

# 도시림의 여름철 평균복사온도 저감 추정 연구<sup>†</sup>

안승만\* · 손학기\*\* · 이규석\*\*\* · 이채연\*\*\*\*

\*국토연구원 주택토지연구본부 · \*\*농촌경제연구원 · \*\*\*성균관대학교 조경학과 · \*\*\*\*차세대도시농림융합기상사업단

## A Study of the Urban Tree Canopy Mean Radiant Temperature Mitigation Estimation

An, Seung Man\* · Son, Hak-gi\*\* · Lee, Kyoo-Seock\*\*\* · Yi, Chaeyeon\*\*\*\*

\*Housing and Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements

\*\*Korea Rural Economic Institute

\*\*\*Dept. of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University

\*\*\*\*Weather Information Service Engine Project, Korea Meteorological Administration

### ABSTRACT

This study aimed to estimate and evaluate the thermal mitigation of the urban tree canopy on the summer outdoor environment by quantitative use of mean radiant temperature. This study applied the SOLWEIG model based  $T_{mrt}$  comparison method by using both (1) urban tree canopy presence examples and (2) urban tree canopy absence examples as constructed from airborne LiDAR system based three-dimensional point cloud data. As a result, it was found that an urban tree canopy can provide a decrease in the entire domain averaged daily mean  $T_{mrt}$  about  $5^{\circ}\text{C}$  and that the difference can increase up to  $33^{\circ}\text{C}$  depending both on sun position and site conditions. These results will enhance urban microclimate studies such as indices (e.g., wind speed, humidity, air temperature) and biometeorology (e.g., perceived temperature) and will be used to support forest based public green policy development.

*Key Words: Urban Tree Canopy, Thermal Comfort, Sky View Factor, Three-dimensional Point Cloud, Fish-eye Photography, SOLWEIG Model*

### 국문초록

이 연구는 제안한 평균복사온도의 차감비교기법을 통해 도시림이 여름철 옥외 환경에 미치는 온열완화를 정량적으로 추정하고 평가하는 것을 목적으로 한다. 항공 라이다 측량시스템 기반 3차원 점군자료로부터 도시림이 있는 모의 대상지와 도시림이 없는 모의 대상지 두 사례를 구축하여 SOLWEIG 기반에서 평균복사온도를 산출하고 두 값들을 비교 및 분석하였다. 연구를 통해 도시림 캐노피가 연구지역 전체 일평균  $T_{mrt}$ 를 약  $5^{\circ}\text{C}$  정도 저감하며 태양의 위치와 지면 조건에 따라 시간평균  $T_{mrt}$ 가  $33^{\circ}\text{C}$ 까지 저감될 수 있음을 확인하였다. 결과들은 도시미기후 지표(풍속, 습도, 대기 온도 등) 및 생명기상

<sup>†</sup>: 본 연구는 산림청 임업기술연구개발사업(과제번호: S111315L110100)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

**Corresponding author:** Chaeyeon Yi, Weather Information Service Engine Project, Korea Meteorological Administration, Yongin 449-791, Korea, Tel.: +82-070-4617-7384, E-mail: prpr.chaeyeon@gmail.com

(인지온도 등) 연구들을 향상시키고 더불어 삼림 기반 공공 녹색정책 개발에 활용될 수 있을 것이다.

주제어: 도시림캐노피, 온열 쾌적성, 평균복사온도, SOLWEIG 모델, 천개지수, 3차원점군자료, 어안사진

## I. 서론

도시의 실내·외 온열 쾌적성은 인공적 건축·조경 요소 또는 자연환경에 의한 미기후 조절능력에 따라 달라지며 조경활동은 심미성과 더불어 실내·외의 미기후 환경을 쾌적하게 조성하여 도시민들의 온열 쾌적성에도 중요한 영향을 미친다. 도시림 캐노피는 옥외 환경에서 양적으로 또는 질적으로 상당한 규모의 도시 지표면을 덮고 있으며 증발산, 호흡, 광합성, 태양복사의 여과·투과·흡수·반사, 부유물질의 건성침적(dry deposition) 등 다양한 신진대사활동을 통해 도시민들에게 편안한 일사, 온도, 습도, 바람 조건 등을 조성하는데 기여한다(Akbari, 2002). 대표적 사례로서 무더운 여름 태양열에 데워진 차들 주변을 지나는 도시민들은 피부로 전달되는 복사열로 인해 심한 온열 스트레스와 불쾌감을 경험하는 반면 도시공원 숲 속 그늘 아래의 도시민들 또는 해변의 파라솔 그늘 아래에서 휴식하는 휴양객들은 약한 바람에도 온열 쾌적성(thermal comfort)을 느낀다. 인체의 체온조절과 온열 쾌적성에 영향을 미치는 물리요인들(physical factors)로는 기온(air temperature), 평균복사온도(mean radiant temperature,  $T_{mrt}$ ), 풍속(air velocity), 습도(humidity) 등이 잘 알려져 있으며 이러한 변수들은 다양한 생태계 순환과 생명활동에도 영향을 미친다. 이 중 도시림 캐노피 등에 의한 평균복사온도 조절 기능은 태양일사로부터의 온열 쾌적성을 잘 설명하는 중요한 변수이다. 2050년 세계인구의 90%는 도시에 거주할 것으로 예측되는 만큼 도시환경의 질과 도시림의 공익적 역할에 대한 정량적 기술과 체계적 관리능력은 보다 중요해질 것이다.

도시림의 정의에 대한 근거는 분명치 않으나 보통 도시 행정구역 내의 산림, 녹지, 공원, 및 가로수 등을 포함하는 것으로 정의하고 있다(NIFoS, 2002). 남한의 도시행정구역 내에서 집계되는 도시림의 면적은 1993년 4,280km<sup>2</sup>이었으나 1998년 24,340km<sup>2</sup>로 증가하여 전체 산림의 37.8%를 차지하고 있다(KREL, 2001). 도시림이 지속가능하고 도시민의 활동들과 효과적으로 어우러지기 위해서는 체계적인 도시림을 관리 정책이 개발되어야 하며 이를 위해서는 상세한 도시림 정보와 기능에 대한 이해가 필요하다. 지금까지 도시림의 공익적 기능들과 가치들(기후완화, 대기정화, 소음감소, 생물서식지로서의 생태적 기능 등)을 기술하기 위한 연구들이 수행되었었다. 그러나 관심범위의 공간자료 구축 및 적용 가능한 모델링 기술의 제약으로 활용이 불편했기 때문에 주로 통계적인 평가 및 분석이

수행되었고 상세한 도시림의 공익적 미기후 조절기능에 대한 연구는 부족하였다. 그러나 근래에 디지털 정보화 및 응용기술 빠르게 발전하면서 입체적인 도시 공간정보 취득 기술과 정교한 도시미기후 모델링 기술이 동시에 빠르게 발전하고 있다. 그 결과 연구 제약들이 크게 해소되어 모델링을 통해 도시림의 공익적 기능을 공간적으로 상세하게 분석 및 평가할 수 있는 기반이 조성되고 있다. 특히 미기후 모델링 및 관측의 상호보완 체계를 통해서 도시림이 도시미기후에 미치는 영향들의 정량적 설명능력에 대한 사회적 관심과 신뢰성이 높아지는 추세이다. 이에 본 연구는 평균복사온도 분포를 통해 도시림 캐노피가 주변 옥외환경에 미치는 온열환경 조절 효과를 정량적으로 기술하는 방법을 제안하고 산출된 결과의 평가를 통해 모델의 개선 방향과 활용 방안을 제시하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 평균복사온도(mean radiant temperature, $T_{mrt}$ )

평균복사온도(mean radiant temperature,  $T_{mrt}$ )는 인체와 복사를 통해 열을 교환하는 주변 표면의 평균온도로 인체를 둘러싸고 있는 불균일한 주변 표면의 단파 및 장파 속(flux)의 총합을 통해 기술된다(ASHRAE, 2001). 초기에는 온열 스트레스가 심한 산업시설의 실내에서의 인체와의 열 교환 과정 및 인체에 미치는 온열 스트레스 위험성 평가에 활용되었으나 근래에는 실외에서의 온열 쾌적성 설명 및 평가 등 연구범위가 확장되고 있다(Figure 1 참조). SOLWEIG(the solar and longwave environmental irradiance geometry)는 3차원 복사 속(flux), 그림자 패턴 변화, 그로 인한 평균복사온도의 시간적-공간적 변화를 수치적으로 모의하기 위해 스웨덴 Gothenburg 대학에서 개발한 모델이다(Lindberg and Grimmond, 2011).

$T_{mrt}$ 의 계산을 위해서는 3차원의 장파(longwave) 및 단파(shortwave) 복사 영역을 모두 합한 평균복사속밀도(mean radiant flux density,  $S_{str}$ ) 요인들 및 개인별 흡수요인들이 필요하다(VDI, 1994).

$$S_{str} = \xi_k \cdot \sum_{i=1}^6 K_i \cdot F_i + \epsilon_p \cdot \sum_{i=1}^6 L_i \cdot F_i \quad (\text{식 1})$$

식 1에서  $K_i$ 와  $L_i$ 는 6방향(동/서/남/북/상/하) 각각에서의

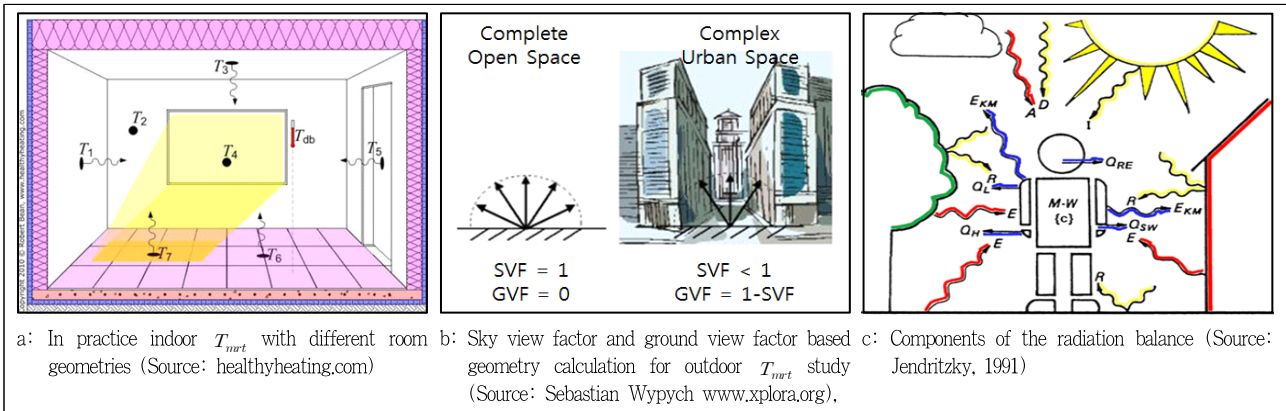


Figure 1. Indoor and outdoor  $T_{mrt}$  estimation model concept for human metabolism study

장파와 단파의 복사속(radiation flux)이며  $F_i$ 는 사람과 주위를 둘러싸고 있는 표면들의 각 요인들(angular factors)로 동/서/남/북 방향의 복사속에서는 0.22로 상/하 방향의 복사속에는 0.06을 부여하고 있다.  $\xi_k$ 는 단파흡수계수(0.7),  $\epsilon_p$ 는 인체의 흡수율(0.97)이다.  $S_{str}$ 을 구하면 식 2의 Stefan-Boltzmann 법칙을 통해  $T_{mrt}$ 가 계산된다.

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{(S_{str}/(\epsilon_p \cdot \sigma))} + 273.15 \quad (\text{식 2})$$

여기서  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )이다. 단파복사속은 직달일사, 산란일사, 전천일사를 입력 자료로 사용한다. 도시의 특정 위치에 유입되는 단파복사( $K_{\downarrow ij}$ )는 식 3을 통해 계산된다.

$$K_{\downarrow ij} = K_{dir} \times Sh_{ij} \times \sin\eta + K_{diff} \times \Psi_{ij} + G \times \alpha \times (1 - \Psi_{ij}) \times \sin\eta \quad (\text{식 3})$$

$$\Psi_{ij} = \left( \frac{1 - \cos\theta}{2} \right) = (1 - (\Psi_{wall1} + \Psi_{wall2})) \quad (\text{식 3a})$$

여기서  $K_{dir}$ ,  $K_{diff}$ ,  $G$ 는 각각 직달일사, 산란일사, 전천일사이다.  $Sh_{ij}$ 는 행렬  $i \times j$  위치에서 그림자의 유(0) 무(1) 판정을 위한 Boolean 값이며  $\eta$ 는 태양고도(지평면과 태양이 이루는 각)이다. 식 3a의  $\Psi_{ij}$ 는 행렬  $i \times j$  위치에서의 천개지수(sky view factor, SVF)로 Ratti and Richens(1999)에 의해 개발된 래스터 기반 계산방법을 적용하고 있다.

$\alpha$ 는 둘러싸고 있는 모든 표면의 평균 알베도(0.15)이다. 식 3은 직달일사 및 산란일사 속(flux)과 지표에 의한 반사일사(reflected radiation)를 단순화하여 기술하고 있다. 지표에 도달한 직달일사 중 표면에 의해 반사되어 밖으로 빠져나가는 양

은 식 4를 통해 추정된다.

$$K_{\uparrow ij} = K_{\downarrow ij} \times \alpha \quad (\text{식 4})$$

4방향에서 들어오는 단파복사( $K_{\rightarrow ij}$ )는 식 3을 변형하여 동쪽을 기준으로 태양방위각( $\theta$ )의 분포에 따라 다음과 같이 추정하여 계산된다(식 5, 6).

태양이 동쪽과 서쪽 사이에 위치하고 있을 때 ( $\theta > 0$ 이고  $\theta < 180$ ),

$$K_{\rightarrow ij} = K_{dir} \times Sh_{ij} \times \cos\eta \times \sin(\theta) + K_{diff} \times \Psi_{ij} + G \times \alpha \times (1 - \Psi_{ij}) \times \sin\eta \quad (\text{식 5})$$

태양이 그 밖에 위치하고 있을 때,

$$K_{\rightarrow ij} = K_{diff} \times \Psi_{ij} + G \times \alpha \times (1 - \Psi_{ij}) \times \sin\eta \quad (\text{식 6})$$

4방향에서 들어오는 각은 하향 입사각과  $90^\circ$  기울어져 있기 때문에  $\cos\eta$ 가 되며  $\sin\theta$ 를 통해 각 방향에서 들어오는 차감된 입사량을 추정한다(각 방향에 직각일 때 차감계수는 1).

행렬  $i \times j$  위치에 입사되는 장파복사( $L_{\downarrow ij}$ )는 입력된 기온( $T_a$ )과 상대습도(RH) 정보로부터 Jonsson *et al.*(2006)이 사용한 방법 식 7을 통해 계산된다.

$$L_{\downarrow ij} = \Psi_{ij} \epsilon_{sky} \sigma T_a^4 + (1 - \Psi_{ij}) \epsilon_w \sigma T_s^4 + (1 - \Psi_{ij})(1 - \epsilon_w) \epsilon_{sky} \sigma T_a^4 \quad (\text{식 7})$$

여기서  $\epsilon_{sky}$ 와  $\epsilon_w$ 는 하늘과 벽으로부터의 장파 복사,  $T_s$ 는 건물과 벽과 지면의 평균 표면온도( $K$ )로 하늘로부터 들어오는

장파복사, 벽으로부터 들어오는 장파복사, 반사된 하늘로부터의 장파복사를 설명한다. 쾌청조건에서  $\epsilon_{sky}$ 는 Prata(1996)가 사용한 식 8으로부터  $25 \text{ Wm}^{-2}$ 를 차감하여 추정한다.

$$\epsilon_{sky} = 1 - \left( 1 + 46.5 \cdot \frac{e_a}{T_a} \right) \times \exp \left( - \left( 1.2 + 3.0 \times 46.5 \times \frac{e_a}{T_a} \right)^{0.5} \right) \quad (\text{식 } 8)$$

하늘에 구름이 있을 경우 하늘로부터의 총 유효방출 장파복사가 증가하므로 입사되는 장파복사는 식 9와 같이 변형된다.

$$L_{\downarrow ij} = L_{\downarrow ij_c} \cdot (1 - c) + c \cdot \sigma T_a^4 \quad (\text{식 } 9)$$

여기서  $c$ 는 하늘의 운량(fractional cloud cover)으로 ( $0 \leq c \leq 1$ ) 식 10을 통해 계산된다.

$$c = 1 - \frac{S_{\downarrow}}{S_{\downarrow_c}} \quad (\text{식 } 10)$$

여기서  $S_{\downarrow}/S_{\downarrow_c}$ 는 쾌청지수(clearness index, CI)처럼 이상적인 쾌청상태의 태양복사와 관측된 태양복사의 비율(ratio)이다. 행렬  $ij$  위치에서 방출되는 장파복사( $L_{\uparrow ij}$ )는 Stefan-Boltzmann 법칙을 적용하여 계산한다. 태양에 노출된 표면은 지표면 온도( $T_s$ ) 상승으로 인해 많은 장파를 방출하기 때문에 행렬  $ij$  위치의 그림자 유무를 고려하여 식 11을 통해 계산된다.

$$L_{\uparrow ij} = \epsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_a + Sh_{ij} \cdot (T_s - T_a))^4 \quad (\text{식 } 11)$$

여기서  $\epsilon_g$ 는 지면으로부터의 장파복사이다. 음영지역에서의 온도는  $T_a$ 로 한다. 양지에서의 표면온도는 쾌청조건에서 태양고도와  $T_s - T_a$ (K) 최대편차( $T_{diffmax}$ )와의 선형관계를 기반으로 추정되며, 이는 Bogren *et al.*(2000)이 발견한 쾌청조건에서 양지와 음지의 지표온도와 최대태양고도의 선형관계에 근거한다. Lindberg *et al.*(2008)은  $T_{diffmax}$ 를 식 12와 같이 매개변수화 하였다.

$$T_{diffmax} = 0.37 \cdot \eta_{max} - 3.41 \quad (\text{식 } 12)$$

$T_{diffmax}$ 는 최대태양고도(약 12시)에 도달 후 2시간 이후에 나타나는 것으로 간주된다. 쾌청조건에서  $T_s$ 는 정현파의 함수

로써 기술되며 진폭은 식 12의 선형관계로부터 얻어지고 1년 중 특정한 날의 일조기간은 그 날짜의 일출 시간과 오후 2시의 관계에 의해 결정된다. 해뜨기 전 초기  $T_s$ 는 평야에서 태양고도가 0일 때의 이론적 편차를 고려하여  $T_a$ 보다 3.4 K 낮게 설정된다. 쾌청조건이 아닐 때는  $T_{diffmax}$ 에 CI를 곱한다. 만약 행렬  $ij$  위치에서 일조 조건이 양지에서 음지로 바뀌면, 지표의 온열 속성들과 점진적인 기온감소를 반영하기 위해 새로운 지표온도를  $T_a$ 와 일치하는 대신 양지조건에서 계산한  $T_s$ 의 75%를 새로운 값으로 적용한다. 반대로 음지에서 양지로 바뀌는 경우에도 같은 방법으로 점진적 온도증가를 적용한다. 4방향에서의 장파복사를 추정함에 있어서도 동일한 수식이 적용된다. 따라서 현재의 격자기반 모델은 건물의 형상의 차이로 인한 방향을 고려하지 않고 있으며  $\psi$ 는 건물 입면의 방향성을 고려하지 않는 인자로서 사용한다. SOLWEIG는 식 13 a~e에서 제시하는 다섯 분야의 장파 복사속을 합하여 4방향에서의 총 장파복사의 속(flux)을 계산한다.

$$L_{\rightarrow sky} = L_{\downarrow} \cdot \frac{w_{sky}}{w_{total}} \cdot 0.5 \quad (\text{식 } 13a)$$

$$L_{\rightarrow REFLECTED} = (L_{\downarrow} + L_{\uparrow}) \cdot (1 - \epsilon_w) \cdot \frac{w_{sky}}{w_{total}} \cdot 0.5 \quad (\text{식 } 13b)$$

$$L_{\rightarrow WALLshadow} = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 \cdot \frac{w_{sky}}{w_{total}} \cdot f_{sh} \cdot 0.5 \quad (\text{식 } 13c)$$

$$L_{\rightarrow WALLsun} = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4 \cdot \frac{w_{wall}}{w_{total}} \cdot (1 - f_{sh} \cdot \cos \eta_{sun}) \cdot 0.5 \quad (\text{식 } 13d)$$

$$L_{\rightarrow GROUND} = L_{\uparrow} \cdot 0.5 \quad (\text{식 } 13e)$$

여기서,  $w$ 는 하늘이나 벽들로부터 입사되는 복사량의 각 가중 인자들(angular weighting factors)로써 4방향에 대해서 반구의 절반만을 고려하기 때문에 모든 항들에 0.5를 곱한다. 가중치를 구하기 위해 건물이나 하늘과 같이 서로 다른 각 요소들의 면적을 간단한 반구 기하를 통해 계산한다. 가상의 측방 시설들이 직각방향 요소들보다 많은 복사를 받기 때문에 이 면적들은 함께 가중 적용된다. 건물 높이에 기초한 평균 각( $\beta_{\psi}$ )은  $\psi = \cos^2 \beta_{\psi}$  관계식에 의해 계산된다. Holmer(1992)는 동일한 온도와 방출을 가정할 때 천개지수( $\psi$ )가 열린 평지와 비교해 장파복사의 속을 추정하는 좋은 근사법이라 하였다.  $\psi$ 와 반구에서 공동 가중되어 합산된 면적과의 상관관계는 식 14와 같이 5차 다항식(결정계수 0.999)을 통해 적용된다.

$$w_{sky} = 26.16 \cdot \Psi^5 - 53.29 \cdot \Psi^4 - 39.33 \cdot \Psi^3 - 9.71 \cdot \Psi^2 - 1.98 \cdot \Psi - 0.05 \quad (\text{식 } 14)$$

결과적으로 개개의  $w$  값들을 도출하기 위해서  $\Psi$ 가 필요하며  $\Psi=1$ 일 때  $w_{total}$ 은 4.417이고  $w_{wall}$ 은  $w_{total}$ 과  $w_{sky}$ 와의 차이이다. 행렬  $i \times j$  위치에서 음지 벽면에서의 비(fraction,  $f_{sh}$ )는 태양의 천정각( $90-\eta$ )과  $\beta_\Psi$ 에 의해 산출된 건물들의 높이에 기초한 평균 각을 이용해 계산된다(식 13c 및 식 13d). 음지 벽면의 비율( $f_{sh}$ )은 동일 높이의 건물들에 의해 둘러싸인 가상의 원형 마당을 통해 계산된다. 원통의 썸기과 같은 기하학적 속성들에  $\eta$ 과  $\beta_\Psi$ 를 적용할 수 있다. 만약 양지의 벽면이 높은 비율로 노출되면  $f_{sh}$ 가 재계산되어 모수가 4방향에 동일하게 된다.  $f_{sh}$ 는 0.5(모든 벽면의 절반이 음지)에서 1(모든 건물의 벽면들이 음지) 사이에 분포한다. 식 13d의  $\cos\theta$  요인은 장파복사 요소로부터 평균 각을 구는데 사용된다.  $\eta_{sun}$ 은  $\beta_\Psi$ 와  $f_{sh}$ 에 삼각함수를 적용하여 계산된다.

## 2. 연구방법 및 사용자료

본 연구에서는 (1) 도시림이 있는 모의 대상지(현재 분포하는 도시림)와 (2) 도시림이 없는 모의 대상지(도시림 제거)를

대상으로 SOLWEIG 모델로부터  $T_{mrt}$ 를 산출해 비교 및 고찰하였다. 연구지역은 서울시 광진구 건국대학교 일대(Figure 4 참조)로 대상지의 도시림 면적이 넓고 분포 패턴이 다양하여 도시림 캐노피에 의한 온열 저감 효과를 분석 및 평가하는데 적합하다고 판단하였다. 사용된 S/W는 SOLWEIG v.2013a 및 An *et al.*(2014)에 의해 개발된 3DPC SVF Calculator이며, SOLWEIG 모델링을 위한 입력자료는 항공라이다 자료로부터 지형, 건물, 도시림캐노피 래스터모델을 1m×1m 해상도로 작성하였다. 이로부터 도시림이 있는 현재의 환경과 도시림을 제거한 가상의 옥외환경 모의 대상지를 구성하였다. 두 모의 대상지의 모델링을 통해 산출된  $T_{mrt}$  공간분포와 수치들을 비교하여 여름철 도시림이 외부환경에 미치는 효과를 정량적으로 기술 및 평가하였다(Figure 2 참조).

항공라이다 자료로부터 지면분류 과정을 거쳐 산출한 3차원 점군분류 결과를 래스터로 변환하여 SOLWEIG 입력 자료인 DEM(digital elevation model), 건물고(builing height), 수고(tree height) 래스터 자료를 작성하였으며 입력자료 포맷은 ASCII이다. 항공라이다 자료는 2008년 9월 6일 지면으로부터 약 700m 고도에서 Leica Airborne Laser Scanner 60에 의해 취득되었으며(12bit, 100kHz, ±50°) 점밀도는 2.5~10 pt/m<sup>2</sup>이다. SOLWEIG 모델링에 적용된 기상자료는 기상청에서 운영

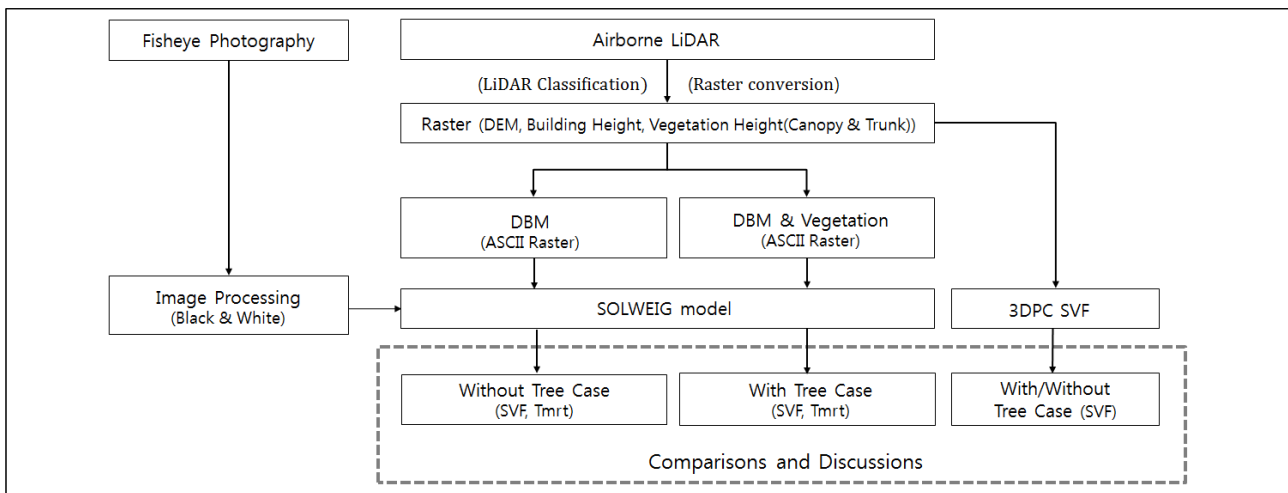


Figure 2. Study work flow

Table 1. Description of the used dataset

Used data	Used attributes	Data source
Airborne LiDAR	Three dimensional coordinates(x, y, z)	Ministry of Government Administration and Home Affairs, Korea
Fisheye photograph	Sky area and non-sky area	-
Digital building model	Ground and building elevation(Raster, ASCII)	Airborne LiDAR
Vegetation(tree) model	Tree height, trunk height(Raster, ASCII)	Airborne LiDAR
Meteorological data	Air temperature, relative humidity, global solar radiation	Korea Meteorological Administration

하는 108번 자동관측지점에서 2012년 8월 5일 관측된 시간별 데이터로 시간, 대기온도, 상대습도, 전천일사 정보를 포함한다(Table 1 참조). 일출/일몰 계산에 따르면 서울에서의 일출 시간은 5시 39분, 일몰시간은 7시 36분으로 추정된다. 적용일은 2012년 폭염 및 열대야 발생일로 Figure 3에서 보듯이 일반적인 여름철 하루 동안의 대기온도, 상대습도, 전천일사 변화를 보여주고 있다. 그러나 오후 1시 경부터 3시 경까지 구름으로 인한 일사량 감소가 있었다. 기상자료와 ASCII 형태로 전환된 모의 대상지 별 입력자료(도시림이 있는 모의 대상지와 도시림이 없는 모의 대상지)를 SOLWEIG 모델에 입력(Table 2 참조)하고 산출된 일평균 및 시간별  $T_{mrt}$  자료를 이용하여 도시림 캐노피의 효과를 분석하였다. 더불어 계산과정에서 산출되는 천개지수를 대상으로 SOLWEIG와 3DPC SVF Calculator 산출 결과를 비교 및 평가하였다. 어안렌즈 영상은 Canon EOS 5D Mark III카메라에 SIGMA 8mm 구경 어안렌즈(F 3.5)로 2013년 7월 29일 촬영된 자료를 이용하였

다. 촬영은 Manfrotto 190XPROB 삼각대가 지면으로부터 가장 근접할 수 있는 약 70cm 높이에서 나침반과 STANLEY laser line level을 이용하여 자북방향과 수평을 유지한 상태에서 수행되었다.

수관밀도와 같은 도시림 캐노피의 상태는 시간에 따라 변화한다. 따라서 기상관측 시기, 도시림 캐노피의 변화는  $T_{mrt}$  해석에 영향을 미칠 수 있으나 본 연구에서는 도시림 캐노피에는 큰 변화가 없을 것을 전제로 두고 캐노피가 없을 때의  $T_{mrt}$  및 관련 변수들과 캐노피가 있을 때의  $T_{mrt}$  및 관련 변수들에 대하여 건물과 수변 지역을 제외한 공간을 대상으로 일평균과 시간별 변화를 비교하였으며 도시림 캐노피의 잠재적 온열환경 조절 기능을 도메인 전체에 대한 일평균  $T_{mrt}$ , 지점 별 일평균  $T_{mrt}$ , 시간별 지점  $T_{mrt}$ 를 통해 수치적으로 기술 및 평가하였다. 더불어 천개지수를 대상으로 각 계산 방법의 특성들과 이에 따른 영향들을 함께 고찰하였다.

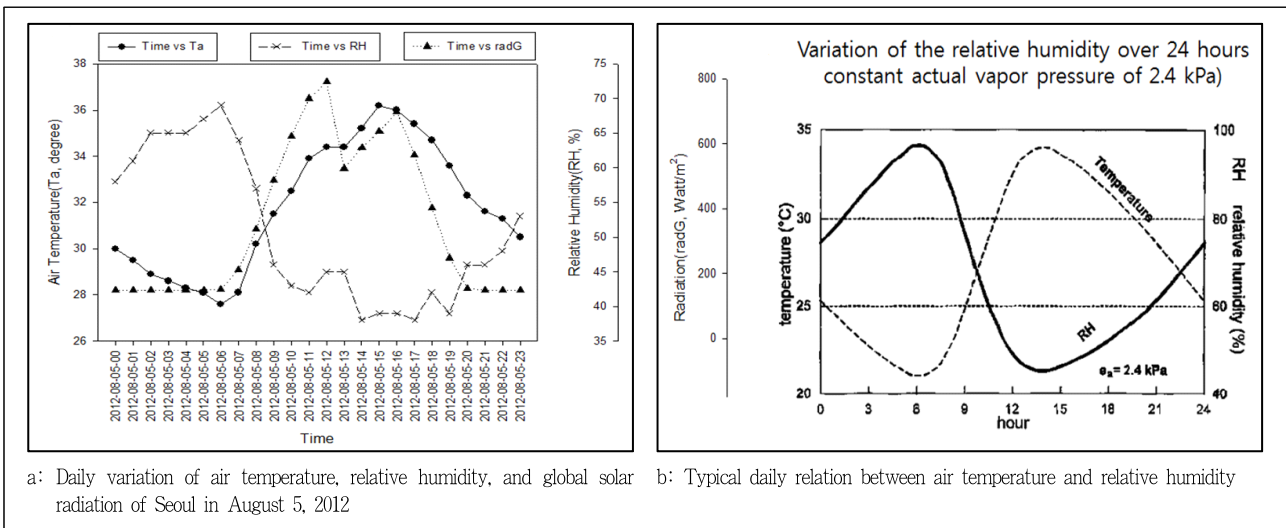


Figure 3. Meteorological data  
Source: FAO corporate document repository

Table 2. Selected input parameters for SOLWEIG simulations

Category	Used input during simulations
Geographic location Longitude / Latitude / Altitude(above see level)	127.0 degree / 37.5 degree / 10m
Urban parameters Albedo / Emissivity(walls) / Emissivity(ground)	0.15 / 0.90 / 0.95
Personal data(PET) Height / Weight / Sex / Age / Activity / Clothing	180 cm / 75 kg / male / 35 yr / 80 W / 0.9 clo
Personal data( $T_{mrt}$ ) Absorption(shortwave) / Absorption(longwave) / Posture	0.70 / 0.90 / Standing
Meteorological data( $T_{mrt}$ ) Air temp, RH, Global soar radiation / Wind speed	Use data file (ASCII table)*

\* Applied meteorological data (Figure 3a) in SOLWEIG



### III. 결과

#### 1. 연구지역 도시림 공간 분포

연구지역은 약 9ha 면적의 도시림에 학교 건물과 온실 등 일부 시설들이 조성된 지역으로 주변 지형은 대부분 평탄한 지형이나 도시림은 작은 언덕 위에 위치하고 있고 참나무와 리기다소나무, 기타 조경 수목이 분포하고 있어 도시림을 포함한 도시의 복잡성을 잘 설명하는 공간이다. 또한 어안렌즈 관측과 3차원 점군자료를 이용한 천개지수( $\psi$ ) 산출 개발 및 검증이 수행된 지역으로 자동 대기/기상 관측망이 운영되고 있는 지역이다(An *et al.*, 2014; Woo *et al.*, 2011). 모델 적용을 위하여 산출된 1m 해상도의 DEM(digital elevation model), 건물고(building height), 수관고(canopy height) 래스터 자료로부터 추정되는 영역 내 건물 면적은 56,154m<sup>2</sup>(전체 면적의 22%), 건물 체적은 214,759m<sup>3</sup>, 도시림 면적은 87,402m<sup>2</sup>(전체 면적의 35%), 도시림 체적은 738,875m<sup>3</sup>이다. 도시림의 체적은 지면에서 도시림 수관높이(canopy height)까지의 체적으로부터 지면에서 줄기

높이(trunk height)까지의 수관하부 체적(0.3× 적용)을 차감하여 계산하였다(Figure 4 참조). 우측 하단의 일감호로부터 도시림이 분포하는 언덕 상부와의 높이차는 약 15m이다. 건물의 평균높이는 약 24m 정도로 공간적으로 산포되고 수직적 편차(Std dev: 10.5m)가 큰 반면, 도시림의 평균높이는 약 8m 정도이나 공간적으로 상호 연결되고 수직적 편차(Std dev: 4.2m)가 작았다(Table 3 참조).

2012년 8월 5일을 대상기간으로 도시림이 없는 경우와 도시림이 있는 경우를 일평균  $T_{mrt}$ 를 통해 비교한 결과 도시림이

Table 3. Study area surface geometry statistics

Input raster type	Min. (m)	Max. (m)	Mean (m)	Std dev. (m)
Digital elevation model(Bare earth)	7.92	33.96	19.89	5.16
Building height	13.87	84.07	37.66	12.05
Digital building model	7.92	84.07	23.71	10.45
Tree canopy height(Over 2m)	2.00	28.98	8.45	4.22
Trunk height	0.60	8.69	2.54	1.27

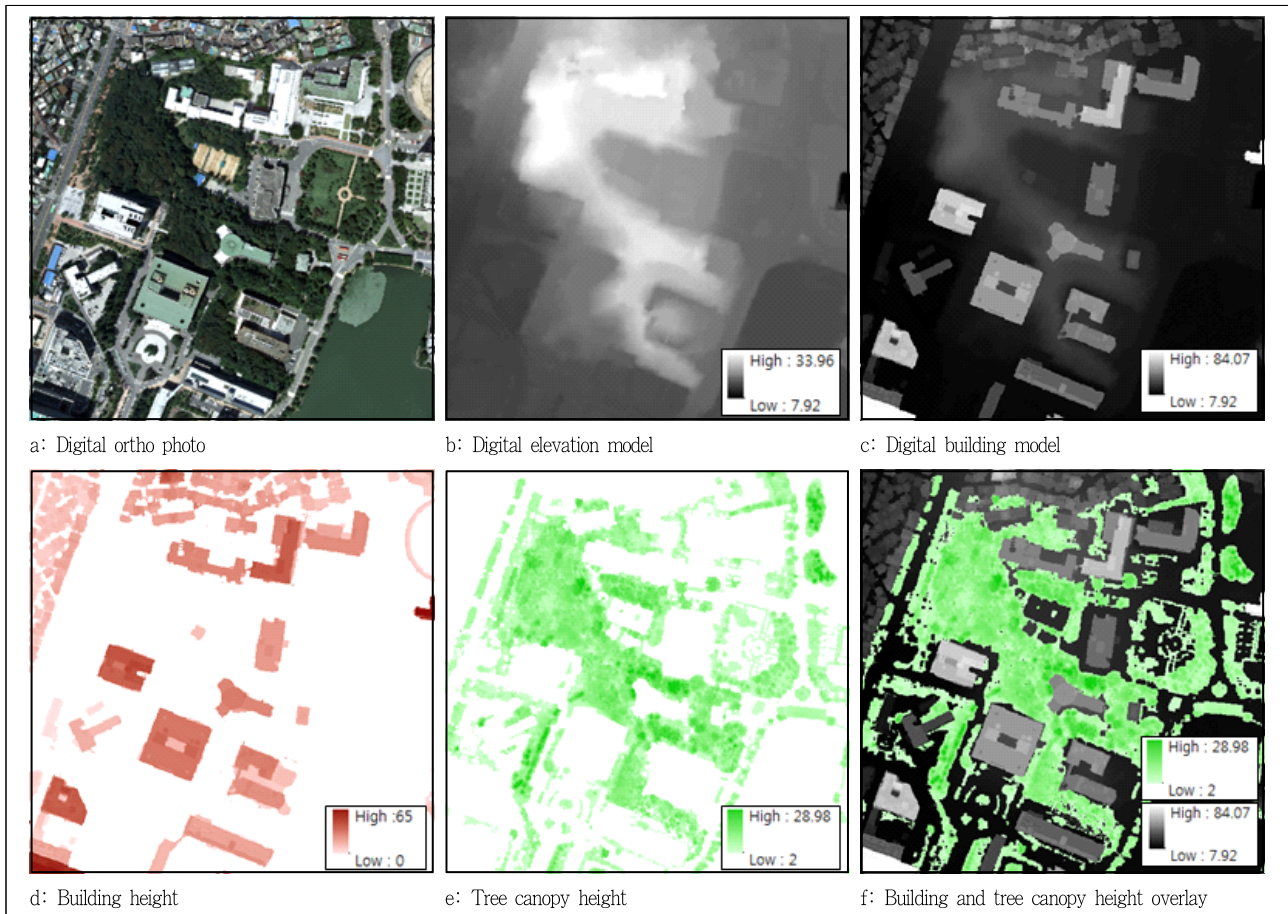


Figure 4. Study site(500m×500m) and developed input surface geometry raster(1m resolution) dataset derived from the airborne LIDAR classifications(digital elevation model, digital building model, building height, tree canopy height)

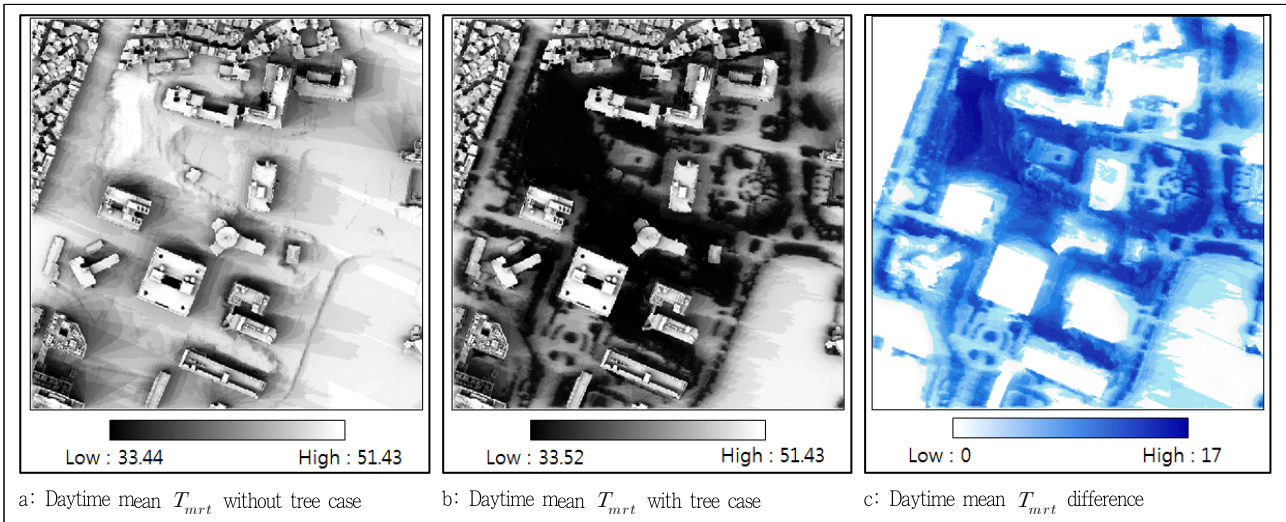


Figure 5. Difference of daytime mean  $T_{mrt}$  between without tree case (a) and with tree case (b)

있음으로 인한 뚜렷한 온열 저감 효과가 나타났다(Figure 5 참조). 도시림이 없는 경우 건물 내부의 중정이나 건물들 사이의 공간을 제외한 대부분의 지역에서 태양복사로 인한 일평균  $T_{mrt}$ 가 높았으며 특히 건물의 옥상과 남쪽을 향하는 언덕의 사면에서 일평균  $T_{mrt}$  수치가 크게 나타났다. 도시림이 있는 경우 일평균  $T_{mrt}$ 의 최고온도와 최저온도가 크게 바뀌지 않았지만 도시림 캐노피에 의한 태양복사 차단 효과로 인해 도시림이 없는 경우보다 캐노피 하부 지표면에서는 일평균  $T_{mrt}$  수치가 약 10°C 정도 저감되었고 특히 남쪽을 향하는 언덕의 사면에서 일평균  $T_{mrt}$  저감 효과가 크게 나타났다. SOLWEIG 모델 적용 시 대상지 전체에서의 도시림 캐노피로 인한 일평균  $T_{mrt}$ 의 평균 저감 효과는 약 5.3°C 정도, 도시림 캐노피와 지형 특성이 적절히 조합될 때에는 특정 장소에서 최대 약 17°C까지 일평균  $T_{mrt}$  차이가 발생하는 것으로 나타났으며(Table 4 참조) 이는 Lindberg and Grimmond(2011)의 SOLWEIG 모델 기반 식생모델의 검증에서 나타나는  $T_{mrt}$  저감효과와 근접한 범위 내에 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 기온은 시간적-공간적 변동성이 낮아 한여름의 도심과 산천 계곡의 비교와 같이 뚜렷한 수변 환경 차이가 있더라도 10°C 정도의 기온 차이가 나타나기 어렵지만  $T_{mrt}$ 의 경우 단파(shortwave) 차단으로

인한 20°C 이상의 시간평균  $T_{mrt}$  차이가 빈번하게 관측되고 있다(Lindberg and Grimmond, 2011).

대상지 전체에 대한 시간별  $T_{mrt}$  평균 변동에서도 도시림이 없는 경우와 도시림이 있는 경우의 차이가 뚜렷하게 나타났다(Figure 6 참조). 태양복사가 없는 야간의 경우 식생에 의한 지표복사(장파복사) 차단이 열평형 기작을 주도함으로 인해서 도시림이 있는 경우의 시간별  $T_{mrt}$  평균이 도시림이 없는 경우의 시간별  $T_{mrt}$  평균보다 3~4°C 높게 나타났다. 일출 이후에는 식생에 의한 태양복사(단파복사) 차단이 열평형 기작을 주도함으로 인해서 도시림이 있는 경우의 시간별  $T_{mrt}$  평균이 도시림이 없는 경우의 시간별  $T_{mrt}$  평균보다 점차 낮아져서 최대 약 10°C 정도까지 일사차단으로 인한 저감 효과가 나타났으나 정오 경 발생한 흐린 날씨로 인해 2시 경의 최대 차이를 볼 수는 없었다.

Table 4. Study area daytime mean  $T_{mrt}$  between without tree case (a) and with tree case (b)

Daytime mean $T_{mrt}$ _Type (2012.08.05, Standing)	Min. (°C)	Max. (°C)	Mean (°C)	Std dev. (°C)
$T_{mrt}$ without_Tree	33.53	51.43	45.71	4.15
$T_{mrt}$ with_Tree	33.44	51.43	40.45	5.60
$T_{mrt}$ difference	-0.35	17.31	5.26	5.17

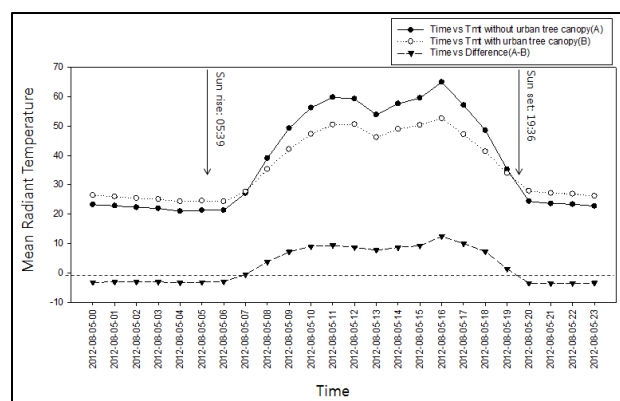


Figure 6. Daily variation of  $T_{mrt}$  (without tree canopy case, and with three canopy case) and estimated  $T_{mrt}$  decrease due to the urban tree canopy



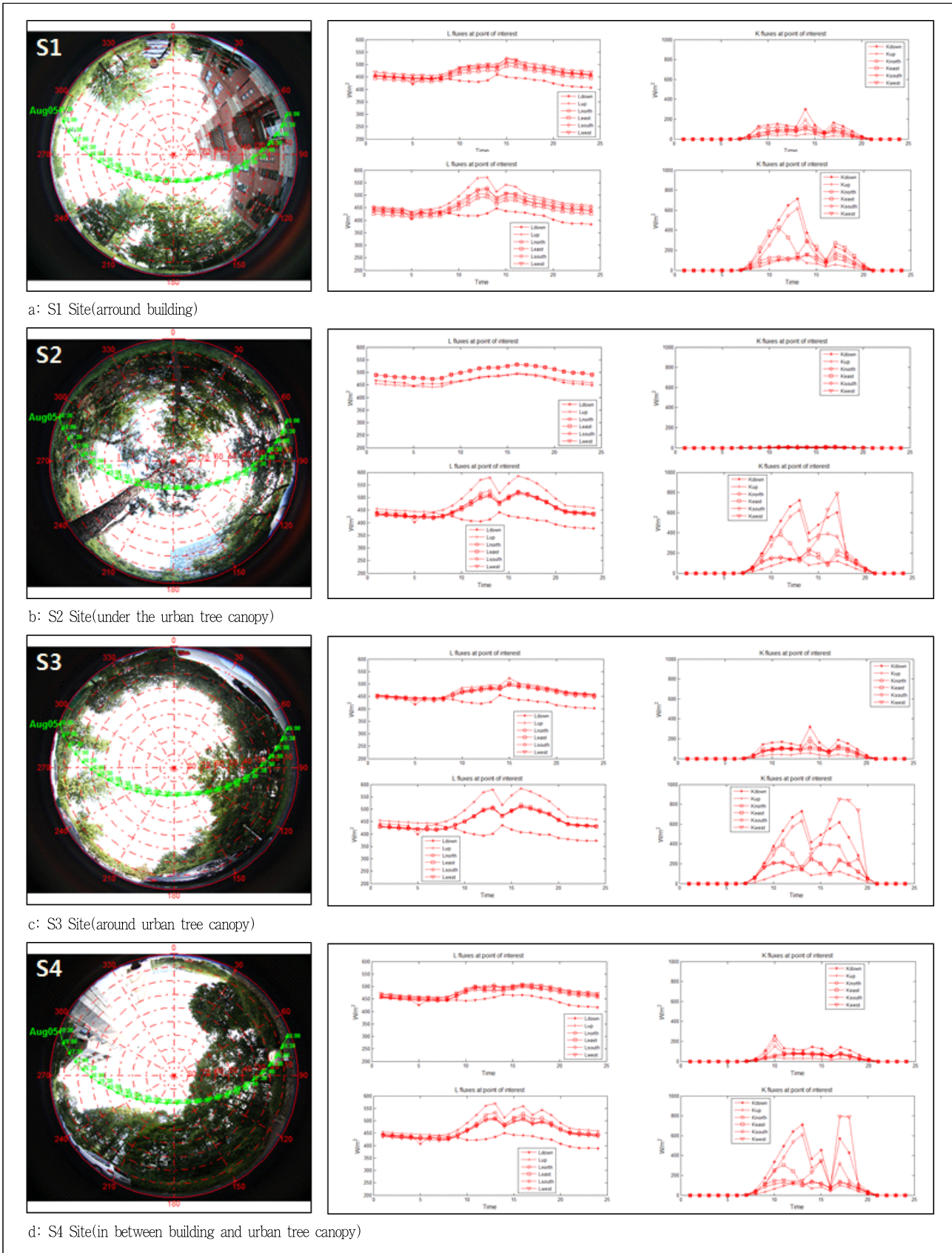


Figure 7. Daily variation of solar path on fish-eye photography, longwave, shortwave, and  $T_{mrt}$  per site locational condition

Figure 7은 지표의 피복 특성에 따라  $T_{mrt}$ 의 시간적 공간적 변화 양상을 상세하게 분석하기 위하여 도메인 내부에서 선정된 네 지점들의 위치, 어안사진 기반 시간별 태양계적, SVF 산정 및 일사확인을 위한 하늘영역 추출(B/W), 항공라이다 3차원 점군데이터로부터 점형 및 격자형으로 투영한 천구의 형태를 보여주고 있다. 건국대학교 박물관 앞 지점(S1)은 건물 영역과 도시림 캐노피 영역이 뚜렷하게 구분되는 지점으로, 도시

림 내부 지점(S2)은 건물이 없고 도시림 캐노피가 하늘을 덮고 있는 지점으로, 테니스장 인근 주차장 지점(S3)은 주변의 도시림과 건물들에 둘러싸여 있는 지점으로, 행정관과 도시림 사이 지점(S4)은 가까운 주변에서 지형, 건물, 도시림 캐노피의 영향을 함께 받는 지점으로 이 네 지점은 건물 및 도시림에 의한 일사 차단에 따른 시간별  $T_{mrt}$  분포가 다르게 나타나고 있다 (Figure 7, 8 참조).

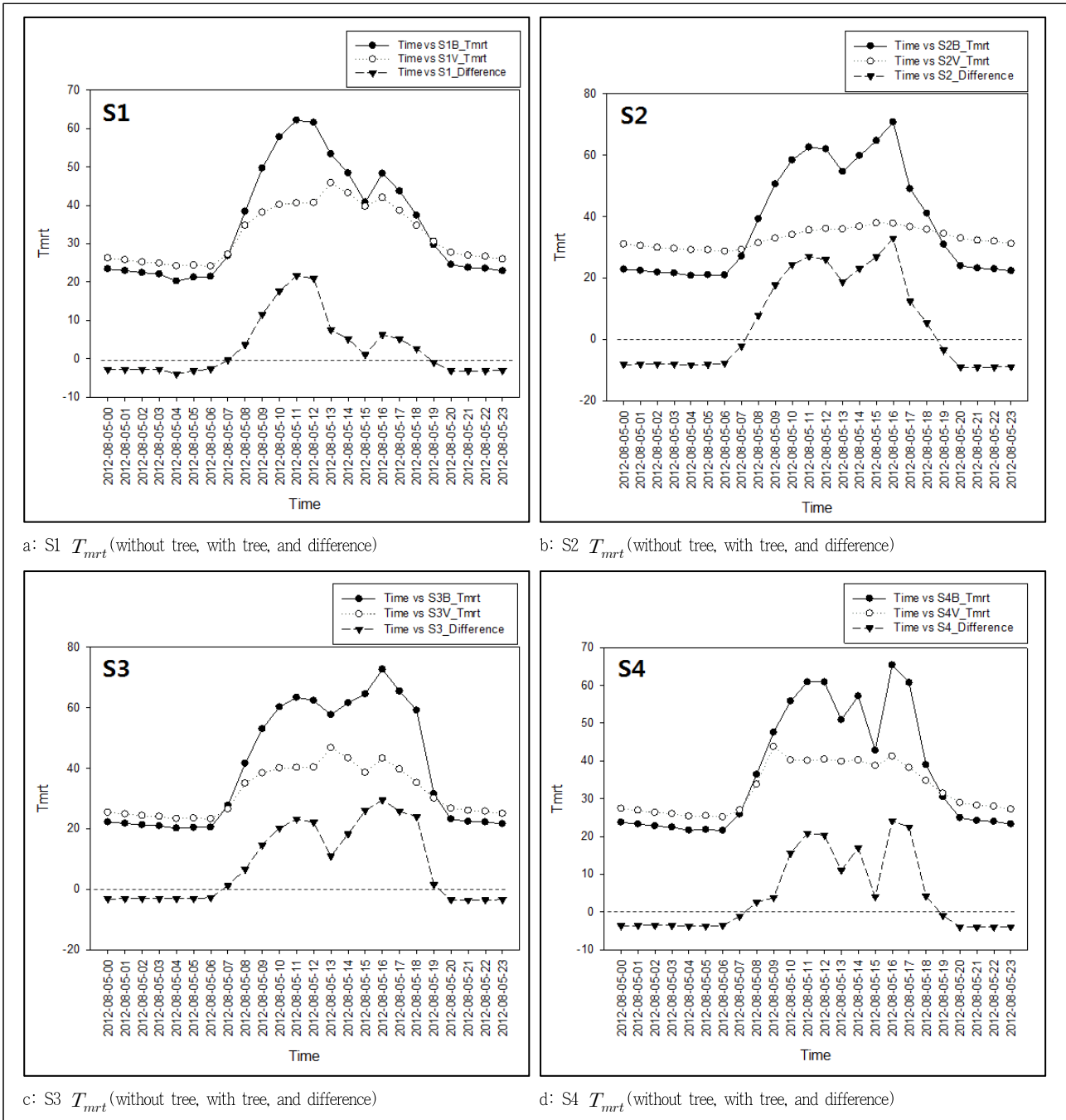


Figure 8. Daily variation of  $T_{mrt}$  of four selected points(S1, S2, S3, S4) and their estimated  $T_{mrt}$  decrease due to the urban tree canopy

Figure 8과 Table 5는 선정된 네 지점들을 대상으로 도시림을 포함하지 않고 구한  $T_{mrt}$ 와 도시림을 포함하여 구한  $T_{mrt}$ 를 SOLWEIG 모델로부터 산출하고 그 차이를 비교한 결과로 도시림에 의해서 주간 일사 차단에 따른  $T_{mrt}$  감소가 발생하는 시간을 확인할 수 있다. 도시림 캐노피가 하늘을 덮고 있는 S2 지점의 경우 주간에도 대부분의 일사가 차단되어 오후 4시경에는 도시림이 없는 경우의 모의 대상지보다  $T_{mrt}$  편차가 약 33°C 낮게 나타났다.

일조시간 중에 도시에서 지면일사의 차단으로 인한  $T_{mrt}$  감소는 도시림과 건물 등 인공구조물의 배치와 천구상의 점유율에 따라 다른 증감 패턴으로 나타났다. S2 지점의 경우 오전에 도시림에 의한  $T_{mrt}$  저감 효과가 크게 나타난 반면 S3 지점과 S4 지점의 경우의  $T_{mrt}$  저감 효과가 두드러지게 나타났으나 그림자가 드리워지지 않는 경우 S2 지점을 제외한 지점에는  $T_{mrt}$  저감 효과가 현저하게 수치적으로 낮아지는 경향을 보였다.

도시림 캐노피 밀도 또는 공극도는 주간에는 지표면에 도달

하는 태양복사에 영향을 미치고 야간에는 지표로부터 빠져나가는 복사의 크기에 영향을 미친다. SVF는 야간 복사에너지의 유·출입에 관여하는 요인으로 An *et al.*(2014)은 동일 도메인을 대상으로 도시림 캐노피의 밀도 또는 공극도를 설명할 수 있는 항공라이다 3차원 점군자료를 이용하여 도시림이 SVF에 기여하는 정도를 수치적으로 기술한 바 있다. Figure 9는 3DPC SVF calculator로부터 산출되는 SVF와 SOLWEIG 모델로부터 산출된 SVF 비교 결과이다. 건물 및 도시림 캐노피 정보를 점군 형태로 가지고 있는 3차원 점군(3DPC)자료(DBM(a') 등)와 격자 형태로 가지고 있는 SOLWEIG 격자(DBM(a) 등)를 통해 입력 자료의 차이가 계산에 미치는 차이가 수치화되었다. 여기서 3DPC SVF calculator는 3차원 점군 상태에서 SVF 계산을 마치고 이를 격자화(Figure 9 bottom 참조)하기 때문에 격자를 계산하는 SOLWEIG 모델과 구별된다(An *et al.*, 2014). SOLWEIG 모델로부터 산출된 SVF와 3DPC SVF calculator로부터 산출된 SVF를 비교한 결과 Figure 9에서 보는 것처럼 캐노피 밀도 및 공극도가 낮은 장소에서 도시림 캐

Table 5. Daily variation of  $T_{mrt}$  of four selected points and estimated  $T_{mrt}$  decrease

Time	S1 $T_{mrt}$			S2 $T_{mrt}$			S3 $T_{mrt}$			S4 $T_{mrt}$		
	B	TC	Diff.	B	TC	Diff.	B	TC	Diff.	B	TC	Diff.
2012-08-05-00	23.4	26.2	-2.8	22.9	31.0	-8.2	22.2	25.4	-3.2	23.8	27.4	-3.6
2012-08-05-01	23.0	25.8	-2.8	22.4	30.5	-8.1	21.8	24.9	-3.1	23.3	26.9	-3.6
2012-08-05-02	22.4	25.2	-2.8	21.9	29.9	-8.0	21.3	24.3	-3.0	22.8	26.3	-3.6
2012-08-05-03	22.1	24.9	-2.8	21.6	29.6	-8.0	20.9	24.0	-3.1	22.5	26.0	-3.6
2012-08-05-04	20.2	24.2	-4.0	20.8	29.1	-8.3	20.2	23.3	-3.2	21.7	25.4	-3.7
2012-08-05-05	21.2	24.3	-3.1	21.0	29.1	-8.2	20.4	23.5	-3.1	21.8	25.5	-3.7
2012-08-05-06	21.4	24.1	-2.7	20.9	28.7	-7.7	20.5	23.2	-2.8	21.6	25.2	-3.6
2012-08-05-07	26.8	27.2	-0.4	27.1	29.2	-2.2	27.7	26.5	1.1	25.9	27.0	-1.1
2012-08-05-08	38.4	34.7	3.6	39.3	31.5	7.8	41.6	35.0	6.6	36.4	33.8	2.6
2012-08-05-09	49.7	38.1	11.5	50.6	32.9	17.7	53.0	38.4	14.6	47.6	43.8	3.8
2012-08-05-10	57.8	40.2	17.6	58.4	34.1	24.3	60.2	40.1	20.2	55.8	40.3	15.6
2012-08-05-11	62.2	40.6	21.6	62.6	35.6	27.0	63.4	40.2	23.2	60.9	40.1	20.8
2012-08-05-12	61.6	40.6	20.9	62.0	36.0	26.0	62.4	40.3	22.1	60.9	40.5	20.4
2012-08-05-13	53.4	45.8	7.5	54.6	35.9	18.7	57.7	46.7	10.9	50.9	39.9	11.0
2012-08-05-14	48.4	43.2	5.2	59.8	36.8	23.0	61.6	43.4	18.2	57.2	40.2	16.9
2012-08-05-15	40.8	39.7	1.1	64.7	37.9	26.8	64.6	38.5	26.0	42.8	38.8	4.0
2012-08-05-16	48.3	42.0	6.3	70.8	37.8	33.0	72.7	43.3	29.4	65.4	41.3	24.1
2012-08-05-17	43.7	38.6	5.1	49.0	36.7	12.4	65.4	39.7	25.8	60.7	38.2	22.5
2012-08-05-18	37.4	34.7	2.7	41.0	35.7	5.3	59.1	35.2	23.9	39.0	34.8	4.2
2012-08-05-19	29.7	30.6	-0.9	30.9	34.4	-3.5	31.6	30.1	1.5	30.5	31.4	-1.0
2012-08-05-20	24.5	27.7	-3.1	23.9	33.0	-9.0	23.2	26.7	-3.5	25.0	29.0	-4.0
2012-08-05-21	23.8	27.0	-3.2	23.2	32.3	-9.1	22.4	26.0	-3.6	24.2	28.2	-4.0
2012-08-05-22	23.5	26.7	-3.1	22.9	32.0	-9.0	22.2	25.7	-3.6	24.0	28.0	-4.0
2012-08-05-23	22.9	25.9	-3.0	22.3	31.2	-8.9	21.6	25.0	-3.4	23.3	27.2	-3.9

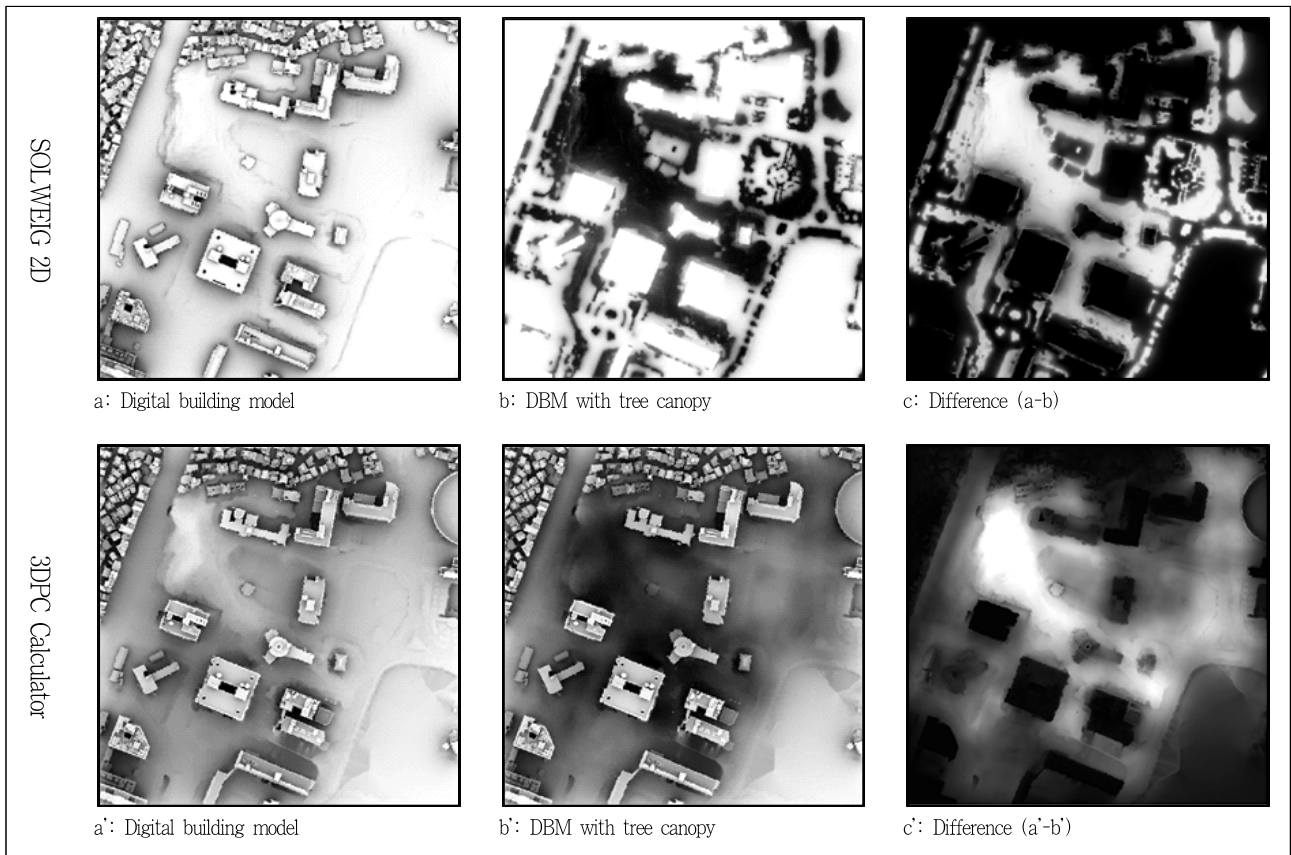


Figure 9. Sky view factor difference between with tree calculation and without tree calculation. Top shows SVFs from SOLWEIG(Lindberg *et al.*, 2008) and bottom shows SVFs from 3DPC SVF calculator(An *et al.*, 2014).

노피에 의해 추가적으로 발생하는 SVF 편차(difference)가 두드러지게 나타났다.

Table 6에서 보듯이 SOLWEIG 모델에서 계산된 건물에 의해 발생하는 SVF(0.82)가 3DPC SVF calculator에 의해 계산된 SVF(0.61)에 비해 약 1.3배 높게 나타나지만 SOLWEIG 모델에서 추정하는 도시림 캐노피에 의해 계산된 SVF 저감 평균(0.36)은 3DPC SVF calculator에 의해 계산된 SVF 저감 평균(0.17)보다 2배 이상 높게 나타나고 있다.

Table 6. Statistics of sky view factor calculation

Input raster type		Min. (m)	Max. (m)	Mean (m)	Std dev. (m)
SOLWEIG	DBM(a)	0.00	1.00	0.82	0.18
	DBM with tree canopy(b)	0.01	1.00	0.67	0.35
	Difference((a) - (b))	0.00	0.99	0.36	0.32
3DPC	DBM(a')	0.00	1.00	0.61	0.19
	DBM with tree canopy(b')	0.00	1.00	0.45	0.22
	Difference((a') - (b'))	0.00	0.68	0.17	0.14

#### IV. 고찰

이 연구는 인지온도의 중요한 요인들 중의 하나인 평균복사온도를 주제로 차감기법을 적용하여 도시림의 온열환경 조절 효과를 정량적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 3차원 점군 기반의 고정밀 도시지표 모델과 SOLWEIG 모델을 통해 도시림 캐노피가 있음으로써 기대할 수 있는 순수한 온열저감 효과를 수치적으로 산출한 데 의의가 있다. SOLWEIG 모델 기반에서 도시림 캐노피가 형성된 현재의 조건에서 추정된  $T_{mrt}$ 와 도시림 캐노피가 사라질 경우 추정되는  $T_{mrt}$ 를 수치적으로 차감하고 남은 값들을 도시림 캐노피가 있기 때문에 얻을 수 있는 공익적 온열저감 효과로 보았다. 연구결과에 근거해 볼 때 도시림 캐노피는 태양일사 차단을 통해 일평균 약 10°C 정도의  $T_{mrt}$  저감 능력을 가지고 있는 것으로 판단되며 시간별 저감 효과는 더 크게 나타나고 있었다. 도시림 캐노피가 가지는 공익적 가치가 높을 것으로 추정되지만 현재 가치를 환산하는 표준체계가 없기 때문에 추후  $T_{mrt}$  저감 능력을 공익적 가치로 환산하는 연구가 수행될 예정이다.

더불어 본 연구에서 제안한 산출기법의 문제점들에 대한 충

분한 검토가 필요할 것이다. 도시림 캐노피의 온열환경 조절 효과를 실험적으로 설명하고 증명하기 위해 사용된 공간정보 자료 및 관측자료의 적시성(2008년 3차원 점군 자료를 이용해 모델 공간을 구축하고 2012년 관측결과 적용) 문제나 SOLWEIG 모델의  $T_{mrt}$  산출 알고리즘의 불완전성 등은 본 연구의 한계로서 추후 개선이 필요하다. 또한 식 3에서 보는 바와 같이 지표표를 구성하고 있는 피복 물질의 알베도(Albedo)는 지표에 유입되는 단파복사( $K_{\downarrow ij}$ )의 수량에 비례적으로 영향을 미치지만 현재 SOLWEIG 모델은 개개의 물질별 특성을 고려하지 않고 일괄적으로 적용(본 연구에서는 0.15)하고 있어 복잡한 도시공간에서의 정교한 온열환경 분석을 저해하는 요인이 되고 있다. 향후에는 식생, 철골, 유리, 콘크리트, 아스팔트 등 다양한 물체들의 알베도, 열용량, 열전도도 특성들과 상호작용이 종합적으로 고려하는 복사모델 개발이 수행되어야 할 것이다. An *et al.*(2014)이 제안한 방법은 3차원 점군자료를 천구투영 단계에서 건물, 식생, 지형 등의 피복 특성별로 분리하고 있어 피복 재질의 물리적 특성을 모델에 반영할 수 있는 기반을 제공하고 있다(Figure 7 참조). 최근 확장되고 있는 3차원 건물들의 피복 이미지는 보다 상세한 재질적 정보를 반영하고 있어 유리창 등과 같은 다양한 물질도 모델에 적용될 수 있을 것이다.

현장에서 측정한  $T_{mrt}$ 를 통한 SOLWEIG 모델  $T_{mrt}$  비교 및 검증은 Lindberg *et al.*(2008) 등 다수 연구들에서 수행되었으나 장비 운용의 제약으로 본 연구에서는 이용하지 못하여 본 연구의 한계로 두었다. 향후 후쿠온도계 등을 이용하여 같은 시간에 지표(land surface)공간의 차이로 발생하는  $T_{mrt}$  차이(Figure 5, 6 참조)를 검증하는 연구들을 수행할 계획이다. 천개지수(SVF) 역시 식 3에서 보는 바와 같이 지표에 유입되는  $K_{\downarrow ij}$ 에 비례적으로 영향을 미치는 중요한 인자이다. 본 연구에서 적용한 (1) SOLWEIG 모델 추정 평균값(0.36)과 (2) 3DPC SVF calculator 추정 평균값(0.17) 비교 결과 도시림 캐노피로 인한 SVF 저감효과가 약 2배 이상 차이가 발생하고 있어 복사 모델에 활용되는 공간정보자료의 선택에도 신중한 검토가 필요하고 판단된다. SVF 저감효과와 차이는 다양한 원인으로 추정할 수 있겠지만 우선적으로는 격자 기반의 SOLWEIG 모델이 구조적으로 도시림 캐노피의 밀도나 공극도를 충분히 계산에 반영하기 못하기 때문에 공극도를 고려하여 계산하는 3DPC SVF calculator보다 낮은 SVF 평균을 산출하는 것으로 판단된다. 그러나 3DPC SVF calculator 역시 투영되는 천구의 상층부에서 캐노피를 충분히 반영하지 못하는 기술적 문제점을 내포하고 있다(An *et al.*, 2014). Lindberg and Grimmond(2011)는 수목의 캐노피에 의해 그림자 지는 지점에서 SOLWEIG가 관측결과에 비해서  $T_{mrt}$ 를 과대하게 추정함을 언급한 바 있다. 따라서 향후에도  $T_{mrt}$  산출기법의 개선을 위해서 변이변수들에 대한 보다 정교한 통제가 연구되어야 할 것이며 더불어 관

측 등 다양한  $T_{mrt}$  산출 방법들과 교차비교를 통한 양적 검증 등이 이어져야 할 것이다. 한편, 컴퓨팅 기술 발전 측면에서 볼 때 SOLWEIG 모델은 편리한 GUI(graphic user interface) 환경과 더불어 확장된 격자기반 멀티스레드(multi-thread) 지원을 통해 안정적인 대용량 연산이 가능해졌다. 결과적으로 고해상도의 품질을 유지하면서도 서울 및 수도권 등 넓은 지역을 모의할 수 있어 향후 광역 녹지계획 연구에도 적용될 수 있게 되었다. 2015년 개최된 제9회 국제 도시기후학회(International Conference on Urban Climate, ICUC)에서 Lindberg는 SOLWEIG 모델을 GIS 플랫폼이 QGIS에 통합될 수 있게 개발 및 배포할 것이라 발표하여 향후 SOLWEIG 모델의 응용은 더욱 활발해질 것이라고 판단된다.

일부 연구들(Setälä *et al.*, 2013; Vos *et al.*, 2013; McPherson *et al.*, 1994)은 도시림의 효과들을 부정적으로 보는 견해도 있으나 Akbari(2002) 등 많은 연구자들의 노력으로 대규모 숲 조성의 필요성과 다양한 공익적 기능들은 대중적으로 널리 인식되고 있다. 숲의 공익적 기능들을 정량적으로 설명하기 위해 상세규모에서 중규모에 이르기까지 식생기능 기반의 모델들이 꾸준히 개선되고 있고(Bruce and Fleer, 1998; Robitu *et al.*, 2006; Lindberg and Grimmond, 2011) 국내에서도 도시환경 개선과 관련한 숲의 다양한 공익적 기능들 계량화(NIFoS, 2010)가 연구되고 있다. 정교한 일사 모델은 미기후 분야에서 지표면 일사차단, 복사 방출량 차이로 인한 현열 분포의 변화, 이로 인한 국지기온 분포 변화와도 연결되어 있어(Yi *et al.*, 2016) 향후 숲의 지면 미기후 조절 기능 설명능력이 크게 개선될 것이다. 건물 및 캐노피의 배치특성에 따라 증감패턴이 크게 달라지고 있어 국지적 공간에서 수행되는 식재(植栽)활동이 미치는 미기후조절 효과를 평가하기 위한 방법들의 개선이 요구되지만 결국 이를 통해 도시의 국소 공간에서의 식재 및 조경활동이 도시미기후 조절에 미치는 공익적 기능을 보다 객관적으로 설명할 수 있을 것이라 기대된다. 공원녹지계획과 같은 대규모 도시림 조성과 같은 조경활동을 통해 만들어지는 식재공간이 도시 미기후 조절에 미치는 효과를 정량적으로 전망하고 설계함으로써 조경기법을 통한 미기후 관리를 보다 체계화 할 것이다. 계획적 측면에서는 도시에 대규모 숲 조성을 통해 긍정적 효과로 기대할 수 있는 도시환경 지표들(풍속, 습도, 기온 등)의 정량적 수치들에 근거하여 체계적인 도시림 관리정책 추진을 기대할 수 있을 것이다. 더 넓게는 산림의 공익 계량화를 통해 숲을 담는 가장 큰 그릇인 산지(山地)의 관리정책 수립까지 확대하여 산줄기-물줄기 관리 계획 등 자연친화적 국토관리계획 수립 연구들(KRIHS, 2010; KRIHS, 2011; Son and Jin, 2013)과도 연계될 수 있을 것이다.

## V. 결론



도시림의 공익적 기능들 중 하나인 지표면 복사 조절 기능을 평균복사온도를 주제로 SOLWEIG 모델을 이용하여 정량적으로 기술하는 방법을 제시하고 모델링 결과의 평가 및 활용성을 고찰해 보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, SOLWEIG 모델을 이용해 도시림 캐노피가 미치는 일사조절 및 온열분포에 미치는 영향을 분석한 결과 도시림 캐노피가 여름철  $T_{mrt}$  조절의 주요인자임을 정량적으로 확인하였다. 도시림이 없는 경우와 도시림이 있는 경우 도시림 캐노피 하부에서 일평균  $T_{mrt}$  가 약 10°C 정도 저감되는 것으로 추정된다. 연구지역 전체 일평균  $T_{mrt}$ 의 평균 저감 효과는 약 5.3°C 정도였으나 도시림 캐노피 특성과 지형특성이 반영되면 국지적으로는 10°C 이상의 일평균  $T_{mrt}$  저감효과를 기대할 수 있었다.

둘째, 연구지역 내에 위치한 네 지점들을 대상으로 시간별 일사조절 및 온열분포에 미치는 영향을 분석한 결과 도시림을 포함하지 않고 구한  $T_{mrt}$ 와 도시림을 포함하여 구한  $T_{mrt}$ 를 비교한 결과  $T_{mrt}$ 의 시간에 따른 변동 폭이 더 크게 나타났다.

셋째, SOLWEIG 모델과 3DPC SVF calculator를 이용해 산출된 SVF 비교 결과 도시림 캐노피가 있음으로 발생하는 SVF 저감 평균 산정방법에 따라 SOLWEIG 모델에서 추정하는 평균값(0.36)과 3DPC SVF calculator에서 추정하는 평균값(0.17)이 2배 이상 차이가 나고 있어 향후  $T_{mrt}$  정확도 향상을 위한 관심과 개선이 요구된다.

## References

- Akbari, H.(2002) Shade trees reduce building energy use and CO<sub>2</sub> emissions from power plants. *Environmental Pollution* 116: S119-S126.
- An, S. M., B. S. Kim, H. Y. Lee, C. H. Kim, C. Y. Yi, J. H. Eum and J. H. Woo(2014) Three-dimensional point cloud based sky view factor analysis in complex urban settings. *International Journal of Climatology* 34(8): 2685-2701.
- ASHRAE, A. H.(2001) *Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Bogren, J., T. Gustavsson, M. Karlsson and U. Postgard(2000) The impact of screening on road surface temperature. *Meteorological Applications* 7(2): 97-104.
- Bruse, M. and H. Fler(1998). Simulating surface- plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Software and Modelling* 13(3): 373-384.
- Holmer, B.(1992) A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs. *Meteorologische Zeitschrift* 1(5): 236-239.
- Jendritzky, G.(1991) Zur raumlichen Darstellung der thermischen Umgebungsbedingungen des Menschen in der Stadt, in: Endlicher, W.; Gofmann, H. (Hrsg.): *Beiträge zur regionalen und angewandten Klimatologie*, Freiburger Geographische Hefte 32, S. 1-18, Freiburg.
- KREI(2001) A study on the urban forest management policy.
- KRIHS(2010) Policy directions for rational classification and management of forestland by considering the mountain ridge and valley networks (KRIHS 2010-40).
- KRIHS(2011) Strategic planning guidelines for forest-land management (KRIHS 2011-49).
- Lindberg, F. and C. S. B. Grimmond(2011) The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105(3-4): 311-323.
- Lindberg, F., B. Holmer and S. Thorsson(2008) SOLWEIG 1.0-Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *International Journal of Biometeorology* 52(7): 697-713.
- McPherson, E. G., D. J. Nowak and R. A. Rowntree(1994). *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project (NE-186)*. Forest Service, US Dept. of Agriculture, Department of Agriculture, Radnor, PA.
- NIFoS(2002) *Effective mangement scheme of the urban forests* (ISBN: 8981760993).
- NIFoS(2010) *Quantification of Welfare Functions of Forests in Korea* (11-1400377-000403-01).
- Prata, A. J.(1996) A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122(533): 1127-1151.
- Ratti, C. and P. Richens(1999) Urban texture analysis with image processing techniques. In *Computers in Building* (pp. 49-64). Springer US.
- Robitu, M., M. Musy, C. Inard and D. Groleau(2006) Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy* 80(4): 435-447.
- Setälä, H., V. Viippola, A. L. Rantalainen, A. Pennanen and V. Yli-Pelkonen (2013) Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions?. *Environmental Pollution* 183: 104-112.
- Son, H.-G. and J.-S. Jin(2013) Mountainous district master plan and territorial management policy (KRIHS policy Brief 436).
- VDI(1994) VDI 3789, Part 2: *Environmental Meteorology, Interactions between Atmosphere and Surfaces: Calculation of the short- and long wave radiation*. Beuth, Berlin, pp. 52.
- Vos, P. E., B. Maiheu, J. Vankerkom and S. Janssen(2013) Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?. *Environmental Pollution* 183: 113-122.
- Woo, J.-H., H. Kim, S. B. Lim, J.-J. Kim, J. Lee, R. Ryoo, H. Kim and L. D. Minh(2011) Constructing u-City of Seoul by future foresight analysis. *Concurrency Comput.: Pract. Exper.* 23: 1114-1126. doi: 10.1002/cpe.1690
- Yi, C., K. R. Kim, S. M. An, Y. J. Choi, A. Holtmann, B. Janicke, U. Fehnbach and D. Scherer(2016) Estimating spatial patterns of air temperature at building-resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *International Journal of Climatology* 36: 533-549.

Received : 27 August, 2015

Revised : 16 November, 2015 (1st)

23 February, 2016 (2nd)

Accepted : 23 February, 2016

3인익명 심사필