

기상 조건에 따른 도시 캐노피 모형의 성능 비교

유영희¹⁾ · 백종진^{1)*} · 이상현²⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부

²⁾공주대학교 대기과학과

(접수: 2012년 10월 24일, 게재확정일: 2012년 12월 1일)

Performance Comparison of an Urban Canopy Model under Different Meteorological Conditions

Young-Hee Ryu¹⁾, Jong-Jin Baik^{1)*}, and Sang-Hyun Lee²⁾

¹⁾*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

²⁾*Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea*

(Received: 24 October 2012, Accepted: 1 December 2012)

Abstract The performances of the Seoul National University Urban Canopy Model (SNUUCM) under different meteorological conditions (clear, cloudy, and rainy conditions) in summertime are compared using observation dataset obtained at an urban site. The daily-averaged net radiation, sensible heat flux, and storage heat flux are largest in clear days and smallest in rainy days, but the daily-averaged latent heat flux is similar among clear, cloudy, and rainy days. That is, the ratio of latent heat flux to net radiation increases in order of clear, cloudy, and rainy conditions. In general, the performance of the SNUUCM is better in clear days than in cloudy or rainy days. However, the performance in simulating sensible heat flux in clear days is as poor as that in rainy days. For all the meteorological conditions, the performance in simulating latent heat flux is worst among the performances in simulating net radiation, sensible heat flux, and latent heat flux. The normalized mean error for latent heat flux is largest in rainy days in which the relative importance of latent heat flux in the surface energy balance becomes greatest among the three conditions. This study suggests that improvements to the parameterization of processes that are related to latent heat flux are particularly needed.

Key words: Urban canopy model, meteorological conditions, net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, storage heat flux

1. 서 론

많은 관측 연구를 통해 도시 열섬, 도시풍, 도시 풍 하층에서의 강수 증가 등 도시 지역에서 흥미로운 기상 현상이 나타남이 밝혀졌다 (예, Arnfield, 2003; Shepherd, 2005). 중규모 모형을 이용하여 이러한 기상 현상을 잘 모의하고 예측하기 위해서는 중규모 모

형에 도시 지표 영향이 잘 반영되어야 한다. 그러나 일반적으로 사용되는 중규모 모형의 수평 격자 크기는 수 km에서 수십 km이기 때문에 중규모 모형을 이용하여 도시 캐노피 내 구조물 (건물과 도로 등)을 직접 분해할 수 없고, 따라서 도시 캐노피 내에서 일어나는 여러 물리 과정을 직접 모사할 수 없다. 이러한 한계를 극복하기 위해 지난 십여 년간 중규모 모형에 사용될 수 있는 도시 캐노피 모형이 개발되어 왔다 (예, Masson, 2000; Kusaka *et al.*, 2001; Martilli *et al.*, 2002; Lee and Park, 2008). 도시 캐노피 모형은 도시 캐노피를 건물과 도로 그리고 건물과 도로로 둘러싸

*Corresponding Author: Jong-Jin Baik, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea.

Phone : +82-2-880-6990, Fax: +82-2-883-4972
E-mail : jjbaik@snu.ac.kr

인 협곡으로 단순화하여 도시 캐노피 층에서 일어나는 여러 물리 과정을 모수화한다.

최근 Ryu *et al.* (2011)이 기존 도시 캐노피 모형보다 더 많은 물리 과정을 포함하는 도시 캐노피 모형 (Seoul National University Urban Canopy Model: SNUUCM)을 개발하였고, 관측 자료를 이용한 모형 검증은 통해 모형의 우수한 성능을 보였다. 그러나 Ryu *et al.* (2011)은 날씨가 맑은 경우에 대해서만 모형을 검증하였다. 도시 캐노피 모형이 접목된 중규모 모형을 이용하여 도시 지역의 기상 현상을 잘 모의하고 예측하기 위해서는 날씨가 맑은 때뿐만 아니라 그 외의 기상 조건에 대해서도 모형의 성능이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 스위스 바젤 (Basel)의 도심 지역에 대한 관측 자료를 이용하여 날씨가 맑을 때, 흐릴 때, 비가 올 때에 대해 도시 캐노피 모형의 성능을 검증·비교하고, 이 결과를 바탕으로 향후 도시 캐노피 모형의 개선 방향을 제안하고자 한다.

2. 모형 개요 및 관측 자료

2.1. 도시 캐노피 모형

본 절에서 Ryu *et al.* (2011)이 개발한 도시 캐노피 모형을 간략히 소개한다. Fig. 1은 SNUUCM의 모식도이다 (Ryu *et al.*, 2011). SNUUCM은 복사에너지 전달 과정, 난류에너지 교환 과정, 표층과 기층 (substrate)

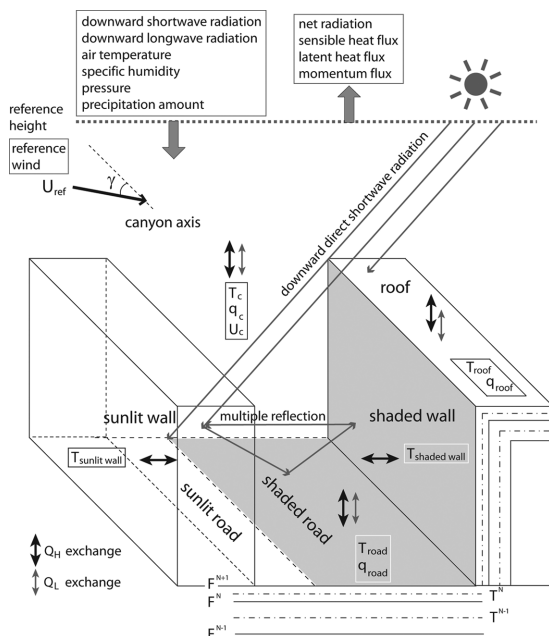


Fig. 1. An illustration of the Seoul National University Urban Canopy Model [adopted from Ryu *et al.* (2011)].

간의 열 전달 과정 등 도시 캐노피 층에서 일어나는 여러 중요한 물리 과정을 모수화한다. 기존 도시 캐노피 모형과 달리 SNUUCM에서 마주보고 있는 건물 벽은 태양의 방위각과 협곡 방향에 따라 햇빛을 직접 받는 벽과 그늘지는 벽으로 나뉜다. 또한 기존 모형과 달리 협곡 내 난류에너지 교환을 모사하는 데 협곡 외관비의 영향뿐만 아니라 협곡 방향에 상대적인 외부 풍향의 영향도 반영되었다. 다음 각 절에서 SNUUCM에 포함된 물리 과정에 대해 보다 자세히 기술한다.

2.1.1. 복사에너지 전달 과정

본 도시 캐노피 모형에는 협곡 내의 그림자 효과와 단파복사에너지의 다중 반사 등 중요한 단파복사에너지 물리 과정이 고려되었다. 태양의 방위각과 협곡 방향에 따라 햇빛을 직접 받는 벽과 그늘지는 벽을 결정 한 후, 도로 및 벽에 도달하는 직달 단파복사에너지를 계산한다. 기준 고도에서의 직달 단파복사에너지는 도로에 드리워지는 그림자를 고려하여 도로와 햇빛을 직접 받는 벽에 분배되며, 그늘지는 도로 및 그늘지는 벽에 도달하는 직달 단파복사에너지는 0이다. 각 표면에 도달하는 전천 단파복사에너지는 직달 단파복사에너지와 산란 단파복사에너지의 합으로 구해지며, 본 모형에서 산란 단파복사에너지는 등방성을 지닌다고 가정하였다. 각 면에 도달하는 산란 단파복사에너지는 각 면에 대한 view factor를 이용하여 계산된다. 협곡 내에서 일어나는 단파복사에너지의 다중 반사는 Lee and Park (2008)을 따라 3회까지 고려하였다. 각 표면에서 반사된 단파복사에너지는 등방성을 지닌다고 가정하였다. 특정 면에서 반사된 단파복사에너지가 다른 면에 도달하는 비율은 view factor에 의해 결정된다.

일반적으로 흡수율 또는 방출률이 큰 도시 표면 물질의 성질을 고려하여 장파복사에너지는 협곡 내에서 1회 반사되는 것으로 모수화하였다. 모든 장파복사에너지는 등방성을 지닌다고 가정하였다. 복사에너지 전달 과정에서 마지막으로 반사되는 단·장파복사에너지는 표면에 모두 흡수된다고 가정하여 복사에너지 보존을 만족시켰다. 각 면에서 최종 흡수 (또는 방출) 되는 단·장파복사에너지는 Ryu *et al.* (2011)에 기술되어 있다.

2.1.2. 난류에너지 교환 과정

난류에너지속 (현열속, 잠열속, 운동량속)은 Monin-Obukhov 상사 이론 (Kot and Song, 1998; Lee and Park, 2008) 또는 경험식 (Rowley *et al.*, 1930)을 이용하여 계산된다. 건물 옥상과 외부 공기 간의 난류에너지 교환, 협곡 공기와 외부 공기 간의 난류에너지

지 교환, 협곡 공기와 도로 간의 난류에너지 교환은 Monin-Obukhov 상사 이론에 따라 계산되며, 협곡 공기와 건물 벽 간의 난류에너지 교환은 경험식을 이용하여 계산된다. 난류에너지속은 표면과 주변 공기 간의 온도 차 (또는 비습 차), 풍속, 안정도, 거칠기 길이 등을 이용하여 계산된다. 건물 옥상 및 도로의 물수지에 강수 영향도 고려하였다. 건물 옥상 및 도로에 최대 1 kg m^{-2} 의 물이 존재할 수 있다고 가정하였고, 이 값을 초과하는 나머지 물은 배수되는 것으로 가정하였다.

2.1.3. 표층과 기층 간 열 전달 과정

건물 옥상, 건물 벽, 도로의 표층 및 기층 온도는 1 차원 열전도 방정식을 수치적으로 풀어 구한다. 전도 열속 (conductive heat flux)은 표면에서 순복사에너지, 현열속, 잠열속의 합을 경계 조건으로 두어 계산되며, 가장 안쪽 기층에 대한 전도열속의 경계 조건은 0으로 (zero-flux condition) 설정하였다. 기층 온도의 시간 변화는 표면에 수직인 방향으로 전도열속의 변화로 결정된다. 전도열속과 온도가 계산되는 격자점은 서로 어긋나 있다. 전도열속은 층의 경계점에서 계산되며, 온도는 층의 중심점에서 계산된다 (Fig. 1). 표면 온도는 표층의 중심점 온도와 같다고 가정하였다.

2.1.4. 협곡 공기 온도와 비습

협곡 공기 온도와 비습은 예단적으로 계산되며, 각각 건물 벽, 도로, 협곡 공기로부터 방출되는 현열속 (인공열 포함)과 잠열속에 의해 결정된다. 모형 내에서 열에너지속의 부호는 각 표면 (협곡 공기)에서 협곡 공기 (외부 공기)로 열에너지가 전달될 때 양 (+)이다. 협곡 내 각 표면으로부터 방출되는 열에너지속에 각 표면에 대한 면적비를 곱하여 더하고, 이 값에 협곡 공기와 외부 공기 간에 교환되는 열에너지속을 빼서 협곡 공기 온도와 비습을 구한다.

2.2. 관측 자료 및 기상 조건 분류

이용한 자료는 스위스 바젤에서 시행된 BUBBLE (Basel UrBan Boundary Layer Experiment) 캠페인 (Rotach *et al.*, 2005)의 자료이다. 가장 변화한 도심 지역에 위치한 지점 (Sperrstrasse)에서 2002년 6월 10일부터 2002년 7월 9일까지 한 달 동안 시행된 집중 관측 캠페인의 자료를 이용하였다. 검증에 사용한 도시 캐노피 모형의 지표 파라미터는 Ryu *et al.* (2011)에서 사용한 것과 같으며, 인공열의 영향은 고려하지 않았다. 도시 지역 내 시가지에 대한 에너지속은 도시 캐노피 모형을 이용하여 구하였으며, 도시 지역 내 자연 식생 지역에 대한 에너지속은 Noah 지표면 모형 (Ek *et al.*, 2003)을 이용하여 구하였다. 두 모형으로부터 얻은 에너지속에 도시 지역에 대한 시가지와

자연 식생 지역의 면적비를 곱하여 도시 지역에 대한 평균 에너지속을 구하였다.

본 연구에서 기상 조건은 하향 단파복사에너지를 이용하여 분류하였다. MATLAB[®] 내 Curve Fitting Toolbox[™] (MathWorks, 2012)를 이용하여 관측된 하향 단파복사에너지를 Fourier series로 정합 (fitting)하였다. 관측된 값과 정합된 값의 차를 이용하여 표준편차를 구하고, 이 표준편차의 일평균이 기준값 (62 W m^{-2}) 이하이면 맑은 날로 분류하였다. 기준값은 하향 단파복사에너지의 일변화가 정현 (sine) 함수의 형태에서 크게 벗어나지 않는 경우를 기준으로 하여 정하였다. 하향 단파복사에너지에 대한 표준편차의 일평균이 기준값 이상이고 강수가 기록되지 않은 날은 흐린 날로 분류하였으며, 강수가 기록된 날은 비가 온 날로 분류하였다. 총 30일 중 맑은 날, 흐린 날, 비가 온 날로 분류된 일수는 각각 10일, 11일, 9일이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상 조건 별 지표 에너지 균형

본 절에서는 관측된 에너지속을 이용하여 기상 조건에 따라 도시 지역의 지표 에너지 균형이 어떻게 다르게 나타나는지 살펴본다. Fig. 2는 각 기상 조건에 대해 평균한 하향 단파복사에너지, 상향 단파복사에너지, 하향 장파복사에너지, 상향 장파복사에너지의 일변화를 나타낸 것이다. 하향 단파복사에너지는 맑은 날에 가장 강하며 비가 온 날에 가장 약하다. 날씨가 맑을 경우 하향 단파복사에너지는 정현 함수와 유사한 일변화를 보이나, 구름이 존재하는 경우 하향 단파복사에너지는 정현 함수 형태에서 벗어나는 일변화를 보인다. 기상 조건에 따른 상향 단파복사에너지의 강도 변화 경향은 하향 단파복사에너지의 그것과 유사하다. 하향 장파복사에너지의 강도는 맑은 날이나 흐린 날보다 비가 온 날에 더 강하다. 이는 구름에 의한 장파복사에너지의 흡수 및 방출에 따른 결과이다. 하향 장파복사에너지와 달리 상향 장파복사에너지의 강도는 맑은 날에 가장 강하고 비가 온 날에 가장 약하다. 즉 기상 조건에 따른 상향 장파복사에너지의 강도 변화 경향은 하향 단파복사에너지의 그것과 유사하다. 하향 단파복사에너지가 강할수록 지표면에 흡수되는 복사에너지가 증가하고 따라서 지표면 온도가 상승한다. 지표면에서 방출되는 장파복사에너지는 지표면 온도의 네제곱에 비례하기 때문에 하향 단파복사에너지가 강할수록 지표면에서 방출되는 장파복사에너지가 증가한다.

Fig. 3는 각 기상 조건에 대해 평균한 순복사에너지, 현열속, 잠열속, 저장열속(storage heat flux)의 일변화를 나타낸 것이다. Fig. 4는 각 기상 조건에 대해 전

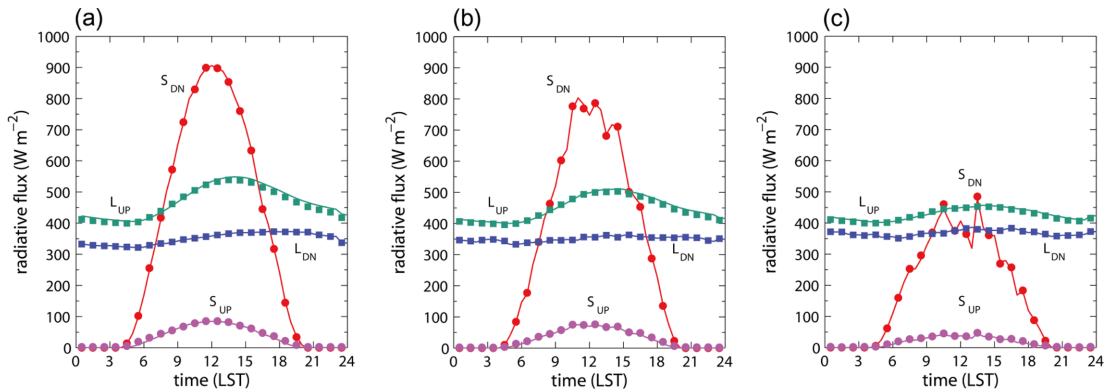


Fig. 2. Diurnal variations of observed (markers) and simulated (lines) radiative fluxes averaged over (a) clear days, (b) cloudy days, and (c) rainy days. S_{DN} and S_{UP} indicate the downward and upward shortwave radiation, respectively, and L_{DN} and L_{UP} indicate the downward and upward longwave radiation, respectively. Fig. 2(a) is adopted from Ryu *et al.* (2011).

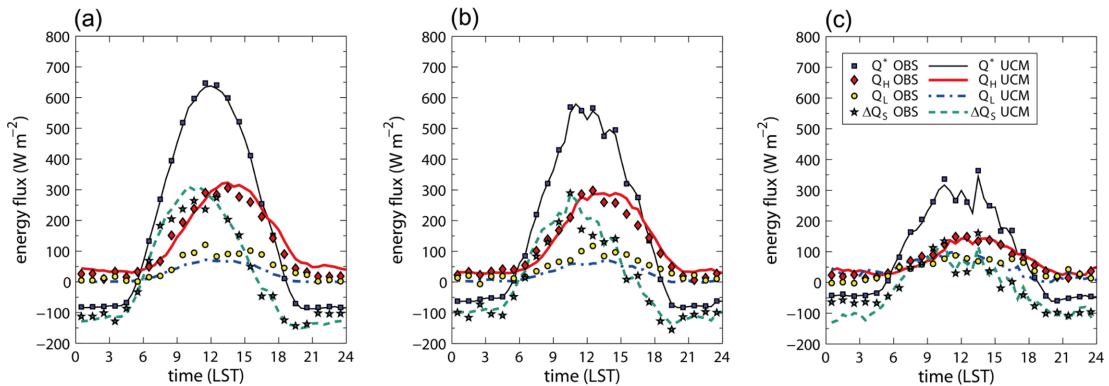


Fig. 3. Diurnal variations of observed (markers) and simulated (lines) energy fluxes averaged over (a) clear days, (b) cloudy days, and (c) rainy days. Q^* , Q_H , Q_L , and ΔQ_S indicate the net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and storage heat flux, respectively. Fig. 3(a) is adopted from Ryu *et al.* (2011).

체, 주간, 야간 시간대에 평균한 에너지속을 나타낸 것이다. 하향 단파복사에너지가 가장 강한 맑은 날에 순복사에너지가 가장 강하며 (Fig. 4(a)), 주·야간 시간대에 평균한 순복사에너지의 절댓값은 하향 단파복사에너지의 경우와 마찬가지로 맑은 날에 가장 크며 비가 온 날에 가장 작다 (Fig. 4(b), (c)). 주간 평균 현열속은 맑은 날에 가장 크며 비가 온 날에 가장 작다. 야간 평균 현열속은 기상 조건에 따라 크게 달라지지 않으며 항상 양의 값을 갖는다. 즉 이는 도시 지역에서는 날씨가 흐리거나 비가 오는 경우에도 야간에 열이 지표면으로부터 대기로 방출되는 것을 뜻한다. 주간 평균 현열속이 기상 조건에 따라 달라지는 것에 반해, 주간 평균 잠열속은 기상 조건에 따라 크게 달라지지 않는다. 야간 평균 잠열속의 값은 크게 차이가 나지 않지만 맑은 날에 가장 작고 비가 온 날에

가장 크다. 주간 평균 저장열속은 세 기상 조건에 대해 모두 양의 값을 가지며 맑은 날에 가장 크고 비가 온 날에 가장 작다. 날씨가 맑거나 흐린 경우 오전 시간에 저장열속이 크고 이 시간대에서 최댓값이 나타나는데 반해 (Fig. 3(a), (b)), 비가 오는 경우 저장열속의 최댓값은 오후 시간에 나타난다 (Fig. 3(c)). 야간 평균 저장열속은 음의 값을 가지며, 주간의 경우와 마찬가지로 날씨가 맑을 때 그 절댓값이 가장 크고 비가 올 때 가장 작다 (Fig. 4(c)). 일평균 순복사에너지, 현열속, 저장열속은 맑은 날에 가장 크고 비가 온 날에 가장 작은 경향성을 보이나 (일평균 저장열속은 비가 올 때 음수임.), 일평균 잠열속은 세 기상 조건에 따른 경향성을 보이지 않는다.

각 기상 조건에 따른 지표 에너지 균형의 변화를 보다 자세히 살펴보기 위해 순복사에너지에 대한 현

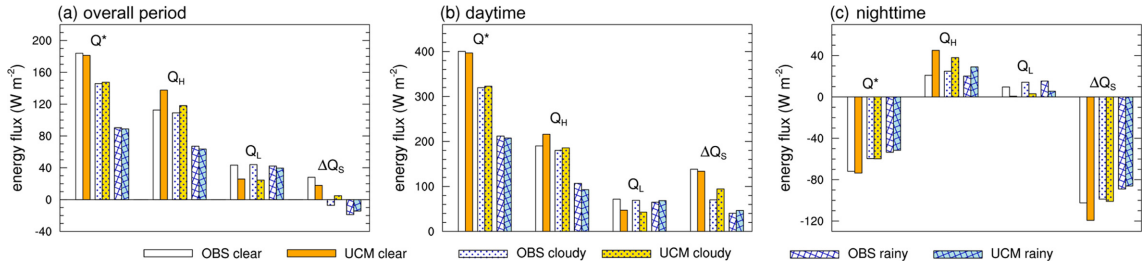


Fig. 4. Average energy fluxes for (a) overall period, (b) daytime, and (c) nighttime in clear, cloudy, and rainy days. Q^* , Q_H , Q_L , and ΔQ_S indicate the net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, and storage heat flux, respectively.

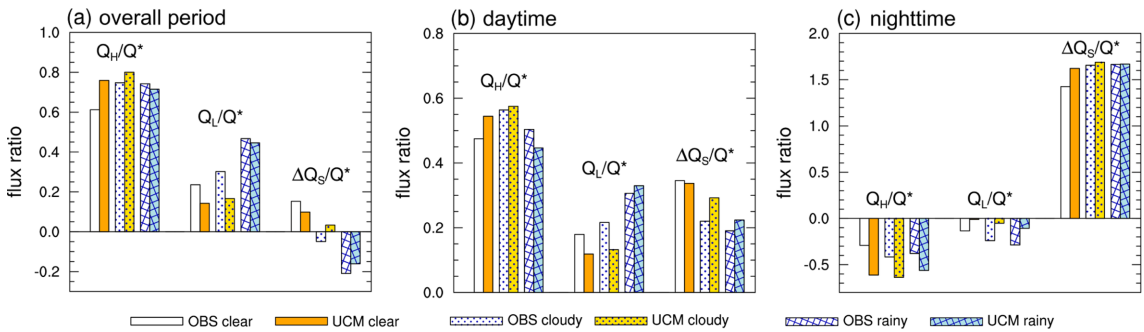


Fig. 5. Ratios of average sensible heat flux (Q_H), average latent heat flux (Q_L), and average storage heat flux (ΔQ_S) to average net radiation (Q^*) for (a) overall period, (b) daytime, and (c) nighttime in clear, cloudy, and rainy days.

열속, 잠열속, 저장열속의 비를 Fig. 5에 제시하였다. 일평균 및 주간 평균 순복사에너지와 현열속은 모두 날씨가 맑은 때 가장 크지만, 순복사에너지에 대한 현열속의 비는 날씨가 맑은 때 가장 작다 (Fig. 5(a), (b)). 순복사에너지에 대한 현열속의 비는 기상 조건 별로 뚜렷한 경향성을 보이지 않으며, 그 비는 주간의 경우 약 0.5 정도로 다른 에너지속의 비 중에서도 가장 크다. 이는 도시 지역에서는 날씨가 흐리거나 비가 오는 경우에도 주간 흡수된 복사에너지의 절반 정도가 현열로 전환되며, 모든 기상 조건에 대해 현열이 도시 지역의 일평균 열에너지 수지에서 가장 큰 비중을 차지하는 것을 뜻한다. Lee (2011)도 스위스 바젤의 도심 지역에 위치한 두 관측 지점 (Sperrstrasse와 Spalenring)에서 비가 오거나 오지 않는 경우에 모두 순복사에너지에 대한 현열속의 비가 주간 약 0.5임을 보였다. 순복사에너지의 강도는 전체, 주간, 야간 시간대에서 모두 맑은 날에 가장 강하고 비가 온 날에 가장 약하지만 (Fig. 4), 순복사에너지에 대한 잠열속의 비의 절대값은 모든 시간대에서 비가 온 날에 가장 크고 맑은 날에 가장 작다 (Fig. 5). 즉 흐리거나 비가 올 때 지표 에너지 균형에서 잠열속의 비중이 크다. 주간 평균 순복사에너지에 대한 주간 평균

저장열속의 비는 날씨가 맑을 때 가장 크고 비가 올 때 가장 작다. 이는 태양복사에너지가 강할수록 주간 도시 지역에서 흡수된 복사에너지가 저장열로 전환되는 비율이 높아져 더 많은 에너지가 도시 피복에 저장되는 것을 의미한다.

요약하면 태양복사에너지가 감소하더라도 주간 도시 지역에서 흡수된 복사에너지가 현열로 전환되는 비율은 크게 달라지지 않으며, 날씨가 흐리거나 비가 올 때 흡수된 복사에너지는 저장열로 전환되기보다는 잠열로 전환된다. Lee (2011) 역시 스위스 바젤의 도심 지역과 주변 교외 지역의 세 관측 지점에서 비가 올 때 순복사에너지에 대한 저장열속의 비가 비가 오지 않을 때 그것보다 작음을 보였고, 반면 비가 올 때 순복사에너지에 대한 잠열속의 비는 비가 오지 않을 때 그것보다 큼을 보였다.

3.2. 기상 조건 별 모형 성능

상향 단파복사에너지의 일변화 및 강도는 모든 기상 조건에 대해 잘 모의되었다 (Fig. 2). 상향 장파복사에너지는 날씨가 흐리거나 비가 올 때보다 날씨가 맑을 때 더 과대 모의되었다. 순복사에너지의 일변화 및 강도는 모든 기상 조건에 대해 전반적으로 잘 모

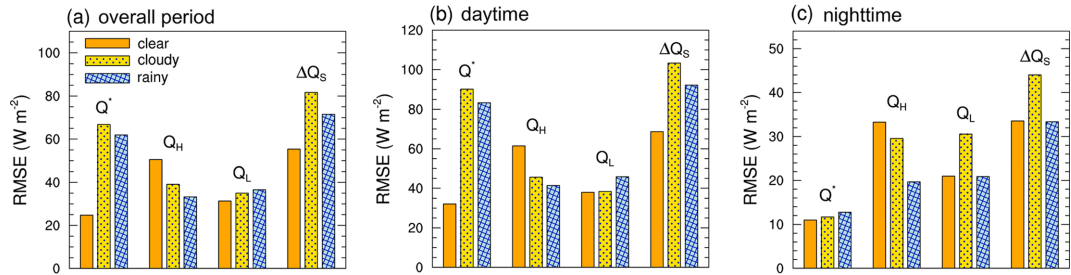


Fig. 6. Root-mean-square error (RMSE) for net radiation (Q^*), sensible heat flux (Q_H), latent heat flux (Q_L), and storage heat flux (ΔQ_S) for (a) overall period, (b) daytime, and (c) nighttime in clear, cloudy, and rainy days.

의되었다 (Fig. 3와 Fig. 4).

Fig. 6는 기상 조건 별로 각 시간대에 대해 평균한 각 에너지속의 평균제곱근오차 (Root-Mean-Square Error: RMSE)를 나타낸 것이다. 날씨가 맑을 때 모든 시간대에서 순복사에너지에 대한 평균제곱근오차가 가장 작은 반면, 하향 단 · 장파복사에너지의 변동이 큰 경우, 즉 날씨가 흐리거나 비가 오는 경우, 순복사에너지에 대한 평균제곱근오차가 크다.

현열속은 날씨가 맑거나 흐린 경우 오후 시간에 과대 모의되었으나, 현열속의 일변화는 대체로 잘 모의되었다 (Fig. 3). 전체, 주간, 야간 시간대에 평균된 현열속을 보면 모형은 모든 시간대에서 날씨가 맑거나 흐릴 때 현열을 과대 모의한 것을 알 수 있다 (Fig. 4). Fig. 4에서 모의된 값과 관측된 값의 차, 즉 평균편향오차 (mean bias error)를 확인할 수 있고, 평균편향오차는 모든 시간대에 대해 흐리거나 비가 온 날보다 맑은 날에 더 큰 것을 알 수 있다. 현열속에 대한 평균편향오차뿐만 아니라 평균제곱근오차도 맑은 날에 가장 크다 (Fig. 6). 현열속에 대한 평균제곱근오차는 모든 시간대에 대해 날씨가 맑을 때 가장 크고 비가 올 때 가장 작다. 날씨가 맑은 경우 주간에 지표면에 흡수되는 복사에너지가 증가하고 지표면이 뜨겁게 가열됨에 따라 대기가 불안정하게 된다. 모형이 날씨가 맑을 때 복사에너지는 잘 모의하는 반면, 상대적으로 현열속을 모의하는 성능이 낮은 것은 대기가 불안정한 상황에서 지표면과 대기 사이의 큰 온도 차가 열 에너지를 모의하는 데 상대적으로 큰 오차를 야기할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

잠열속은 날씨가 맑거나 흐린 경우 과소 모의되었으나 비가 온 경우 평균적으로 잘 모의되었다 (Fig. 3와 Fig. 4). 비가 온 경우 잠열속의 일변화와 강도는 전반적으로 잘 모의되었지만, 잠열속에 대한 일평균 및 주간 평균 평균제곱근오차는 세 기상 조건 중 비가 올 때 가장 크다 (Fig. 6(a), (b)).

저장열속의 일변화 및 평균 강도는 모든 기상 조건에 대해 전반적으로 잘 모의되었다 (Fig. 3와 Fig. 4).

모든 시간대에 대해 저장열속에 대한 평균제곱근오차는 다른 에너지속에 대한 평균제곱근오차보다 크다 (Fig. 6). 모형 내에서 저장열속은 직접 계산되지 않고 다른 에너지속을 이용하여 잔여속 (residual flux)으로 계산된다. 이 때문에 다른 에너지속의 오차가 누적되어 저장열속에 대한 오차는 대체로 크게 나타난다 (Grimmond and Oke, 1999; Offerle *et al.*, 2005). 저장열속에 대한 일평균 및 주간 평균 평균제곱근오차는 맑은 날에 가장 작으며 흐린 날에 가장 크다.

Fig. 5에서 모형이 모의한 순복사에너지에 대한 현열속, 잠열속, 저장열속의 비는 관측된 에너지속을 이용해 구한 비와 다소 차이를 보이지만, 기상 조건에 따른 경향성은 서로 유사함을 확인할 수 있다.

앞서 살펴본 각 에너지속에 대한 평균제곱근오차는 각 에너지속의 절댓값이 크면 클 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 에너지속에 대한 평균절대오차를 각 에너지속의 평균값으로 나눈 NME (Normalized Mean Error)를 이용하여 기상 조건에 따른 모형의 성능을 비교하였다. NME는 다음과 같이 계산된다.

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i - O_i|}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (1)$$

여기서 M 과 O 는 각각 모의된 값과 관측된 값을 나타내며, N 은 자료의 개수이다. Fig. 7은 각 기상 조건과 시간대 별로 각 에너지속에 대한 NME를 나타낸 것이다. 저장열속에 대한 오차는 다른 에너지속에 대한 오차가 누적되어 반영되고 또한 저장열속의 평균값이 작기 때문에 저장열속에 대한 NME는 다른 에너지속에 대한 NME보다 훨씬 크게 나타났다. 따라서 본래의 값에 1/10을 곱한 값을 Fig. 7에 제시하였다.

전체, 주간, 야간 시간대에 평균된 순복사에너지에 대한 NME의 절댓값은 모두 맑은 날에 가장 작고 비가 온 날에 가장 크다. 즉 날씨가 흐리거나 비가 올

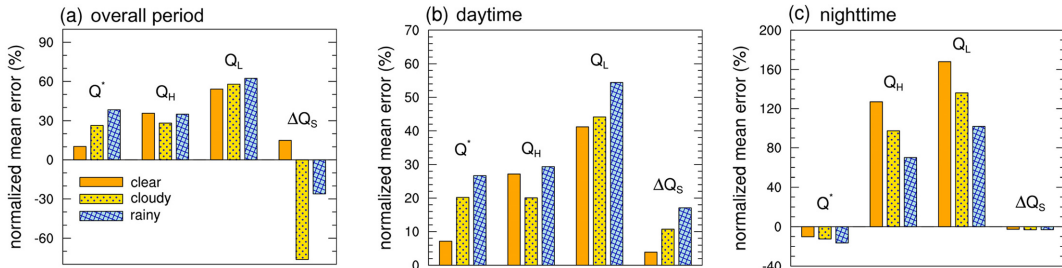


Fig. 7. Normalized mean error for net radiation (Q^*), sensible heat flux (Q_H), latent heat flux (Q_L), and storage heat flux (ΔQ_S) for (a) overall period, (b) daytime, and (c) nighttime in clear, cloudy, and rainy days. The presented normalized mean error for storage heat flux is 1/10 of the original value.

때 모형이 순복사에너지를 모의하는 성능이 상대적으로 떨어진다. 순복사에너지뿐만 아니라 모형이 현열속과 잠열속을 모의하는 성능도 대체로 비가 올 때 낮다 (Fig. 7(a), (b)). 순복사에너지에 대한 일평균 및 주간 평균 NME가 기상 조건에 따라 크게 달라지는데 반해, 현열속에 대한 NME는 그 정도로 크게 달라지지 않는다. 현열속에 대한 일평균 NME는 약 30% 정도이며 (맑은 날, 흐린 날, 비가 온 날의 일평균 NME는 각각 36%, 28%, 35%임.), 주간 평균 NME는 맑은 날, 흐린 날, 비가 온 날에 각각 27%, 20%, 29%이다. 날씨가 맑을 때 현열에 대한 NME가 큰 것은 앞서 언급한 대로 대기가 불안정한 조건에서 열에너지를 모의하는 데 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있기 때문이다. 전체 시간대에 대해 평균한 NME를 보면 기상 조건에 관계 없이 모형이 저장열속을 제외한 에너지속 중에서 잠열속을 모의하는 성능이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 도시 캐노피 모형에 대한 국제 비교 연구 프로젝트 (International Urban Energy Balance Models Comparison Project, Grimmond *et al.*, 2010, 2011)에서도 도시 캐노피 모형이 다른 에너지속보다 잠열속을 모의하는 성능이 더 낮다는 결론을 내렸다. 특히 잠열속에 대한 주간 평균 NME는 비가 올 때 가장 크다 (54%, Fig. 7(b)). 이는 지표 에너지 균형에서 잠열이 상대적으로 큰 비중을 차지하는 상황에서 비가 올 때 도시 캐노피 모형이 잠열속을 모의하는 성능이 더 떨어지는 것을 뜻한다. 현재 도시 캐노피 모형 내에서 잠열속을 모의하는 과정이 단순화되어 있다. 도시 캐노피 모형이 여러 기상 조건에 대해 에너지속을 잘 모의하기 위해서는 향후 이 부분의 개선이 필요할 것으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 세 기상 조건 (맑을 때, 흐릴 때, 비가 올 때)에 따른 도시 지역의 지표 에너지 균형과 도

시 캐노피 모형의 성능을 비교하였다. 대상 도시 지역에서 일평균 순복사에너지, 현열속, 저장열속은 맑은 날에 가장 크고 비가 온 날에 가장 작았지만, 일평균 잠열속은 세 기상 조건 별로 크게 다르지 않았다. 즉 순복사에너지가 잠열속으로 전환되는 비는 맑은 날에 가장 작고 비가 온 날에 가장 컸다. 대상 도시 지역에서 주간에 흡수된 복사에너지는 현열로 가장 많이 전환되며, 이 비 (약 0.5)는 세 기상 조건 별로 크게 다르지 않았다. 날씨가 맑은 경우 주간에 흡수된 복사에너지의 상당량이 현열과 저장열로 전환되나, 날씨가 흐리거나 비가 오는 경우 주간에 흡수된 복사에너지가 저장열로 전환되기보다 잠열로 전환되는 것으로 나타났다.

전반적으로 날씨가 맑을 때보다 흐리거나 비가 올 때 도시 캐노피 모형의 성능이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 날씨가 맑을 때도 모형이 현열을 모의하는 성능은 낮았다. 모형이 순복사에너지, 현열속, 잠열속을 모의하는 성능을 비교해 볼 때 기상 조건에 관계 없이 잠열속을 모의하는 성능이 가장 낮았다. 그 중에서도 비가 올 때 잠열속에 대한 오차가 가장 컸으며, 이는 지표 에너지 균형에서 잠열속이 큰 비중을 차지할 때 도시 캐노피 모형이 잠열속을 모의하는 성능이 떨어지는 것을 뜻한다. 본 연구의 결과는 도시 캐노피 모형 내에 잠열속을 모의하는 과정이 개선되어야 함을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No. 2012-0005674)입니다.

참고문헌

Arnfield, A. J., 2003: Two decades of urban climate

- research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1-26.
- Ek, M. B., K. E. Mitchell, Y. Lin, E. Rogers, P. Grunmann, V. Koren, G. Gayno, and J. D. Tarpley, 2003: Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8851, doi:10.1029/2002JD003296.
- Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke, 1999: Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 922-940.
- _____ and Coauthors, 2010: The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First results from phase 1. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 1268-1292.
- _____ and Coauthors, 2011: Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int. J. Climatol.*, **31**, 244-272.
- Kot, S. C. and Y. Song, 1998: An improvement of the Louis scheme for the surface layer in an atmospheric modelling system. *Bound.-Layer Meteor.*, **88**, 239-254.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteor.*, **101**, 329-358.
- Lee, S.-H. and S.-U. Park, 2008: A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Bound.-Layer Meteor.*, **126**, 73-102.
- _____, 2011: Further development of the vegetated urban canopy model including a grass-covered surface parametrization and photosynthesis effects. *Bound.-Layer Meteor.*, **140**, 315-342.
- Martilli, A., A. Clappier, and M. W. Rotach, 2002: An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Bound.-Layer Meteor.*, **104**, 261-304.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.*, **94**, 357-397.
- MathWorks, 2012: Curve Fitting Toolbox™: User's Guide (R2012b). [Available online at http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/curvefit/curvefit.pdf].
- Offerle, B., C. S. B. Grimmond, and K. Fortuniak, 2005: Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *Int. J. Climatol.*, **25**, 1405-1419.
- Rotach, M. W. and Coauthors, 2005: BUBBLE – An urban boundary layer meteorology project. *Theor. Appl. Climatol.*, **81**, 231-261.
- Rowley, F. B., A. B. Algren, and J. L. Blackshaw, 1930: Surface conductances as affected by air velocity, temperature, and character of surface. *ASHRAE Trans.*, **36**, 429-446.
- Ryu, Y.-H., J.-J. Baik, and S.-H. Lee, 2011: A new single-layer urban canopy model for use in mesoscale atmospheric models. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1773-1794.
- Shepherd, J. M., 2005: A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interact.*, **9**, 1-27.