

Research Paper

위성 영상을 활용한 두 가지 현열 플럭스 추정 방법 간의 비교

김상혁* · 이동근**

서울대학교 생태조경지역시스템 공학부 학생*, 서울대학교 조경지역시스템 공학부 교수**

Comparison of Two Methods to Estimate Urban Sensible Heat Flux by Using Satellite Images

Sang-Hyuck Kim* · Dong-Kun Lee**

Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea, Student*
Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea, Professor**

요약: 도시 지역의 열 환경을 파악하기 위해 열 플럭스를 추정하고자 하는 연구들이 많이 진행되어 왔다. 현재 다양한 방법을 통해 현열 플럭스가 추정되고 있으나 각 방법 간의 차이를 비교하는 연구는 매우 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 대표적인 두 가지 현열 플럭스 추정 방법을 통해 동일한 대상지의 현열 플럭스를 추정하고 그 결과를 비교하여 방법 간의 의의와 한계를 확인하고자 하였다. 연구 결과 열수지 방정식 방법을 통해 현열 플럭스를 추정할 경우 해상도면에서 큰 장점을 가지나 도시 지역의 특징 중 하나인 인공열을 반영하지 못해 현열이 과소추정될 수 있음을 확인할 수 있었다. 물리식을 기반으로 추정할 경우 상대적으로 오차가 작고 인공열의 반영이 가능하나, 시간 및 공간 해상도에 있어 한계가 있음을 확인하였다. 두 방법은 인공열이 많이 발생하는 공업지역에서 가장 큰 차이를 나타냈으며 그 차이는 평균 약 135 W/m^2 , 최대 400 W/m^2 로 나타났다. 반면 녹지 및 수변공간은 약 20 W/m^2 로 두 방법 간의 차이가 매우 작은 것을 확인할 수 있었다. 두 방법 간의 결과가 도시 지역에서 유의미한 차이를 보이는 만큼 향후 연구 목적에 맞는 방법을 선택할 필요가 있다.

주요어: 도시 열섬, 열평형 방정식, 현열 플럭스 추정, 인공열

Abstract: In order to understand the urban thermal conditions, many studies have been conducted to estimate the thermal fluxes. Currently sensible heat fluxes are estimated through various methods, but studies about comparing the differences between each method are very insufficient. Therefore, this study try to estimate the sensible heat flux of the same area by two representative estimation methods and compare their results to confirm the significance and limitation between methods. As a result of the study, the heat balance methods has a great advantage in terms of resolution but it can not consider the anthropogenic heat flux, so sensible heat flux can be underestimated in urban areas. When estimating based on physical equation, anthropogenic heat flux can be considered and the error is relatively small, it has a limitations in time and space

resolutions. The two methods showed the largest difference in industrial areas where anthropogenic heat fluxes are high, with an average of 135 W/m^2 and a maximum of 400 W/m^2 . On the other hand, the green and water have a very small difference with an average of 20 W/m^2 . The results between two methods show significant differences in urban areas, it is necessary to select a suitable method for each research purpose.

Keywords : Urban heat island, Heat balance, Sensible heat flux, Anthropogenic heat

I. 서론

도시화가 진행됨에 따라 도시 지역은 불투수 표면이 증가하고 있으며 이는 도시가 더 많은 열을 흡수하게 만들고 있다. 그 결과 도시 지역이 주변 지역보다 높은 기온을 보이는 현상이 나타나게 되는데, 이를 도시 열섬현상이라 하며 현재 도시의 가장 대표적인 기상 현상으로 자리 잡았다(Oke 1982; Bornstein & Lin 2000). 도시 열섬현상과 더불어 기후변화로 인한 기온 상승으로 인해 도시 내부에 유입되고 축적되는 열이 증가하면서 도시민의 폭력성 증가, 온열 질환 발생 및 사망자 수 증가 등 악영향을 미치고 있다 (Conti et al, 2005).

이러한 문제점의 근본적인 원인을 파악하기 위해 도시 내부의 열 환경을 정확히 평가하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 도시 공간의 열 환경은 난류 교환 과정을 통해 결정된다. 도시 표면과 대기 사이에서 난류에 의해 열, 수분, 운동 에너지 등의 교환이 지속적으로 발생하게 되고 이때 교환되는 양에 의해 도시 열 환경을 파악할 수 있다. 특히 열의 교환 때문에 발생하는 열 플럭스 중 현열 플럭스는 도시의 열 환경에 가장 큰 영향을 주는 요소로써, 열 환경 및 열섬현상에 대해 분석하려면 현열 플럭스에 대해 정확히 파악할 수 있어야 한다.

현열 플럭스에 대한 측정은 주로 에디 공분산 방법(eddy covariance method)을 통해 이루어진다. 이 방법은 대기 운동과 온습도의 난류 섭동을 고주파수로 직접 측정함으로써 열 플럭스를 정확하게 파악할 수 있다(Offerle et al, 2006; Liu et al, 2013). 그러나 측정에 필요한 장비의 가격과 관리 측면, 정확한 측정이 가능한 장소가 한정적이라는 단점 때문에 도시 공간에서는 현열 플럭스의 측정이 이루어지지 못

하고 있다(Cui & Chui 2021).

이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 현열 플럭스 추정 방법들이 개발되었고 이는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로, 열수지 방정식을 통한 추정 방법이다. Penman-Monteith 방법(Monteith 1965)을 기반으로 수정된 추정식을 활용하는 방법으로 다양한 공간에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. Penman-Monteith 방법의 경우 비교적 정확한 추정이 가능하지만, 실측을 통해 구축해야 하는 입력 변수가 너무 많고 이는 곧 도시 지역을 대상으로 적용하기 어렵다(De Bruin & Holtslag 1983). 이러한 문제점을 해결하고자 도시에서 쉽게 구축할 수 있는 기온, 상대습도, 순복사열, 토지 피복 등으로 열수지 방정식을 통해 비교적 쉽게 현열 플럭스를 계산할 수 있는 다양한 추정식이 개발되었다. 현열 플럭스의 교환을 계산하는데 중요한 변수 중 하나인 공기 역학 저항을 계산하지 않아 입력 변수 및 계산에 대한 부하를 크게 줄일 수 있으며 높은 시간 및 공간 해상도를 가진 결과를 도출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 입력 변수를 실제 도시 환경을 완벽하게 반영할 수 없어 현열 플럭스 추정값의 정확성에 대한 한계점이 존재한다. 두 번째는 물리적 산정식을 통한 추정 방법이다. 최대한 물리적 이론을 반영할 수 있도록 저항값을 계산하여 추정함으로써 열수지 방정식을 통한 추정 방법에 비해 정확성이 높은 장점이 있다. 시간이 지남에 따라 과거에는 구축하기 어려웠던 입력 변수들이 쉽게 구축할 수 있게 되었고, 측정으로만 얻을 수 있던 입력 변수들이 연구를 통해 다른 변수로 추정이 가능해지면서 최근 많이 활용되고 있는 방법이다(Kato & Yamaguchi 2005). 물리학에 기반을 두고 있는 만큼 비교적 정확한 추정이 가능하지만, 추정을 위해서는 표면 온도 값이 필요하기 때문에 도시 전체에 대한 현

열 플럭스를 추정하려면 위성 영상의 사용이 불가피하다. 이러한 이유로 시간 및 공간적 해상도가 상대적으로 낮은 단점이 있다.

두 가지 방법은 서로 다른 장단점을 가지고 있으며 선행연구들의 경우 하나의 방법을 선택하여 현열 플럭스를 추정하고 있다. 그러나 아직 두 방법의 정확한 비교가 이루어지지 않아 방법 간 결과의 차이가 명확하지 않고 어떤 목적에 알맞은 방법인지 파악하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 동일 시간, 동일 대상지에 대해 두 가지 방법으로 현열 플럭스를 추정해보고 그 결과를 비교함으로써 추정 방법 간의 의의 및 한계를 파악해보고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구 대상지 및 입력자료

연구 대상지는 경기도 중남부에 있는 수원시로 선정하였다. 수원시는 121 km²의 면적에 백만 명 이상의 인구가 거주하고 있어 인구 밀도가 높은 편에 속한다. 또한, 2010년 이후 광교신도시를 비롯한 호매실지구, 고색동, 세류동, 고등동 등의 지역 개발사업이 진행되면서 토지 피복에 많은 변화가 발생하였다. 위와 같은 급격한 도시화로 인해 수원시의 폭염일수는 매년 증가하고 있으며, 2018년에는 38일의 폭염

일수를 기록하였다.

순복사열, 현열, 잠열, 저장열의 각종 열 플럭스를 추정하기 위해 필요한 기상자료는 기온, 상대습도, 풍속, 운량 등이 있으며 수원시 전체에 대한 데이터가 필요하다. 따라서 수원시 내 AWS(Automatic Weather Station) 및 ASOS의 값을 토대로 보간법을 활용하여 기상자료를 구축하였다.

태양 단파 복사열의 양을 계산하기 위해 필요한 그림자 데이터의 경우 실제 건물 높이가 반영된 DSM과 대상지의 경위도 및 분석이 시행될 날짜와 시간을 토대로 계산된 태양 고도를 활용하여 구축하였다. 이 과정은 Arcgis 10.5의 Hillshade를 통해 진행되었으며, 30m 격자의 각 셀이 해당 지역의 그림자 비율(0~1)을 값으로 갖도록 구축하였다. 추후 계산 과정에서의 활용을 위해 그림자가 많을수록 0에 가까운 값을 갖게 하여 완벽한 그늘은 0, 그늘이 전혀 없는 경우는 1의 값을 갖게 된다. DSM에 필요한 등고선 및 건물 높이 정보는 국토지리정보원에서 제공하는 수치지형도 v2.0을 토대로 30 m 해상도로 구축하였다.

현열 플럭스 계산을 위해 필요한 표면 온도의 경우 Landsat 8 OLI/TIRS(Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor) 위성 영상을 활용하였다. OLI센서는 30m의 공간 해상도를 가지며, TIRS 센서는 100m의 공간 해상도를 가지지만 미국지질조사국

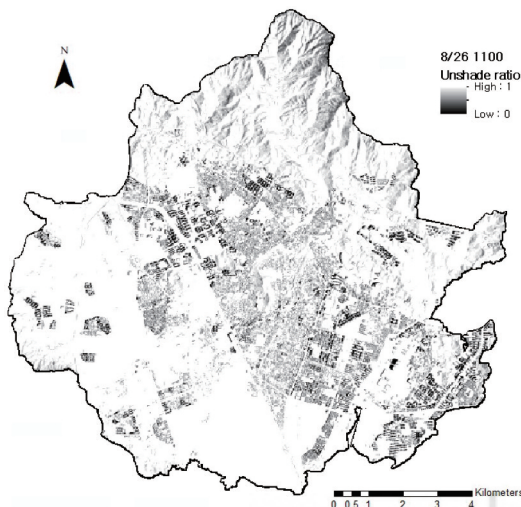


Figure 1. Unshade ratio distribution of Suwon, Korea on August 26th, 2017 1100 KST.

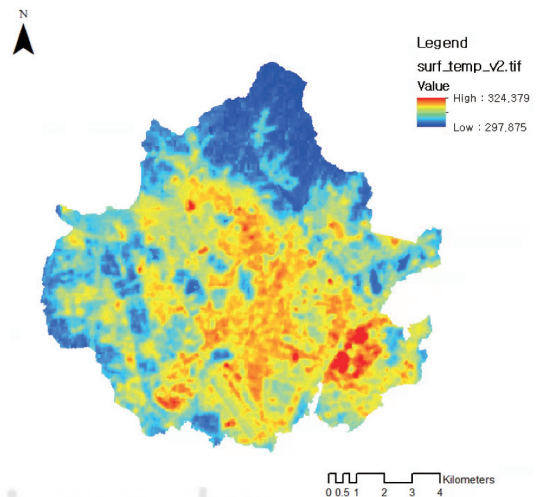


Figure 2. Surface temperature (Kelvin) distribution of Suwon, Korea on August 26th, 2017 1100 KST.

(USGS)에서 30m 해상도로 매칭 과정을 적용하여 제공하고 있다. 본 연구에서 사용한 Landsat 8 Collection 2 level 2 Science Product(L2SP) 자료의 경우 사용자의 편의성을 위해 Collection 2 level 1 자료를 기반으로 영상에 대한 전처리 및 각종 보정 과정을 거친 지표면 반사도와 표면 온도 자료를 제공한다. 따라서 별도의 처리 과정 없이 표면 온도 자료를 활용할 수 있었으며 알베도의 경우 지표면 반사도를 통해 계산하여 사용하였다. 현열 플럭스가 가장 많이 발생하는 6월부터 8월의 이미지 중 운량이 5% 이하인 이미지를 선택하여 사용했으며, 해당 날짜와 시간에 맞추어 기상자료 및 지형자료를 구축하였다.

2. 열수지 방정식을 통한 현열 플럭스 추정

1) 열수지 방정식

도시의 표면에 도달한 열은 다양한 형태로 방출 또는 흡수되며 이들은 항상 평형을 이루어야 한다. 이를 표현하는 방정식을 열수지 방정식이라 하며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_n = H + \lambda E + Q_s$$

여기서 Q_n 은 순복사열, H 는 현열 플럭스, λE 는 잠열 플럭스, Q_s 는 저장열 플럭스를 의미한다. 즉, 단파 혹은 장파 복사의 형태로 도시 공간의 표면에 도달한 열은 현열, 잠열, 저장열 중 하나의 형태로 대기 중으로 방출되거나 표면 내부로 흡수되게 된다. 본 연구에서의 열수지 방정식은 대기와 도시의 표면 간의 열 교환을 다루므로 모든 열 플럭스는 대기와 도시 표면과의 관계에 의해 결정된다.

2) 순복사열 산정

순복사열은 태양에 의해 표면에 도달하는 복사열의 총량으로 입사되는 복사열과 방출되는 복사열의 차이를 통해 산정할 수 있다. 도시 지역에 존재하는 복사열은 크게 단파와 장파로 분류할 수 있으며, 단파는 오직 태양에 의해서만 발생하고 장파는 모든 물체에서 발생하는 차이가 있다. 단파의 경우 태양과 지구의 위치 관계에 의해 달라지며 태양 고도, 계절, 시간 등의 영향을 받게 된다. 단파는 태양으로부터 직

접 표면에 도달하는 직달 단파와 대기 중에서 산란을 통해 표면에 도달하는 산란 단파로 나눌 수 있다. 직달 단파의 경우 위치(위도 및 경도)와 시간에 따라 달라질 수 있으나 도시 규모의 대상지 내부에서는 그 차이가 매우 작다. 따라서 도시 지역에서 직달 단파에 가장 큰 영향을 주는 요소는 그림자로, 그림자의 유무에 따라 직달 단파량이 크게 좌우된다. 산란 단파의 경우 해당 위치에서 하늘이 얼마나 보이는지에 따라 그 값이 달라지는데, 이를 천공률(Sky View Factor, SVF)이라고 하며 표면에 도달하는 산란 단파량은 천공률에 비례하게 된다. 모든 표면은 입사되는 단파를 일정 비율만큼 반사하며 이를 알베도(Albedo)라고 한다. 알베도는 표면의 재질과 색깔 등에 따라 달라지며 본 연구에서는 위성 영상을 통해 대상지의 알베도 값을 추출하였다. 따라서 표면에 도달하는 순 단파 복사열은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$S_{net} = (Shadow * S_{dir} + SVF * S_{diff}) * (1 - \alpha)$$

이때 S_{net} 은 순 단파 복사열, S_{dir} 은 직달 단파, S_{diff} 은 산란 단파, $Shadow$ 는 해당 지역의 그림자 비율, SVF 는 천공률, α 는 피복의 알베도를 의미한다.

장파의 경우 주변에 존재하는 모든 물체가 방출하며, 정확한 산정을 위해서는 주변 모든 물체의 표면 온도와 방사율 값을 파악해야 한다. 그러나 도시 규모의 대상지에서 모든 물체의 표면 온도 및 방사율 데이터를 구축하는 것은 불가능하며, 본 연구는 도시 지역의 표면과 대기 사이에서 교환되는 현열을 추정하고자 하므로 대기와 지표면 사이에서 교환되는 장파만을 다루게 된다. 대기는 슈테판 볼츠만 법칙에 따라 장파를 방출하여 지표면에 도달하는 장파 복사열은 다음과 같이 산정할 수 있다(Offerle et al. 2003; Loridan et al. 2011).

$$L_{\downarrow} = [\epsilon_{clear} + (1 - \epsilon_{clear}) \times F_{CLD}] \times \sigma T_a^4$$

이때 L_{\downarrow} 은 지표면에 도달하는 장파 복사열, ϵ_{clear} 는 맑은 대기의 방사율, F_{CLD} 는 0~1로 표현한 운량, T_a 는 기온, σ 는 슈테판 볼츠만 상수를 의미하며 ϵ_{dear} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$w = 46.5(e_a / T_a)$$

$$e_{clear} = 1 - (1 + w)e^{-\sqrt{1.2 + 3w}}$$

이때, w 는 가습수량, e_a 는 증기압을 의미한다.

표면에서 방출하는 장파 복사열의 양은 마찬가지로 슈테판 볼츠만 법칙을 따르며 표면온도와 방사율을 통해 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$L\uparrow = \epsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon_s) L\downarrow$$

이때, $L\uparrow$ 는 표면에서 방출하는 장파 복사열, T_s 는 표면 온도, ϵ_s 는 표면의 방사율을 의미한다(Loridan et al, 2011).

표면에 도달하는 순 장파 복사열은 둘의 차이를 통해 산정할 수 있으며 순복사열은 순 단파 복사열과 순 장파 복사열(L_{net})의 합으로 산정이 가능하다.

$$L_{net} = L\downarrow - L\uparrow$$

$$Q_n = S_{net} + L_{net}$$

3) 저장열 플럭스 산정

저장열 플럭스를 정확하게 산정하기 위해서는 모든 표면의 재질과 열전도도, 수직적인 온도 변화 등 물리적 특성을 정확히 파악해야 한다. 그러나 도시에는 굉장히 다양한 표면과 재질이 혼재되어 있어 저장열 플럭스 산정을 위한 데이터를 구축하기가 매우 어렵다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 순복사열을 기반으로 저장열 플럭스를 산정하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 그 중 현재까지 가장 많이 사용되는 방법은 OHM(Objective Hysteresis Model)으로 실험 결과를 바탕으로 저장열 플럭스에 대한 산정식을 도출한 방법이다(Grimmond et al, 1991a). 이는 저장열이 이력곡선(Hysteresis loop)의 형태를 보이는 것에 착안하여 재질에 대한 여러 차례의 실험을 거쳐 보정계수를 결정하고, 다음과 같은 식에 의해 저장열 플럭스를 산정한다.

$$Q_s = a_1 Q_n + a_2 \Delta Q_n + a_3$$

여기서 ΔQ_n 은 순복사열의 순간 변화량, a_1, a_2, a_3 는 재질의 보정계수로 순복사열의 순간 변화량은 산정하고자 하는 시간의 1시간 전과 후 순복사열의 평균값을 사용한다. 도시 지역에서 특정 공간의 저장열 플

럭스를 산정하기 위해서는 해당 공간의 피복 비율을 반영하여 다음과 같은 식을 통해 저장열 플럭스를 산정한다.

$$Q_s = \sum_{i=1}^j f_i^* [a_{1i} Q_n + a_{2i} \Delta Q_n + a_{3i}]$$

이때, f_i 는 i 번째 피복의 비율, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i} 는 i 번째 피복의 보정계수를 의미한다.

즉, 30m 해상도의 경우 30m 격자 내에 존재하는 모든 토지 피복의 비율을 계산하고 토지 피복에 맞는 보정계수를 부여함으로써 30m 해상도로 저장열 플럭스를 산정할 수 있게 된다. 산정을 위해 필요한 보정계수는 선행연구들을 결과를 종합하여 Table 1과 같이 설정하였다.

Table 1. OHM empirical coefficients for individual surface covers (Grimmond & Oke, 2002)

Land cover	a ₁	a ₂	a ₃
Building	0.12	0.39	-7.17
Road	0.61	0.41	-27.7
Impervious surface	0.7	0.33	-38.0
Bare soil	0.37	0.42	-34.9
Lawn	0.32	0.54	-27.4
Forest	0.11	0.11	-12.3
Water	0.5	0.21	-39.1

4) 잠열 플럭스 산정

잠열 플럭스 산정에는 포화 증기압과 실제 증기압의 차이가 필요하다. 또한, 공기 역학 저항, 기공 저항 등의 저항값들이 필요한데 복잡한 도시 환경에서 이러한 각종 저항값을 정확히 계산하는 것은 매우 어려운 일이다(Kato & Yamaguchi 2005). 따라서 본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 매개 변수화한 방법을 활용하여 잠열 플럭스를 추정하고자 한다. De Bruin & Holtslag (1982)에 의해 제시되고 다양한 연구를 통해 보완된 이 방법은 다음과 같은 식을 통해 잠열 플럭스를 산정한다.

$$\lambda E = \frac{\alpha}{1 + (\gamma/s)} (Q_n - Q_s) + \beta$$

이때, α, β 는 경험적 상수로 피복에 따라 다른 값을

부여한다. 이는 선행연구들을 종합하여 Table 2와 같이 선정하였다(Hanna and Chang 1992; Grimmond & Oke, 2002).

Table 2. latent heat flux coefficients for individual surface covers

Land cover	α	β
Building	0.0	20
Road	0.2	20
Impervious surface	0.2	20
Bare soil	0.4	20
Lawn	0.8	20
Forest	1.0	20
Wet land	1.2	20
Water	1.3	20

잠열 플럭스 산정식의 s 는 x축을 온도로 하는 포화 증기압 곡선의 기울기로 온도와 압력에 따라 다른 값을 가지며 γ 은 건습계 상수로 0.67×10^3 의 값을 갖는다. 따라서 대기 중에서 γ/s 는 기온과 기압에 따라 변화하게 되며 1기압 환경에서는 기온에 따라 Table 3과 같은 값을 갖는다(Beljaars, 1989; Holstag & Ulden 1989).

Table 3. values for specific temperature

T_a (°C)	γ/s
-5	2.01
0	1.44
5	1.06
10	0.79
15	0.60
20	0.45
25	0.35
30	0.27
35	0.21

5) 현열 플럭스 추정

도시 표면이 열적 평형을 유지하기 때문에 나머지 열 플럭스를 산정함으로써 열수지 방정식에 의해 다음과 같이 현열 플럭스를 추정할 수 있다.

$$H = Q_n - \lambda E - Q_s$$

3. 물리적 산정식을 통한 현열 플럭스 추정

현열은 온도 변화에 사용되는 열로 두 물체 사이의 현열 플럭스는 서로의 온도 차, 비열, 밀도 등에 의해 결정된다. 도시 표면과 대기 사이에 교환되는 현열 플럭스는 다음과 같은 식에 의해 산정할 수 있다.

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a}$$

이 때, 각각 현열 플럭스(H), 공기의 밀도(ρ), 비열(C_p), 기온(T_a), 표면 온도(T_s)를 의미한다. 앞서 서술했듯 표면 온도는 위성 영상을 통해 도출한 값을 활용한다. 위성 영상에서 도출한 표면 온도의 경우 실제 도시 환경에서 발생하는 모든 열이 반영된 결과라고 볼 수 있으므로 현열 플럭스 산정에 적합하다고 판단하였다. r_a 는 공기 역학 저항으로 풍속, 피복, 구조물의 높이 등에 따라 결정되는 저항값으로 다음과 같은 식에 의해 산정할 수 있다(Brutsaert 1982).

$$r_a = \frac{\ln(z_u - d_0)}{z_{0M}} * \frac{\ln(z_u - d_0)}{z_{0H}} * \frac{1}{k^2 u}$$

여기서 z_u 는 기온 및 풍속의 측정 높이, u 는 풍속, k 는 카르만 상수(0.4), z_{0M} 는 모멘텀 거칠기 길이(roughness length), z_{0H} 는 열 거칠기 길이이다. d_0 는 영면 변위로 건물의 평균 높이(z_h)와 단면적 밀도(λP)를 통해 산정하는 방법을 활용하였으며, 열과 모멘텀 거칠기 길이는 Table 4와 같이 설정하였다(Macdonald et al, 1988).

$$Q_s = a_1 Q_n + a_2 \Delta Q_n + a_3$$

Table 4. Roughness lengths for different surface covers

Land cover	ZOM	ZOM/ZOH
Water	$0.3 * 10^{-4}$	0.34
Bare soil	0.001	50
Field	0.004	50
Grassland or Rice field	0.1	100
Lawn	0.01	50
Forest	0.5 - 1.0	1000
Suburban	0.5	1000
Urban	1.5	1000
Industrial	0.9	1000

III. 결과 및 고찰

1. 열수지 방정식을 통한 현열 플럭스 추정

열수지 방정식을 통해 현열 플럭스를 산정할 경우 기본적으로 순복사열의 절댓값에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 그림자가 전혀 존재하지 않아 높은 순복사열 값을 보이게 되는 나지에서 가장 높은 평균값을 보였으며, 공업단지와 도시 지역의 불투수 표면이 그 뒤를 이었다. 나지의 현열 플럭스 평균값은 159.6 W/m²로 도시의 불투수 표면, 공업단지, 도로 등과 비교했을 때 10 W/m² 이상 높았으며 수변공간 및 녹지와는 100 W/m² 가량의 차이를 보였다. 공업단지와 불투수 표면은 평균이 각 142.1 W/m², 141.8 W/m²로 매우 값을 보여주었으나 표준편차에서 10 W/m² 이상의 차이를 보였다. 이는 상대적으로 건물이 적은 공업단지의 경우 그림자의 영향을 적게 받아 고층 건물로 인한 그림자의 영향이 큰 불투수 표면에 비해 상대적으로 균일한 값을 나타낸 것으로 보인다. 물론 최댓값의 경우 불투수 표면에서 나타났으나, 대부분의 도시 지역에서는 나지보다 현열 플럭스 값이 낮게 나타나 일반적인 인식과 다른 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 앞서 언급한 고층 건물들로 인한 그림자의 영향이 가장 큰 원인이라 할 수 있다. 그림자들로 인해 도시 지역에 도달하는 순복사열 자체가 큰 폭으로 감소하게 되고, 이에 따라 자연스럽게 나지에 비해 낮은 현열 플럭스 값이 도출되게 된다. 그러나 실제 환경의 경우 그림자의 영향으로 태양으로부터 도달하는 순복사열이 감소하더라도 사람, 차량 및 건물에서 발생하는 열로 인해 도시 지역이 평균적으로 가장 높은 현열 플럭스 값을 보이는 경우가 많으나 열수지 방정

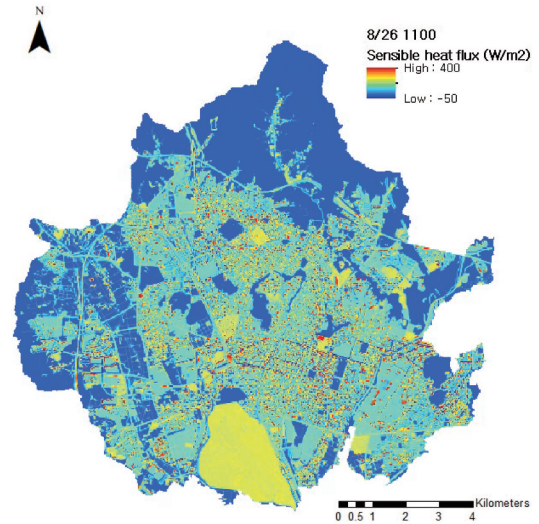


Figure 3. Sensible heat flux distribution of Suwon, Korea on August 26th, 2017 1100 KST based on heat balance equation.

식을 통해 추정하는 경우 이러한 사항들을 반영할 수 없어 그림자가 전혀 생기지 않는 나지에서 도시 지역보다 높은 현열 플럭스 값을 갖는 결과가 나타나게 된다. 이와 유사하게 저층 밀집단지의 그림자 면적이 고층 밀집단지보다 높아 더 낮은 현열 플럭스 값을 보이게 되어 아파트가 주택단지보다 열환경이 좋지 않은 결과가 도출되기도 했다.

수변공간과 녹지는 도시 지역에 비해 월등히 낮은 현열 플럭스 값을 보여주어 도시 공간의 열을 저감하는 효과를 확인할 수 있었다. 큰 차이는 아니지만, 녹지가 수변공간보다 더 좋은 효과를 보여주었다고 할 수 있으나, 이는 여러 가지 플럭스들을 산정하는 과정에서 발생하는 오차를 고려했을 때 유의미한 값이라고 보기 어렵다.

2. 물리적 산정식을 통한 현열 플럭스 추정

물리적 산정식을 활용할 경우 기온과 표면 온도의 차이가 클수록 높은 현열 플럭스를 기대할 수 있다. 물론 표면에 따른 저항값의 차이가 반영되지만, 일반적으로 물, 산림과 같이 온도 차가 작은 표면은 저항값이 높고 불투수 표면과 같이 온도 차가 큰 표면은 저항값이 작아 대부분 온도 차와 현열 플럭스 값이 비례하는 결과가 나타났다. 열수지 방정식 방법의 결과와

Table 5. Estimated sensible heat flux by heat balance equation (unit : W/m²)

Landcover	Mean	Standard deviation
Impervious Surfaces	141.8	97.5
Road	131.5	97.0
Industrial	142.1	85.0
Bare soil	159.6	83.3
Green	36.7	75.8
Water	44.2	71.6

Table 6. Estimated sensible heat flux by physical equation (unit : W/m²)

Landcover	Mean	Standard deviation
Impervious Surfaces	196.8	68.8
Road	183.0	78.0
Industrial	273.5	72.8
Bare soil	143.8	65.0
Green	61.8	66.5
Water	61.8	62.0

는 달리 평균적으로 가장 높은 현열 플럭스를 보이는 지역은 공업단지로 평균 273.5 W/m²의 값을 보였다. 이는 두 번째로 높은 평균값을 보이는 불투수 표면과 비교해도 약 80 W/m²가 높은 결과로 압도적인 차이를 보여주었다. 앞선 방법에서 가장 높은 평균값을 보여주었던 나지는 143.9 W/m²의 평균값으로 공업단지, 불투수 표면, 도로에 이어 네 번째에 그쳐 전반적인 도시 지역보다 낮은 결과를 보여주었다. 이는 위성 영상을 통해 구축된 표면 온도를 활용함으로써 도시 지역에서 차량, 건물 등에서 방출되는 열이 반영된 결과라고 볼 수 있으며 이 부분이 물리적 산정식을 활용한 방법과 열수지 방정식 방법의 가장 큰 차이점이라고 볼 수 있다. 지도상의 분포로 보았을 때 가장 높은 현열 플럭스를 보이는 지역은 Figure 4의 오른쪽

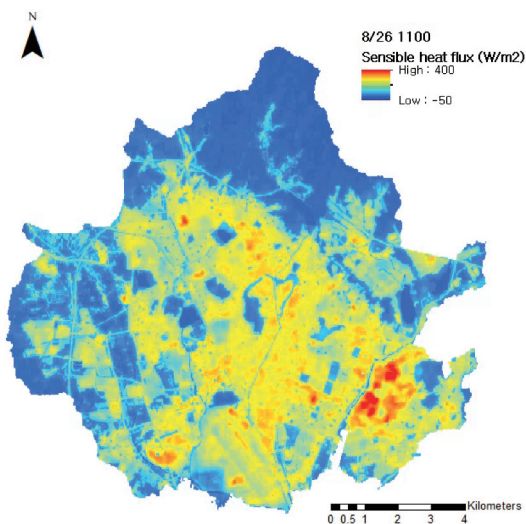


Figure 4. Sensible heat flux distribution of Suwon, Korea on August 26th, 2017 1100 KST based on physical equation.

쪽 아래에 위치한 삼성전자 공업단지로 약 505 W/m²의 현열 플럭스를 보였으며 수원 산업단지(수원델타 플렉스)가 343 W/m², 도시 중심부가 290 W/m²로 그 뒤를 이었다.

수변공간과 녹지는 61.8 W/m²로 완벽히 같은 평균값을 보여주었으나 호수와 녹지 중심부의 값을 비교하면 각 3 W/m², 30 W/m²로 완벽히 동일한 효과를 가졌다고 보기는 어려웠다. 그럼에도 둘 사이의 평균값이 같은 이유는 위성의 해상도가 30 m로 제한되어 있어 폭이 좁은 강과 개천 같은 수변공간의 표면 온도가 다소 높게 측정되었기 때문으로 나타났다.

DSM과 같은 지형자료 없이 위성 영상을 통해 산출한 표면 온도만을 활용했기 때문에 도시의 3차원적인 구조를 반영하지 못해 고층 건물의 그림자로 인한 영향을 직접적으로 확인하기는 어려웠으나 저층 밀집단지가 고층 밀집단지보다 높은 현열 플럭스 값을 보여 도시의 특성을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 위성 영상에 의존하게 되어 공간 해상도가 30 m로 제한되었고, 구름의 영향으로 인해 시간 해상도가 좋지 않은 한계점이 존재하였다.

3. 두 방법 간 현열 플럭스 추정 결과 비교

두 가지 추정 방법의 결과는 상당히 다른 모습을 보여주었다. 특히 전반적으로 표준편차의 차이가 커 열수지 방정식 방법은 물리적 산정식을 활용한 방법에 비해 현열 플럭스의 공간적 분포 차이를 확인하기 어려웠다. 두 결과값의 차이를 확인해본 결과 산업단지 및 도시 지역에서 유의미한 차이가 나타났다. 특히 삼성전자 공업단지의 경우 두 방법 간 가장 큰 차이를 보였는데, 이는 도시 지역에서 발생하는 인공열로 인한 결과로 생각된다. 인공열이란 인간의 산업 활동, 수송, 상업, 인체의 물질대사 등을 통해 발생하는 열로 인간 활동이 활발하고, 많은 에너지를 사용하는 곳일수록 많이 발생하게 된다. 이는 도시 지역의 가장 큰 특징 중 하나로, 다른 지역과 다르게 도시 지역은 태양 이외의 열원을 갖는다는 것을 의미한다. 그러나 열수지 방정식을 통한 현열 추정 방법의 경우 열원으로 태양만을 고려하고 있어 인공열에 대한 반영이 불가능하기 때문에 실제 도시의 온도를 반영하

Table 7. Difference of sensible heat flux between two methods (unit: W/m²) (Physical equation method - heat balance equation method)

Landcover	Mean	Standard deviation
Impervious Surfaces	56.6	104.0
Road	52.7	97.2
Industrial	135.4	107.4
Bare soil	-23.2	73.9
Green	24.3	54.0
Water	17.0	53.9

는 물리적 산정식 기반 추정 방법에 비해 산업단지, 주거지역, 도시 중심부에서의 현열 플럭스가 낮게 나타났다. 특히 많은 양의 인공열이 발생하는 산업단지에서는 평균 약 135 W/m²의 차이를 보여주었으며 최대 400 W/m² 가량의 차이가 발생했다. 가장 큰 차이가 발생한 지점은 공업단지 내에서 건물의 그림자 아래에 있는 지점으로 그림자 반영 여부와 인공열 반영 여부의 두 방법 간 차이가 극대화되는 지점임을 확인할 수 있었다. 이러한 지점은 도시 공간 내에서도 쉽게 찾아볼 수 있었으며 이로 인해 두 방법 간의 차이에서 높은 표준편차가 발생하였다. 나지의 경우 열수지 방정식 방법에서 물리적 산정식을 활용한 방법보다 높은 현열 플럭스가 도출된 유일한 표면으로 서로

간의 차이는 -23.2 W/m²로 나타났다. 앞선 표면에 비해 유의미한 차이라고 보기는 어려우나 열수지 방정식 방법이 나지의 현열 플럭스를 과대평가할 수 있음을 확인할 수 있었다. 산림, 수변공간, 공원 등 인공열의 발생이 없거나 매우 적은 장소는 두 결과의 차이가 대부분 +5~+15 W/m²로 나타나 인공열 이외의 요소로 인한 오차는 거의 없음을 확인할 수 있었다. 실제 두 방법 간의 차이는 평균 24.3 W/m², 17 W/m²로 완벽히 0 W/m²에 수렴하는 모습은 아니었으나 10 W/m² 이상의 차이를 보이는 지역은 대부분 녹지 및 수변공간의 가장자리로 해상도에 따른 오차 발생 가능성이 큰 지역임을 확인할 수 있었다. 따라서 두 방법 간의 가장 큰 차이점은 인공열 반영 여부라고 말할 수 있으며, 도시 지역에서 인공열은 열 환경에 유의미한 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 특히 공업단지에서 인공열에 의해 증가하는 현열 플럭스는 태양에 의해 발생하는 현열 플럭스와 유사할 정도로 높은 결과를 보여 도시 지역의 열 환경을 평가할 때 인공열을 반드시 고려해야 함을 보여주었다.

정리하자면, 열수지 방정식을 통한 현열 플럭스 추정 방법은 데이터 구축이 쉽고 높은 해상도로 결과를 도출할 수 있지만 인공열을 반영할 수 없어 도시 지역의 정확한 평가에는 적합하지 않다고 할 수 있다. 반면에 물리적 기반의 현열 플럭스 추정 방법은 도시에서 발생하는 인공열을 반영할 수 있어 좀 더 정확하게 현열 플럭스를 추정할 수 있으나 원하는 시점의 데이터를 구축하기 어려워 제한적인 평가만 가능하다는 단점이 있다.

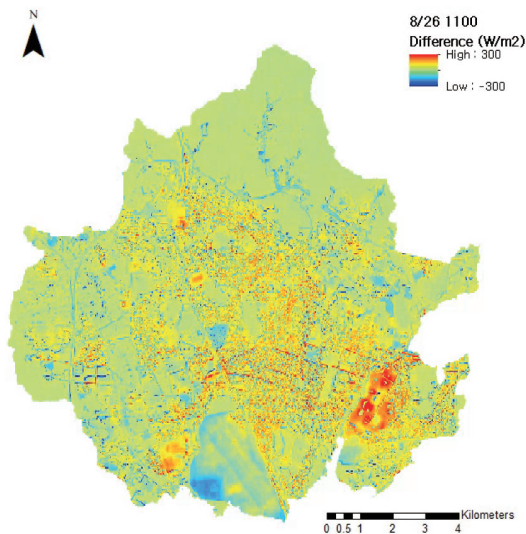


Figure 5. Difference of sensible heat flux distribution between two method for Suwon, Korea on August 26th, 2017 1100 KST (Physical equation method - heat balance equation method).

IV. 결론

본 연구에서는 두 가지 방법을 통해 동일한 지역에 대해 현열 플럭스를 추정해보고 그 결과를 비교하여 방법 간의 차이를 확인하였다. 두 방법 모두 다양한 연구에서 활용되고 있으나 아직 서로 간의 상대적인 비교가 이루어지지 않아 왔다.

열수지 방정식을 통해 현열 플럭스를 추정할 경우 상대적으로 많은 입력자료가 필요하다. 기본적인 기상자료뿐만 아니라 도시의 지형, 이를 통한 그림자

여부, 천공률(SVF) 등의 기하학적 자료가 필요하므로 구축하는데 더 많은 시간이 소요된다. 그러나 입력자료가 대부분 고해상도로 제공되며, 방법 자체에 시간 해상도적인 제약이 없어 원하는 시간의 결과를 고해상도로 쉽게 도출할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현열 플럭스 추정을 위해 활용되는 잠열 플럭스, 저장열 플럭스 등의 산정 방법이 대부분 다른 지역에서 진행된 연구들이기 때문에 지역적 차이에 따른 오차가 발생할 수 있고, 대부분 자연 상태의 지반을 가정했기 때문에 입력 변수로 태양에 의한 순복사열만을 고려하고 있다. 이는 도시 지역의 특징 중 하나인 인공열을 반영할 수 없는 결과를 도출하게 되어 도시 지역의 현열을 과소추정하는 오류를 범할 수 있다.

물리적 산정식을 통해 현열 플럭스를 추정하는 경우 위성 영상을 통해 표면 온도 자료를 구축하게 된다. 위성 영상을 활용하는 만큼 시간, 공간적 해상도에 제약이 발생하는 한계점이 있으나 필요한 입력자료가 적고 구축하는데 시간이 많이 필요하지 않은 장점이 있다. 물리적 산정식을 기반으로 하고 있어 오차를 최소화할 수 있다는 장점이 있으나 실제 환경의 3차원적 구조를 완벽하게 모사하지 못하는 한계점이 존재한다. 그러나 위성 영상을 통해 구축된 표면 온도의 경우 도시에서 발생하는 인공열이 반영되어 있어 도시 지역을 대상으로 할 때 인공열의 영향이 반영된 현열 플럭스 값을 추정할 수 있다. 이는 열수지 방정식 방법에 비해 도시 지역의 열 환경을 파악하는 데 있어 큰 강점을 가질 수 있으며, 인공열의 변화를 파악하는 데도 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

현재 다양한 연구에서 두 방법을 통해 현열 플럭스를 추정하고 있다. 물리적 산정식을 통해 현열을 추정하는 연구가 증가하는 추세이나, 아직은 어느 한쪽이 완벽한 정답이라고 말할 수 없으므로 서로 간의 비교를 통해 각 방법의 의의와 한계, 적용 가능성 등을 확인하여 향후 연구에 도움이 될 수 있으리라 생각한다.

사사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술

원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020002770003).

References

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300(9): D05109.
- Allen L, Lindberg F, Grimmond CSB. 2011. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology* 31(13): 1990-2005.
- Bornstein RD. 1975. The two-dimensional URBMET urban boundary layer model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 14(8): 1459-1477.
- Bornstein R, Lin Q. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment* 34(3): 507-516.
- Brutsaert W. 1982. *Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications*. D. Reidel Publ., Boston, MA.
- Bueno B, Pigeon G, Norford LK, Zibouche K, Marchadier C. 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geoscientific Model Development* 5(2): 433-448.
- Chen F, Yang X, Wu J. 2016. Simulation of the urban climate in a Chinese megacity with spatially heterogeneous anthropogenic heat data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(10): 5193-5212.
- Conti S, Meli P, Minelli G, Solimini R, Toccaceli

- V, Vichi M, Perini L. 2005. Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research* 98(3): 390-399.
- Cui W, Chui TFM. 2021. Measurements and simulations of energy fluxes over a high-rise and compact urban area in Hong Kong. *Science of The Total Environment* 765: 142718.
- Doan VQ, Kusaka H, Nguyen TM. 2019. Roles of past, present, and future land use and anthropogenic heat release changes on urban heat island effects in Hanoi, Vietnam: Numerical experiments with a regional climate model. *Sustainable Cities and Society* 47: 101479.
- Flanner MG. 2009. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models. *Geophysical Research Letters* 36(2).
- Gabey AM, Grimmond CSB, Capel-Timms I. 2019. Anthropogenic heat flux: advisable spatial resolutions when input data are scarce. *Theoretical and Applied Climatology* 135(1): 791-807.
- Grimmond CSB, Cleugh HA, Oke TR. 1991a. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 25(3): 311-326.
- Grimmond CSB, Oke TR. 1991b. An evapotranspiration interception model for urban areas. *Water Resources Research* 27(7): 1739-1755.
- Grimmond CSB, Oke TR. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 41(7): 792-810.
- Gutierrez E, Gonzalez JE, Martilli A, Bornstein R. 2015. On the anthropogenic heat fluxes using an air conditioning evaporative cooling parameterization for mesoscale urban canopy models. *Journal of Solar Energy Engineering* 137(5): 051005.
- Hamilton IG, Davies M, Steadman P, Stone A, Ridley I, Evans S. 2009. The significance of the anthropogenic heat emissions of London's buildings: A comparison against captured shortwave solar radiation. *Building and Environment* 44(4): 807-817.
- Holtzlag AAM, Van Ulden AP. 1983. A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 22(4): 517-529.
- Iamarino M, Beevers S, Grimmond CSB. 2012. High & resolution (space, time) anthropogenic heat emissions: London 1970-2025. *International Journal of Climatology* 32(11): 1754-1767.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* 99(1-2): 44-54.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2007. Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 110(1): 1-17.
- Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, Kondo H. 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy* 76(4): 449-466.
- Kwon YJ, Lee DK. 2019. Thermal comfort and longwave radiation over time in urban residential complexes. *Sustainability* 11(8):

- 2251.
- Loridan T, Grimmond CSB, Offerle BD, Young DT, Smith TE, Jarvi L, Lindberg F. 2011. Local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS): longwave radiation parameterization and seasonality-related developments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50(1): 185-202.
- Macdonald RW, Griffiths RF, Hall DJ. 1998. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment* 32(11): 1857-1864.
- Oke TR. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)* 7(8): 769-779.
- Oke TR. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455): 1-24.
- Oke TR, Spronken-Smith RA, Jauregui E, Grimmond CS. 1999. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment* 33(24-25): 3919-3930.
- Park CY, Lee DK, Krayenhoff ES, Heo HK, Ahn S, Asawa T, Kim HG. 2018. A multilayer mean radiant temperature model for pedestrians in a street canyon with trees. *Building and Environment* 141: 298-309.
- Radhi H, Fikry F, Sharples S. 2013. Impacts of urbanisation on the thermal behaviour of new built up environments: A scoping study of the urban heat island in Bahrain. *Landscape and Urban Planning* 113: 47-61.
- Sailor DJ, Lu L. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric environment* 38(17): 2737-2748.
- Smith C, Lindley S, Levermore G. 2009. Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: the case of Manchester. *Theoretical and Applied Climatology* 98(1): 19-35.
- Spronken Smith RA. 2002. Comparison of summer and winter time suburban energy fluxes in Christchurch, New Zealand. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 22(8): 979-992.
- Yuan C, Adelia AS, Mei S, He W, Li XX, Norford L. 2020. Mitigating intensity of urban heat island by better understanding on urban morphology and anthropogenic heat dispersion. *Building and Environment* 176: 106876.
- Yu C, Hu D, Wang S, Chen S, Wang Y. 2021. Estimation of anthropogenic heat flux and its coupling analysis with urban building characteristics-A case study of typical cities in the Yangtze River Delta, China. *Science of The Total Environment* 774: 145805.
- Varquez ACG, Kiyomoto S, Kanda M. 2021. Global 1-km present and future hourly anthropogenic heat flux. *Scientific Data* 8(1): 1-14.
- Zhang X, Aono Y, Monji N. 1998. Spatial variability of urban surface heat fluxes estimated from Landsat TM data under summer and winter conditions. *Journal of Agricultural Meteorology* 54(1): 1-11.