

소각시설 여열을 이용한 대규모 시설원에 단지의 난방 시스템 적용 가능성 평가

Utilization of Heat from Waste-Incineration Facility for Heating Large-Scale Horticultural Facilities

이재호(Jaeho Lee)¹, 현인탁(Intak Hyun)¹, 이광호(Kwang Ho Lee)^{2*}

¹한밭대학교 대학원 건축공학과, ²한밭대학교 건축공학과 교수

¹Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

²Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 305-719, Korea

(Received May 27, 2015; revision received June 16, 2015; Accepted: June 23, 2015)

Abstract The Korean government plans to establish large-scale horticultural facilities using reclaimed land to improve the competitiveness of the national agricultural sector at the government level. One of the most significant corresponding problems is the ongoing dependence of these facilities on fossil fuel, whereby constant heating is necessary during the winter season to provide the necessary breeding conditions for greenhouse crops. In particular, high-level energy consumption is incurred from the use of heating-related coverings with large heat-transmission coefficients such as those composed of vinyl and glass. This study investigated the potential applicability of waste-incineration heat for use in large-scale horticultural facilities by evaluating the hot-water temperature, heat loss, and available greenhouse area as functions of the distance between the incineration facility and the greenhouse. In conclusion, waste-incineration heat from a HDPE pipe can heat a horticultural facility of 10 ha if the distance is less than 8 km.

Key words Incineration facility(소각시설), Large-scale horticulture facility(대규모 시설원예단지), Pipe network(열이송 배관), EnergyPlus(에너지플러스), Incineration waste heat(소각 폐열)

* Corresponding author, E-mail: kwhlee@hanbat.ac.kr

기호설명

R_c : 배관 유체 및 배관 내표면 사이에서 일어나는 대류열전달에 대한 열저항 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
 R_p : 파이프 재질을 통해 일어나는 전도열전달에 대한 열저항 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
 R_s : 파이프 외표면과 토양에서 일어나는 전도 열전달에 대한 열저항 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
 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 [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
 k_p : 파이프의 열전도율 [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
 k_w : 물의 열전도율 [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
 Re : 레이놀즈 수
 Nu : 너셀 수
 Pr : 프란틀 수

U_i : 지중관의 전체적인 열전달 계수 [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$]
 R_t : 전체 열 저항 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
 m_w : 유량 [kg/s]
 C_w : 물의 비열 [$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$]
 T_{soil} : 지중 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_w : 유체 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{w,in}$: 배관 입구의 열원 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{w,out}$: 배관 출구의 시설원예 도달 열원 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
 Q_{tot} : 소각로에서 발생하는 여열량 [W]
 Q_{amb} : 배관 열 손실량 [W]
 Q_{load} : 시설원예 1 ha당 하루 누적 부하량 [Wh/d ha]

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

세계는 지금 기후변화로 상징되는 환경위기와 고유

가로 대표되는 자원위기에 동시에 직면해 있다. 특히 기후변화 문제는 기상재해를 유발, 생태계 질서 변화 등 인류의 생존을 위협하고 있다. 따라서 지금과 같이 에너지를 다소비할 경우 지구촌이 치러야 할 기후 변화에 따른 경제적 손실이 매년 세계 GDP의 5~20%에 달할 것이라는 전망이 나오고 있다.⁽¹⁾ 따라서 정부가 “저탄소 녹색 성장”을 새로운 국가비전으로 제시한 것도 세계적인 문제로 대두되고 있는 1차 에너지 사용에 대한 트렌드 변화를 대비한 것이다. 정부의 저탄소 녹색 성장의 안중 떠오르고 있는 집단에너지 사업은 제3차 집단에너지공급 기본계획⁽²⁾의 발표 내용으로 자원회수시설의 소각여열 등을 이용한 집단 에너지 사업을 적극적으로 이용할 경우 집단에너지사업자 선정에 이점으로 작용한다는 내용이다. 이로 인하여 집단에너지사업은 자원회수시설의 소각여열을 이용한 집단에너지 확대보급이 불가피하게 되었다. 현재 우리나라는 국가적인 에너지 절감의 동참과 집단에너지사업의 효율적인 추진을 위해 자원회수시설에서 생산된 소각여열을 열 배관을 통해 공급받아 지역난방시설로 연계하여 집단에너지 사업지구 내 지역난방을 위하여 공동주택, 오피스텔, 판매시설, 업무시설 및 교육시설 등에 난방을 공급하고 있다.

한편, 정부는 서해와 남해를 포함하여 간척지 사업을 진행 중이며 농림축산식품부에 따르면, 대규모 간척지 활용 기본 구상으로 인해 간척지에 침탄수출원예단지, 일반원예단지, 친환경축산단지 등 간척지의 농업적 활용에 대한 구상을 내놓은 상태이다.⁽³⁾ 그 중 시설원예에 대한 비율이 약 70%가 넘어 대규모 시설원예단지로 인한 농업적인 구상의 관심도가 높음을 알 수 있다. 한편, 시설원예는 외피가 비닐, 유리 등 일반적인 건물보다 열관류율이 높은 외피를 사용하며, 재배 작물을 위해 24시간 일정 온도를 유지해야하는 난방위주의 시설이다. 또한, 현재 정부에서 공급되는 면세유의 경우 면세 비율이 점점 줄어들어 난방에 따른 경영비가 점차 상승하고 있는 상황이다. 따라서 시설원예단지를 대규모 간척지 활용방안 구상으로 시설원예의 난방에너지 절감이 시급하여 시설원예의 겨울철 난방에 필요한 화석에너지를 대체가능한 신·재생에너지의 도입이 시급하다.

시설원예에 도입 가능한 대체에너지의 연구에 대해, Hyun et al.⁽⁴⁾은 해수, 하천수, 발전소 온배수, 지열을 열원으로 하는 히트펌프를 시설원예에 적용하여 각 열원에 따른 에너지 소비량을 도출해내었지만, 단지 에너지 소비량에 대한 연구였으며, 소각로 여열에 대한 열원은 진행되지 않았다. 또한, Lee et al.⁽⁵⁾은 시설원예에 적용 가능한 열원을 해수, 하천수, 발전소 온배수, 지열로 선정하고, 거리(0~5 km)와 열원이동 배관의 재질에 따른 에너지 사용량과, 그에 따른 경제성을 분석하였다. 그 결과로 거리가 0 km에서 5 km로 증가함에 따라 해

수, 하천수의 경우 6.19°C, 1.04°C의 온도증가를 보였으며, 발전소 온배수의 경우 거리가 증가함에 따라 약 4.41°C의 온도감소를 보이는 것으로 나타내었으며, 에너지사용량도 동일한 패턴을 보이는 결과를 나타내었다. 마지막으로 Chin⁽⁶⁾은 전국 소각장 현황 및 여열을 이용한 집단에너지 사업의 현황을 분석하고 정부 및 각 지방단체에서 추진하는 에너지 확대를 위한 절감을 위한 연구를 하였으며, 경제적인 측면으로 기존 소각시설 여열회수 사업에 따른 원유 대체효과가 약 758억 원에 달하는 것으로 나타내었다. 또한, 원유 대체의 생활에너지 전환 효과에 의해 기존 소각시설 여열회수 사업이 전기공급으로는 156 GWh/년, 난방공급으로는 487,663 GWh/년으로 나타내어 소각시설의 여열회수에 대한 중요성을 나타내었다. 하지만, 현황에 대한 연구만 이루어져 직접적으로 시설이나, 건물과 연계된 연구는 미흡하다.

따라서 본 연구는 기존에 이루어진 선행연구 이외에 열원을 소각로 여열을 이용하여, 시설원예에 적용시켰으며, 시설원예와 폐기물 소각 시설 사이의 거리, 배관 재질 및 작물의 생육조건(고온, 중온, 저온)에 따른 출구온도와 열 손실량을 확인하였다. 또한, 에너지 사용량, 그에 따른 수용량을 확인하여, 소각로 여열을 대규모 시설원예의 열원으로 적용하였을 경우, 시설원예의 겨울철 난방에너지 공급 가능성에 대한 기본 자료를 제공하는데 목적이 있다.⁽⁷⁾

1.2 연구 방법 및 범위

본 연구는 대규모 시설원예에 소각로 여열을 도입하여 난방 에너지 절감을 목표로 진행하였다. 정부가 발표한 대규모 간척지 활용 기본 구상에 따라 대규모 시설원예 규모인 10 ha 규모의 시설원예를 가정하여 그에 따라 EnergyPlus 시뮬레이션 프로그램으로 모델링을 진행하였다. 소각로의 여열 및 기본 정보는 화성시에 있는 A소각장 방문을 통해서 얻은 자료들을 사용하였다. 대상 소각시설의 선정은 실제 정부에서 발표한 간척지 기본 구상의 화옹지구와 지리적으로 적용이 가능하다고 판단되기 때문이며, 현재 가동 중인 화성시 A 소각시설에서 지역난방공사로 보내는 여열을 시설원예에 적용하였을 경우의 가능성을 확인하고자 하였다. 시뮬레이션의 기상데이터는 EnergyPlus에서 제공하는 기상데이터 중 화성시와 가장 가까운 인천 기상데이터를 적용하였다. 따라서 시뮬레이션을 통한 부하를 확인하고, 소각로에서 나오는 여열을 실제 시설원예에 적용하였을 때 시설원예와의 거리를 변수로 설정하였다. 또한, 선행연구에서 발췌한 열전달식을 통해 거리에 따른 온도패턴, 거리, 적용가능 작물에 따라 빠져나가는 열량을 확인하여 최종적으로 소각로 여열을 이용

하였을 경우 거리에 따른 수용 면적(ha)을 파악하고자 한다.⁽⁷⁾

2. 시뮬레이션 개요 및 이론적 배경

2.1 시뮬레이션 선정

본 연구에서 사용한 시뮬레이션 프로그램은 냉난방 부하 및 열환경에 대해 수학적으로 검증이 가능한 Energy Plus v.6.0을 선정하였다.⁽⁸⁾ EnergyPlus는 건물의 부하를 계산하는데 있어 미국의 냉동공조학회(ASHRAE)에서 권장하는 열 밸런스(Heat Balance) 방법을 사용하는데, 이 방법은 공간부하를 계산하기 위한 업계의 표준 방법이다.⁽⁹⁾ 또한, 건물 에너지 시뮬레이션의 주요 구성요소들인 Zone, Surface, Air Heat Balance 및 System과 Plant 모델링을 각 시간 단계별로 통합적으로 실시함으로써 각 구성요소간의 유기적인 연결 관계를 잘 묘사하는 큰 장점을 지니고 있다. 프로그램의 개발 및 검증에 대한 자세한 내용은 선행연구에서 여러 차례 검증하였다.⁽¹⁰⁾

2.2 해석조건 선정

본 논문의 모델링은 10 ha 규모의 시설원에 분석에 초점을 맞추었다. 또한, 재배 작물로 파프리카(고온), 토마토(중온), 딸기(저온) 등을 선정하여 주/야간의 생육 조건 온도를 적용하였다. EnergyPlus 시뮬레이션 모델은 Fig. 1와 같다. 소각로 열원의 초기온도 설정 값은 화성시 A자원회수시설에 문의하여 지역난방공사로 보내지는 온도의 평균치를 적용하였다. 열원 발생지에서 시설원예까지 운송하는데 쓰이는 배관의 경우 선행연구⁽⁵⁾에 의해 HDPE 및 이중 보온관을 선정하였다. 배관의 규격 및 유량은 화성시 A자원회수 시설 방문을 통해서 얻은 자료들을 토대로 선정하였다. 또한 선행연구를 바탕으로 토양의 열전도율⁽¹¹⁾과 파이프 재질의 열전도율⁽¹²⁾을 적용하였다. 전체적인 조건은 Table 1에 자세히 나타내었다. 또한 입력한 Iron Frame의 물성치는 Table 2

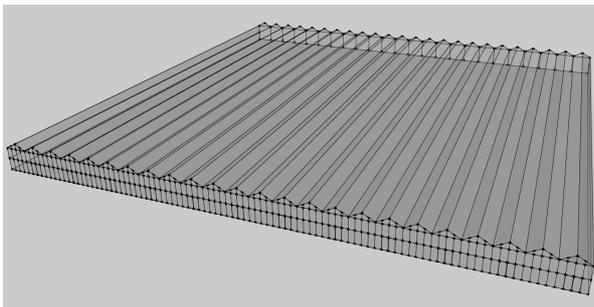


Fig. 1 Simulated model.⁽⁷⁾

Table 1 Analysis conditions

Fixed Parameters			
Simulation Software		EnergyPlus v.6.0	
Modeling Size		10 ha	
Heat Source Temperature		120(°C)	
Terminal Unit		4Pipe Fan Coil System	
Hot Water Temperature Supplied to the FCU(°C)		Year-round 50°C	
Pipe Diameter		Internal diameter : 300 mm Thickness : 8.5(mm)	
Soil Thermal Conductivity		2.0(W/m · K)	
Variable Parameters			
Distance		0 km~40 km	
Pipe Material	HDPE	0.38(W/m · K)	
	Pre-insulated Pipe	0.026(W/m · K)	
Cooling/Heating Setpoint of Greenhouse Crop(°C)	Case 1	Day : 22/Night : 18(High)	
	Case 2	Day : 22/Night : 14(Middle)	
	Case 3	Day : 22/Night : 8(Low)	

Table 2 The iron frame physical properties applied to the simulation

Item	Properties
Width	5.6(cm)
Thermal conductivity	58(W/mK)
Density	7,850(kg/m ³)
Specific heat	465(J/kgK)

와 같으며, 외부 창호의 재질은 유리온실에서 일반적으로 사용하는 맑은 유리 5 mm를 사용하였다. 유리온실에 사용한 침기량은 1.84 ACH를 사용하였다. 이는 Kim⁽¹³⁾등에서 Blower Door 장치를 사용하여 압력차 측정법으로 ASTM E 779⁽¹⁴⁾에 의해 유리온실의 침기량을 실제 측정 한 값이다.⁽⁷⁾

3. 배관 열손실 계산식 및 부하에 의한 면적 계산식

3.1 배관 열손실 계산식

본 연구에서 배관 열손실 계산식은 선행연구⁽¹⁵⁾에서 발췌하였다. 본 연구의 배관 열손실 계산식 적용을 위한 여러 가지 가정들이 있는데, 선행연구^(7, 15)에 자세히 기술 되어있어 공간제약상 본 논문에는 서술하지 않았다. 지중관 및 주변 토양간의 열전달을 계산하기

위해, HDPE관의 경우 열전달 계수는 다음 식(1)~식(3)를 이용하여 결정 된다.^(5, 7, 15)

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

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

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

배관 내표면에서의 대류 열전달계수(h_c)와 레이놀즈 수(Re), 너셀 수(Nu)는 다음 식(4)~식(6)에 의해 계산 된다.

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

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

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

열 저항 값으로 사용되는 R_c , R_p , R_s 는 다음과 같이 지중관의 전체 열전달계수로 산출 될 수 있으며 식은 다음과 같다.^(7, 15)

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

$$R_t = R_c + R_p + R_s \quad (8)$$

유체가 배관을 따라 흐를 때, 관내의 유체와 토양 사이의 열전달은 열손실의 양과 동일하며 식은 다음과 같다.^(7, 15)

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

지중 배관 유체 출수온도(시설원에 도달 온도)는 최종적으로 위의 열전달 방정식에 의해 계산된다. 위의 식은 HDPE 관에 적용되는 식으로써, 이중 보온관의 경우 추가적인 요소를 고려하여 적용하였다.

3.2 부하에 의한 수용면적 계산

본 연구에서는 소각로의 여열 온수 온도와 현재 가동 중인 화성시 A소각장의 카탈로그 데이터를 이용하여 지역난방공사로 공급되는 열량을 발체하였는데, 여열 온수 온도는 120℃, 지역난방공사로 보내지는 열량은 26.4 Gcal/hr로서 이를 하루 평균 W로 환산하면 30.7 MW(Q_{tot})이다. 그 데이터를 가지고 소각로 여열을 시설원에 적용하였을 때 실제로 수용할 수 있는 시설

원에 면적을 도출하고자 한다. 먼저, 수용면적을 계산하기 위해서는 소각로 여열의 하루 누적 열량에 따른 유량 산정이 필요하다. A 소각장의 경우 지역난방에서 쓰이고 회수되는 온수 온도차 ΔT 가 40℃인 점을 감안하여 식(10)에 의해 계산이 가능하다.

$$M_{water} = \frac{Q_{tot}}{C_{water} \cdot \Delta T} \quad (10)$$

Q_{tot} 에 30.7 MW, ΔT 에 40℃를 대입하면 유량 M은 0.18 m³/s이 된다. 유체가 배관을 흐르면서 손실되는 열량(Q_{amb})은 식(11)에 의해 계산된다.

$$Q_{amb} = C_{water} \cdot M_{water} \cdot (T_{w.in} - T_{w.out}) \quad (11)$$

시설원예와 소각시설 사이의 거리에 따른 Q_{amb} 값을 구한 후 최종적으로 도출되는 수용면적의 경우 식(12)를 통해 확인할 수 있다. 수용면적 산정을 위한 시설원에 1 ha당 하루 누적 열량은 가장 부하가 많이 발생하는 날을 대표일로 설정하여 적용하였다.

$$\frac{(Q_{tot} - Q_{amb}) \times 24(h)}{Q_{load}} \quad (12)$$

따라서 위의 식을 통해 각 생육 조건별로 가장 부하가 많이 발생하는 겨울철 대표일의 누적 열량을 도출하여, 각 작물 및 변수 요소에서 확인 가능한 출구 온도, 열 손실량, 수용 면적을 도출하였다.

4. Simulation Analysis

4.1 재배 작물별 대표일 부하 특성

본 연구에서는 시설원예에 실질적으로 적용 가능한 재배 작물의 특성을 알아보기 위해 현재 시설원예에서 재배하고 있는 작물의 생육조건을 발체하여 크게 고온, 중온, 저온 작물의 주간/야간 온도를 설정하여 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 2와 Table 3는 EnergyPlus 프로그램을 통해 도출한 재배 작물별 대표일 부하 변화와 하루 총 부하를 나타낸다. 각 재배 작물의 생육 조건은 Table 1에서 확인할 수 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, 주간 시간에는 거의 동일한 부하량을 보이며, 크게 차이 나는 시간대는 각각의 재배 작물의 설정온도가 다른 야간(0:00~08:00, 20:00~24:00) 시간인 것으로 확인된다. 따라서 고온의 생육조건을 가진 작물일수록 설정온도를 맞추기 위해 소모되는 부하량이 더 많은 것을 확인할 수 있으며, 대표일 총부하량은 Table 3

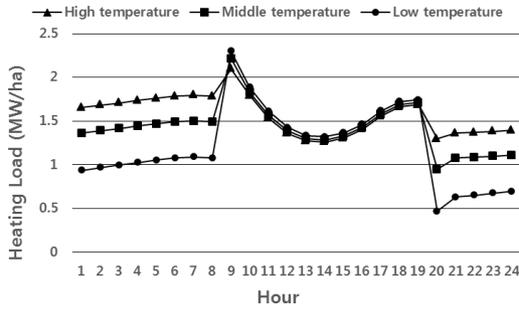


Fig. 2 Heating load on the representative day of each case.

Table 3 An accumulated heating load on the representative day

Item	Heating Load(MWh/day · ha)
High Temperature Crop	37.6
Middle Temperature Crop	34.2
Low Temperature Crop	29.2

에서 확인할 수 있다.

4.2 거리에 따른 시설원에 온수 도달 온도 분석

본 연구에서 선정한 소각로에서 지역난방공사로 배출되는 온수의 온도는 90~120℃의 분포를 보이는데, 시뮬레이션 해석 시에 120℃로 가정하여 연구를 진행하였다. Fig. 3는 열전달식을 적용하여 거리를 열원발생지의 근거리인 0 km부터 40 km까지 변화시켰을 때 시설원예에 도달하는 온수 온도변화를 배관 재질별로 나타낸다. 배관의 재질과 관계없이 거리가 증가함에 따라 출구의 온수 온도는 감소하는 것으로 나타났다. 먼저, HDPE 관의 경우 거리가 0 km에서 40 km로 증가함에 따라 온도가 감소하여 40 km 기준 76.9℃의 온도를 나

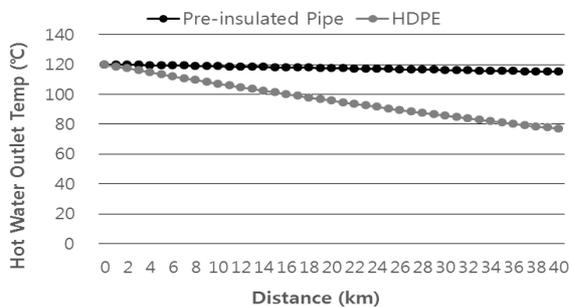


Fig. 3 Hot Water Outlet Temperature Variation as a Function of Distance from Incineration Facility.

타내어 초기의 열원온도와의 차이가 약 43℃ 인 것으로 나타났다. 이는 소각시설의 온수 배출 온도인 120℃가 지중 온도인 12℃와의 차이가 크며, 이중 보온관에 비해 상대적으로 열전도율이 높은 HDPE 관의 열손실 때문인 것으로 사료된다. 반면에 이중 보온관의 경우 거리가 0 km에서 40 km로 증가하여 40 km 기준 약 115℃로 나타나 온도강하가 약 5℃밖에 나지 않는다. 소각시설의 온수 배출 온도가 120℃로 지중온도인 12℃와 큰 차이를 보이지만, 단열재가 삽입되어 HDPE 재질의 관보다 낮은 열전도율을 나타내는 이중 보온관의 온도 감소가 훨씬 적은 것으로 나타난다.⁽⁷⁾

4.3 거리에 따른 열손실량

Fig. 4은 소각로 여열이 시설원에 단지까지의 도달 거리에 따라 지중으로 빼앗기는 열 손실량을 배관 재질별로 나타낸 결과이다. 전체적으로 배관의 재질과 관계없이 거리가 증가함에 따라 손실되는 열량이 증가하는 것으로 나타났다. HDPE 관의 경우 거리가 증가함에 따라 열 손실량이 많아지면서 40 km에서는 약 33.0 MW의 열 손실량을 보인다. 반면에, 이중 보온관의 경우도 거리가 증가함에 따라 열 손실량이 증가하지만 40 km에서 약 3.8 MW의 열손실량만을 보였다. 이는 HDPE 관을 적용하였을 때보다 약 89%의 열 손실량 감소에 해당하는 수치이다. 열 손실량이 감소하는 이유는 거리가 증가함에 따라 시설원예에 도달하는 온수의 온도가 낮아지고(Fig. 3), 그로 인해 소각시설에서 배출되는 온도인 120℃와의 차이인 ΔT가 커지기 때문이다. 또한, 배관의 열손실량의 차이도 각 배관의 열전도율의 차이로 인해, 열전도율이 HDPE관에 비해 상대적으로 낮은 이중 보온관이 적은 온도 변화 및 그에 따른 열손실량을 보이는 것으로 나타났다. 이렇듯, 거리에 따라 증가하는 열손실량으로 인해 수용할 수 있는 시설원에 면적에 영향을 미칠 것으로 판단된다.⁽⁷⁾

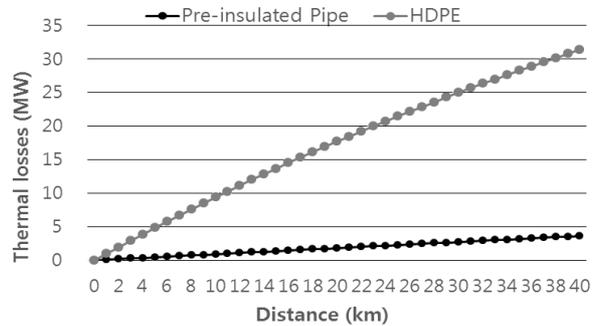


Fig. 4 Thermal Losses through the Pipe Network as a Function of Distance from Incineration Facility.⁽⁷⁾

4.4 거리에 따른 열 손실량과 소각로 여열 부하량 비율

Fig. 5는 거리에 따라 손실되는 열 손실량과 소각로 여열의 하루 누적 열량의 비를 재질별로 나타낸다. 소각로 여열의 하루 부하량은 시간별 평균 약 30.7 MW이며, 열 손실량은 거리에 따라서 점점 증가하게 된다. 열 손실량과 소각로 여열의 비가 1.0인 경우에는 사용 가능한 소각로 여열이 시설원예에 도달하면서 모두 소진되고 그로 인해 시설원예에서 실제로 사용할 수 있는 여열이 남아있지 않는 경우이다. 당연히, 비율이 거리에 따라서 점점 증가를 하는 경향을 보이게 되는데, Fig. 5를 통해 시설원예로 이동하는 거리에 따라 소각로 여열의 열량에서 손실되는 양의 비율을 확인 할 수 있다. 소각로 여열의 경우, 소각시설에서 출수되는 온수가 시설원예의 난방에 쓰인후 다시 돌아오게 되는데, 그로 인해 도달가능거리가 실제로는 Fig. 5의 절반으로 줄어들게 된다. 따라서 Fig. 5에서 0.5의 값을 나타내었을 때 실제로 사용할 수 있는 여열이 남아있지 않는 경우가 된다.

Fig. 5에서 확인 할 수 있듯이 HDPE 관의 경우 근거리부터 급격히 증가하여, 거리를 40 km까지 증가하였을 경우 1.075의 비율을 나타내어, 소각로에서 발생하는 열량을 넘어서게 되는 것으로 나타났다. 따라서 환수까지 고려를 한다면 0.5의 값을 나타내는 16 km 이상의 거리에서는 소각시설의 여열 이용이 불가능한 것으로 판단할 수 있다. HDPE 관의 비율이 거리에 따라 크게 증가하는 이유는 앞서 분석한 거리에 따른 소각로 여열 온수의 변화와(Fig. 3) 그에 따른 열 손실량의 변화로(Fig. 4) 설명이 가능하다. 반면에 이중 보온관의 경우 거리가 근거리에서는 0.003의 비율을 보이며 거의 변화가 없으며, 거리가 증가하여 40 km의 지점에서 0.119의 낮은 비율을 보인다. 이중 보온관도 열 손실 비율을 보이기는 하지만, HDPE의 열손실 비율과는 매

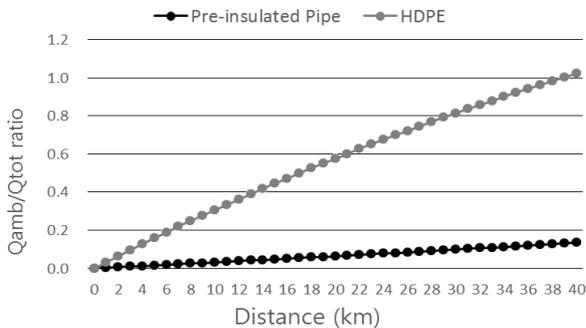


Fig. 5 Available Horticulture Facility Area as a Function of Distance from Incineration Facility.⁽⁷⁾

우 큰 차이를 보인다. 마찬가지로 소각시설과 시설원예 사이의 왕복까지 고려한다면, 20 km 이상 적용 가능할 것으로 판단된다. 따라서 소각로 여열을 이중보온관에 적용하였을 때, HDPE 관을 쓰는 것보다 이중 보온관을 쓰는 것이 훨씬 효율적임을 판단할 수 있다.

4.5 거리에 따른 시설원예 수용 면적

현재 우리나라에서는 일반적으로 소각시설의 여열 중 일부는 소각시설의 부대시설에서 활용되고, 나머지는 지역난방공사로 보내지고 있다. 또한, 소각시설은 소각로 여열 온수를 공급만 하는 소각시설과 회수까지 하는 소각로로 나뉜다. 따라서 본 연구에는 회수하여 적용하는 소각로의 경우를 고려하여 각 재배 작물별 수용 가능 면적을 고려하고자 한다.

수용 면적은 소각로 여열에서 지역난방공사로 공급되는 하루 누적 열량 및 거리에 따른 열 손실량을 고려하여, 본 연구에서 도출한 대표일 누적 부하로 나누어 계산하였다(식(12)). 또한, 시설원예에 적용 가능한 재배 작물을 고온, 중온, 저온으로 나누어 선행적으로 검증된 1 ha 규모의 모델링에 적용하였다. 그 결과 고온 약 37.6 MWh, 중온 약 34.2 MWh, 저온 약 29.2 MWh의 부하를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 6~Fig. 8은 소각로의 여열을 이용하여 수용할 수 있는 면적(ha)을 재배 작물 별로 시설원예와 소각시설 사이의 거리의 함수로서 나타내었다. 전체적으로 거리가 증가함에 따라 수용할 수 있는 면적이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 먼저 고온 생육조건)에서 소각시설과 시설원예가 근거리일 경우(0 km) 재질에 구분 없이 19.6 ha로 거의 20 ha의 규모의 시설원예 난방이 가능하다. 하지만 HDPE 관의 경우 34 km에서 1.1 ha의 규모만 수용이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 앞서 분석 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 16 km에서는 10 ha를 수용 할 수 있는 것으로 나타나, 온수의 왕복을 고려하면 그 절반 거리인 8 km

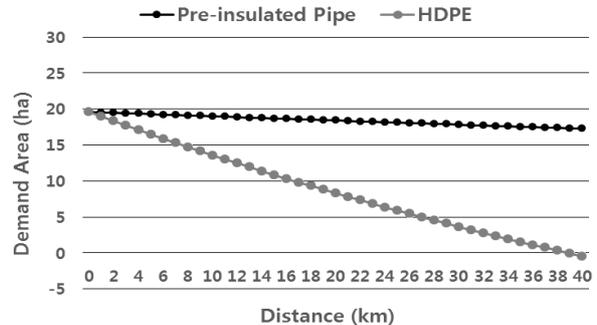


Fig. 6 Available Horticulture Facility Area as a Function of Distance from Incineration Facility(High Temperature crop).

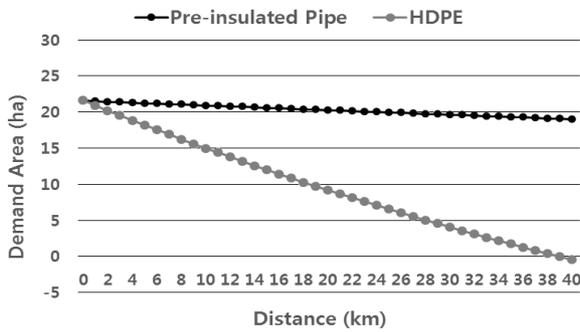


Fig. 7 Available Horticulture Facility Area as a Function of Distance from Incineration Facility(Middle Temperature crop).

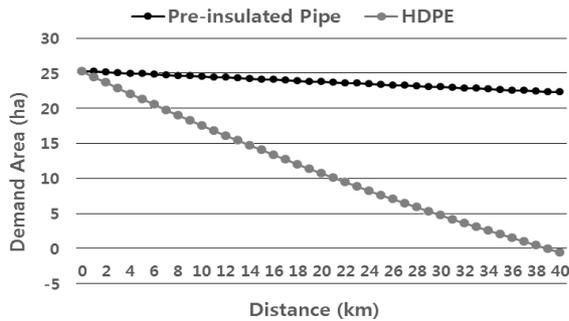


Fig. 8 Available Horticulture Facility Area as a Function of Distance from Incineration Facility(Low Temperature crop).

까지가 대규모라고 할 수 있는 10 ha 규모의 시설원에 난방이 가능한 것으로 판단된다. 반면에, 이중 보온관의 경우 거리가 40 km까지 증가하여도 약 17.1 ha의 규모를 수용할 수 있는 것으로 나타났다.

중온 생육조건의 경우 근거리에서(0 km) 배관 재질과 구분 없이 약 21.5 ha의 규모를 수용할 수 있으며, 거리증가에 따라 HDPE 관의 경우 16 km 기준(온수 왕복을 고려하면 8 km) 10.9 ha를 수용할 수 있다. 이중 보온관의 경우 40 km 기준 약 19 ha의 규모를 수용할 수 있다. 마지막으로 저온 생육조건의 경우 근거리에서 배관 재질과 구분 없이 약 25.3 ha의 규모를 수용할 수 있으며, HDPE 관의 경우 16 km 기준(온수 왕복을 고려하면 8 km) 12.7 ha를 수용할 수 있을 것으로 사료된다. 반면 이중 보온관의 경우 40 km 기준 약 22.3 ha의 규모의 시설원에 수용이 가능한 것으로 나타났다. 이를 통해, 시설원예와 소각시설 사이의 거리가 증가함에 따라 온수 온도의 감소 및 배관을 통한 열손실량이 증가로 인하여 시설원예에 적용할 수 있는 열량이 감소하게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 거리가 증가함으로 인해 시설원예의 수용 면적이 감소하며, 무

엇보다 배관의 재질에 따라 수용할 수 있는 면적이 크게 다른 것으로 나타났다. 또한, 생육조건에 따른 수용 면적의 경우 고온의 생육조건을 가진 작물을 재배하는 시설원예일수록 부하량이 많아 그에 따른 수용 면적이 줄어드는 것을 알 수 있다.

요약컨데, 소각로 여열을 시설원예 난방에 이용할 경우 근거리일 때는 고가의 이중 보온관보다는 HDPE 관을 사용해도 무관할 것으로 판단되지만, 정부가 발표한 대규모 간척지 기본계획에 따라 본 연구의 대상이었던 화옹지구의 화성시 A소각장과 같이 시설원예 사이의 거리가 장거리일 경우에는 HDPE 관보다 이중 보온관이 더 에너지 효율적이고 경제적인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 소각시설과 시설원예 사이의 거리와 배관의 재질에 따라 변화하는 온수 도달 온도패턴과 열 손실량, 열 손실비율을 확인하였다. 또한, 적용 가능한 재배작물의 생육조건을 고려하여 고, 중, 저온의 생육조건을 가진 작물을 재배하는 시설원예를 설정하여 수용 가능 면적을 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 거리에 따른 시설원예 온수 도달 온도 변화는 근거리일 경우 120℃이지만, HDPE 관의 경우 거리가 0 km ~40 km로 증가하면서 온도가 감소하여 40 km 기준 76.9℃의 온도를 나타내어 열원 온도차가 약 43℃로 나타났다. 반면에 이중 보온관은 단열재가 삽입되어 HDPE 관보다 낮은 열전도율로 인해 거리가 증가하더라도 40 km 기준 출수 온도가 약 115℃로서 약 5℃의 차이를 보여 온도 감소의 폭이 훨씬 적었다.
- (2) 거리에 따른 배관 열손실량은 배관의 재질과 관계없이 거리 증가로 인해 손실되는 열량이 증가하였다. HDPE 관은 거리의 증가로 열손실량이 40 km에서 약 31.4 MW의 열손실량을 보인 반면, 이중 보온관의 경우 열손실량이 40 km에서 약 3.6 MW를 보여 HDPE관보다 훨씬 적은 열손실량을 보였다.
- (3) 거리에 따른 열손실량과 소각로 여열부하의 비는 HDPE 관의 경우 40 km 기준 약 1.023의 비율로 소각로에서 발생하는 여열량을 넘어서게 되는 것으로 나타났다. 반면에, 이중 보온관의 경우 근거리에서는 0.003의 비율을 보이고, 거리가 증가하여 40 km의 지점에서 0.119의 비율을 보였다. 비교 대상인 HDPE의 열손실 비율과 비교해보면 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.
- (4) 겨울철 대표 일을 선정하여 조사한, 소각시설과 시설원예 사이의 거리에 따른 시설원예 수용 가능 면적은, 중온 생육조건의 작물의 경우 근거리에서는 재질과 구분 없이 약 21.5 ha의 규모를 수용할 수 있

었다. 또한, 거리가 증가함에 따라 HDPE는 16 km 기준 10.9 ha를, 이중 보온관은 40 km 기준 약 19 ha의 규모의 시설원예를 수용할 수 있었다. 또한, 고온의 생육 조건을 가진 작물을 재배하는 시설원예 일수록 적은 면적을 수용함을 확인할 수 있었다.

- (5) 소각로 여열을 시설원예 난방에 이용할 경우 근거리일 때는 고가의 이중 보온관보다는 HDPE 관을 사용해도 무방할 것으로 판단되지만, 시설원예와 소각시설 사이의 거리가 장거리일 경우에는 HDPE 관보다 이중 보온관이 더 효율적이고 경제적인 것으로 판단된다.

후 기

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부 과제명 : 산업폐열 배출실태와 산업폐열 활용 시설원예용 집단에너지 공급시스템 적용가능성 분석 및 운영체계 개발, 세부과제번호 : PJ010021012014)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

1. Ministry of Knowledge Economy, 2009, The Third District Energy Supply Plan.
2. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2009, Framework for Large-scale Reclamation Site Usage Plan.
3. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Plan for Utilization of Large-scale Reclaimed Land Area
4. Hyun, I. T., Lee, J. H., Yoon, Y. B., Nam, Y. J., Lee, K. H., 2014, The Potential and Utilization of Unused Energy Sources for Large-Scale Horticulture Facility Applications under Korean Climatic Conditions, *Energies*, Vol. 7, No. 8, pp. 4781-4801.
5. Lee, J. H., Hyun, I. T., Yoon, Y. B., Nam, Y. J., and Lee, K. H., 2015, Energetic and Economic Assessment of Pipe Network Effects on Unused Energy Source System Performances in Large-scale Horticulture Facilities, *Energies*, Vol. 8, No. 5, pp. 3328-3350.
6. Chin, D. H., 2009, A study on expanding the practical use of energy by using the remaining heat of incinerator, PhD's Dissertation, Yeungnam University, Gyeongsan, South Korea.
7. Lee, J. H., Hyun, I. T., Kim, H. W., and Lee, K. H., 2015, Applicability of Waste Heat from Incineration Facility for Large-scale Horticulture Facilities, In Proceedings of the Summer Conference of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea(SAREK), Youngpyong, South Korea, pp. 699-702.
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., and Glazer, J., 2001, EnergyPlus : Creating a New-generation Building Energy Simulation Program. *Energy and Buildings*, Vol. 33, No. 4, pp. 319-331.
9. ASHRAE Fundamentals Handbook, 2009, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
10. EnergyPlus. Testing and Validation, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/testing.cfm>.
11. Kim, Y. H., 2007, study of geothermal heat pump performance prediction and assessment technique, PhD's Dissertation, Jeju National University, Jeju, South Korea.
12. Choi, S. W., 2012, A study on thermal conductivity characteristics of deep depth vertical closed-loop ground heat exchanger, Master's Thesis, KwangWoon University, Seoul, South Korea.
13. 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.
14. Kim, K. S., Yoon, J. H., and Song, I. C., 2000, Energy Performance Evaluation of Heat Reflective Radiant Barrier Systems for Greenhouse Night Insulation. *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 16, No. 10, pp. 153-161.
15. Lee, K. H. and Strand. R. K., 2006, Implementation of an Earth Tube System Into EnergyPlus Program. SimBuild 2006, The 2nd National Conference of IBPSA-USA, Cambridge, MA, USA.