Table 3. GAHX system specification for the test

Property	Value	Unit
Total heat requirement	7.5	kW
Piped diameter(outer)	250	mm
Pipe diameter(inter)	240	mm
Pipe thermal conductivity	0.19	W/m, K
Ambient temperature	-10	°C
Ground temperature	0	°C

여기에서, Q 는 열량, C_p 는 공기의 비열, m 은 질량 유량, ΔT 는 출입구의 온도차이다. 따라서 75%와 85%의 열교환 효율에서 7.5 kW의 열을 생산하기 위해 약 2,750 m³/h, 2,420 m³/h의 유량이 산정되었다. 계산된 유량을 바탕으로 관로(Path)의 최적화를 위해 관로의 개수에 따른 유량과 길이, 압력손실을 계산하였다. 또한 계산된 유량을 바탕으로 개발한 모델식에 반영하여 지중 열교환기의 길이를 산정하였다. 그 결과 한 개의 관로로 설계하였을 때, 실험장치에 필요한 지중 열교환기의 길이는 각각 88.3 m, 111.7 m가 필요한 것으로 산정되었다.

위 설계길이를 활용하여 압력손실을 계산하였을 때, 75% 및 85% 열효율의 각 유량과 길이에서 압력손실은 364.8 N/m², 372.6 N/m²로 계산되었다. 이 값은 실험장치에 이용할 환기용 팬의 정압 성능과 비교하였을 때, 한계치에 가까운 값으로 팬의 과부하와 유량 값을 보여주기 힘들 것이라고 판단되었다. 따라서 지중 열교환기의 관로를 1개에서부터 5개로 변화시켜가며 7.5 kW의 열용량을 생산하기 위해 필요한 각 관로의 길이와 압력손실을 계산하였다.

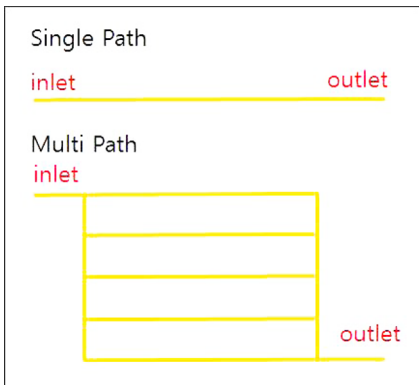


Fig. 3. Design schematic of GAHX path.

Table 4. Result of path design at 75% efficiency

Number of Path	1	2	3	4	5
Heat requirement of one path (kW)	7.5	3.8	2.5	1.9	1.5
Length of one path (m)	88.3	59.4	48.7	43.1	39.4
Total pipe length (m)	88.3	118.7	146.1	172.4	197.0
Flow rate of one path (m ³ /h)	2750	1375	915	690	550
Total pressure drop (N/m ²)	372.6	125.2	68.3	45.8	33.3

Table 5. Result of path design at 85% efficiency

Number of Path	1	2	3	4	5
Heat requirement of one path (kW)	7.5	3.8	2.5	1.9	1.5
Length of one path (m)	111.7	76.1	63.0	55.9	51.4
Total pipe length (m)	111.7	152.3	189.0	223.6	257.0
Flow rate of one path (m ³ /h)	2420	1210	805	605	485
Total pressure drop (N/m ²)	364.8	124.4	68.3	45.7	33.7

Fig. 3은 병렬로 연결된 다중관로에 대한 시각적인 설명을 나타낸 그림이다. 각 관로를 1개에서부터 5개까지 분할하여 설계하였을 때 75%와 85%의 열교환 효율에서 7.5 kW의 열을 생산하기 위한 관로의 길이, 총 관로의 길이, 관로별 유량 및 총 압력손실을 계산하여 아래의 Table 4로 나타내었다.

Table 4에서는 열교환 효율이 75%일 때를 기준으로 관로의 개수를 변화하여 계산한 결과이다. 같은 과정으로 Table 5에서는 열교환 효율이 85%일 때의 결과값을 표시하였다.

위에 나타낸 Tables 4, 5와 같이 관로가 1개 일 때 지중 열교환기의 설계길이는 각각 88.3 m, 111.7 m로 계산되었고, 유량은 2,750 m³/h, 2,420 m³/h가 필요한 것으로 나타났다. 압력손실은 각각 372.6 N/m², 364.8 N/m²으로 일반적인 다익형 송풍기의 정압 성능을 고려하였을 때 1개의 관로로 설계하는 경우 송풍기의 성능에 영향을 주는 높은 수치이다. 따라서 2개 이상의 관로로 설계하여야 하며, 관로의 숫자가 많아질수록 각 관로의 요구 유량과 압력손실은 감소하지만 총 파이프의 길이가 증가하여 초기비용이 많이 소요될 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기열원 히트펌프를 위한 공기식 지중 열교환기의 유량 및 길이 산정에 관한 연구가 수행되었고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 선행연구의 계산식을 바탕으로 공기식 지중 열교환기 길이 산정 설계 모델을 개발하였고, 이를 이용하여 공기식 지중 열교환기의 최적의 열교환 효율을 산정하였다.

(2) 모델식을 바탕으로 75% 와 85%의 열교환 효율에서 7.5 kW의 열용량을 생산하기 위해 약 2,750 m³/h, 2,420 m³/h의 유량이 산정하였고, 모델식을 기반으로 필요한 길이는 각각 88.3 m, 111.7 m로 계산되었다.

(3) 설계조건을 만족하기 위한 지중 열교환기의 관로의 수와 총 필요 길이를 산정하였고, 총 압력손실을 계산하였다. 그 결과 실험장치에 이용할 다익형 송풍기의 정압 성능을 고려하여 2개의 관로 이상으로 설계하여야 한다.

향후 연구에서는 실험장치 설계조건의 정확한 길이산정을 위해 실측 외기온도와 지중온도의 측정을 바탕으로 모델식을 이용한 계산이 필요하며, 이론적인 계산과 실제의 적용 오차를 줄이기 위한 파이프 주변 지중의 열거동을 반영한 진보적인 모델식의 연구와 실증시설과의 실험 데이터 비교 및 전산해석과의 검증 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 #16CTAP-C096424-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Rehau Ecoair Ground-Air Heat Exchange System, www.rehau.com.
2. Kang, E. C., Lee, E. J., and Min, K. C., 2014, Two way set temperature control impact study on ground coupled heat pump system energy saving, Korea Society of Geothermal Energy Engineerings, Vol. 10, pp. 7-12.
3. Muehleisen, R. T., 2012, Simple design tools for earth-air heat exchangers, In Fifth National Conference of IBPSA-USA, SimBuild, pp. 723.
4. Hollmuller, P. and Lachal, B. M., TRNSYS compatible moist air hypocaust model, Final report, Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie, Genève.
5. Lee, K. H. and Strand, R. K., 2008, The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 486-494.
6. Vlad, G. E. C., Necula, H., and Badea, A., 2011, Thermoeconomic design of an earth to air heat exchanger used to preheat ventilation air in low energy buildings, International Conference on Energy, Environment, Entrepreneurship, Innovation, Lanzarote, Spania, pp. 11-16.
7. De Paepe, M. and Janssens, A., 2003, Thermal-hydraulic design of earth-air heat exchangers, Energy and Buildings, Vol. 35, pp. 389-397.