

## 지열히트펌프의 도심 열섬 저감 효과의 검토

## Effect of the Geothermal Heat-pump on alleviation of the Urban Heat Island

손원득\*†

Son Won-Tug\*†

(Received 18 March 2016; accepted 01 June 2016)

**Abstract :** Remarkable air temperature increases in urban areas are known as heat island phenomenon. In this study, we analyzed the effects of renewable energy on the heat island phenomenon in urban area by numerical method. The results showed that the use of renewable energy reduces the building energy use in urban area and contributes the alleviation of the Urban Heat Island Effects.

**Key Words :** 신재생에너지(New & renewable energy), 도시열섬(Heat Island), 환경부하(Environmental Load), 지열히트펌프(Ground source heat pump)

## 기 호 설 명

$a$	: 일사 흡수율 (-)	$E_{w1}$	: 맞은편 외벽 복사량
$c$	: 공기의 비열 [J/(kg·K)]	$H$	: 건물군 높이
$C$	: 대기층간 열전달률 [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	$I_d$	: 외벽 확산일사량
$COP$	: 공조기의 성능계수 [-]	$I_r$	: 외벽 직달일사량
$D$	: 건물군 폭	$Q_A$	: 공조배열량
$E_b$	: 지표면 복사량	$Q_b$	: 지표면으로부터의 열류
$E_o$	: 대기 복사량	$Q_{car}$	: 자동차에서의 배열
$E_w$	: 외벽 복사량	$Q_g$	: 창으로부터의 열류
		$Q_i$	: 실내 발열량
		$Q_{ig}$	: 창에서 실내로의 관류열량

† 손원득(교신저자) : (주)센솔루션  
E-mail : sonwt@sensolution.kr, Tel : 070-4651-5565

† Son Won-Tug(corresponding author) : SEN Solution  
E-mail : sonwt@sensolution.kr, Tel : 070-4651-5565

$Q_{ir}$	: 옥상면에서 실내로의 관류열
$Q_{iw}$	: 외벽에서 실내로의 관류열량
$Q_r$	: 옥상면으로부터의 열류
$Q_s$	: 도로 공간에 흡수된 반사일사
$Q_u$	: 상공부 대기 제1층에의 열류
$Q_{u1}$	: 상공부 대기 제2층에의 열류
$Q_{un}$	: 상공부 대기 제n층에의 열류
$Q_w$	: 벽면으로부터의 열류
$S_b$	: 지표면 면적
$S_g$	: 창 면적
$S_r$	: 옥상 면적
$S_w$	: 외벽면적
$t$	: 시간
$V$	: 도로 공간의 체적
$V_1$	: 상부 대기 제1층 체적
$V_n$	: 상부대기 제n층 체적
$W$	: 도로폭

### 그리스 문자

$\alpha$	: 대류 열전달률 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$\gamma$	: 일사 반사율
$\varepsilon$	: 복사율
$\theta$	: 온도 [ $^{\circ}C$ ]
$\lambda$	: 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]
$\rho$	: 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	: 형태계수
$\omega$	: 일향률

### 하 첨 자

1	: 상공부 대기 제1층
a	: 공기

$b$	: 도로면
can	: 도로 공간
$g$	: 창
$n$	: 상공부 대기 제n층
$s$	: 토양
$w$	: 외벽

## 1. 서 론

최근 정부시책에 의해 에너지절약 및 환경친화적 건축물에 관한 관심이 고조되고 있다. 친환경 녹색성장을 위한 대표적인 에너지원인 신재생에너지는 그 보급률이 증가하고 있는 추세이며, 정부에서도 제도규정에 의해 의무적으로 사용하도록 규정하고 있다.

현행 '신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법(1) 제12조제12항'에 의한 공공기관 등이 신축, 증축 또는 개축하는 건축물에 대하여 정부에서 정한 설계시 산출된 예상 에너지 사용량의 15%이상을 신재생에너지를 이용하여 공급되는 에너지를 사용하도록 신재생에너지설비를 의무적으로 설치하게 하고 있다.

한편, 최근까지 대한민국에서 건축물에 적용된 신재생에너지원은 적용이 용이한 태양에너지, 지열에너지로 국한되어있다. 특히 지열에너지는 히트펌프의 열원으로 지열을 사용한 사례가 가장 많이 적용되었다. 지열을 에너지원으로 하는 히트펌프는 에너지효율적인 측면에서 기존의 전기 또는 가스에만 의존하는 냉난방기기대비 그 성능이 우수하며, 또한 기존의 냉동기 및 공랭식 에어컨에 필요로 하는 냉각탑 또는 실외기에 의한 외부로의 열배출이 없어 도시열섬현상을 방지하는 측면에서도 매우 유효하다.

따라서, 본 논문에서는 도심지의 열원으로

지열히트펌프 적용에 따른 에너지절약효과 및 도시열섬현상 방지에 기여정도를 정량적으로 분석하고자 한다.

## 2. 연구 대상 및 연구 방법고찰

연구대상지역은 그림 1에 나타난 바와 같이 고층건물이 가장 많이 있는 강남역과 역삼역 사이 중심지 약 13.77km<sup>2</sup>의 면적을 대상으로 하였다. 이 지역은 대로 중심으로 일반상업지역이 길게 분포되어 있으며, 제2, 3종 일반주거지역으로 구성되어있다.

도시의 에너지 소비에 관한 연구에는, 도시 열환경 형성요인의 측면(2)과 미활용 에너지 사용의 측면(3)으로 분류될 수 있다. 전자는 공조에 의한 인공배열이 도시기후 변화에 미치는 영향에 관한 것이며, 후자는 건물 및 지역의 열공급을 위한 인공배열의 재활용에 관한 것이다.(4) 최근 도시의 온난화현상이 현저하게 나타남으로써 전자의 측면에서 도시기후에 미치는 인공배열의 영향에 관하여 각종의 연구가 수행되어져 왔다.

본 논문에서는 도시온열성상 분석을 위해 개량·건축-도시-토양연성계 모델(이하 AUS-SSM: Architecture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model)을 사용하였다. AUSSSM의 개요를 그림 2에 나타내었다. AUSSSM은 도시대기, 토양, 건물의 3개의 서브모델로 구성되어있으며, 전체를 완전연성계로서 취급하고 있다. 도시고온화요인의 정량화 다시말해, 도시고온화 억제수법의 정량적평가를 목적으로 하는 수치해석모델이다. AUSSSM에서는 동일형상의 직방체건물이 등간격으로 무한히 존재하는 이상적인 도시를 가정하여 대기층에 수직 1차원모델을 적용하고 있다. 또한 토양에 관한 서브모델 및 건축서브모델은

1차원 열전도방정식을 기본으로 하고 있다. 상정하는 도시의 가로형상을 그림 3에 나타내었다.



Fig. 1 3D map in around Gangnam station

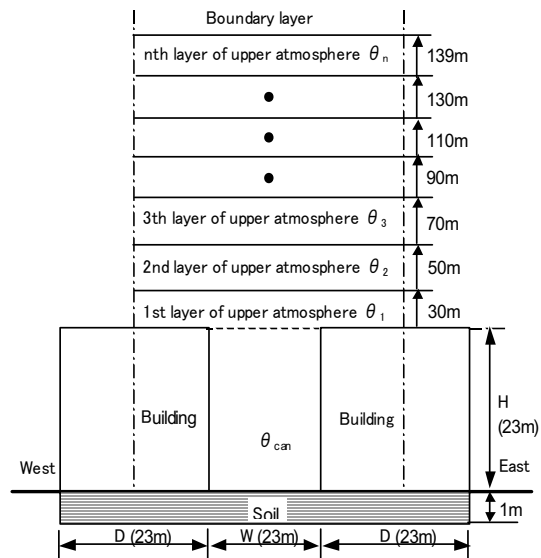


Fig. 2 Schematic frame of the AUSSSM

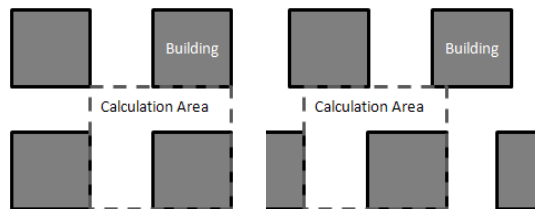


Fig. 3 The grid pattern in the AUSSSM

### 3. 수치해석 개요

#### 3.1 1차원 도시 Canopy 모델의 개요

##### 3.1.1 건축물 및 토양 모델

건축물 모델은 건축물 열부하 계산을 기초로 하여 벽체 및 창으로 구성된 직방체의 건축물을 설정하였다. 외벽 및 옥상벽면 내에 대해서는 1차원 열전도방정식에 기초하였으며, 표면에서는 방위에 따른 일사, 장파방사 및 일사의 1차 반사와 대류에 의한 열전달을 고려하였다. 창을 통한 일사는 실내 벽체에 흡수된 후 실온상승에 기여한다고 가정하였다. 실내 벽면 간의 장파복사는 실온에 의해 실의 벽면 온도가 거의 동일하다고 가정하여 고려하지 않았다.

도로면 및 토양에 대해서는 지중 0.5m 지점을 온도지정 경계층으로 하는 1차원 열전도방정식에 의해 계산하였다. 지표면에 대해서도 일사, 장파복사 및 일사의 1차반사와 대류에 의한 열전달을 고려하였다.

건축물 외벽과 도로 및 토양의 열평형 방정식은 다음과 같다.

- 외벽 및 토양 내

$$c_{w,s} \rho_{w,s} \frac{\partial \theta_{w,s}}{\partial t} = \lambda_{w,s} \left( \frac{\partial^2 \theta_{w,s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_{w,s}}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

- 외벽 표면

$$\begin{aligned} q_w = & \sigma_{w,o} \varepsilon_w E_o + \sigma_{w,b} \varepsilon_w E_b \\ & + \sigma_{w,w1} \varepsilon_w E_{w1} - E_w \\ & + \alpha_w (\omega_w I_r + \sigma_{w,o} I_d) \\ & + \alpha_w \sigma_{w,b} (\gamma_b (\omega_b I_r + \sigma_{b,o} I_d)) \\ & + \alpha_w \sigma_{w,w1} (\gamma_{w1} (\omega_{w1} I_r + \sigma_{w1,o} I_d)) \\ & - \alpha (\theta_w - \theta_{can}) \end{aligned} \quad (2)$$

- 토양 표면

$$\begin{aligned} q_b = & \sigma_{b,o} \varepsilon_b E_o + \sigma_{b,w} \varepsilon_b E_w \\ & + \sigma_{b,w1} \varepsilon_b E_{w1} - E_b \\ & + \alpha_b (\omega_b I_r + \sigma_{b,o} I_d) \\ & + \alpha_b \sigma_{b,w} (\gamma_w (\omega_w I_r + \sigma_{w,o} I_d)) \\ & + \alpha_b \sigma_{b,w1} (\gamma_{w1} (\omega_{w1} I_r + \sigma_{w1,o} I_d)) \\ & - \alpha (\theta_b - \theta_{can}) \end{aligned} \quad (3)$$

##### 3.1.2 도로 공간 및 상부 대기

도로 공간은 일반적으로 복잡한 기하학적 공간이나, 주변의 건축물을 동일한 직방체로 단순화 하여 아래와 같은 가정을 하였다.

- (1) 도로 공간 내부 및 각 층의 상부 대기는 온도분포가 없으며, 각 공간의 온도는 일정하다.
- (2) 도로 공간의 길이는 남북방향으로 무한하며, 동서방향으로는 동일한 형태의 공간이 연속된다.
- (3) 건물군으로부터의 공조배열은 옥상에서 배출된다.
- (4) 잠열의 영향은 작다고 가정하고 현열만 고려한다.

이러한 가정 하의 도로 공간 및 상부 대기 각 층의 열평형식은 아래와 같다. 단, C는 각 층 상부 대기 간의 열전달률을 의미한다.

- 도로 공간

$$c_a \rho_a V \frac{\partial \theta_{can}}{\partial t} = Q_w + Q_g + Q_b - Q_u + Q_s + Q_{car} \quad (4)$$

$$Q_w = S_w \cdot \alpha (\theta_w - \theta_{can}) \quad (5)$$

$$Q_g = S_g \cdot \alpha (\theta_g - \theta_{can}) \quad (6)$$

$$Q_b = S_b \cdot \alpha (\theta_b - \theta_{can}) \quad (7)$$

$$Q_u = C (\theta_{can} - \theta_1) \quad (8)$$

- 상부 대기 제1층

$$c_a \rho_a V_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = Q_u + Q_r - Q_{u1} + Q_A \quad (9)$$

$$Q_r = S_r \cdot \alpha (\theta_r - \theta_1) \quad (10)$$

$$Q_A = (Q_{ir} + Q_{iw} + Q_{ig} + Q_i) \times (1 + 1/COP) \quad (11)$$

$$COP = -0.0697 \times \theta_1 + 5.0801 \quad (12)$$

- 상부 대기 제n층

$$c_a \rho_a V_n \frac{\partial \theta_n}{\partial t} = Q_{n-1} - Q_n \quad (13)$$

$$Q_n = C(\theta_n - \theta_{n+1}) \cdot (W + D) \quad (14)$$

일반적으로 상부 대기 각층 간의 열이동은 부력에 의한 이류(Advection)에 의해 지배되므로, 그 풍속을 입력조건으로 설정할 필요가 있으나, 계산의 간략화를 위해서 여기서는 하기의 상공부 대기성상 고찰 결과를 기초로 한 시간별 열전달률을 사용하였다. 표 1에 계산 조건 및 계산에 사용된 각 재료의 열물성치를 나타내었다. HVAC System의 경우 공기열원 히트펌프, 터보냉동기 및 흡수식냉동기를 열

원으로 적용한 경우를 case1로, 지열히트펌프, 터보냉동기 및 흡수식냉동기를 열원으로 적용한 경우를 case2로 선정하였다.

기상데이터는 서울지역 8월 평년값을 사용하였다. 수치해석에 사용된 기상데이터를 그림 4에 나타내었다. 일사량의 데이터는 수평면 전천일사량을 Udagawa et al.에 의한 직산 분리식<sup>5)</sup>을 이용하여 법선면 직달일사량과 수평면 확산일사량으로 분리하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 계산 대상기간의 태양고도와 태양방위각으로부터 산출한 도로 공간의 일향률( $\omega$ : 직달일사량이 벽면에 입사하는 면적비)을 도로 공간의 지표면, 동측 및 서측 벽면에 대해 각각 계산하였다.

서울 강남역 부근 GIS 데이터에 의해 평균 건물군의 높이는 23.8m, 도로폭은 17m, 건물군 폭은 32m로, 창면적율은 35%로 선정하였다. 실내 발열 및 환기에 대해서는 바닥면적을 기준으로 산정하였다. 또한 도로의 교통수단에 의한 배열은 실측조사를 기초로 하여 발열량 및 배기가스의 발열량을 산출하였다.(6)

Table. 1 Basic assumptions used in the standard solution

Street configuration	building width B=32 m, road width W=16.88m, building height H=23.8 m floor area ratio: 700%, gross ratio of building volume to lot 300%
Street grid pattern	Staggered array
Solar radiation reflectivity	Building wall 0.6, asphalt pavement 0.9, soil 0.7, lawn 0.75
Wall	plaster board (9 mm)+insulation (20 mm)+concrete(200 mm)+tile
Glazing	Transparent glass of 6 mm thickness, ratio of glazing 35%
Roof	Soil (10 cm) + lawn
Covering ratio	asphalt pavement : soil : lawn = 1 : 1 : 1
Anthropogenic heat from traffic (at the peak)	9.7 W per square meter of the area of the block
Internal heat generation of building (at the peak)	sensible heat: 56 W per square meter of the area of the room latent heat: 13 W per square meter of the area of the room
HVAC System	case1: Air Source Heat Pump(10%), Turbo Refrigerator(45%), Absorption Refrigerator(45%) case2: Ground Source Heat Pump(10%), Turbo Refrigerator(45%), Absorption Refrigerator(45%)
Setting of air-conditioning	26°C RH60% constant (8:00 - 21:00), ventilation 2.7m <sup>3</sup> /h

Table. 2 COP of air conditioning system

	System	Calculation of COP	Exhausted heat rate
Air conditioning system	Air source heat pump	$COP=COP_{HPair} \cdot lrate$	$Q=(1+1/COP) \cdot H_{load}$
	Ground source heat pump	$COP=1.20COP_{HPair} \cdot lrate$	
	Turbo refrigerator	$COP=1.60COP_{HPair} \cdot lrate$	
	Gas-fueled absorption refrigerator	$COP=0.38COP_{HPair} \cdot lrate$	
	Irate(부하변화에 따른 성능변화 계수)= $(-0.0681ea1+0.139ewt+0.0023pr+3.1598)/(-0.0681ea1+0.1319ewt+0.0023*100+3.1598)$		

#### 4. 공조기로부터의 배열량

계산에 사용된 공조시스템의 종류, COP 및 배열량의 계산방법을 표 2에 나타내었다. 공기열원히트펌프의 경우 COP는 그림 5에 나타낸 바와 같이 공기열원히트펌프의 열원온도와 COP관계로부터 결정하였다.

현열처리비는 공기열원히트펌프 100%, 터보냉동기 12.5%, 가스직화식 흡수식냉동기는 가스연소에 따른 수증기 발생량을 별도로 고려하여 대기의 비습계산점에 부여하였다. 지열히트펌프의 경우 도로공간으로의 배열량은 없는 것으로 하였다.

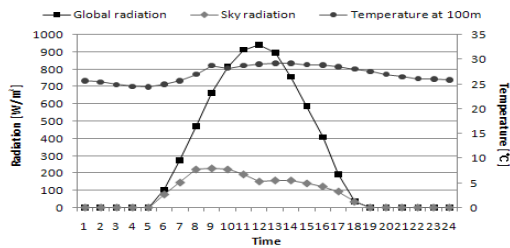


Fig. 4 Boundary condition

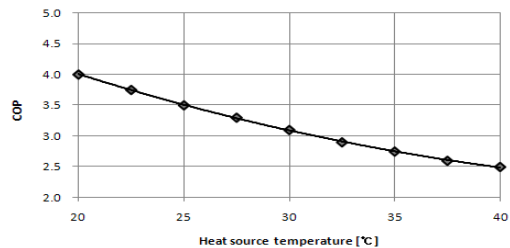


Fig. 5 COP and heat source temperature of air source heat pump

#### 5. 공조배열량 및 도시온도변화 검토

이 절에서는 신재생에너지원 중 하나인 지열히트펌프를 에너지사용량의 10% 적용함에 따라 건축물로부터 배출되는 공조배열의 감소에 의한 도심지 공간 내의 온열성상 및 에너지 절약효과에 관해서 검토하고자 한다.

그림 6에 전체 건물에너지사용량의 10%를 신재생에너지인 지열히트펌프가 담당할 경우(case2)와 기준조건(case1)에서의 전체 공조시스템에서의 공조배열량의 비교를 나타내었다. case2의 경우 case1에 비해 시각별 평균 공조배열량이 약 9%(43.04W/m²)정도 감소되는 것으로 나타났다. case1과 case2의 최대 공조배열 배출량은 15시에 나타났으며, 각각 564.64W/m², 513.20W/m²로 나타났다.

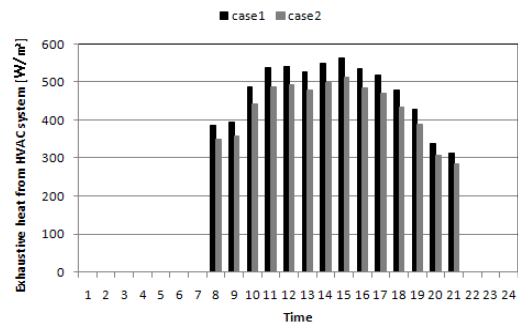


Fig. 6 Comparison of exhaustive heat from HVAC system

그림 7에 나타낸 바와 같이 신재생에너지인

지열히트펌프를 전체 건물에너지사용량의 10%로 적용하여 공조배열량이 감소된 경우(case2), 도로 공간의 시각별 평균 온도는 기준조건(case1)에 비해 0.16°C 낮게 나타났다. 도심 온도가 가장 높은 13시의 경우, case1과 case2의 도로공간의 온도는 각각 32.01°C, 31.76°C로 0.25°C의 온도차가 있음을 확인할 수 있었다.

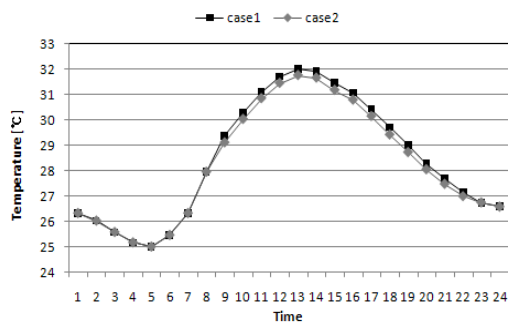


Fig. 7 Comparison of street space temperature

그림 8에 상공100m까지 높이별 온도변화를 나타내었다. case1과 case2의 온도차는 지면에 가까워질수록 증가하는 것으로 나타났으며, 상공 약60m지점부터의 case1과 case2의 온도차는 canopy 평균온도차의 10%이하로, 대기로의 배열감소효과에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

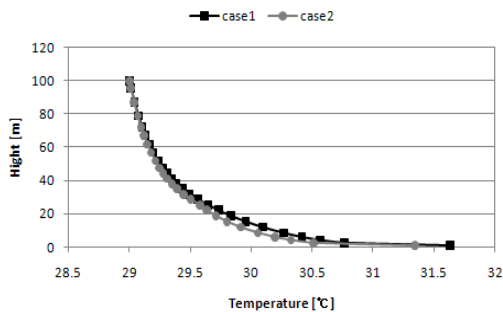


Fig. 8 Comparison of perpendicular distribution air temperature

## 6. 에너지사용량 및 환경부하변화 검토

지금까지 신재생에너지 사용에 따른 공조배열량 감소 및 도심지 온도변화에 관해 검토하였다. 본 절에서는 신재생에너지 사용에 따른 에너지절약 및 환경부하 저감량을 정량적으로 검토하고자 한다.

그림 9에 case1, case2의 일일 에너지사용량 변화를 나타내었다. case2의 경우 case1에 비해 시각별 평균 1차 에너지소비 절감량은 약 14.53W/m<sup>2</sup>로 case1대비 7.3%정도 줄어드는 것으로 나타났다.

case1과 case2의 일평균 에너지사용량은 각각 3208.60W/m<sup>2</sup>, 3005.25W/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 일일에너지사용량을 기준으로 연간 에너지절감량은 (냉방운전일수 88일기준) 약 18kW/m<sup>2</sup>로 case1대비 0.6%의 에너지절약효과가 있는 것으로 나타났다.

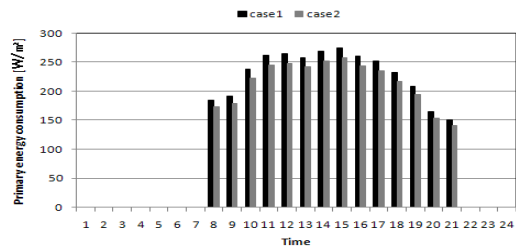


Fig. 9 Comparison of primary energy consumption

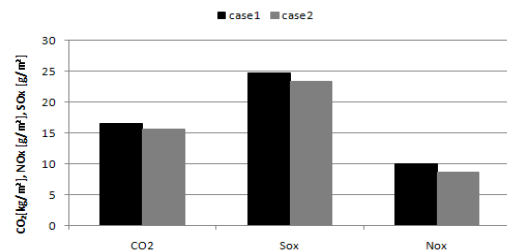


Fig. 10 Comparison of environmental load

그림 10에 case1, case2의 연간 CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>

및 NOx배출량을 비교하였다. 신재생에너지 적용에 따른 CO2, SOx 및 NOx 배출 저감률은 각각 5.4%, 5.9% 및 12.8%로 나타났다.

Table. 3 The conversion factor of CO2, NOx, SOx emission

Type	Electric Power	Gas
Unit [*]	kWh	MJ
CO <sub>2</sub> emission [kg-C/*]	0.143	0.0186
NOx emission [g-NOx/*]	0.231	0.026
SOx emission [g-SOx/*]	0.209	-

## 7. 결 론

본 논문은 강남역 주변 시가지(13.77km<sup>2</sup>)를 대상으로 건물 에너지사용량의 10%를 지열원 히트펌프로 충당할 경우, 공조배열감소 및 도시열섬현상 방지에 기여 정도를 정량적으로 분석하고 건물에서의 에너지 절약 및 친환경적인 효과를 정량적으로 분석하였다.

도시온열성장 분석을 위해 개량·건축-도시-토양연성계 모델(이하 AUSSSM: Architecture-Urban-Soil Simultaneous Simulation Model)을 사용하였다.

수치해석 결과를 간략히 정리하면 아래와 같다.

- (1) 신재생에너지를 전체 건물에너지사용량의 10% 적용한 경우(case2), 기준조건(case1)에 비해 도로로 배출되는 시각별 평균 공조배열량은 약 9% (43.04W/m<sup>2</sup>)정도 감소되는 것으로 나타났으며, 일일 최대 공조배열감소량은 51.44W/m<sup>2</sup>로 나타났다.
- (2) case2의 경우 기준조건에 비해 일일평균 도심지 온도가 약 0.16℃ 낮게 나타났으며, 최대0.25℃ 온도차가 있음을 확인하였다. 또한 이 온도차는 지면에 가까워질수록 증가하였다.

- (3) 신재생에너지를 적용한 case2의 경우 case1에 비해 시각별 평균 1차 에너지소비량이 약 14.53W/m<sup>2</sup> 감소되며, 연간 약 18kW/m<sup>2</sup>의 에너지절약효과가 있는 것으로 나타났다.
- (4) 신재생에너지 적용에 따른 온실가스배출량을 비교한 결과, case2가 case1에 비해 CO2, SOx 및 NOx 배출량이 5.4%, 5.9% 및 12.8%감소되는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 신재생에너지 사용이 도심 열섬방지에 일정부분 기여하며, 에너지절약 및 환경부하저감에도 효과가 있음을 확인하였다.

## Reference

1. Korea energy management corporation, 「New & Renewable Energy Statistics 2007」, pp.25-27, September 2008.
2. Shimoda, Y., Evaluation of low-level thermal energy flow in the osaka prefectural area, International Journal of Global Energy Issues, Vol. 11, No. 1-4, pp. 178-187, 1998.
3. Sadohara, S. and Ojima, T, Study on the classification of districts in tokyo according to district heating and cooling, Journal of AIJ, No. 364, pp. 86-93, 1986.
4. Mochida, T., New frontiers in architecture for a global environment, Architectural Institute of Japan, No. 1, pp. 128-133, 2002.
5. Udagawa, M. and Kimura, K., The estimation of direct solar radiation from global radiation, Journal of AIJ, No. 267, pp.110-115, 1978.
6. Nimura, T., A study on evaluation of the cross section for the road in urban, MS thesis, Nagoya University, Nagoya, Japan, pp.35-39, 1998.