

도시 협곡에서 건물 지붕 냉각이 스칼라 물질 확산에 미치는 영향

박수진 · 김재진*

부경대학교 환경대기과학과

(접수일: 2014년 3월 23일, 게재확정일: 2014년 6월 23일)

Effects of Building-roof Cooling on Scalar Dispersion in Urban Street Canyons

Soo-Jin Park and Jae-Jin Kim*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 23 March 2014; accepted 23 June 2014)

Abstract In this study, the effects of building-roof cooling on scalar dispersion in three-dimensional street canyons are investigated using a computational fluid dynamics (CFD) model. For this, surface temperature of building roof is systematically changed and non-reactive pollutants are released from street bottom in urban street canyons with the aspect ratio of 1. The characteristics of flow, air temperature, and non-reactive pollutant dispersion in the control experiment are analyzed first. Then, the effects of building-roof cooling are investigated by comparing the results with those in the control experiment. In the control experiment, a portal vortex which is a secondary flow induced by ambient air flow is formed in each street canyon. Averaged air temperature is higher inside the street canyon than in both sides of the street canyon, because warmer air is coming into the street canyon from the roof level. However, air temperature near the street bottom is lower inside the street canyon due to the inflow of cooler air from both sides of the street canyon. As building-roof temperature decreases, wind speed at the roof level increases and portal vortex becomes intensified (that is, downdraft, reverse flow, and updraft becomes stronger). Building-roof cooling contributes to the reduction of average concentration of the non-reactive pollutants and average air temperature in the street canyon. The results imply that building-roof cooling has positive effects on improvement of thermal environment and air quality in urban areas.

Key words: CFD model, urban street canyon, building-roof cooling, non-reactive pollutant

1. 서 론

도시화로 인한 토지 피복 변화는 도시 지역의 지표 복사율과 에너지 수지 등에 영향을 미치는 등 도시 지역 열적 환경을 변화시킨다(Santamouris, 2001; Park, 2004; Giridharan *et al.*, 2007). 특히, 도시 개발에 의 한 목초지 감소와 콘크리트 비율 증가는 도시 지역

기온을 상승시키고(Yeo and Yoon, 2009; Lee *et al.*, 2010; Kim and Yeom, 2012), 도시 지역 흐름과 오염 물질 확산에 영향을 미친다(Rosenfeld *et al.*, 1995; Sini *et al.*, 1996; Kim and Baik, 2005; Offerle *et al.*, 2007; Kang *et al.*, 2008; Kim and Baik, 2010). Offerle *et al.* (2007)은 도시 협곡의 건물 벽면 가열에 따른 협곡 내 풍향·풍속과 온도 분포 변화를 관측·조사하였고, Sini *et al.* (1996)은 협곡 내 차등 가열에 따른 흐름 변화와 오염 물질 농도 분포를 조사하였다. 이들 연구는 도시 협곡에서의 지표면 가열이 협곡 내 기온을 상승시킬 수 있음을 나타내었다. Rosenfeld *et al.* (1995)은 도시 지역에서 대기 온도 22°C를 기준으

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1, Daeyeon 3-Dong, Nam-Gu, Busan 608-737, Korea.
Phone : +82-51-629-6645, Fax : +82-51-629-6638
E-mail: jjkim@pknu.ac.kr

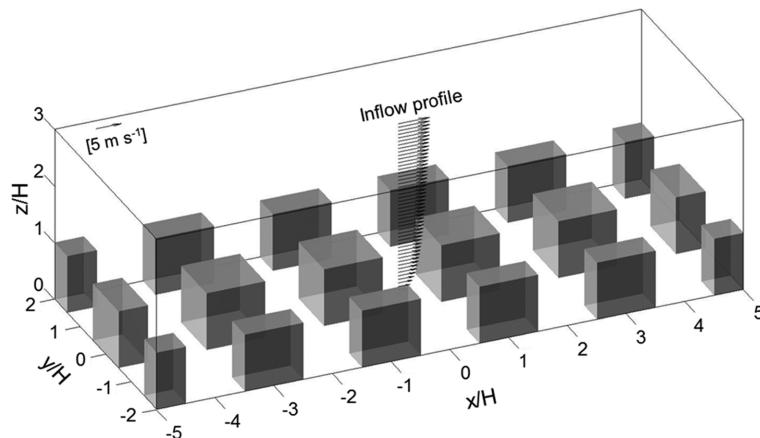


Fig. 1. Building configuration of cubical buildings. H is the building height.

로 6%/ $^{\circ}\text{C}$ 의 비율로 스모그 발생 확률이 증가함을 보고 한 바 있다. 따라서, 건물 벽면이나 도로 가열은 도시 고온화와 도시 사막화 현상의 원인이 되고, 도시 지역 주거 환경을 악화시킬 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 도시 지역에 녹지를 조성하여 기온을 낮추기 위한 연구가 진행되어왔다 (Voogt and Oke, 1998; Niachou *et al.*, 2001; Wong *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Alexandria and Jones, 2008; Kolokotroni and Giridharan, 2008; Lee and Kim, 2012). 이강국과 홍원화(2007)는 공단 지역과 교통이 복잡한 최근 시간의 도심 지역에서 상대적으로 높은 기온이 나타나고, 하천과 초목 지역에서 상대적으로 낮은 기온이 나타남을 보고하였다. Shashua-Bar and Hoffman (2002)은 Green CCTC 모델을 이용하여 수목에 의한 그림자가 도시 지역 기온을 감소시킴을 보였으며, Theodosiou (2003)는 분석 모델을 이용하여 건물 옥상의 토양층 두께, 수풀 밀도와 높이 등에 따른 온도 저감 효과를 조사하였다. 이들 중 대부분은 옥상 녹화에 따른 온도 저감 효과 분석을 주요한 목적으로 삼았다. 옥상 녹화가 도시 지역 흐름과 오염 물질 확산에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 제한적으로 연구되어 왔다(Alexandria and Jones, 2008; Baik *et al.*, 2012). 최근에 고해상도 대기 운동의 수치 계산이 가능한 모델을 이용하여 도시 지역 흐름과 확산에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Schlünzen *et al.*, 2003; Baik *et al.*, 2009; Tewari *et al.*, 2010). 특히, 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 모델은 미세규모에서 흐름, 기온, 오염 물질의 확산에 대한 수치 모의가 가능하기 때문에, CFD 모델을 이용한 미세규모 국지 기상에 대한 연구가 진행되고 있다(Takahashi *et al.*, 2004; Huang *et al.*, 2008; Kang *et al.*, 2008; Baik *et al.*, 2009; Kim and

Baik, 2010).

본 연구에서는 CFD 모델을 이용하여 도시 협곡에서 옥상 녹화가 기온 저감과 오염물질 확산에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 이 논문은 모두 4장으로 구성된다. 제2장에서는 연구 방법에 대해 서술하고, 제3장에서는 실험 결과에 대해 고찰한다. 마지막 장에서는 본 연구 결과를 전반적으로 요약하고 결론에 대해 서술한다.

2. 연구방법

본 연구에서 사용한 CFD 모델은 김재진(2007)이 사용한 것과 동일하다. 이 모델은 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름계를 가정하고, 벽면 경계에서의 난류 경계층 효과를 잘 반영하도록 벽면 함수(Wall function)를 사용하였다(Versteeg and Malalasekera, 1995). 난류 모수화는 표준 $\kappa-\varepsilon$ 난류 종결 방법을 사용하였다. 지배 방정식 계는 엇갈림 격자계(Staggered grid system)에서 유한 체적법(Finite volume method)과 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용하여 수치해를 구한다.

Figure 1은 미세규모의 고해상도 수치 모의를 위한 실험 도메인을 나타낸다. 모델 격자수($x \times y \times z$)는 $162 \times 66 \times 50$ 개이고, 격자 크기는 $x \times y \times z$ 방향에 대하여 모두 1.25 m의 등격자계를 사용하였다. 전체 계산 영역 크기는 $x \times y \times z$ 방향으로 각각 200 m \times 80 m \times 60 m이다. 건물의 높이(H), 너비(W), 길이(L)는 각각 20 m로 설정하였다.

CFD 모델의 유입 경계 조건은 Castro and Apsley (1997)가 제시한 연직 분포를 이용하였다. 바람(U, V, W), 난류 운동 에너지(κ), 소멸률(ε)에 대한 초기 조건

은 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (1)$$

$$V(z) = 0, \quad (2)$$

$$W(z) = 0, \quad (3)$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta'}\right)^2, \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z}, \quad (5)$$

여기서, u_* , z_0 , κ , δ' 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이 ($= 0.05$ m), von Karman 상수($= 0.4$), 경계층 두께 ($= 1000$ m)를 나타낸다. C_μ 는 난류 운동 에너지와 소멸률에 대한 경험적 상수($= 0.0845$)이다(Yakhot *et al.*, 1992).

옥상 녹화의 영향을 조사하기 위하여, 지표면 온도를 Table 1과 같이 설정하였다. 선행 연구들에 따르면, 일사가 비교적 강할 때에는 콘크리트 표면 온도는 약 50°C 까지 증가한다(Asaeda *et al.*, 1996). 도시 지역은 주로 콘크리트로 구성되어 있고, 콘크리트 지역과 녹지의 표면 온도는 최대 30°C 의 차이가 발생한다(Wong *et al.*, 2003). 본 연구에서는 옥상 녹화에 따른 옥상 건물 표면 온도 감소를 고려하기 위하여, 전체 도메인은 콘크리트로 구성되어 있다고 가정하고, 건물 옥상 온도를 일정한 비율(5°C)로 감소시켰다. 규준 실험(CTRL)은 도로 바닥과 건물 옥상 표면 온도를 50°C 로 고정시키고, 대기 온도를 20°C 로 설정하였다. 옥상 녹화 효과를 재현하기 위하여 도로 바닥 온도를 50°C 로 고정시키고, 건물 옥상 표면 온도를 5°C 씩 낮추어 20°C 까지 감소시켰다. 수치 실험은 시간 간격을 0.5초로 하여 총 4800초 동안 수행되었다. 옥상 녹화에 따른 도시 협곡 내 오염 물질 농도 분포를 분석하기 위하여 화학적 반응을 고려하지 않는 스칼라 물질을 고려하였고 침적은 없다고 가정하였다. 대기 확산 모델은 시간 간격을 0.1초로 하여 3600초 동안 수치 적분하였다. 주기적 경계 조건을 사용하였고, 모든 도로 바닥에서 3600초 동안 100 ppb s^{-1} 의 배출률로 오염 물질이 배출된다고 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 규준 실험 특성 분석

Table 1에 나타난 바와 같이, 규준 실험에서는 도로 바닥과 건물 옥상 표면 온도가 같다. Figure 2는 규준 실험에 대한 바람 벡터장을 나타낸다. 건물 옥상 고

Table 1. Summary of the numerical experiments.

Experiments	Street-bottom temperature ($^\circ\text{C}$)	Building-roof temperature ($^\circ\text{C}$)
CTRL	50	50
EXP1	50	45
EXP2	50	40
EXP3	50	35
EXP4	50	30
EXP5	50	25
EXP6	50	20

도($z/H = 0.94$)에서는 유입류 방향으로의 흐름이 나타나고(Fig. 2a), 건물 중앙 고도($z/H = 0.44$)에서는 이중 에디 순환이 나타난다(Fig. 2b). 반면, 협곡 내 최하층 고도($z/H = 0.03$)에서는 유입류와 반대 방향의 흐름과 협곡 외부로 유출되는 흐름이 나타난다(Fig. 2c). 연직 방향의 바람 벡터장을 살펴보면, 협곡 중심($y/H = 0.03$)에서 하나의 소용돌이가 나타나고(Fig. 2e), 협곡의 가장자리($y/H = -0.44$ and $y/H = 0.44$)에서는 풍하측 건물 부근 하층에서 소용돌이 중심이 나타난다(Figs. 2d, f). 풍상측 건물 부근($x/H = -0.44$)에서는 상승 기류와 협곡 외부로 유출되는 흐름이 나타나고(Fig. 2g), 풍하측 건물 부근($x/H = 0.44$)에서는 하강 기류와 협곡 내부로 수렴하는 흐름이 나타난다(Fig. 2i). 이들을 종합하면, 도시 협곡 내에서 포탈 형태의 소용돌이가 형성됨을 알 수 있다.

Figure 3은 z 방향에 직교한 속도 성분의 평균 풍속($1/M \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} \sqrt{U^2 + V^2} dy$, $M = y$ 방향 격자수)과 평균 연직 성분 속도($1/N \int_{z/H=0.0}^{z/H=1.0} W dz$, $N = z$ 방향 격자수) 분포를 나타낸다. 도시 협곡 흐름은 주변 바람에 의해 2차적으로 형성된 것으로 주변 바람에 비해 풍속이 낮게 나타난다(Figs. 3a, b). 또한, 도시 협곡의 가장자리에 비해 중심에서의 풍속이 낮게 나타나고, 풍하측 부근보다는 풍상측 부근에서 평균 풍속이 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 평균 연직 성분 속도의 경우, 도시 협곡 내 발생하는 포탈 소용돌이에 의해 풍상측 부근에서 상승 기류가 나타나고, 풍하측 부근에서 하강 기류가 나타난다(Figs. 3c, d). 도시 협곡 내 최대 평균 상승 속도와 하강 속도는 각각 0.95 m s^{-1} 과 -0.90 m s^{-1} 이다.

수평으로 평균한 기온($1/N \int_{z/H=0.0}^{z/H=1.0} T dz$) 분포의 경우, 풍하측 건물 부근에서는 도시 협곡 양 옆으로부터 건물 중앙으로 수렴하는 비교적 차가운 기류에 의해 비교적 낮은 기온이 나타난다. 풍상측 건물 부근에서는 가열면(도시 협곡 바닥)을 지나온 비교적 따뜻한 기류가 상승하면서 풍하측 부근보다 높은 기온이 나타난다(Fig. 4a). 도시 협곡 중앙 부근에서 나타난 최고

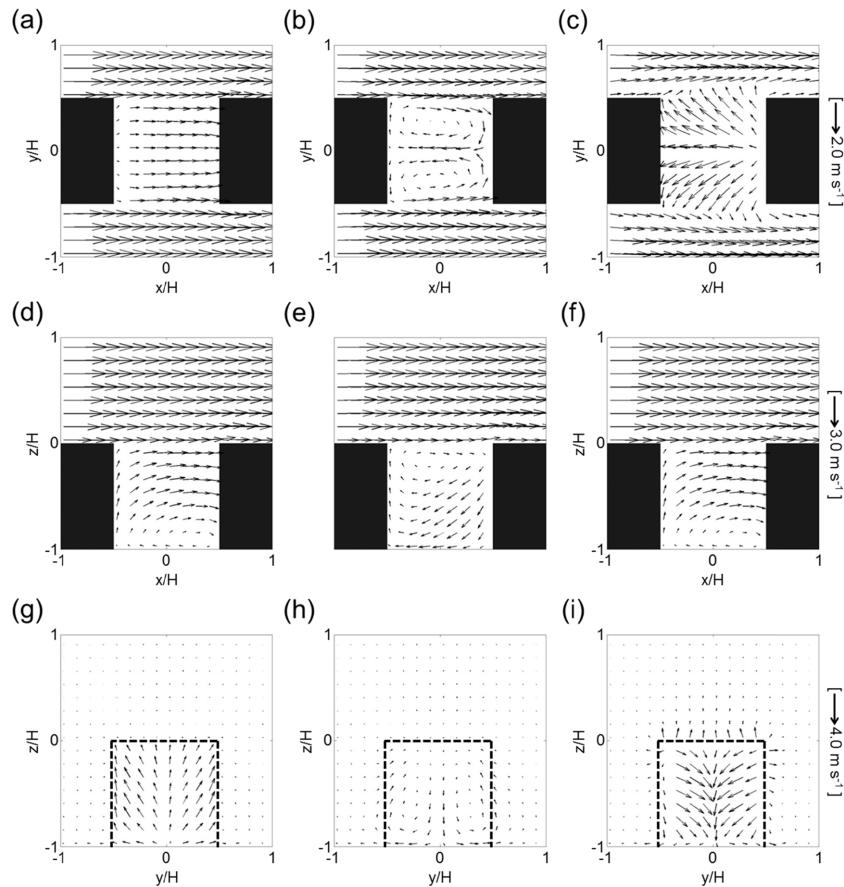


Fig. 2. Fields of wind vector at $z/H =$ (a) 0.03, (b) = 0.44, and (c) 0.94 in the x-y plain, at $y/H =$ (d) -0.44, (e) 0.03, and (f) 0.44 in the x-z plain, and at $x/H =$ (g) -0.44, (h) 0.03, and (i) 0.44 in the y-z plain in the control experiment.

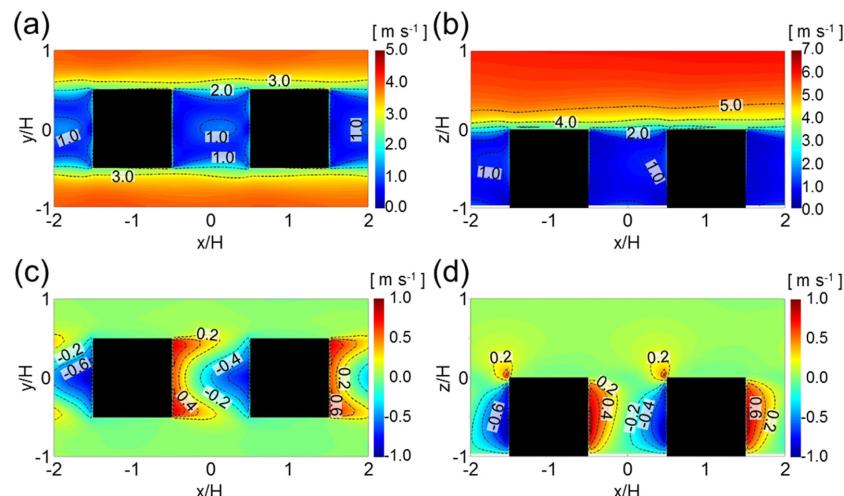


Fig. 3. Contours of the horizontal [(a) and (b)] and vertical wind components [(c) and (d)] in the control experiment. Left panels are averaged vertically from $z/H = 0.0$ to 1.0 and right panels are averaged horizontally from $y/H = -0.5$ to 0.5.

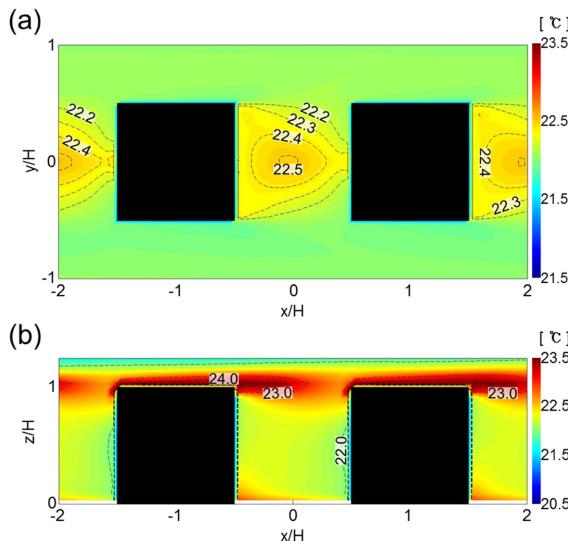


Fig. 4. Contours of air temperature averaged (a) vertically from $z/H = 0.0$ to 1.0 and (b) horizontally from $y/H = -0.5$ to 0.5 in the control experiment.

평균 기온($= 22.52^{\circ}\text{C}$)은 주로 도시 협곡 옥상 고도의 높은 기온에 의한 것으로 판단되며, 이를 연직 방향으로 평균한 기온($1/M \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} T dy$) 분포(Fig. 4b)에서 확인할 수 있다. 도시 협곡 바닥과 지붕의 표면 온도가 같지만, 지붕 고도 부근의 기온이 바닥 근처의 기온보다 높게 나타나는데, 이는 풍하측 건물 근처에서 수렴된 주변의 차가운 기류에 의한 것으로 판단된다.

비반응성 오염물질의 확산 특성을 분석하기 위하여, 무차원화한 농도를 사용하였다. 무차원화 방법은 Pavageau and Schatzmann (1999)이 제안한 방법을 따랐고, 무차원 농도(K)는 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{CU_{ref}HL}{Q}, \quad (6)$$

여기서, C , U_{ref} , H , L , Q 는 각각 비반응성 오염물질 농도, 기준 고도에서의 풍속, 건물 높이, 오염원 배출 원 길이, 오염 물질 배출률을 나타낸다. 연직 방향으로 평균한($1/N \int_{z/H=0.0}^{z/H=1.0} K dz$) 분포의 경우, 풍하측 건물 부근에서 도시 협곡 양 옆으로부터 저농도의 기류가 수렴되면서, 도시 협곡의 중앙에 이르는 지역에서 비교적 낮은 농도가 나타나고, 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 농도가 높아진다(Fig. 5a). 도시 협곡 내 평균 농도가 외부의 평균 농도보다 낮다는 사실은 주목할 만하다. 수평 방향으로 평균한 농도($1/M \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} K dy$) 분포의 경우, 도시 협곡 바닥 근처에서 농도가 가장 높고, 상층으로 갈수록 농도가 감소한다. 2차원 도시 협

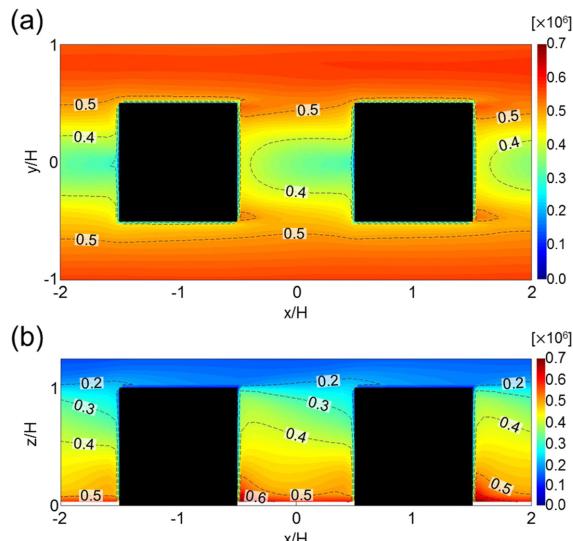


Fig. 5. The same as Fig. 4 except for non-dimensional concentration of non-reactive pollutants. Concentration is normalized by the same method as Pavageau and Schatzmann (1999).

곡에 대한 선행 연구(Sini *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2001; Baik and Kim, 2002)에 의하면, 오염원을 지나는 기류가 풍상측 건물 부근에서 상승하면서, 풍상측에서 농도가 가장 높고 풍하측에서 농도가 가장 낮다. 도시 협곡 중심($y/H = 0$) 부근에서 같은 고도의 농도를 비교하였을 때, 풍상측이 풍하측보다 높다는 점은 2차원 도시 협곡과 유사하다. 그러나 도시 협곡 가장자리($y/H = -0.5$ 또는 0.5) 부근에서는 도시 협곡을 빠져 나가던 오염 물질이 포탈 소용돌이에 의해 풍하측으로 재유입되면서(Figs. 2d, f and h), 풍하측에서도 높은 농도가 나타난다(Fig. 5b). 도시 협곡 내 최고 평균 농도($= 0.74 \times 10^6$)는 도시 협곡 내 형성된 포탈 소용돌이에 의해 풍상측 건물 부근에서 나타난다(Fig. 5b).

Figure 6은 최하층 고도($z/H = 0.03$)의 기온과 무차원 농도 분포를 나타낸다. 기온의 경우, 도시 협곡 양 측면에서 유입되는 비교적 차가운 기류가 하강하면서 풍하측 건물 부근에서 낮은 기온이 나타난다(Fig. 6a). 농도의 경우, 최하층 고도에서 역류와 도시 협곡 외부로 유출되는 흐름(Fig. 2c)이 존재하기 때문에, 풍하측 건물 부근에서 가장 낮은 농도($= 0.45 \times 10^6$)가 나타나고, 풍상측과 도시 협곡 양 측면으로 갈수록 농도가 증가한다(Fig. 6b). 즉, 이 결과로부터 도시 협곡 내부보다는 바람이 불어 들어오는 방향에 위치한 도로 지역(도시 협곡 외부)의 기온이 높고, 도로 지역으로부터 배출되는 대기오염물질의 농도가 높다는 것을 알 수 있다.

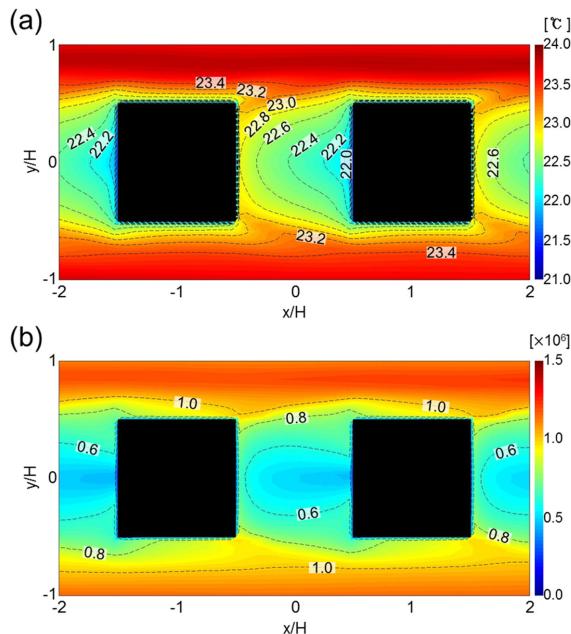


Fig. 6. Contours of (a) air temperature and (b) non-dimensional concentration at $z/H = 0.03$ in the control experiment.

Figure 7은 도시 협곡 내에서 평균한 수평 풍속, 기온, 무차원 농도를 나타낸다. 도시 협곡 내 연직 분포를 분석하기 위해 평균 수평 풍속(\bar{U}), 평균 기온(\bar{T}),

평균 농도(\bar{K})를 다음과 같이 계산하였다.

$$\bar{U} = 1/MN \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} \int_{x/H=-0.5}^{x/H=0.5} \sqrt{U^2 + V^2} dx dy, \quad (7)$$

$$\bar{T} = 1/MN \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} \int_{x/H=-0.5}^{x/H=0.5} T dx dy, \quad (8)$$

$$\bar{K} = 1/MN \int_{y/H=-0.5}^{y/H=0.5} \int_{x/H=-0.5}^{x/H=0.5} K dx dy. \quad (9)$$

평균 수평 풍속의 경우, 하부 도시 협곡($z/H < 0.84$)에서는 내에서 1 m s^{-1} 이하의 비교적 낮은 풍속이 나타나고, 상부($0.84 < z/H < 1.0$)에서는 풍속이 급격히 증가한다(Fig. 7a). 평균 기온의 경우, 상층($z/H > 0.28$)에서는 도로 바닥과 건물 옥상 표면의 가열 효과로 인해 협곡 외부 기온보다 높게 나타나지만, 하층($z/H < 0.28$)에서는 도시 협곡의 양 측면에서 유입되는 비교적 차가운 공기로 의해 도시 협곡 외부 기온보다 오히려 낮게 나타난다(Fig. 7b). 평균 농도의 경우, 오염 물질이 배출되는 최하층 고도에서의 농도가 가장 높게 나타나고, 고도가 증가하면서 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 도시 협곡 내부 농도는 오염 물질이 도시 협곡 외부로 유출되기 때문에, 도시 협곡 외부 농도보다 낮게 나타나는데, 특히, 도시 협곡 바닥 근처에서 도시 협곡 외부 농도는 내부 농도의 약 2배 정도이다(Fig. 7c).

3.2 EXP6 특성 분석

도시 협곡에서 옥상 녹화의 영향을 조사하기 위해, 건물 옥상 표면 온도를 체계적으로 변화시키면서 수

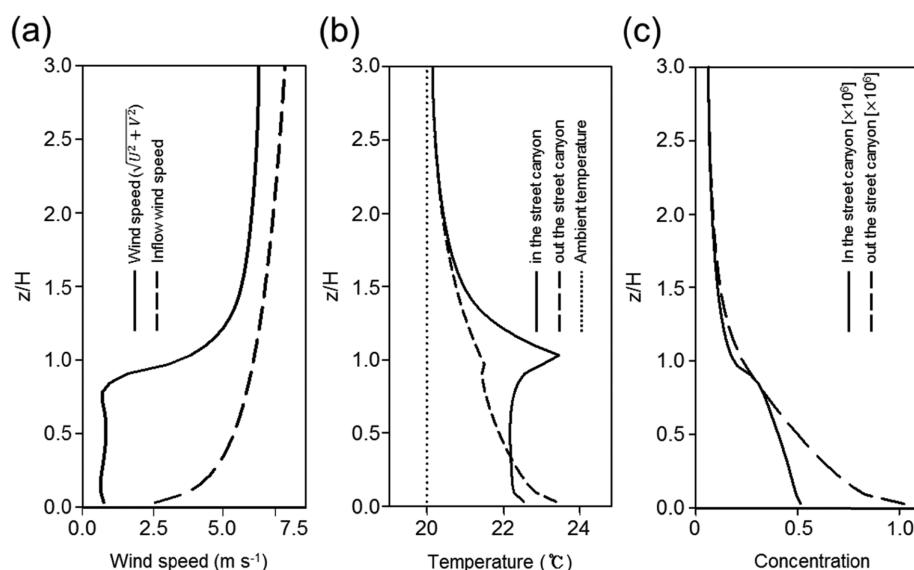


Fig. 7. Vertical profiles of wind speed, air temperature, and non-dimensional concentration averaged inside and outside the street canyon.

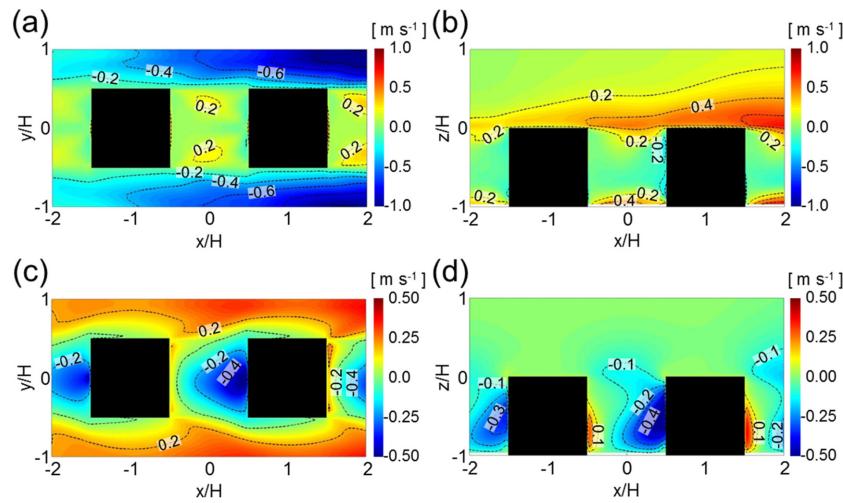


Fig. 8. The same as Fig. 3 except for the differences between the EXP6 and control experiments.

치 실험하였고, 도로 바닥과 건물 옥상 표면 온도 차이가 가장 큰 EXP6과 규준 실험(CTRL)을 비교·분석하였다. Figure 8는 EXP6과 규준 실험의 평균 풍속 차이를 나타낸다. EXP6의 경우, 도시 협곡 내 평균 풍속은 규준 실험과 비교하여 최고 0.25 m s^{-1} 증가한다(Fig. 8a). 선행 연구(Kim and Baik, 2010; Kim et al., 2014)에 따르면, 건물 옥상 냉각은 옥상 고도의 풍속을 증가시키고, 이에 따라 도시 협곡 내에 형성된 포탈 소용돌이의 강도가 강화된다. 본 연구 결과도 이를 선행 연구 결과와 일치하는데, 규준 실험과 비교하였을 때, EXP6에서는 옥상 고도의 수평 속도가 증가하고(Fig. 8b), 풍하측 지역의 하강류와 풍상측 지역의 상승류가 증가하며(Fig. 8c), 도시 협곡 내 평균 풍속이 증가하였다(Fig. 8a). 도시 협곡 내 최하층 고도의 풍속은 최대 0.52 m s^{-1} 증가하였다. 동일한 방법으로, EXP6과 규준 실험의 평균 기온을 비교·분석하였다(Fig. 9). EXP6의 경우, 도시 협곡 내 풍속 증가로 인해 도시 협곡 내부에서 평균적으로 1.47°C 감소하고, 도시 협곡의 외부에서는 0.78°C 감소한다(Fig. 9a). y 방향으로 평균한 기온의 경우, 옥상 바로 위($z/H = 1.03$)에서 최고 5.66°C 감소하였다. 도시 협곡 내에서는 풍상측 옥상 고도 바로 아래($z/H = 0.97$)에서 최고 3.88°C 까지 감소하였다(Fig. 9b).

Figure 10은 EXP6과 규준 실험의 무차원 농도 차이를 나타낸다. 앞에서 살펴 본 바와 같이, EXP6은 규준 실험에 비해 도시 협곡 외부로 유출되는 흐름이 강화된다. 이에 따라 평균 농도가 감소하는데(Fig. 10a), 도시 협곡 내에서는 평균적으로 0.66×10^6 감소하고, 도시 협곡 외부에서 0.39×10^6 감소하였다. 수평 방향으로 보았을 때에는 풍하측과 도시 협곡 가장자리(y/

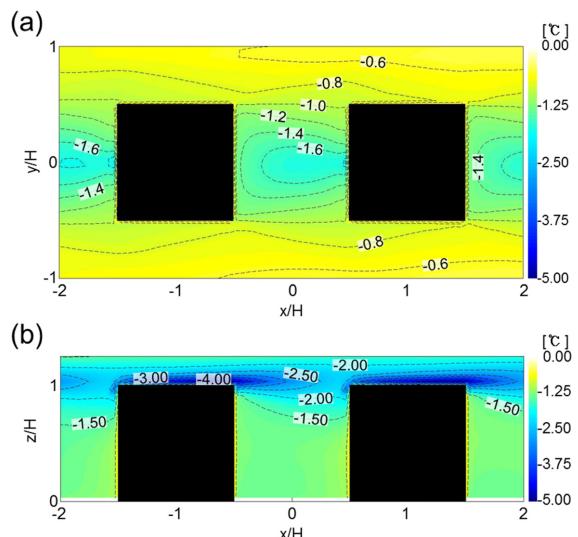


Fig. 9. The same as Fig. 4 except for the differences between the EXP6 and control experiments.

$H = -0.5$ 와 0.5 에서 평균 농도의 감소가 크게 나타났다. 상부 도시 협곡($z/H \geq 0.47$)에서는 풍하측 지역보다 풍상측 지역에서 평균 농도 감소가 크게 나타나는 반면, 하부 도시 협곡($z/H \leq 0.47$)에서는 풍하측 지역의 평균 농도 감소가 더 크게 나타난다(Fig. 10b).

Figure 11은 EXP6과 규준 실험에 대한 최하층 고도($z/H = 0.03$)의 기온과 무차원 농도 분포 차이를 나타낸다. 기온의 경우, EXP6에서는 규준 실험과 비교하여 최하층 고도의 기온이 전체적으로 감소한다. 최하층 고도에서 도시 협곡 내부와 외부의 평균 기온

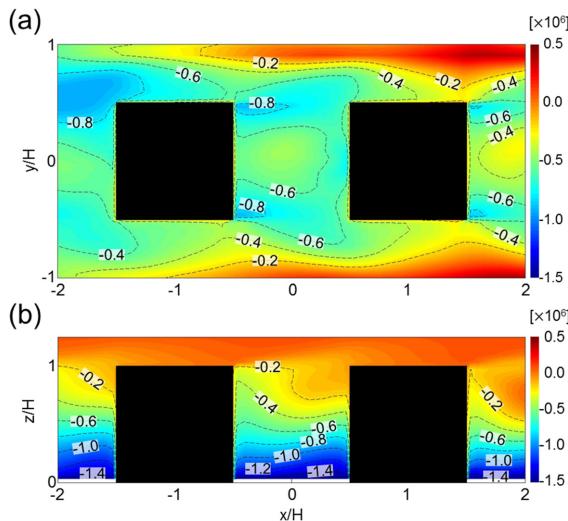


Fig. 10. The same as Fig. 5 except for the differences between the EXP6 and control experiments.

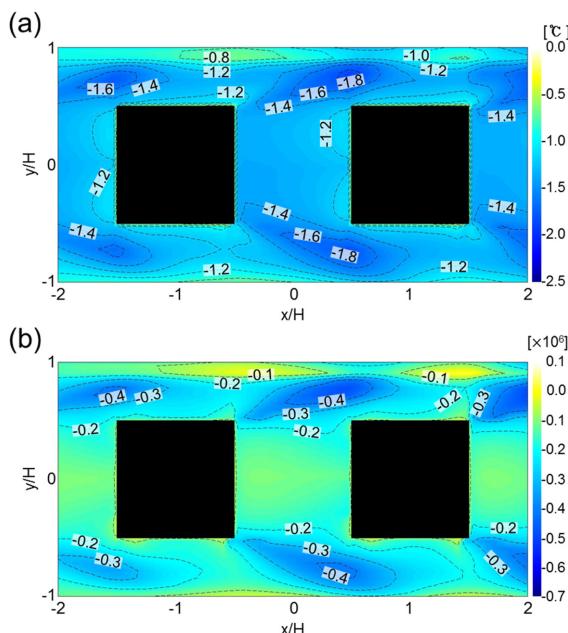


Fig. 11. The same as Fig. 6 except for the differences between the EXP6 and control experiments.

감소는 각각 -1.31°C 와 -1.29°C 이다. 최하층 고도($z/H = 0.03$)에서는 도시 협곡 내부의 풍상층에서부터 풍하층 건물 외부까지의 지역에서 평균 기온 감소가 두드러지고(Fig. 11a), 이와 동일한 지역에서 평균 농도 감소도 크게 나타난다(Fig. 11b) 이는 옥상 녹화에 의해 냉각된 상층 기류가 도시 협곡으로 유입된 후, 도시

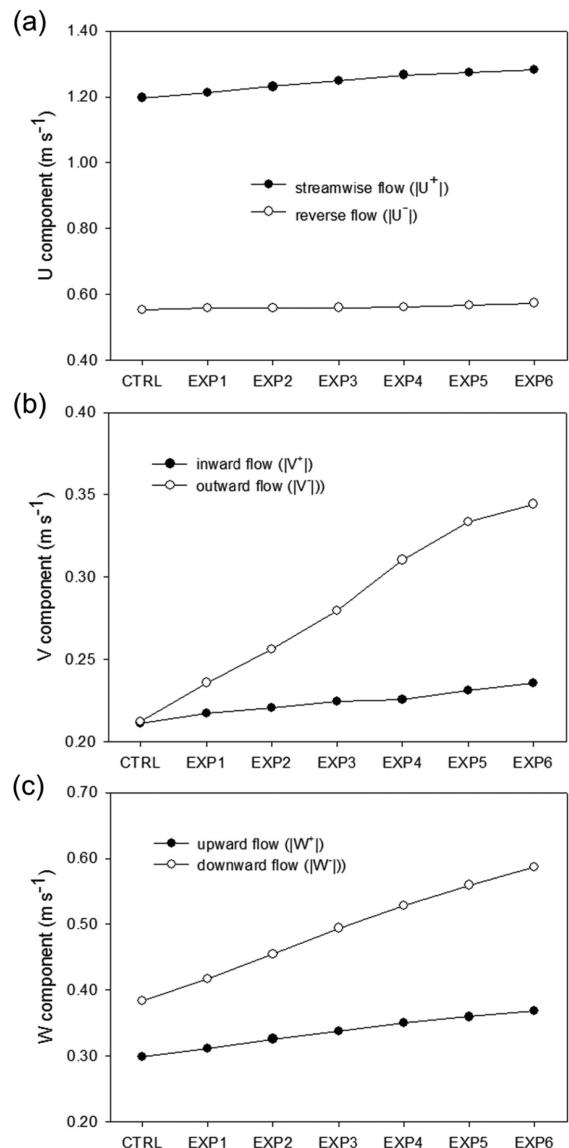


Fig. 12. Variation of (a) U, (b) V, and (c) W components averaged over the street canyon with building-roof cooling.

협곡 바닥 근처에서 외부로 유출되면서, 도시 협곡 외부의 기온을 낮춰주기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 최하층 고도의 도시 협곡 내부와 외부의 평균 농도 감소는 각각 -2.41×10^6 와 $-1.59 \times 10^6\text{°}\text{o}$ 이다.

3.3 건물 옥상 표면 온도 변화에 따른 특성 분석

도로 바닥과 건물 옥상 표면 온도 차이에 따른 도시 협곡 내부에서 평균한 U, V, W성분 속도를 조사하였다. U 성분 속도의 경우, 건물 옥상 표면 온도가

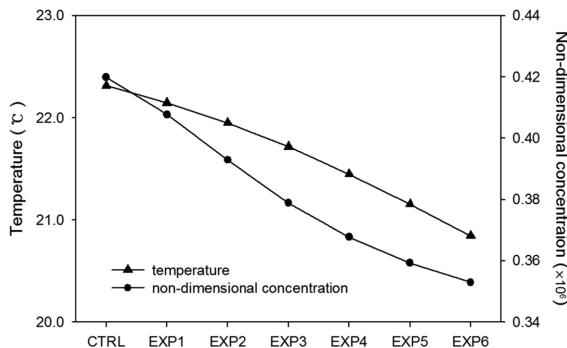


Fig. 13. Variation of air temperature and non-dimensional concentration averaged over the street canyon with building-roof cooling.

낮아질수록 유입류 방향 흐름과 역류가 강화되었다. 포탈 소용돌이의 상부에 해당되는 유입류 방향 흐름(역류)의 평균은 규준 실험에서 $1.37 (-0.41) \text{ m s}^{-1}$ 이고 EXP6에서는 $1.49 (-0.27) \text{ m s}^{-1}$ 으로 약 $0.004 (-0.005) \text{ m s}^{-1}$ 의 비율로 증가(감소)하였다. V 성분의 경우, 외부로부터 도시 협곡으로 들어오는 유입류(inward flow)와 도시 협곡으로부터 외부로 나가는 유출류(outward flow)로 구분하여 평균 속도를 구하였다. 건물 옥상 표면 온도가 낮아질수록 유입류와 유출류 크기가 증가하는데, 유입류($0.007 \text{ m s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)보다 유출류($0.018 \text{ s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)의 증가가 두드러졌다(Fig. 12b). W 성분의 경우, 풍상측의 상승 기류와 풍하측의 하강 기류 모두 건물 옥상 표면 온도가 낮아질수록 증가하였고, 하강 기류의 평균 증가율($0.025 \text{ m s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)이 상승 기류의 평균 증가율($0.008 \text{ m s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)보다 높게 나타났다(Fig. 12c).

도시 협곡 내 평균 기온과 농도는 건물 옥상 표면 온도가 낮아질수록 감소하였다(Fig. 13). 평균 기온은 규준 실험과 EXP6에서 각각 22.31°C 와 20.84°C 로 건물 옥상 표면 온도가 1°C 감소함에 따라, 도시 협곡 평균 기온은 약 0.05°C 감소하였다. 무차원화한 비반응 대기오염물질의 평균 농도는 규준실험과 EXP6에서 각각 0.42×10^6 와 0.35×10^6 로 건물 옥상 표면 온도가 낮아질수록 0.002×10^6 의 비율로 감소하였다. 즉, 건물 옥상 녹화는 도시 협곡 내부의 기온을 감소시킬 뿐만 아니라, 도시 협곡에서 배출된 대기오염물질의 평균 농도를 감소시키는 역할을 한다. 이는 건물 옥상 녹화가 도시 협곡의 열환경과 대기질환경에 긍정적인 역할을 한다는 것을 시사한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 CFD 모델을 이용하여 옥상 녹화가 도시 협곡의 흐름, 기온, 비반응 오염물질 확산에 미

치는 영향을 조사하였다. 옥상 녹화에 따른 도시 협곡 내의 흐름, 기온, 농도 분포 특성을 분석하기 위하여, 균일한 건물 군을 설정하여 도로 바닥 온도(50°C)를 고정시키고, 건물 옥상 표면 온도를 5°C 간격으로 20°C 까지 일정하게 감소시켰다. 규준 실험의 경우, 도시 협곡 내에서 하나의 포탈 형태의 소용돌이가 형성된다. 풍상측 건물 부근에서 상승 기류가 나타나고, 풍하측 건물 부근에서 건물 중앙으로 수렴하는 하강 기류가 나타난다. 상부 도시 협곡에서는 유입류와 같은 방향의 흐름이 나타나고, 하부 도시 협곡에서는 유입류와 반대 방향의 흐름이 발생한다. 기온의 경우, 도시 협곡 내에 형성된 소용돌이에 의해 건물 옥상의 비교적 따뜻한 공기가 도시 협곡 내로 유입되어, 도시 협곡 외부보다 협곡 내에서 더 높은 기온이 나타난다. 최하층 고도에서의 기온은 도시 협곡의 양 측면에서 유입되는 비교적 차가운 공기에 의해 풍하측 건물 부근에서 낮은 기온이 나타난다. 농도의 경우, 도시 협곡 외부로 유출되는 흐름에 의해 협곡 외부보다 협곡 내부에서 더 낮은 농도가 나타나고, 도시 협곡 내에서는 포탈 소용돌이에 의해 건물 지붕 고도까지 비교적 높은 농도가 나타난다. 최하층 고도의 농도는 도시 협곡 외부로 유출되는 흐름에 의해 외부보다 내부에서 낮은 농도가 나타난다.

건물 옥상을 녹화하여 표면 온도가 낮아진 경우, 옥상 고도의 수평 속도가 증가하고, 도시 협곡 내의 연직 풍속이 강화되어, 도시 협곡 내부의 전체적인 흐름이 강화된다. 옥상 녹화의 강도가 강할수록 도시 협곡 내 평균 기온과 농도는 감소한다. 평균적으로는 도시 협곡 외부보다 도시 협곡 내부의 기온과 농도 감소가 크게 나타나지만, 최하층 고도에서의 평균 농도 감소는 도시 협곡 내부보다 외부가 크게 나타났다.

결론적으로, 본 연구를 통하여 옥상 녹화는 도시 협곡 내 흐름을 강화시키고, 도시 협곡 기온과 대기 오염물질 농도를 감소시켰다. 이 연구 결과는, 향후, 도시 개발 및 녹지 조성시, 건물 옥상 온도 변화에 따른 도시 지역의 기후 및 대기질을 예측함에 있어서 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었습니다(PS-2012-0918). 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

Alexandria, E., and P. Jones, 2008: Temperature decreases

Atmosphere, Vol. 24, No. 3. (2014)

- in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build. Environ.*, **43**, 480-493.
- Asaeda, T., V. T. Ca, and A. Wake, 1996: Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmos. Environ.*, **30**, 413-427.
- Baik, J. J., and J. J. Kim, 2002: On the escape of pollutants from urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **36**, 527-536.
- _____, S. B. Park, and J. J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **48**, 1667-1681.
- _____, K. H. Kwak, S. B. Park, and Y. H. Ryu, 2012: Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmos. Environ.*, **61**, 48-55.
- Castro, I. P., and D. D. Apsley, 1997: Flow and dispersion over topography: a comparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flows. *Atmos. Environ.*, **31**, 893-850.
- Giridharan, R., S. S. Y. Lau, S. Ganesan, and B. Givoni, 2007: Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Build. Environ.*, **42**, 3669-3684.
- Huang, H., R. Ooka, H. Chen, S. Kato, T. Takahashi, and T. Watanabe, 2008: CFD analysis on traffic-induced air pollutant dispersion under non-isothermal condition in a complex urban area in water. *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, **96**, 1774-1788.
- Kang, Y. S., J. J. Baik, and J. J. Kim, 2008: Further studies of flow and reactive pollutant dispersion in a street canyon with bottom heating. *Atmos. Environ.*, **42**, 4964-4975.
- Kim, H. O., and J. M. Yeom, 2012: Effect of the urban land cover types on the surface temperature: Case study of Ilsan new city. *Korean J. Remote Sens.*, **28**, 203-214.
- Kim, J. J., 2007: The effects of obstacle aspect ratio on surrounding flows. *Atmosphere*, **17**, 381-391 (in Korean with English abstract).
- _____, and J. J. Baik, 2005: Physical experiments to investigate the effects of street bottom heating and inflow turbulence on urban street-canyon flow. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 230-237.
- _____, and _____, 2010: Effects of street-bottom and building-roof heating on flow in three-dimensional street canyons. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 513-527.
- _____, _____, and H. Y. Chun, 2001: Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics*, **89**, 947-966.
- _____, E. Pardyjak, D. Y. Kim, K. S. Han, and B. H. Kwon, 2014: Effects of building-roof cooling on flow and air temperature in urban street canyons. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 365-375.
- Kim, S. B., E. H. Jung, and G. H. Kim, 2006: Analysis of street trees and heat island mosaic in Jung-gu, Daegu. *J. Environ. Sci.*, **15**, 325-332.
- Kolokotroni, M., and R. Giridharan, 2008: Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, **82**, 986-998.
- Lee, D. G., S. W. Yoon, S. H. Oh, and S. W. Jang, 2005: The effect of temperature reduction as influenced by rooftop greening. *J. Korean Soc. Environ. Restor. Technol.*, **8**, 34-44.
- Lee, E. J., and J. H. Kim, 2012: A consideration of the correlation between the change of surface temperature on the roof and the adoption of the green roof vs non green roof: Application in Daejeon area. *J. Korean Solar Energy Soc.*, **32**, 134-140.
- Lee, K. G., and W. H. Hong, 2007: The study on the heat island and cool island according to trend toward higher temperature in urban: Case study oh Taegu metropolitan city. *J. Archit. Inst. Korean*, **23**, 219-228.
- Lee, W. S., S. G. Jung, K. H. Park, and K. T. Kim, 2010: Analysis of urban thermal environment for environment-friendly spatial plan. *J. Korean Assoc. Geogr. Inform. Stud.*, **13**, 142-154.
- Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, and G. Mihalakakou, 2001: Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energ. Buildings*, **33**, 719-729.
- Offerle, B., I. Eliasson, C. S. B. Grimmond, and B. Holmer, 2007: Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Bound.-Layer Meteor.*, **122**, 273-292.
- Park, S. B., 2004: Measurement and analysis of heat island in summer in Gwangju. *J. Korean Solar Energy Soc.*, **24**, 65-75.
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Pavageau, M., and M. Schatzmann, 1999: Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **33**, 3961-3971.

- Rosenfeld, A. H., H. Akbari, S. Bretz, B. L. Fishman, D. M. Kurn, D. Sailor, and H. Taha, 1995: Mitigation of urban heat islands: materials, utility program, updates. *Energ. Buildings*, **22**, 255-265.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou, and D. N. Assimakopoulos, 2001: On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, **70**, 201-216.
- Schlünzen, K. H., and Coauthors, 2003: Flow and transport in the obstacle layer: First results of the microscale model MITRAS. *J. Atmos. Chem.*, **44**, 113-130.
- Shashua-Bar, L., and M. E. Hoffman, 2002: The Green CTTC model for predicting the air temperature in small urban wooded sites. *Build. Environ.*, **37**, 1279-1288.
- Sini, J. F., S. Anquetin, and P. G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **30**, 2659-2677.
- Takahashi, K., H. Yoshida, Y. Tanaka, N. Aotake, and F. Wang, 2004: Measurement of thermal environment in Kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energ. Buildings*, **36**, 771-779.
- Tewari, M., H. Kusaka, F. Chen, W. J. Coirier, S. Kim, A. A. Wyszogrodzki, and T. T. Warner, 2010: Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmos. Res.*, **96**, 656-664.
- Theodosiou, T. G., 2003: Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energ. Buildings*, **35**, 909-917.
- Voogt, J. A., and T. R. Oke, 1998: Effects of urban surface geometry on remotely sensed surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, **19**, 895-920.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman, Malaysia, 257 pp.
- Wong, N. H., Y. Chen, C. L. Ong, and A. Sia, 2003: Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Build. Environ.*, **38**, 261-270.
- Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, 1992: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids*, **4**, 1510-1520.
- Yeo, I. A., and S. H. Yoon, 2009: Numerical simulation on the urban heat island effect formed by urban planning elements in summer. *J. Archit. Inst. Korean*, **29**, 557-580.