KIEAE Journal, Vol. 14, No. 4, Aug. 2014, pp.119-125

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

68

배관 재질 및 길이에 따른 대규모 시설원예단지용 미활용 에너지 시스템의 성능 평가

Effects of Pipe Network Materials and Distance on Unused Energy Source System Performance for Large-scale Horticulture Facilities

이재호* · 윤여범* · 현인탁* · 이광호**

Lee, Jae-Ho* · Yoon, Yeo-Beom* · Hyun, In-Tak* · Lee, Kwang Ho**

** Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, South Korea.*

*** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University, South Korea(kwhlee@hanbat.ac.kr)*

ABSTRACT

This study investigated the effects of pipe network materials and distance on system performance utilizing unused energy sources in large-scale horticulture facility. For this, the modeling was performed with a 100 m long and 100 m wide rectangular shaped glass house having an area of 1ha (10,000m^2) using EnergyPlus software. The heat sources considered were air source, geothermal heat, power plant waste heat, sea water heat, and river water. The temperature variation of the fluid with regard to pipe material and distance from the heat source and the resultant heat pump electricity consumptions were calculated. It turned out that the fluid temperature reaching the heat pump increased as the distance from the heat source increased in case of sea water and river water, which have higher temperatures than the surrounding soil, improving the heat pump efficiency. It was vice versa in case of the power plant waste heat. In addition, pipe material of PVC showed the smallest effect on the system performance variation due to the lowest thermal conductivity, compared to PB and HDPE.

ⓒ 2014 KIEAE Journal

KEYWORD

미활용 에너지원,
파이프 변수,
열수송,
대규모 시설원예,
에너지플러스

Unused energy sources,
Piping parameters,
Pipe network,
Large-scale horticulture facility,
EnergyPlus

ACCEPTANCE INFO

Received July 15, 2014
Final revision received August 14, 2014
Accepted August 18, 2014

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

전 세계적으로 인구증가와 산업이 발전함에 따라 CO_2 등의 온실가스 배출량이 증가하고 있으며, 지구의 평균온도가 급속도로 증가하고 있다. 또한 화석연료의 무분별한 사용으로 화석에너지가 고갈되고, 온실가스 증가에 따른 지구온난화 문제가 야기되고 있다[1]. 한편, 우리나라의 시설원예 면적은 2010년 52,000ha에 달하고 있으며, 이중 약 30%에 해당하는 15,600ha는 동절기에 가온하여 원예작물을 재배하고 있다. 또한 최근 국가적으로 100ha 규모의 대규모 단지 조성의 계획을 마련하고 있다. 대규모 시설원예의 가장 큰 문제점은 겨울철 난방연료를 석유에 의존하는 것이다. 매년 상승하는 국제원유 가격으로 인해 면세유 가격 또한 증가해 시설 내의 재배작물의 경쟁력이 떨어지고 있다[2]. 통계상 우리나라의 시설농업 난방비용은 2008년 기준 연간 1조 4,426억원에 달하고 있으며[1], 시설원예에서 난방비용이 차지하는 비율은 재배하는 작물에 따라 다르지만 전체 경영비용에 약 19~58%로 상당한 부분을 차지하고 있다. 현재 우리나라의 난방 에너지원의 약 92%로 해외의존도가 높은 화석에너지임을 감안한다면 보다 안정적이고 친환경적인 대체 에너지 적용이 시급하다고 할 수 있다[3]. 따라서 이에 따른 대규모 시설원예의 겨울철 난방연료에 대한 연구와 정책이 절실히 필요하다. 시설원예 난방연료와 관련하여, Kim[4]등은 지하수를 열원으로 하는 지열히트펌프를 시설원예에 적용하였다. 경유를 사용하였을 때 LCC비용이 수직밀폐형 지열냉난방시스템은 62%, SCW형 지열냉난방시스템은 72%의 절감효과와 각각 71%, 82%의 CO_2 절감을 나타내었다. Yoo[2]등은 화력발전소 폐열을 열원으로 한 히트펌프를 시설원예에 적용하여 열교환기의 길이에 따른 난방성능을 분석하였다. 그 결과 PE 파이프의 길이를 1.0RT당 75m로 설계하였을 때가 가장 바람직한 것으로 나타났다. 이때의 난방성능계수(COPh)는 3.8로 경유난방 대비 약 87%의 난방에너지 비용 절감 효과와 62%의 CO_2를 절감효과를 나타냈다. Park[5]은 온도차 에너지의 부존량과 이용가능성에 대한 연구를 진행하였으며, 하천수에너지와 해수에너지의 부존량을 각각 192,100Tcal/year과 27,160Tcal/year으로 추산하였고, 35%이상의 에너지 절약효과 및 26%이상의 오염물질배출량 감소효과를 나타낼 것으로 예측하였다.

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2014.14.4.119

하지만, 건물에 접목시키지 않고 에너지 자체만을 분석한 연구이다. 또한 Moon[6]은 강변 여과수를 히트펌프의 열원으로 시설원예시설에 적용하여 일반 경유 보일러 대비 80% 정도의 난방비용 절감을 나타냈지만, 하천수 열원에 국한된 연구였다. 마지막으로 Hyun[7]은 해수, 하천수, 발전소 온배수, 지열을 열원으로 하는 히트펌프를 시설원예에 적용하여 각 열원에 따른 에너지 소비량을 도출해내었지만 실제 열원과 히트펌프 사이의 배관 열손실에 대한 고려가 되어있지 않았다. 이처럼 열원에 따른 히트펌프의 냉·난방 성능과 에너지 소비에 관한 연구는 진행되었지만 대부분의 연구가 하나의 열원에 대해서만 연구를 진행하였다. 또한 열원 발생지와 시설원예의 거리에 따른 열손실에 대한 고려를 하지 않은 연구들이 대부분이며, 그에 따른 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선행연구로 검증된 대규모시설원예의 모델링에 대류열전달식을 적용하여 거리와 파이프 재질에 변화를 주어 히트펌프 사용지와 열원발생지의 거리변화를 통해 손실되는 열원의 온도를 확인하고, 그에 따라 변동되는 에너지소비 패턴을 확인하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 시설원예에 신재생에너지를 도입하여 난방 에너지 절감을 목표로 하는 논문으로 연구방법은 Fig. 1과 같다. 국내에 가로 100m, 세로 100m 규모의 대규모 시설원예를 EnergyPlus로 모델링 하였으며, 기상데이터는 EnergyPlus에서 제공하는 인천 기상데이터를 사용하였다. 시설원예에 적용한 열원으로는 공기열, 해수열, 하천수열, 발전소 온배수, 지열을 사용하였다. 또한 연중온도가 가장 낮은 날을 대표일로 정하였으며, 분석 변수로는 Pipe의 거리와 재질로 정하였다. 변수의 변화에 따라 변동되는 온도패턴을 확인하고 본 연구에서 적용한 열원이 히트펌프에 적용되었을 때 전기소비량의 변화를 분석하였다. 또한 현재 대규모 시설원예에서 일반적으로 사용하는 가스보일러 대비 에너지 절감량을 파악하고, 열원발생지로부터 거리증가에 따라 변동되는 온도패턴을 확인하였다.

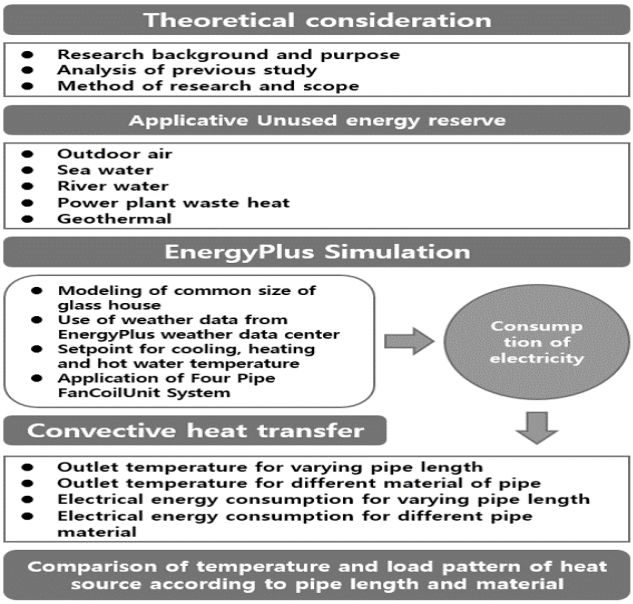

Figure 1. Study flow chart

2. 시뮬레이션 개요 및 이론적 배경

2.1. 시뮬레이션 선정

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 프로그램은 냉난방 부하 및 열환경에 대해 수학적으로 검증이 가능한 Energyplus v6.0을 선정하였다[8]. EnergyPlus는 건물의 부하를 계산하는데 있어 미국의 냉동공조학회(ASHRAE)에서 권장하는 열 밸런스(Heat Balance)방법을 사용하는 데, 이 방법은 공간부하를 계산하기 위한 업계의 표준 방법이다[9]. EnergyPlus는 Loads, Systems 그리고 Plants 부분을 통합할 수 있다. 프로그램의 개발 및 검증에 대한 자세한 내용은 선행연구에서 여러 차례 검증하였다[10].

2.2. 해석조건 선정

본 논문에서는 모델링한 100ha 시설원예 중에서 대규모 시설원예의 기준이 되는 1ha(10,000m^2) 면적을 가지는 사각형으로 길이 100m, 폭 100m 규격의 시설원예 분석에 초점을 맞추었다. EnergyPlus 시뮬레이션 모델은 Fig. 2와 같으며 선행연구[7]에 의해 검증되었다. 각 열원의 초기 온도 설정 기준에 대한 값 역시 선행연구[7]에 의해 발췌하였다. 열원 발생지에서 히트펌프까지 운송하는데 쓰이는 배관의 경우 가장 일반적으로 많이 쓰이는 재질 3가지로 선정하였고, 규격은 선행연구[1]에서 이미 검증한 모델의 규격에 비례한 수치의 배관을 적용하였다. 또한 선행연구를 바탕으로 토양의 열전도율[11]과 파이프 재질의 열전도율[12]을 적용하였으며 그 값은 Table. 1과 같다. 또한 입력한 Iron Frame의 물성치는 Table 2와 같으며, 외부 창호의 재질은 유리온실에서 일반적으로 사용하는 맑은 유리 5mm를 사용하였다. 냉난방 설정온도는 시설원예의 재배작물인 토마토의 생육조건에 맞추어 낮 시간은 23℃, 밤 시간은 11℃로 설정하였다[13]. 가스보일러 및 히트펌프 모델링에 관한 자세한 사항은 선행연구[7]에 기술 되어 있어 공간제약 상 본 논문에는 서술하지 않았다. 히트펌프 온수 설정온도는 연중 40℃로 일정하다고 가정하였고 이때 FCU 취출온도는 16.05～24.34℃로 나타났다. 유리온실에 사용한 침기량은 1.84 ACH를 사용하였다. 이는 Kim[14]등에서 Blower Door장치를 사용하여 압력차 측정법으로 ASTM E 779[15]에 의해 유리온실의 침기량을 실제 측정한 값이다.

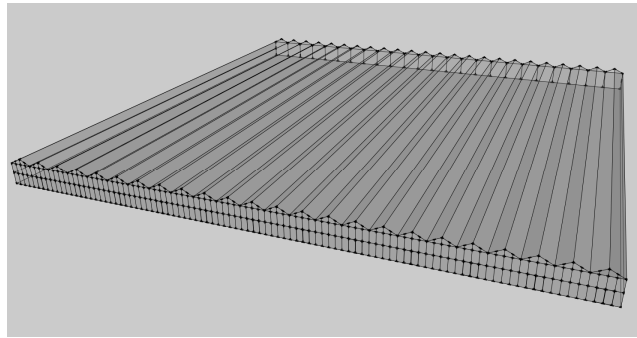

Figure 2. Simulated model

Table 1. Analysis Conditions

Fixed Value	
Program	EnergyPlus v.6.0
Modeling Size	100(m) × 100(m)
Model System	4Pipe Fan Coil System
Pipe Diameter	내경 40.8(mm) Thickness 4.6(mm)
Soil Thermal Conductivity(k)	2.50 (W/m·K)
Cooling/Heating Setpoint(℃)	Day : 23℃ / Night : 11℃
Discharge Air Temperature of the FCU(℃)	16.0~24.3℃
Hot Water Temperature Supplied to the FCU(℃)	Year-round 40℃
Date	2013, December, 15
Variable Value	
Distance	0km, 1km, 2km, 3km, 4km, 5km
Pipe Material(k) (Thermal Conductivity)	HDPE = 0.335 PB = 0.193 PVC = 0.12

Table 2. The iron frame physical properties applied to the simulation

Width	5.6cm
Thermal conductivity	58W/m^3
Density	7,850kg/m^3
Specific heat	4,65j/kgK

3. 배관 열손실 계산식

본 연구에서 배관 열손실 계산식은 선행연구[16)]에서 발췌하였다. 본 연구의 배관 열손실 계산식 적용을 위한 여러 가지 가정들이 있는데, 선행연구[16)]에 자세히 기술 되어 있어 공간제약 상 본 논문에는 서술하지 않았다. 따라서 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 얻은 결과값을 배관 열손실 계산식에 대입하여 분석하였다. 지중관 및 주변 토양간의 열전달을 계산하기 위해, 열전달 계수는 다음 식 (1), (2), (3)을 사용하여 결정 된다[16)].

$$R_c = \frac{1}{2\pi r_1 L h_c} \quad \text{식(1)}$$

$$R_P = \frac{1}{2\pi L k_p} ln \frac{r_1 + r_2}{r_1} \quad \text{식(2)}$$

$$R_s = \frac{1}{2\pi L k_s} ln \frac{r_1 + r_2 + r_3}{r_1 + r_2} \quad \text{식(3)}$$

여기서,

R_c : 파이프에서 유체 및 파이프 내면 사이에서 일어나는 대류 열전달에 대한 열 저항(℃/W)

R_P : 파이프 재질을 통해 일어나는 전도열전달에 대한 열 저항(℃/W)

R_s : 파이프 외부와 토양에서 일어나는 전도 열전달에 대한 열 저항(℃/W)

r_1 : 파이프 내부 반지름(mm)

r_2 : 파이프 두께(mm)

r_3 : 파이프 외부표면과 토양사이의 거리(mm)

L : 파이프 길이(m)

h_c : 내관 표면에서의 대류 열전달 계수

k_s : 흙의 열전도율(W/m℃)

k_p : 파이프의 열전도율(W/m℃)

내관 표면에서의 대류 열전달계수(h_c)와 레이놀즈 수 (Re), 너셀 수 (Nu)는 다음 식(4), (5), (6)에 의해 계산 된다.

$$h_c = \frac{Nu k_w}{2r_1} \quad \text{식(4)}$$

$$Nu = \frac{(f_w/2)(Re - 1000)\Pr}{1 + 12.7(f_w/2)^{1/2}(\Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{식(5)}$$

$$f_w = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad \text{식(6)}$$

여기서,

k_w : 물의 열전도율(W/m℃)

Re : 레이놀즈 수

Nu : 너셀 수

$\Pr$: 프란틀 수

열 저항 값으로 사용되는 R_c, R_p,R_s는 다음과 같이 지중관의 전체 열전달계수로 산출 될 수 있으며 식은 다음과 같다[16)].

$$U_t = \frac{1}{R_t} \quad \text{식(7)}$$

$$R_t = R_c + R_p + R_s \quad \text{식(8)}$$

여기서,

U_t : 지중관의 전체적인 열전달 계수(W/m℃)

R_t : 파이프의 물과 토양 사이에서 일어나는 전체 열 저항(℃/W)

유체가 파이프를 따라 흐를 때, 관내의 유체와 토양 사이의 열전달은 열손실의 양과 동일하며 식은 다음과 같다[17)].

$$U_t dy[T_w(y) - T_{soil}] = -m_w C_w [dT_w(y)] \quad \text{식(9)}$$

여기서,

m_w : 유량(kg/s)

T_{soil} : 지중 온도(℃)

T_w : 유체 온도(℃)

C_w : 물의 비열(J/kg℃)

지중관 출구 유체온도는 최종적으로 위의 열전달 방정식에 의해 계산된다. 지중배관에 들어가는 유입유체온도가 실제 열원 온도와 동일하다고 가정하였다[16)].(여기서 y = 0)

식(9)을 풀면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$U_t y = -m_w C_w \ln|T_w(y) - T_{soil}| + C \quad \text{식(10)}$$

경계 조건으로부터:

$$T_w(0) = T_{w,in} \quad \text{식(11)}$$

여기서,

$T_{w,in}$: 배관 입구의 실제 열원 온도(℃)

상수 C는 식(10)으로 계산된다.

$$C = m_w C_w \ln|T_{w,in} - T_{soil}| \quad \text{식(12)}$$

관 내부의 유체 온도 $T_a(y)$에 대해 위의 식으로 유체와 파이프 그리고 주변 토양에 관한 대류열전달이 계산되며, 최종적으로 히트펌프에 도달하는 열원유체 출구온도는 다음 식으로 계산 된다[16].

In case $T_{w,in} > T_{soil}$

$$T_w(L) = T_{soil} + e^A \quad \text{식(13)}$$

In case $T_{w,in} = T_{soil}$

$$T_w(L) = T_{soil} \quad \text{식(14)}$$

In case $T_{w,in} < T_{soil}$

$$T_w(L) = T_{soil} - e^A \quad \text{식(15)}$$

$$A = \frac{m_w C_w \ln|T_{w,in} - T_{soil}| - U_t L}{m_w C_w} \quad \text{식(16)}$$

4. Simulation Analysis

4.1. 변수에 따른 평균 출구 온도 분석

본 시뮬레이션 모델링에 요구되는 부하는 1,100kW이다. 따라서 30RT 히트펌프를 10대를 사용한다고 가정하였다. 유량, 파이프 관경, 배관두께 등은 30RT 용량의 히트펌프에서 사용되는 값을 사용하였는데, 국내 S사의 카탈로그 데이터를 참조하여 유량 5.67kg/s, 파이프 관경 50.1mm, 배관 두께 3.1mm로 설정하였다. Table 3은 앞서 언급한 열전달식을 통해 산출된 열원별로 거리, 재질에 따른 시간당 히트펌프 도달온도를 나타낸 것이다. 거리를 고려하지 않은 기준 모델의 출구온도도 같이 표기하였다. 공기 열원은 도달 거리가 항상 0km이기 때문에 Case에 상관없이 -6.35℃로 일정함을 알 수 있다. 시뮬레이션은 EnergyPlus에서 제공하는 2013년 기상데이터의 가장 추운날인 12월 15일을 대표일로 분석을 진행하였다.

전체적으로 발전소 폐열과 지열, 외기를 제외한 해수, 하천수 온도가 열원발생지로부터 5km지점까지 거리에 따라 증가하는 온도패턴을 보인다. 그 이유는 거리가 늘어남에 따라 지중온도보다 낮은 해수, 하천수 열원들이 히트펌프 입구 측으로 도달하면서 지열과 열교환을 통해 열을 획득하기 때문이다. 반면에 지열보다 높은 온도를 가진 발전소 온배수는 거리에 따라서 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이 이유는 앞서 언급했듯이 거리가 늘어남에 따라 지열과의 열교환을 하게 되는 데, 발전소 온배수가 지열보다 더 높은 온도이므로 열손실로 인해 온도가 감소한다.

재질별로 봤을 때 열전도율이 높은 HDPE의 해수, 하천수의 온도차가 열원발생지로부터 5km지점까지 각각 7.68℃, 1.29℃로 나타났고, PB와 PVC의 해수, 하천수의 온도차가 열원발생지로부터 5km지점까지 각각 6.15℃, 1.04℃와 4.75℃, 0.80℃의 온도 증가율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 열전도율이 높은 HDPE가 온도차에 따른 열 획득이 많아 더 큰 온도차를 보이는 것이다. 반면에 발전소 온배수의 경우 HDPE는 5km기준 14.53℃로, PB 15.62℃, PVC 16.62℃보다 더 많은 감소를 보이는 것으로 나타났으며, 열전도율이 증가함에 따라 열손실의 양이 많아지는 것을 알 수 있다. 따라서 열전도율이 높은 HDPE가 온도차에 따른 열 획득과 손실이 가장 많은 것으로 나타났으며, 반대로 열전도율이 가장 낮은 PVC가 가장 적은 열 획득과 열 손실을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3. Average outlet temperature of each heat source according to material and Distance (℃)

Material	Distance	Air source	Sea Water	River Water	Power Plant waste heat	Geothermal
Base	0m	-6.35	0.56	10.00	20.00	11.91
HDPE	1km	-6.35	2.86	10.39	18.37	11.91
	2km	-6.35	4.69	10.69	17.06	11.91
	3km	-6.35	6.15	10.94	16.02	11.91
	4km	-6.35	7.31	11.14	15.17	11.91
	5km	-6.35	8.24	11.29	14.53	11.91
PB	1km	-6.35	2.20	10.28	18.83	11.91
	2km	-6.35	3.61	10.51	17.83	11.91
	3km	-6.35	4.81	10.71	16.97	11.91
	4km	-6.35	5.84	10.89	16.24	11.91
	5km	-6.35	6.71	11.04	15.62	11.91
PVC	1km	-6.35	1.73	10.20	19.17	11.91
	2km	-6.35	2.77	10.37	18.42	11.91
	3km	-6.35	3.71	10.53	17.76	11.91
	4km	-6.35	4.55	10.67	17.16	11.91
	5km	-6.35	5.31	10.80	16.62	11.91

4.2. 변수에 따른 열원별 COP

Fig. 3, 4, 5는 거리에 따라 발생하는 대표일 하루 평균 COP를 나타낸다. 보일러 효율의 경우 약 80%로 거의 일정한 효율을 보였으며, 해수, 하천수, 발전수 온배수, 지열 각각의 COP를 보면 열원발생지에는 평균 3.1, 3.6 4.3, 5.3, 4.5이지만 거리가 늘어난 5km기준 COP는 평균 3.1, 4.0, 4.4, 4.8, 4.5로 나타났다. 외기와 지열은 히트펌프 사용지에서 가까운 곳에 있다고 가정하였기 때문에 거리에 상관없이 일정하였으며, 해수와 하천수는 증가하는 패턴으로 나타났다. 반면에 발전소 온배수는 거리가 늘어남에 따라 COP가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 앞선 분석에서 나타났던 거리에 따라 달라지는 열원별 온도패턴과 동일한 형태를 보인다. 해수 및 하천수열의 경우 열원발생지로부터 거리가 증가할수록 파이프를 통해 두 열원보다 온도가 높은 지열을 흡수하여 최초의 온도보다 다소 온도가 증가한 상태로 유입되게 된다. 결국 히트펌프에서 소모되는 압축기 동력이 감소하여 성능계수인 COP는 증가한 것으로 나타났다. 반면, 발전소 폐열의 경우 기존의 지열온도보다 온도분포가 높기 때문에 해수, 하천수와는 반대로 거리가 늘어남에 따라 COP가 감소하는 것이다. 따라서 앞으로 분석 한 전기 사용량의 변화에도 그 영향을 미칠 것으로 사료된다.

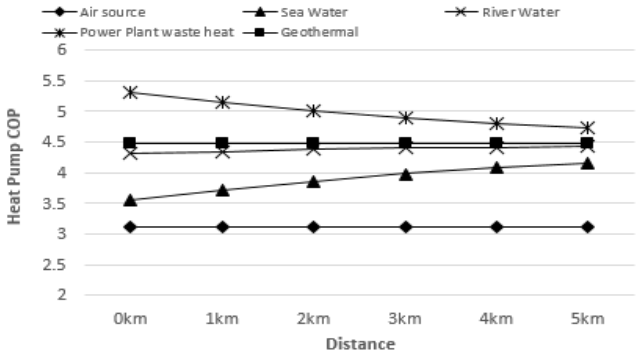

Figure 3. Average COP on the representative day for each heat source according to distance (HDPE)

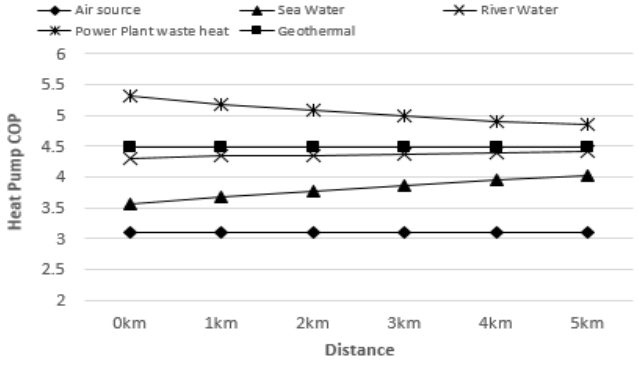

Figure 4. Average COP on the representative day for each heat source according to distance (PB)

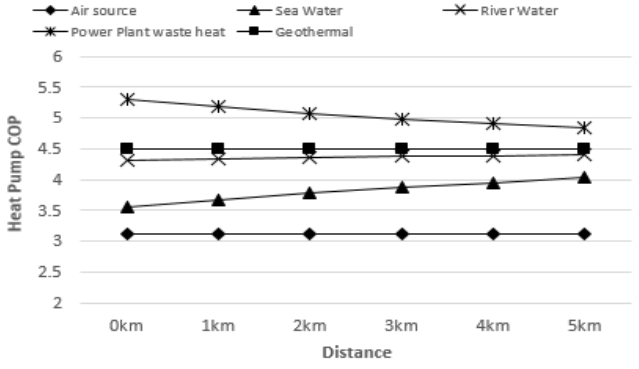

Figure 5. Average COP on the representative day for each heat source according to distance (PVC)

4.3. 변수에 따른 열원별 단위면적당 일평균 전기사용량

Fig. 6, 7, 8은 거리에 따라 발생하는 대표일 하루 누적 전기사용량을 나타낸 그림이며 Table 4, 5, 6은 거리에 따라 발생하는 대표일 하루 누적 전기사용량을 재질별로 나타낸 것이다. 지열은 일정하였으며, 해수, 하천수는 거리가 0~5km로 늘어남에 따라 전기소비량이 0km 대비 각각 평균 11.86%, 2.15% 감소한다. 이 이유는 거리가 늘어남에 따라 지중온도보다 낮은 외기, 해수, 하천수 열원들이 시설원예의 히트펌프 입구측으로 이동하면서 지열과 열교환을 통해 열을 획득하기 때문이다. 반면에 지열보다 높은 온도를 나타내는 발전소 온배수는 거리가 늘어남에 따라 전기소비량이 0km 대비 약 9.63% 증가한다.

온도패턴을 보면 열교환의 대상인 지열을 기준으로 해수, 하천수는 증가하고 발전소 온배수는 감소하여 열원들이 지열의 온도에 접근하는 것을 알 수 있다. 또한 일반 가스보일러와 미활용에너지를 비교하면, 열원발생지로부터 5km지점까지 재질에 따라 약간의 차이는 있지만 전기사용량의 약 65~75%가 절감되는 것으로 나타난다. 따라서 가스보일러를 사용하여 시설원예의 난방을 하는 것보다 미활용에너지를 적용한 히트펌프가 에너지 절감효과를 가지는 것을 알 수 있었으며, 그 중 발전소 온배수가 높은 열원온도와 그로 인한 COP 상승으로 인해 가장 많은 에너지 절감효과를 가져오는 것으로 확인된다.

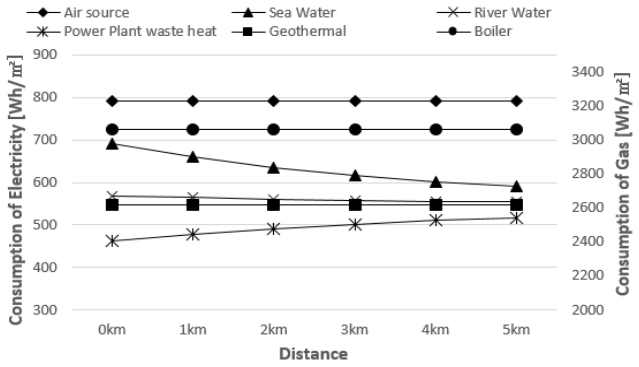

Figure 6. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe distance (HDPE)

Table 4. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe material (HDPE)

Wh/m²		Air Source	Sea Water	River Water	Power Plant waste heat	Geothermal	Boiler
HDPE	0km	790.8	691.0	569.2	462.0	546.9	3063.4
	1km	790.8	659.7	564.6	478.0	546.9	3063.4
	2km	790.8	635.5	561.0	491.1	546.9	3063.4
	3km	790.8	616.7	558.1	501.9	546.9	3063.4
	4km	790.8	601.9	555.8	510.7	546.9	3063.4
	5km	790.8	590.4	554.1	517.8	546.9	3063.4

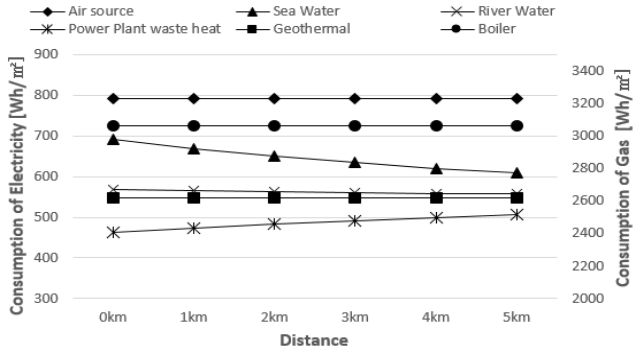

Figure 7. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe distance (PB)

Table 5. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe material (PB)

Wh/·m²		Air Source	Sea Water	River Water	Power Plant waste heat	Geothermal	Boiler
PB	0km	790.8	691.4	569.2	462.0	546.9	3063.4
	1km	790.8	668.6	565.9	473.4	546.9	3063.4
	2km	790.8	649.7	563.1	483.3	546.9	3063.4
	3km	790.8	633.9	560.7	492.0	546.9	3063.4
	4km	790.8	620.6	558.7	499.6	546.9	3063.4
	5km	790.8	609.5	557.0	506.2	546.9	3063.4

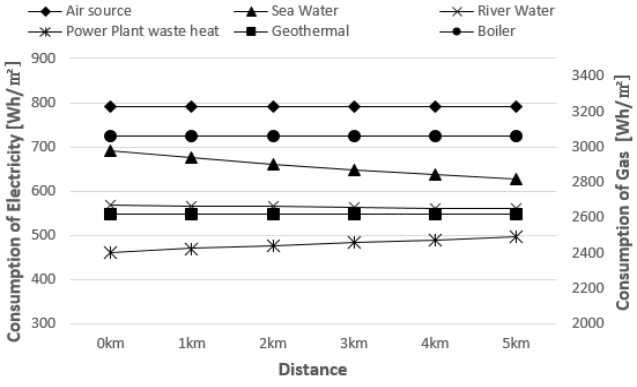

Figure 8. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe distance (PVC)

Table 6. Accumulated electricity and gas consumption on the representative day for each heat source according to the pipe material (PVC)

Wh/m²		Air Source	Sea Water	River Water	Power Plant waste heat	Geothermal	Boiler
PVC	0km	790.8	691.0	569.2	462.0	546.9	3063.4
	1km	790.8	675.0	566.9	470.0	546.9	3063.4
	2km	790.8	660.9	564.8	477.4	546.9	3063.4
	3km	790.8	648.4	562.9	484.1	546.9	3063.4
	4km	790.8	637.3	561.3	490.2	546.9	3063.4
	5km	790.8	627.4	559.8	495.7	546.9	3063.4

4.4. 변수에 따른 발전소 온배수 출구온도, 전기사용량 분석

앞의 분석은 각 열원별 0km～5km까지 각 1km마다 거리와 재질에 따라서 변화하는 온도패턴과 전기사용량의 패턴을 나타내었다. 패턴 분석 결과 일반적인 외기, 해수, 하천수보다 지열을 이용하는 것이 에너지 효율적이라고 판단된다. 하지만 지열보다 높은 온도패턴을 가지고 있는 발전소 온배수는 열원발생지로부터 거리가 늘어남에 따라 온도가 감소하고, 전기 소비량은 증가하는 패턴을 보이는데 열원발생지로부터 거리가 늘어남에 따라 지열과 발전소온배수의 온도패턴을 조금 더 알기 위해 거리의 범위를 늘려 추가적으로 분석하였다.

Fig. 9과 Table 7은 거리에 따른 화력발전소 온배수 배출온도분포와 전기사용량을 나타낸다. 재질은 앞의 연구와 동일한 재질을 사용하여 분석하였다. 지열보다 높은 온도패턴을 가지고 있는 발전소 온배수는 재질에 따른 차이가 있지만, 거리가 늘어남에 따라 지열에 가까운 전기소비패턴을 보인다. 지열과 발전소 온배수의 전기사용량을 비교해봤을 때, 15km지점을 기준으로 재질에 따라 전기소비량이 약 3.3～17.9W/m²차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 LCC비용 회수기간을 장기간으로 볼 경우에는 발전소 온배수를 사용하는 것이 더 효과적이지만, 그 차이가 지열을 이용한 히트펌프의 전기사용량과 미미하여 차이가 조금 더 발생하는 10km까지는 발전소 온배수를 이용하는 것이 적합하다고 판단된다. 그러나 그 이상의 거리가 늘어날 경우 발전소 온배수를 사용하는 것보다는 지열을 사용하는 것이 설치비 등으로 인해 발전소온배수보다 유리할 것으로 사료된다.

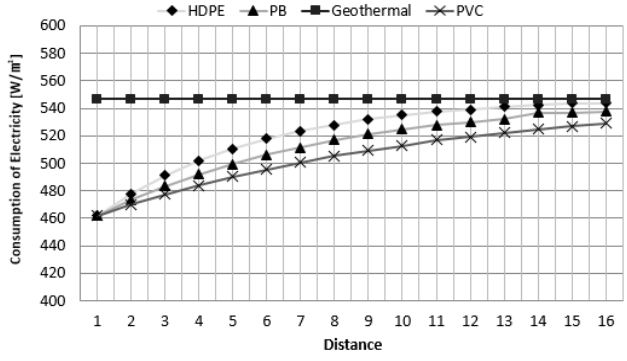

Figure 9. Daily average electricity and gas consumption per unit area according to the distance and material

5. 결 론

본 연구는 대규모 시설원예의 난방에너지 절감을 목표로 하며, 대규모 시설원예에 적용가능한각각의 열원을 외기와 해수열, 하천수열, 발전소 온배수, 지열로 설정하고 시뮬레이션과 배관열손실 계산식을 통해 거리와 재질에 따라 배출 온도의 변화와 시설원예에서 사용되는 전기소비량의 변화에 대해서 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 거리에 따른 열원별 배출온도 분포로는 열원발생지점으로

Table. 7 Average outlet temperature of geothermal and power plant waste heat source according to distance in the pipe (℃)

		1km	2km	3km	4km	5km	6km	7km	8km	9km	10km	11km	12km	13km	14km	15km
Geothermal		11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
Power Plant waste heat	HDPE	18.4	17.1	16.0	15.2	14.5	14.0	13.6	13.2	13.0	12.7	12.6	12.4	12.3	12.2	12.2
	PB	18.8	17.8	17.0	16.2	15.6	15.1	14.6	14.2	13.9	13.6	13.4	13.2	12.8	12.8	12.7
	PVC	19.2	18.4	17.8	17.2	16.6	16.1	15.7	15.3	15.0	14.6	14.4	14.1	13.9	13.7	13.5

부터 5km기준으로 해수, 하천수 각각 재질에 따른 평균온도가 약 6.82℃, 11.04℃로 나타났으며, 발전소 온배수의 경우 평균 약 15.59℃로 나타났다.

(2) 지열을 제외한 모든 열원이 거리에 따라 온도 변화를 보였으며 지열원보다 낮은 온도분포를 가진 해수, 하천수의 경우 0km 대비 약 6.19℃, 1.04℃의 온도증가를 보였다. 반대로 지열원보다 높은 온도분포를 가진 발전소 온배수의 경우 약 4.41℃의 온도감소를 보였다.

(3) 외기, 해수, 하천수, 발전수 온배수, 지열 각각의COP를 보면 열원발생지에는 평균 3.11, 3.6 4.3, 5.3, 4.5이고, 거리가 늘어난 5km기준 COP는 평균 3.1, 4.0, 4.4, 4.8, 4.5 로 나타났다. 외기와 지열은 일정하였으며, 해수와 하천수는 증가하는 패턴으로 나타났다. 반면에 발전소 온배수는 거리나 늘어남에 따라 COP가 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 거리에 따른 전기소비량은 지열은 일정하였으며, 해수, 하천수는 거리가 0～5km로 늘어남에 따라 전기소비량이 0km 대비 각각 평균 11.19%, 2.03% 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 지열원보다 높은 온도를 나타내는 발전소 온배수는 거리가 늘어남에 따라 전기소비량이 0km대비 약 9.03% 증가하는 것으로 나타났다.

(5) 발전소 온배수를 지열과 비교하였을 경우, 전기사용량이 재질에 따라 차이는 있지만 15km기준 약 3.3～17.9W/m^2로 차가 나는 것을 확인하였으며, 거리가 늘어남에 따라 전기사용량이 증가해 점차 지열과 유사한 패턴을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구는 대규모 시설원예용 집단에너지를 활용한 공급시스템 및 운영체계 개발을 목표로 하는 연구의 후속 연구로써, 미활용에너지를 열원으로 한 히트펌프를 대규모 시설원예에 접목시켜 거리와 재질에 따른 열원별 온도 증감패턴을 확인하였다. 추후에 Pipe깊이, 관경, 유량 등 다른 변수를 통해 보다 더 정밀한 에너지 패턴을 분석할 예정이다.

Acknowledgement

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project Title: Development of Optimal District Energy and Operation System using Industrial Waste Heat for Large-scale Horticulture Facility Applications, Project No: PJ01002101)", Rural Development Administration, Korea.

References

[1] Heo, T. H., On the Application of the Heat Pump System to Facility Horticulture, Using Hot Waste Water from Power Plants. PhD's Dissertation. Jeju National University, Jeju, South Korea, 2012. 2

[2] Yu, Y. S., Development of Greenhouse Cooling & Heating System Using Waste Heat of Thermal Generation Plant. Project No. PJ007432, National Academy of Agricultural Science in Korea, Suwon, South Korea, 2012.

[3] Ryu, Y. S., Joo, H. J., Kim J. W., Park, M. R., Economic Analysis of Cooling-Heating System Using Ground Source Heat in Horticultural Greenhouse, Journal of the Korean Solar Energy Society (KSES). 2012. Vol. 32 No. 6. pp. 60-67.

[4] Kim, J. S., Efficiency analysis of geothermal heating and cooling system using groundwater for controlled horticulture. PhD's Dissertation. Andong University, Andong, South Korea, 2013. 8.

[5] Park, J. T., Chang. K. C., An Investigation on Quantity of Unused Energy Using Temperature Difference Energy as Heat Source and Its Availability. Energy Engg. 2002, Vol. 11, No. 2, pp. 106-113.

[6] Moon, J. P., Utilization of River Bank Filtration for Horticulture Facility. Korea J. Geotherm. Energy (KSGEE). 2012. 8, pp. 10-14.

[7] Hyun. I. T., Lee. J. H., Yoon. Y. B., Lee. K. H., Nam. Y. J., The Potential and Utilization of Unused Energy Sources for Large-Scale Horticulture Facility Applications under Korean Climate Conditions. Journal of Energies. 2014, Vol. 7, Issue 8, pp. 4781-4801.

[8] Crawley D. B., Lawrie L. K., Winkelmann F. C., Buhl W. F., Huang H. J., Pedersen C. O., Strand R. K., Liesen R. J., Fisher D. E., Witte M. J., Glazer J., EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Buildings. 2001, Vol. 33, Issue 4, pp. 319-331.

[9] ASHRAE Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009.

[10] EnergyPlus. Testing and Validation. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm

[11] Kim, Y. H., A study of geothermal heat pump performance prediction and assessment technique. PhD's Dissertation. Jeju National University, Jeju, South Korea, 2007.

[12] Choi, S. W., A study on thermal conductivity characteristics of deep depth vertical closed-loop ground heat exchanger. Master's Thesis, KwangWoon Univercity, Seoul, South Korea, 2012.

[13] Guidance on Energy Efficient Farm Product Management in Greenhouses; Rural Development Administration (RDA): Suwon, Korea, 2011, pp. 2-3.

[14] Kim, K. S., Yoon, J. H., Song, I. C., Energy Performance Evaluation of Heat Reflective Radiant Barrier Systems for Greenhouse Night Insulation. Architectureal Institute of Korea(AIK). 2000. 10, pp. 153-161.

[15] Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. Active Standard No ASTM E 779-87, American Society for Testing and Materials (ASTM). 1987.

[16] Lee. K. H., Strand. R. K., Implementation of an Eerth Tube System Into EnergyPlus Program. SimBuild 2006, The 2nd National Conference of IBPSA-USA, Cambridge, MA, USA, 2006.

[17] Jacovides, C. P., Mihalakakou, G., An Underground Pipe System as an Energy Source for Cooling/heating Purposes. Renewable Energy, 1995. 11, Vol. 6, Issue 8, pp. 893-900.

ⓒCopyright Korea Institute of Ecological Architecture and Environment