

라그랑지안 입자모델을 활용한 도시기온 예측기법의 연구

Study on Urban Temperature Prediction Method Using Lagrangian Particle Dispersion Model

김 석 철* · 윤 정 임

(주)볼트시뮬레이션

(2017년 1월 1일 접수, 2017년 1월 11일 수정, 2017년 1월 26일 채택)

Seogcheol Kim* and Jeongim Yun

BOOLT Simulation

(Received 1 January 2017, revised 11 January 2017, accepted 26 January 2017)

Abstract

A high resolution model is proposed for calculating the temperature field of a large city, based upon a Lagrangian particle model. Utilizing the analogy between the heat and mass transport phenomena in turbulent flows, a Lagrangian particle model, originally developed for air pollutant dispersion problems, is adapted for simulating heat transport. In the model conceptual heat particles are released into the atmosphere from the heat sources and move along with the turbulent winds in accordance with the Markov process. The potential temperature assumed to be conserved along with heat particles serves as a tag, so the temperature fields can be deduced from the distribution of particles. The wind fields are constructed from a diagnostic meteorology model incorporating a morphological model designed for building flows. Test run shows the robustness of the modeling system.

Key words : Lagrangian heat particle model, Urban temperature calculation

1. 서 론

기후변화로 인하여 폭염일수가 증가하고 도시 열환경이 악화될 것으로 전망되면서 도시계획이나 환경관리 또는 관련연구를 위해 도시 기온 모델링의 필요성이 빈번하게 제기되고 있다. 도시 기온 현상은 거시적이면서 동시에 미시적인 특징을 지닌다(Oke, 1987). 예를 들어 도시열섬은 도시공간 전체에 걸쳐 나타나는

거시규모 현상으로 도시 크기와 인구 등의 거시적 인자에 영향을 받는다. 반면 열점현상(hot spot)은 수 내지 수십 m 크기의 도시협곡(street canyon) 내 공간에 국한되는 미시규모 현상으로 태양광에 노출된 아스팔트 포장면적과 차량 밀집도, 냉방 실외기 배치상황 그리고 각종 건물로 인해 통풍이 제한되는 공간형태 등의 국소적인 요인에 의해 좌우된다. 따라서 도시 기온의 다양한 특성을 분석하기 위해서는 거시적으로는 도시 전체를 포함하고 미시적으로는 온열지점까지 묘사할 수 있는 광역 고해상도 모델링 도구가 요구된다.

본 연구에서는 대기질 모델링에 적용되는 대기확산

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3477-1963, E-mail : sckim@boolt.co.kr

모델을 이용하여 도시공간의 열환경을 모델링할 수 있는 방안을 모색하였다. $O(10)m$ 의 해상도로 $O(10)km$ 범위의 도시공간 열환경을 모델링할 수 있는 기법을 구현함에 있어 서울 크기의 대도시를 단일 영역으로 모델링 하되 도시 건물 및 도로구조에 의해 야기되는 국지적 고온영역, 예를 들어 열점현상까지 묘사하는 것을 목표로 하였다.

난류조건 하에서 대기 중으로 열이 퍼지는 과정은 대기오염물질의 확산과정과 유사하다. 도시에서 지표 근처 기류는 건물과 부딪히면서 난류가 강하게 발생한다. 또한 태양광에 의해서 지표면과 건물표면이 가열되는 주간에는 열적난류도 발달한다. 열과 오염물질간에 역학적 상사성이 성립할 경우에는 오염농도분포로부터 배출형태가 같은 열분포 즉, 온도분포를 산출할 수 있다. 따라서 대기오염물질에 적용되는 대기확산모델을 온도분포 계산에도 사용할 수 있다.

유체 내 이동현상의 측면에서 열과 물질의 상사성을 활용한 기존 연구사례는 많다. Raupach and Legg (1983)은 대기확산모델 연구를 위해서 풍동 내에서 정교한 열확산 실험을 수행한 바 있다. Yoo *et al.* (2005)은 대형 경계층풍동에서 SF_6 를 이용한 가스확산 실험과 전열기를 이용한 열확산 실험을 수행하여 두 현상 간의 상사성을 실험적으로 확인하였고 상사성을 이용하여 CFD 모델로써 풍동실험에 대한 온도 및 물질전달 과정을 분석한 바 있다(Shim *et al.*, 2005). 포집과 분석에 상대적으로 긴 시간이 소요되는 가스확산 실험대신 현장에서 실시간으로 측정가능한 열확산 온도실험으로 대체함으로써 다량의 실험데이터를 신속하게 획득하기 위한 목적에서 수행된 연구이다.

온도계산에 대기확산모델을 적용하면 대기환경 분야에 많이 연구된 모델링 기법을 활용할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들면 라그랑지안 입자모델과 같은 대기확산모델은 Eulerian 격자계산 기법의 온도계산용 수치해석코드를 보완할 수 있다. 또한 대기확산모델을 사용할 경우 특정 위치의 온도상승에 기여한 열원을 추적하는 것이 용이하다. 즉, 오염원 추적과 같이 열원 식별이 용이한데 이는 대기확산모델이 특정 배출원으로 인한 주변지역 영향을 평가하는 기능에 초점을 두고 있기 때문이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 라그랑지안 입자모델을 활용하여 열흐름을 분석할 수 있는 모

델링 알고리즘을 구성하였다. 3장에서는 서울을 사례 지역으로 선정하여 라그랑지안 모델을 기반으로 기온 분포를 계산하고 그 결과를 분석하였다. 4장에서는 결론을 제시하였다.

2. 모델구성

2.1 라그랑지안 열확산 묘사

대기경계층 내에서 기온, 특히 지표면에 인접한 인간활동 공간의 기온은 태양광에 의한 가열 또는 장파복사에 의해 냉각된 지표면에서의 공급과 제거되는 현열(sensible heat)에 의해 좌우된다. 가열된 지표면이나 건축물 표면에서 발생한 현열이 공기흐름을 따라 풍하 및 높은 고도까지 퍼짐에 따라 기온변화가 발생한다.

냉난방열, 자동차 발열 또는 인체 발열 등과 같이 직접적인 인간활동에 의해 발생하는 열량은 태양광에 비해 훨씬 적으나 도시관리나 환경계획에서 제어 가능한 변수이므로 주요 항목으로 고려되어야 한다. 인공발열은 그 양이 적고 그 형태가 선이나 점이 될 수 있다는 점을 제외하면 자연발열과 전파과정이 동일하다. 대기확산모델에서 배출원을 점, 선, 면 오염원으로 분류하는 기법을 열원에 대해서도 동일하게 적용할 수 있다.

열의 난류확산과정은 지표에서 현열입자를 공급받은 미소한 공기덩어리들이 주변 공간으로 각기 이동하는 과정으로 이해할 수 있다. 라그랑지안 모델링 기법은 미소 공기덩어리 각각의 이동과정을 추적하는 것이다. 미소 공기덩어리에 식별자를 붙이고 그 식별자의 움직임을 추적하는 것으로 계산입자가 식별자이다. 라그랑지안 기법을 적용한 열확산 모델링은 대기확산모델의 경우와 비교하면 대부분 동일하나 한 가지가 상이하다. 대기확산모델의 경우 라그랑지안 입자모델에서 추적하는 대상량은 질량으로 보존되는데 반해 미소 공기에 포함된 현열량은 보존되지 않는다. 따라서 열확산 계산을 위한 라그랑지안 입자모델에서 계산입자의 현열량은 보존되지 않는다.

계산입자의 현열량 비보존 문제는 다음과 같이 해결할 수 있다. 계산입자에 의해서 시간별로 위치가 추적되는 미소 공기덩어리의 상태변화는 열역학 제1법칙으로부터 다음과 같다.

$$\delta q = C_p dT - \frac{1}{\rho} dp \quad (1)$$

여기서 δq 는 미소 공기덩어리로 유입 또는 유출되는 현열량, C_p 는 정압비열, ρ 는 공기 밀도, p 는 열역학적 압력이다. 공기는 이상기체로 간주하였다. 난류확산에 의한 계산입자의 이동이 단열과정(adiabatic process)이고 기압이 수력학적 압력(hydrostatic pressure)이 유지되는 것으로 근사하면 식(1)로부터 계산입자에 대해서 보존되는 온위(potential temperature, θ)를 유도할 수 있다. 계산입자의 온도는 보존량인 온위로부터 다음과 같이 계산된다(Sutton, 1953).

$$T(x, y, z, t) = \theta_i [p_0(t) + \rho g z_i]^{R/C_p} \quad (2)$$

여기서 θ_i 는 계산입자의 온위값, g 는 중력가속도, R 은 이상기체, z 와 t 는 각각 연직방향 좌표와 시간, x, y 는 수평방향 좌표이다. θ_i 는 보존량으로 계산입자 생성 조건으로부터 계산되는 상수이다.

$$\theta_i = \frac{T(x_i, y_i, z_i, t_i)}{[p_0(t_i) + \rho g z_i]^{R/C_p}} \quad (3)$$

현열이 대기 중으로 공급되는 과정도 열역학 제1법칙으로부터 유도할 수 있다. 지표면 또는 건축구조물의 가열된 표면으로부터 미소 공기덩어리로 열이 유입되는 과정은 등압과정으로 근사할 수 있으므로 식(1)로부터 다음 식이 성립한다.

$$\dot{q} dt = C_p dT \quad (4)$$

여기서 \dot{q} 는 현열유속(sensible heat flux), dt 는 표면과 미소 공기덩어리의 접촉이 유지되는 짧은 시간, dT 는 접촉시간 동안 미소 공기덩어리의 온도상승량이다. 본 연구에서 계산입자의 시간당 방출갯수(\dot{N})는 현열유속에 비례하도록 설정하였다.

$$\alpha \dot{N} \Delta t = C_p \Delta T \quad (5)$$

여기서 α 는 현열유속에 대한 입자발생율을 규정하는 비례상수로 계산입자에 물리적인 의미를 부여하고 모델링 해상도를 조절하는 계산변수이다. 식(2)~식(5)를 이용하여 계산입자의 공간분포로부터 기온을 해석하는 데 α 가 필요하다. α 가 작을수록 많은 수의 계산입자가 생성되므로 계산소요 시간은 증가하는 반면 모

델링 해상도는 높아진다. α 의 적정 값은 문제의 종류에 따라 또한 요구되는 해상도와 계산소요 시간에 따라 달라질 수 있으므로 각 요소를 고려하여 사용자가 적절히 선택하여야 한다. 실제 시뮬레이션에서 적정한 α 값을 선택하는 과정 즉, 입자발생 개수를 결정하는 과정은 어렵지 않다. 입자발생 개수를 증가시키면서 동일한 상황을 반복하여 계산하면 된다. 이때 계산결과가 충분히 수렴되는 최소한의 입자 개수가 최적 값이다.

열확산계산을 위한 라그랑지안 입자모델 즉, 라그랑지안 열 입자모델에서 계산입자가 미소 공기덩어리의 움직임과 분리되지 않고 단열과정이 유지되는 한 전술한 모델링 절차는 유효하다. 그러나 미소 공기덩어리의 움직임이 단열과정으로 근사할 수 없는 환경이 존재할 수 있는데 난류에 의한 열확산에 비해 분자확산이 우세한 환경이다. 구름이 없는 야간에 지표면이 급격히 냉각되는 경우가 대표적인 사례로 강한 온도 역전층이 형성되어 난류혼합이 억제되면 기류가 성층화된다. 이러한 조건 하에서는 분자확산에 의한 열전달 메카니즘이 활성화되므로 계산입자의 운동규칙에 이러한 효과를 반영하여야 한다. 전술한 계산입자의 이동규칙에 무작위 이동을 추가하여 분자확산 효과를 자연스럽게 구현할 수 있다. 그러나 인공구조물이 밀집된 도시공간에서는 야간에도 분자확산 효과는 중요하지 않을 것으로 생각된다. 건축물 후면에서 와류가 발생하므로 성층화된 조건에서도 건물주변에서는 난류가 발생한다. 그 결과 도시공간에서는 지표면으로부터 어느 정도의 고도까지는 구조물에 의한 혼합층이 존재한다(Britter and Hanna, 2003). 도시 열환경 분석을 위한 라그랑지안 모델링 과정에서 전도효과는 제한적으로 발생할 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 라그랑지안 계산입자의 이동규칙에서 분자확산 효과는 무시하였다.

또한 식(1)에서 잠열의 영향은 무시하였다. 실제 대기에서는 수증기가 응결되는 경우가 발생할 수 있는데 상대습도가 100%에 근접하는 경우나 강이나 호수가 있는 지역에서는 이러한 효과가 중요할 수 있다. 모델링 과정에서 잠열의 영향은 식(3)의 온위를 수정하고 계산입자의 위치이동에 따른 상대습도의 변화를 추적함으로써 고려될 수 있으나 본 연구에서는 생략하였다. 도시공간에서 햇살이 강한 날에 발생하는 폭염현

상을 모델링하는 경우 잠열효과가 대부분 발생하지 않거나 발생하더라도 중요하지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 그러나 적용범위의 제약을 피하기 위해서는 계산부하가 증가하더라도 잠열효과를 고려하는 것이 바람직하다.

2.2 알고리즘

2.2.1 온도계산

전술한 이론적 고찰에 근거하여 대기오염 모델링에 사용하는 라그랑지안 입자모델의 연산알고리즘을 온도에 대해 적용하였다. 라그랑지안 입자모델에서는 계산입자가 생성되어 모델링 영역으로 유입되고 시간의 흐름에 따라 이동하여 영역바깥으로 사라지는 과정이 반복적으로 묘사된다. 온도분포는 계산입자의 위치정보를 토대로 해석된다.

현열이 대기 중으로 전달되는 지점 즉, 가열된 지표면이나 건물표면은 대기확산모델의 배출원에 해당된다. 모델링에서 배출원은 계산입자가 생성되는 부분으로 대기오염 배출원을 점, 선, 면, 또는 부피형태로 처리하는 것처럼 열배출 형태와 모델링 해상도에 맞도록 계산입자가 생성되어 모델링 영역으로 유입된다. 현열이 대기로부터 빠져나가는 경우는 지표면이나 건물표면이 차가워서 공기가 냉각되는 경우나 모델영역의 풍하경계면에서 발생한다. 계산입자는 모델링 영역을 벗어나게 되므로 연산과정에서 배제된다. 계산입자의 생성은 현열유속에 비례하도록 설정하므로 현열유속이 정의되어야 하는데 현열유속은 태양복사량과 표면조건의 함수이다. 본 연구에서는 Holtslag and Ulden (1983)이 제안한 절차를 국내 관측자료에 맞추어 수정한 후에 적용하였다.

모델영역 풍하경계면을 통해 계산입자가 유출되는 것에 반해 풍상경계면에서는 계산입자가 유입되어야 한다. 풍상경계면의 조건은 상층기상 관측치를 적용하거나 대기경계층 내 혼합이 원활하게 일어나는 조건에 한해 온위가 일정하다는 가정을 적용할 수 있다. 온위가 일정한 경우 유입된 계산입자는 이미 균질하게 혼합된 상태임을 가정한 것이므로 모델링 영역 내에서도 균질한 상태를 유지한다. 계산입자를 일일이 추적할 필요가 없으므로 모델링에서 유입 계산입자에 대한 연산을 배제할 수 있다는 장점이 있다.

온도계산을 위한 라그랑지안 입자모델에서 계산입

자의 이동규칙은 중력을 배제했을 때의 대기오염물질과 동일하다. 물리적인 관점에서 열의 이동은 기류와 분자확산운동에 의해 이루어지나 전술한 논거에 따라 분자확산은 무시한다. 일반적으로 라그랑지안 입자모델에서 기류는 시간에 대한 평균성분과 변동성분 즉, 난류성분으로 구분하여 시간분할기법(time splitting method)을 적용하여 구현한다. 본 연구에서는 Markov 프로세스를 적용하였다(Wilson and Sawford, 1996; Hanna 1979). Markov 프로세스에 기반한 시간분할 알고리즘의 예측정확도는 풍동실험에 대해서 자세히 분석된 바 있다(Kim, 2003).

2.2.2 바람장 계산: morphological model

온도계산을 위한 라그랑지안 입자모델에서 계산입자는 기류에 의해서 이동한다. 3차원 모델링 공간에서 바람장을 계산하기 위해 morphological model (Benthan and Britter, 2003; Hanna and Britter, 2002; MacDonald, 2000; MacDonal *et al.*, 1988; Lattau, 1969; Cionco, 1965)을 적용하였다.

Morphological model은 CFD 기반 수치해석모델에 비해 정확도가 낮은 반면 모델 연산량이 적어 계산속도가 빠르다. 대수방정식을 토대로 모델방정식이 구성된 결과 연산 알고리즘이 안정되어 거의 항상 수렴된 모델결과를 산출할 수 있다. 형상통계에 기반한 모델이므로 다양한 기류조건에 대한 기온분포 통계량을 구하는 경우에 유용성이 높을 것으로 생각된다. 건물형상 통계량의 함수로 기류분포를 추정하는 경험모델인 morphological model은 풍속함수를 다음 형태로 설정한다.

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) + \psi(\zeta) \right] \quad (6)$$

식(6)에서 풍속함수는 조건이 균질하고 평탄한 대기 경계층에서 지표로부터 통상 10 m 정도의 지표층(surface layer)에 유효한 풍속분포를 경계층 높이까지 확장한 형태이다. 거칠기 길이(roughness length or height) z_0 , 배제두께(displacement thickness or height) d , 마찰속도(friction velocity) u_* 가 주어지면 식(6)으로부터 풍속의 연직분포를 계산할 수 있다. 식(6)에서 κ 는 von Karman 상수(≈ 0.4), $\psi(\zeta)$ 은 대기안정도에 따라 정의된 함수이다.

Morphological model은 일정한 범위의 건물분포로부터 산정한 건물형상에 대한 통계량으로부터 식(6)의 풍속함수 인자를 결정할 수 있도록 한다. 따라서 morphological model에서 기류는 일정한 크기의 수평 격자 셀에 대해 산출된 건물 형상인자의 함수이다. 건물 형상인자는 건물에 의한 풍로차폐 비율(λ_f), 전체면적 대비 건물면적 비율(λ_p), 평균 건물높이(H)이다. λ_f 는 풍향에 따라 변화하는데 반해 λ_p 와 H는 건물형태가 주어지면 고정된다. 본 연구에서 건물 형상인자로부터 풍속함수 인자를 결정하는 모델은 Kim *et al.*(2011)의 제안을 따라 구현하였다.

격자 셀에서 다양한 형태로 배치된 건물은 한 세트의 건물 형상인자로 통계처리된다. 건물 형상인자를 산출하는 격자 셀의 크기에 따라 기류정보의 공간해상도가 달라진다. 격자 셀이 작을수록 해당과정에 대한 모델링 연산부하는 증가하지만 전체 계산에서 그 비중은 미미하다. 반면 모델링 해상도는 격자 셀이 작아지면 현저히 증가하므로 허용가능한 최소값으로 격자 셀의 크기를 낮추는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 격자 셀의 크기를 가로와 세로 방향으로 동일하게 100 m로 설정하였다.

온도모델링을 위한 절차구성 시 morphological model의 결과를 직접 라그랑지안 온도입자모델에 연결하는 대신 그 중간에 필터(filter) 기능을 하는 기상진단모델(Ross *et al.*, 1988; Ludwig and Byrd, 1980)을 삽입하였다. 기상진단 모델링에는 지형정보가 요구되는데 이는 지형영향을 경험적으로 모수화하여 운동방정식이 만족되도록 바람장을 구성하기 때문이다. 기상진단모델 필터(diagnostic model filter)는 morphological mode에서 생성된 바람장에 지형효과를 추가하여 라그랑지안 온도입자모델에 요구되는 바람장 정보를 생성한다.

기상진단모델 필터를 삽입한 이유는 morphological model을 통해 구성된 고해상도 기류정보는 도시지역에 대해서만 정의되기 때문이다. 도시 전체에 대한 열환경을 모델링하기 위해서는 종종 도시주변의 전원지역까지 모델링 영역이 확장되어야 하므로 도시공간보다 더 넓은 영역의 바람장이 요구된다. 주변 전원지역까지 포함하여 도시 전체에 대하여 기온을 모델링하는 경우 morphological model은 도시공간에 대해서만 정의되므로 기상진단모델의 영역 일부만을 채우게 된다. 반면 도시 일부의 기온을 모델링하는 경우에는 mor-

phological model에서 산출되는 바람장으로 기상진단 모델 영역전체가 채워진다. 영역이 도시를 완전히 포함하거나 일부 도시와 주변 전원지역을 포함하거나 또는 도시 일부만을 포함하거나 기상진단모델은 자연스럽게 라그랑지안 온도입자모델에서 필요한 공간규모에 대해 바람장 정보를 생성하는 필터기능을 수행한다.

3. 결과 및 고찰

라그랑지안 온도입자모델의 사용성을 살펴보기 위해 실제문제에 적용하였다. 서울의 여의도 지역을 포함하는 동서 및 남북방향으로 각각 5 km 범위를 대상 영역으로 설정하였다(그림 1). 대상영역에는 고층건물의 상업구역(그림 1의 중앙 섬 부분)과 저층건물이 밀집된 주거지역(그림 1의 좌하단)이 인접해 있고 한강과 수변공간이 넓게 포함되어 다양한 도시 열환경 요소가 공존하는 곳이다.

현열유속모델과 morphological 모델에 필요한 토지 피복 정보는 30 m 공간해상도의 환경부 데이터를 사용



Fig. 1. The modeling domain of 5 km×5 km horizontal dimensions : 32,159 buildings, red polygons overlapped against the satellite image are located in the modeling domain.

하였다. 기상진단모델 필터에 적용되는 지형고도와 morphological model에 필요한 3차원 건물형상 및 위치정보는 국토지리정보의 수치지도로부터 추출한 30 m 해상도의 DEM (Digital Elevation Map)과 건물데이터를 사용하였다. 건물의 수평형상은 수치지도에 포함된 건물외곽선 다각형 꼭지점의 좌표를 m 단위로 변환하여 파악하였다. 건물의 높이정보는 층고뿐으로 한 층을 3m로 가정하여 높이를 m 단위로 환산하였다.

사례 모델링 영역에는 32,159개의 건물이 포함되어 있는데 그림 1에서 위성이미지에 중첩하여 빨간색 다각형으로 표시된 부분이다. 건물밀집도가 가장 높은 곳은 주택지역으로 주로 층수가 낮은 연립주택과 단독주택으로 구성되어 있다. 여의도(그림 1의 중앙 섬)에

는 건물밀도는 상대적으로 낮으면서 층고는 매우 높은 건물이 모여 있다.

Morphological model에서는 형상인자를 계산하는 격자 셀이 100 m×100 m이므로 모두 2,500개의 격자 셀에 대해 형상인자를 산출하여 morphological model에 적용하였다. Morphological model에서 기류계산에 적용하기 위해 산출된 형상인자는 그림 2와 같다. 여기서 λ_r 와 λ_p 은 최소값이 0이고 최대값이 1인 무차원 단위이고 평균 건물고도(H)와 지면 거칠기(z_0)의 단위는 m이다. 고층건물이 모여 있는 여의도 지역에서는 H와 z_0 그리고 λ_r 가 높은 반면 저층건물이 밀집된 좌하단 영역에서는 λ_p 가 현저히 높다. 100m 격자 셀로 산정한 형상인자 분포는 위치에 따라 편차가 크게 나타난다.

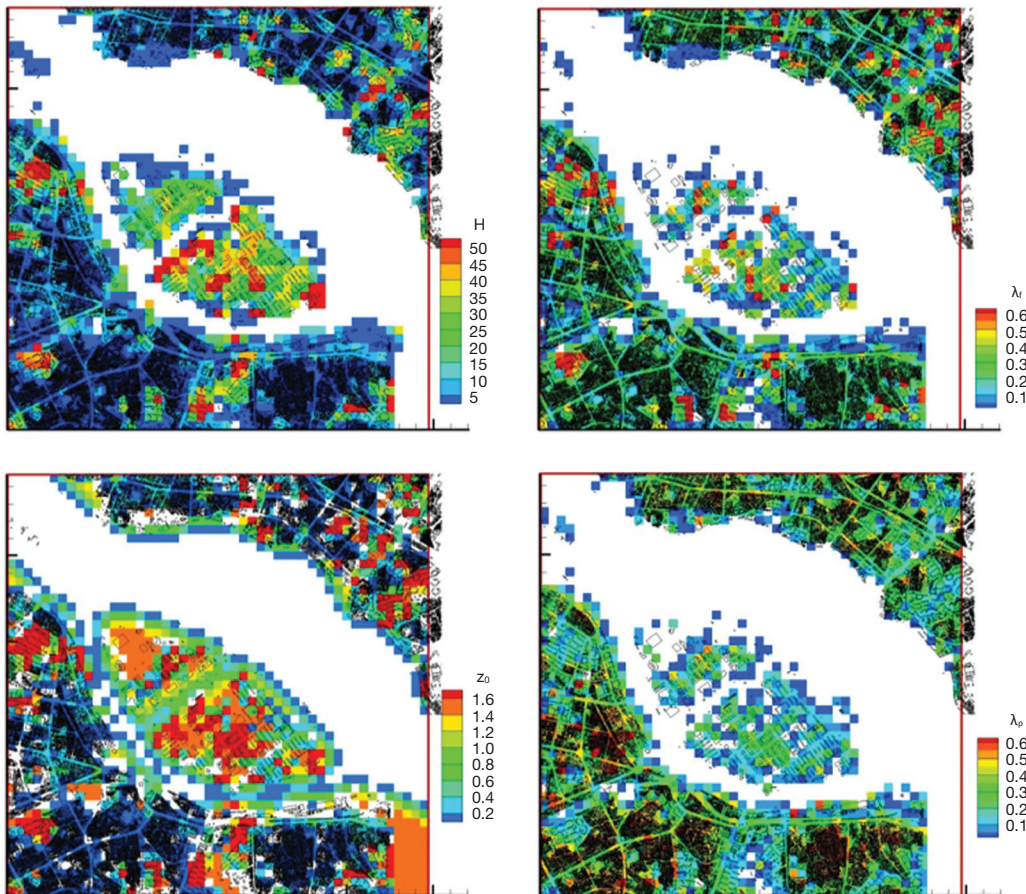


Fig. 2. Morphological parameters : mean height (H, top left), front building blocking ratio (λ_r , top right), horizontal building area ratio (λ_p , bottom right), and surface roughness length (z_0 , bottom left).

기상관측자료는 모델링 영역 내 임의의 위치에서 임의의 개수만큼 입력할 수 있다. 2016년 현재 기상청에 의해서 공식적으로 운용되고 있는 기상관측소는 서울시 내의 경우 대략 구 마다 1개 정도 있는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 사용성을 확인하기 위한 목적이므로 4개소만을 적용하였다. 2009년 8월 12일 0시부터 23시까지 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 현열유속으로 15시에 대한 결과를 제시하였고 그림 4는 온도증분(temperature anomaly)으로 하루 중 기온이 높은

시간대인 12시와 15시의 결과를 제시하였다.

현열유속은 위치에 따라 변동이 상대적으로 큰데 이는 토지피복형태와 풍속조건에 따라 현열계산이 민감하게 영향을 받기 때문이다. Morphological model에 의해 산출되는 풍속은 건물배치와 건물형상 즉, 형상인자에 민감하게 영향을 받기 때문에 현열유속은 주변 건물 배치에 따라서도 달라진다. 토지피복 뿐만 아니라 형상인자 또한 위치에 따라 변화가 크기 때문에 현열유속이 위치에 따라 크게 변하는 것으로 생각된다. 그림 3에서 현열유속이 상대적으로 높은 지역은 여의도이고 가장 낮은 지역은 한강으로 여의도 지역의 현열유속이 한강에 비해 4배 가량 높고 여의도 내에서도 건물구역이 녹지공간에 비해 2배 가량 높은 것으로 나타났다.

그림 4의 온도증분은 라그랑지안 온도입자모델의 온도분포와 배경 평균온도의 차이를 나타내는데 모델링영역 내에서 방출된 현열로 인해 증가 또는 감소하는 온도를 표시한다. 온도증분이 양수일 때에는 배경 평균온도에 비해서 해당 위치의 온도가 높다. 온도증분의 최소치가 1이고 최대치는 4이므로 계산결과에 의하면 모델링영역 내에서 온도 차이는 최대 3°C 발생한다. 그러나 경계면에서의 라그랑지안 계산입자의 이상 거동을 제외하면 계산상으로 유의미한 온도 차이는 약 2°C이다. 온도가 가장 낮은 곳은 한강구역이고 가장 높은 곳은 여의도와 한강 북측 고수부지로 나타났다.

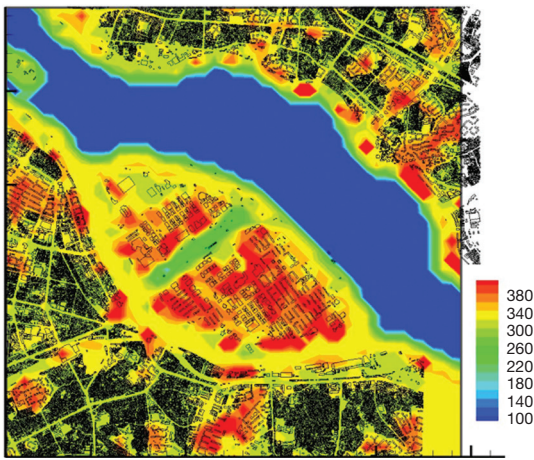
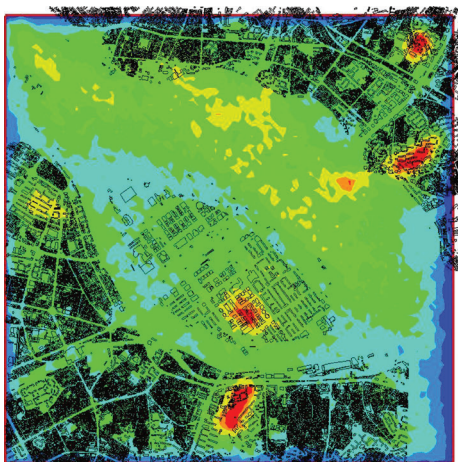
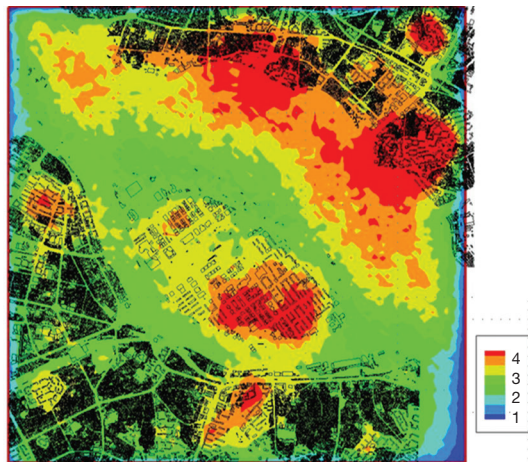


Fig. 3. Sensible heat flux (in kW/m²) : 2009. 08. 12. 15:00 in PST.



(a) 2009. 08. 12. 12:00 PST



(b) 2009. 08. 12. 15:00 PST

Fig. 4. Temperature anomaly (in K) at 10m height above ground level.

현열유속이 높은 곳에서 대부분 기온도 높게 형성되는데 여의도와 여의도 남측의 높은 온도영역이 이 경우이다. 반면 한강북측의 넓은 영역으로 온도가 높게 예측된 것은 기류조건의 영향이 가해진 결과로서 실제로 이러한 현상이 발생하는지 여부에 대해서는 실측 등을 토대로 면밀히 검토를 해야 할 것으로 생각된다. 해당영역에서는 풍속이 낮아지면서 공기흐름(stream-line)이 낮은 고도로 수렴되는 것으로 계산되었다. 현열유속과 기온분포를 비교하면 기온은 위치에 따라 변화가 부드럽게 나타나는데 인공위성 영상으로 관측된 표면온도는 위치에 따라 편차가 큰 반면 관측온도의 지역적 편차는 훨씬 둔감해지는 것과 같은 이유로 생각된다. 대기 중으로 유입된 열은 난류혼합이 강하게 발생하는 환경에서 주변공간으로 섞이면서 평준화가 신속하게 진행되기 때문이다.

전술한 모델링연산에서 morphological model의 바람장 계산격자는 수평방향으로 50 m, 연직방향으로 5 m이고 연직모델링 높이는 2km이다. 따라서 기류해석을 위한 격자점의 개수는 4,000,000 (= 100 × 100 × 400) 개이다. 라그랑지안 온도입자 분포로부터 기온을 산출하기 위한 격자크기는 바람장 계산격자와 동일하게 설정하였다. 라그랑지안 온도입자모델에서 계산입자는 약 360,000개를 사용하였다. 평균적으로 온도계산 격자 당 10초에 1개씩 라그랑지안 계산입자가 방출되는 셈이다. 그러나 방출입자 숫자는 모델에 의해서 계산되는 열유속 크기에 비례하므로 각 격자에서 방출되는 입자숫자와는 다르다.

노트북 PC에서 하나의 코어만을 사용하여 모델링 연산을 실행하였는데 CPU 프로세스는 Intel (R) Core (TM) i7-4710HQ 2.50 GHz, 메모리(RAM)는 16GB이며 연산에 소요된 CPU 시간은 약 20초이었다. 연산장비와 모델링 해상도를 동일하게 유지할 경우 처리시간은 모델링 대상영역의 면적에 거의 정비례한다. 예를 들면 여의도 일원에서 서울시 전체로 모델링 영역을 확장할 경우 면적은 8 (200 km²/25 km²)배 증가하는 것이므로 3분 정도가 소요될 것으로 예상된다.

4. 결 론

도시대기에서 열과 오염물질의 확산이 유사하다는

점에 착안해서 대기확산모델을 기반으로 넓은 지역에 대한 도시 기온을 고해상도로 모델링할 수 있는 방법을 제안하였다. 논리적 측면에서 대기오염물질에 대한 모델링 과정과 동일한 연산절차를 구성함으로써 대기분야에서 개발된 대기확산모델을 온도계산에 적용할 수 있도록 하였다. 라그랑지안 입자모델을 기반으로 모델코드를 구현하고 가상적인 열 입자의 생성과 이동 과정을 추적하면서 열 입자의 공간분포로부터 시간별로 기온을 계산하였다. 서울 여의도 지역을 대상으로 사례계산을 수행한 바에 따르면 넓은 도시공간에 대해서도 빠르고 안정된 형태로 고해상도 기온계산이 가능하였다.

도시 기온 계산에서 라그랑지안 입자모델의 장점으로는 기온으로부터 열원을 역추적하는 것이 용이하다는 점도 있다. 라그랑지안 입자모델에서는 기온계산에 사용되는 열 입자가 어떤 열원으로부터 방출된 것인지 식별된다. 기온측정은 상대적으로 쉽고 공유되는 자료가 많은 반면 열원측정 자료는 드문 것이 현실이다. 기온측정 자료를 모델입력 자료로 사용해서 열원정보를 생성하거나 이론적으로 추정된 열원정보의 정확도를 향상시킬 수 있다면 유용할 것이다. 이와 관련해서는 향후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 16AUDP-B102406-02).

References

- Benthan, T. and R. Britter (2003) Spatially averaged flow within obstacle arrays, *Atmospheric Environment*, 37(15), 2037-2043.
- Britter, R.E. and S.R. Hanna (2003) Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 35, 469-496.
- Cionco, R.M. (1965) A mathematical model for air flow in a vegetative canopy, *Journal of Applied Meteorology*, 4, 517-522.

- Grimmond, C. and T. Oke (1999) Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form, *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1262-1292.
- Hanna, S. and R. Britter (2002) Wind flow and vapor cloud dispersion at industrial and urban sites, CCPS, New York, 208pp.
- Hanna, S.R. (1979) Some statistics of Lagrangian and Eulerian wind fluctuations, *Journal of Applied Meteorology*, 18, 518-525.
- Holtzlag, A.A.M. and A.P. Van Ulden (1983) A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(4), 517-529.
- Kim, B.G., C. Lee, S. Joo, K. Ryu, S. Kim, D. You, and W. Shim (2011) Estimation of roughness parameters within sparse urban-like obstacle arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, 139(3), 457-485.
- Kim, S. (2003) Evaluation of one-particle stochastic Lagrangian models in horizontally-homogeneous neutrally-stratified atmospheric surface layer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(4), 397-414. (in Korean with English abstract)
- Lettau, H. (1969) Note on aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness element description, *Journal of Applied Meteorology*, 8, 828-832.
- Ludwig, F.L. and G. Byrd (1980) An efficient method for deriving mass-consistent flow fields from wind observations in rough terrain, *Atmospheric Environment*, 14(5), 585-587.
- Macdonald, R. (2000) Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 97(1), 25-45.
- Macdonald, R., R. Griffiths, and D. Hall (1998) An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmospheric Environment*, 32(11), 1857-1864.
- Oke, T.R. (1987) *Boundary layer climates*, Routledge, London and John Wiley & Sons, New York, 435 pp.
- Raupach, M.R. and B.J. Legg (1983) Turbulent dispersion from an elevated line source: measurements of wind-concentration moments and budgets, *Journal of Fluid Mechanics*, 136, 111-137.
- Ross, D.G., I.N. Smith, P.C. Manins, and D.G. Fox (1988) Diagnostic wind field modeling for complex terrain: model development and testing, *Journal of Applied Meteorology*, 27, 785-796.
- Shim, W., S. Kim, and S. Yoo (2005) A study on the pollutant dispersion over a mountain valley region (II): numerical simulation, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 17(11), 1060-1071. (in Korean with English abstract)
- Sutton, O.G. (1953) *Micrometeorology*, MacGraw-Hill, New York, 457 pp.
- Wilson, J.D. and B.L. Sawford (1996) Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere, *Boundary Layer Meteorology*, 78(1), 191-210.
- Yoo, S., W. Shim, and S. Kim (2005) A study on the pollutant dispersion over a mountain valley region (I): wind tunnel experiments, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 17(11), 1050-1059. (in Korean with English abstract)