한국대기환경학회지 제 19 권 제 6 호
J. KOSAE Vol. 19, No. 6 (2003) pp. 773~787
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

도시지역의 국지순환과 침적현상에 관한 수치모의

Numerical Simulation for Local Circulation of Urban Area and Deposition Phenomenon

이화운* · 오은주 · 노순아 · 반수진
부산대학교 대기과학과

(2003년 6월 26일 접수, 2003년 10월 10일 채택)

Hwa Woon Lee*, Eun-Joo Oh, Soon-A Roh and Soo-Jin Ban
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 26 June 2003, accepted 10 October 2003)

Abstract

There are variations in the temperature field due to urban heat island and anthropogenic heating so that regional scale meteorological field is changed. Therefore we simulate and predict the regional climate change according to surface characteristics through regional meteorological model. This study investigates the regional meteorological field by urbanization that influences in local circulation system using CSU-RAMS and simulates dry deposition velocity (V_d) using PNU/DEM which includes surface characteristics (such as albedo, surface hydrology and roughness length etc.) with calculated meteorological field.

During the summer, horizontal distributions of V_d were simulated using CSU-RAMS and PNU/DEM at Busan metropolitan area. The estimated values of V_d were larger in forest and agricultural areas than water areas since ozone with low water solubility is destroyed slowly at wet surface or water.

Key words : Urbanization, Regional meteorological modeling, Dry deposition velocity, Ozone

1. 서 론

도시의 대기오염 문제는 다양한 배출원으로부터 다량 및 다종의 오염물질 배출과 그 지역의 도시화에 따른 기후특성에 영향을 받는다. 이러한 대기오염의 분포 양상은 대기오염물질의 배출량과 난류 확산 및 수송, 화학 반응, 침적현상 등에 의해 결정되므로 이들을 지배하는 기상인자들에 대한 이해는 대기오염현상을 파악하는 필수 요소라고 할 수 있다(Mckendry, 1993; Liu *et al.*, 1987; Lalas *et al.*, 1982). 또한, 도시규모의 기후특징은 도시 내에 형성된 고유의 기상장이 대기오염물질을 정체시킨다(Noto, 1996)는 것인데, 이러한 도시지역의 국지순환계를 수치모의하기 위해 CSU-RAMS (Colorado State University-Regional Atmospheric Meteorological Model)를 사용한 연구가 많이 이루어지고 있다(Pielke and Uliasz, 1998; McQueen *et al.*, 1995).

* Corresponding author
Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

대기오염물질의 농도 분포는 정확한 배출량 산정과 올바른 기상장 모형의 인식 그리고 정확한 침적량의 산정에 따라 큰 차이를 나타내고, 강하된 침적물질은 농경지, 삼림, 토양, 수면 등에 오염을 유발할 수 있다. 따라서 대기질 예측에 있어서 침적 현상이 고려된다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이며, 이를 통한 대기질 관리의 측면에서 대기오염물질의 적절한 감소계획을 산정 · 평가하고 효과적인 대책을 마련할 수 있을 것으로 사료된다.

대기질의 분석에 있어서 주요한 제거 작용을 하는 침적 현상에 관한 연구는 대상지역에서 지속적으로 관측된 자료 수집이 없을 경우와 관측자료와의 비교를 위하여 수치모의하는 연구가 활발하다. 침적 속도를 계산할 수 있는 침적 모델로 1980년대 ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model)이 최초로 개발, 수정 및 적용되었고(Padro, 1996; Padro and Edwards, 1991; Pleim *et al*, 1984). 또 다른 침적 모델로서 RADM (Regional Acid Deposition Model)이 개발, 적용되었다(Massman *et al*., 1994; Harley *et al*., 1993; Chang *et al*, 1987; Walcek *et al*., 1986).

본 연구의 대상지역인 부산지역에 대하여 광화학 모델 또는 침적 모델을 사용한 연구로는, 중규모 해륙풍 모델과 건성침적속도 모델 및 Canada에서 관측된 기상자료와 오존의 건성침적속도 자료를 사용하여 오존의 건성침적속도를 수치모의 및 비교한 바가 있다(원경미와 이화운, 1998, 1999). 복잡한 도시지역에 대한 기상장 및 대기질 모델이 사용된 선행연구로, 이순환 등(2002)이 역학적 기상 모델과 입자상 확산 모델이 결합된 모델(SMART)을 사용하여 복잡한 지형에서 지역적 순환은 도시화의 여부에 따라 강화 또는 약화됨을 보였다. 기상장 모델인 MM5 (The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)와 광화학모델인 UAM-V (The Variable grid Urban Airshed Model)를 사용하여 오존의 고농도일에 대한 수치모의와 관측값과의 비교를 하였다(김유근 등, 2003).

건성 침적 현상에 대한 선행연구로, 입자상 물질의 강하는 습한 정도와 입자의 크기분포에 영향을 받는데, 포화 상태일 때 10μm 이상의 입자의 성장과 제거가 효과적임을 보인 바가 있으며(김유근 등, 1998), 이학성 등(1999)은 서울지역에서 여름과 겨울에 대한 산성강하물의 측정을 시행하여 계절에 따른 통계적 분석을 실시하였다. Park *et al*. (2002)은 질소계 강하물질들의 장기간 건성침적과 각 물질별 분포율을 산출하였으며, 질소계 물질이 중요한 2차 오염물질임을 보였다.

본 연구에서는 복잡한 도시지역인 부산지역에 대하여 기상장 모델(CSU-RAMS)을 사용하여 도시지역의 국지 순환계를 분석하고, 침적 모델 PNU/DEM (Pusan National University/Deposition Model)을 사용하여 가스상 물질인 오존의 건성 침적 속도를 수치모의하였다. 종관장보다 작은 중규모는 실제 광화학적 과정에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 규모이며, 보다 큰 규모를 대상으로 하는 모델에 비해 중규모는 다양한 역학과정을 계산할 수 있어야 하는데, CSU-RAMS는 중규모 기상장과 순환계에 대하여 신뢰성 있는 결과를 나타낸다. 따라서, CSU-RAMS로 국지적 대기 순환계에 영향을 미치는 도시화에 따른 지역 기후의 변동이 반영된 지역적 순환계를 수치모의하고, 기상장 분석 결과를 건성 침적 속도를 산정하는데 사용하여 건성 침적 현상을 분석하였다.

2. 연구 방법

기상장 분석을 위해 사용된 CSU-RAMS는 도시화에 따른 효과를 잘 표현하기 위해 비정수(Non-hydrostatic) 레이놀드 평균된 원시 방정식(Reynold-Averaged Primitive Equation)인 운동량, 질량, 에너지 등의 보전에 기초한 운동방정식, 연속방정식, 정역학방정식, 열역학방정식, 비습방정식으로 구성되어 있으며, Grid 구조는 Arakawa C Grid (Mesinger and Arakawa, 1976)를 사용한다. Arakawa C grid는 scalar 변수를 grid box의 중간에, normal velocity 성분은 해당하는 격자측면에 배치하는 방법이다. 수평 좌표계는 중규모 수치모의에 적합한 극-평사 투영법(Polar-Stereographic Projection)을, 연직 좌표계로는 모델 도메인의 최상층을 평면, 하층은 지형의 굴곡을 따르는 체계인 σ-좌표계(Tripoli and Cotton, 1982; Clark, 1977; Terrain-Following Coordinate, Gal-Chen and Somervile, 1975)를 사용하고 있다. 지표면 열수지 모델은 Businger *et al*. (1971)에 의해 모수화되고 Louis (1979)에 의해 수정된 모델을 사용하며, 토양 모델은 McCumber and Pielke (1981)에 의해 초기화

되고, Tremback and Kessier (1985)에 의해 수정된 방법을 사용한다. 또한 도시 열섬과 인공열 등으로 인하여 도시의 지표면 온도장의 변화가 발생되고 이에 따른 지역 규모의 기상장이 변화하게 되므로 이러한 도시 열원과 지표 변화 특성에 따른 지역 기후 변화를 지역 기상 모델을 통하여 모사·예측 하고자 한다.

또한, 도시 규모의 침적 예측 모델 구축과 모델링 수행은 기상조건과 다양한 지표면의 특성을 고려하여 대기오염물질의 건성침적속도를 계산할 수 있게 하고, 연구대상 지역에 적합한 기상장 모델과 결합할 수 있는 건성침적모델, PNU/DEM을 사용하였다. 그리고 건성침적 현상의 일반적 특성을 파악하기 위하여 농경지, 목초지, 활엽수림, 침엽수림, 나지, 바다, 포도밭, 면화밭 등의 다양한 지표면에 대하여 건성침적속도를 계산하고, 침적속도와 기상 인자들 사이의 관련성을 자세히 살펴보았다.

부산광역시를 중심으로 한 기장군의 일부 및 김해 일부 지역을 포함한 영역을 대상지역으로 고려하였으며, 해양과 구릉지 및 산지지형이 함께 존재하고 복잡한 해안선은 물론 낙동강과 삼각주를 포함하고, 내륙으로 도시가 형성되어있는 지역이다.

3. 연구 내용

3.1 기상장 모델

3.1.1 기초방정식

CSU-RAMS는 비정수(non-hydrostatic) 레이놀드 평균된 원시방정식 (Reynolds-averaged primitive equation)으로 다음과 같이 구성되어 있으며, 격자 구조는 Arakawa C Grid (Mesinger and Arakawa, 1976)를 사용하고 있다. RAMS에서 사용하고 있는 기초방정식은 다음과 같다.

운동방정식;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} - \theta\frac{\partial \pi'}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial u}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} - \theta\frac{\partial \pi'}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial v}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u\frac{\partial w}{\partial x} - v\frac{\partial w}{\partial y} - w\frac{\partial w}{\partial z} - \theta\frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g\theta_v'}{\partial \theta_0} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_m\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_m\frac{\partial w}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_m\frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (1)$$

열역학방정식;

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u\frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v\frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w\frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h\frac{\partial \theta_{il}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h\frac{\partial \theta_{il}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial \theta_{il}}{\partial z}\right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t}\right)_{rad} \quad (2)$$

비습방정식 ;

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u\frac{\partial r_n}{\partial x} - v\frac{\partial r_n}{\partial y} - w\frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h\frac{\partial r_n}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h\frac{\partial r_n}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_h\frac{\partial r_n}{\partial z}\right) \quad (3)$$

연속방정식;

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{Rpi}{c_v\rho_0\theta_0}\left(\frac{\partial \rho_0\theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0\theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0\theta_0 w}{\partial z}\right) \quad (4)$$

여기서 u, v, w는 x, y, z 방향의 속도성분, f는 coriolis parameter, K_m은 운동량에 대한 와 점성계수(eddy viscosity coefficient), K_h는 열과 수분에 대한 와 점성계수, θ_{il}은 ice-liquid water에 대한 온위, r_n은 혼합비, ρ는 밀도, π_0는 exner fuction의 평균, π'는 exner function의 섭동(perturbation), θ_v는 가온위, p는 기압을 나타낸다.

수평좌표계는 중규모 수치모의에 적합한 극-평사투영법 (polar-stereographic projection)을, 연직 좌표

계로는 모델 영역의 최상층은 평면, 하층은 지형의 굴곡을 따르는 체계인 σ_z지형좌표계 (Tripoli and Cotton, 1982; Clark, 1977; terrain-following coordinate, Gal-Chen and Somerville, 1975)를 사용하였으며, 좌표계는 다음과 같다.

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad z^* = H\left(\frac{z - z_g}{H - z_g}\right) \tag{5}$$

여기서 H는 모델 최상층의 높이를, z_g는 x와 y함수로써 지형고도를 나타낸다.

지표면 자료는 USGS (U. S. Geographic Survey)의 자료를 사용하였으며, 자료의 해상도는 1 km × 1 km 이며, CSU-RAMS에서는 대상 격자에 존재하고 있는 지표면 종류의 비율을 고려하여 지표면 특성을 고려하고 있다. 지표면 열수지 모델은 Businger *et al.* (1971)에 의해 모수화되고 Louis (1979)에 의해 수정된 모델을 사용하였으며, 토양 모델은 McCumber and Pielke (1981)에 의해 초기화되고, Tremback and Kessler (1985)에 의해 수정된 방법을 사용하였다.

3. 1. 2 난류운동에너지

난류운동에너지 모수화 (turbulent kinetic energy parameterization)는 와 혼합계수 (eddy mixing coefficient)를 계산하는데 필요한 것으로, CSU-RAMS에서는 수평격자의 크기가 클 경우는 Mellor and Yamada scheme (1974)을, 수평격자가 작은 경우는 대류운동이 계산되어지는 Deardorff scheme (1978)을 사용한다.

본 연구에서 사용되어진 Mellor and Yamada (1974, 1982)에 의해 수정된 Mellor and Yamada 2.5 Scheme은 Helfand and Labaga (1988)에 기초를 둔 것으로, 발달하는 난류에 대하여 수정 · 보완되었으며, 수평바람성분과 온위, 난류운동에너지 등은 CSU-RAMS에서 진단장 (prognostic fields)에 의해 계산되어진다.

3. 2 침적 모델

경계층에서 산성강하물질은 건성침적에 의해 제거되며, 오염물질 농도 예측모델에서 건성침적에 대한 내부 모듈은 강수가 없을 경우 오염물질 플럭스를 산출할 수 있도록 발전되어왔다. PNU/DEM은 이러한 대기오염물질 농도와 건성침적플럭스를 예측하기 위한 건성침적모델 중 지역 특성을 잘 고려할 수 있도록 구성되어있다.

저층 대기에서 지면에 대한 어떤 오염 물질의 건성침적플럭스는 오염물의 농도에 선형적으로 비례한다는 가정 하에,

$$F_d = -V_d C \tag{6}$$

로 나타내어지고, 여기서 V_d(cm s^{-1})는 건성 침적 속도(dry deposition velocity)이고, F_d(ppb-m s^{-1})는 건성침적플럭스이며, C (ppb)는 오염물질의 농도이다.

건성침적속도에 대한 저항 유추법 모델은 선행 연구에 수반된 가장 일반적인 접근 중 하나이며, 본 연구에서 오존의 건성침적속도를 수치모의하기 위한 PNU/DEM은 건성침적플럭스에 대한 오염물질 농도의 비를 전체저항 R_T(s cm^{-1})로 나타내며 건성침적속도 V_d를 전체저항의 역수를 취하여 다음과 같이 표현한다.

$$V_d = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \tag{7}$$

여기서, R_a는 공기 역학적 저항, R_b는 점성층 저항, R_c는 지표면 저항이다. 공기역학적 저항은 일정 플럭스층 (constant flux layer)과 침적층 (deposition layer)의 난류와 층류의 풍속, 대기 안정도, 마찰 속도, 지표면 특성에 따른 지표 거칠기 길이 등과 관련된다. 점성층 저항은 오염물질의 분자확산과 공기의 점성도 등과 관련되며, 입자에 대한 분자 확산이나 브라운 확산만이 의미를 가진다. 지표면 저항은 지표의 특징과 그 식생에 따라 가장 큰 차이를 보이므로 지표의 화학적 · 생물학적 특성이 잘 고려되어야한다.

공기 역학적 저항은 저층 대기에서의 풍속과 대기 안정도, 지표면의 종류에 따른 지표 거칠기 길이 등과 관련되며 다음과 같이 나타내어진다.

$$R_a = (\ln(Z_r/Z_0) - \psi_H)/ku^* \tag{8}$$

여기서, Z_r은 건성침적속도가 계산되는 고도이며, Z_0은 각 land-use형태와 계절에 따라 결정되는 지표 거칠기 길이이다. k는 von Karman상수이고, ψ_H는 안정도 보편함수이다.

마찰 속도 u^*(m/sec)는 Bulk Richardson 수 (R_{iB})를 사용하여 각각 불안정한 대기 ($R_{iB} \leq 0$)의 경우와 안정한 대기 ($R_{iB} > 0$)의 경우로 나누어 계산된다 (Louis, 1979).

$$u^* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[1 - \frac{9.4R_{iB}}{(1+7.4B)} \right]^{1/2} \quad R_{iB} \le 0 \tag{9}$$

$$u^* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[\frac{1}{\left(1+\frac{9.4}{2}R_{iB}\right)} \right] \quad R_{iB} > 0 \tag{10}$$

여기서, B와 R_{iB}는 다음의 식을 사용하여 계산되어진다.

$$B = 9.4 \sqrt{R_{iB} \frac{z}{z_0}} \, (k/\ln(z/z_0))^2 \tag{11}$$

$$R_{iB} = \frac{gz\Delta\theta_v}{\theta_{vg}u^2} \tag{12}$$

여기서, g는 중력 가속도, z는 저층 대기의 높이, $\Delta\theta_v = \theta_{va} - \theta_{vg}$이며, θ_{va}는 저층 대기의 가온위, θ_{vg}는 지면에서의 가온위, u는 풍속이다.

점성층 저항은 Pleim *et al.* (1984)과 Wesely and Hicks (1977)에 의하여 다음 식과 같이 나타낸다.

$$R_b = \frac{1}{u^*} \left(\frac{\nu}{D_j} \right)^{2/3} \tag{13}$$

여기서, D_j는 j종류 기체의 확산계수이고, ν는 공기의 점성계수이다.

지표면 저항은 건성침적속도의 일변화 경향을 결정하는 가장 우세한 저항성분으로 지표면의 특성과 식생의 종류에 따라 가장 큰 차이를 보인다. PNU/DEM에서 지표면 저항은 잎의 면적(Leaf Area), 식물의 기공(stomatal) 작용, 흙의 산도(pH), 수분 함량과 화학적 결합 등의 영향이 고려되며, 잎의 기공 및 엽육(mesophyll)에 대한 저항, 마른 표피 저항(cuticle resistance), 젖은 표피 저항, 지면 저항(ground resistance)으로 구성하였다.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \tag{14}$$

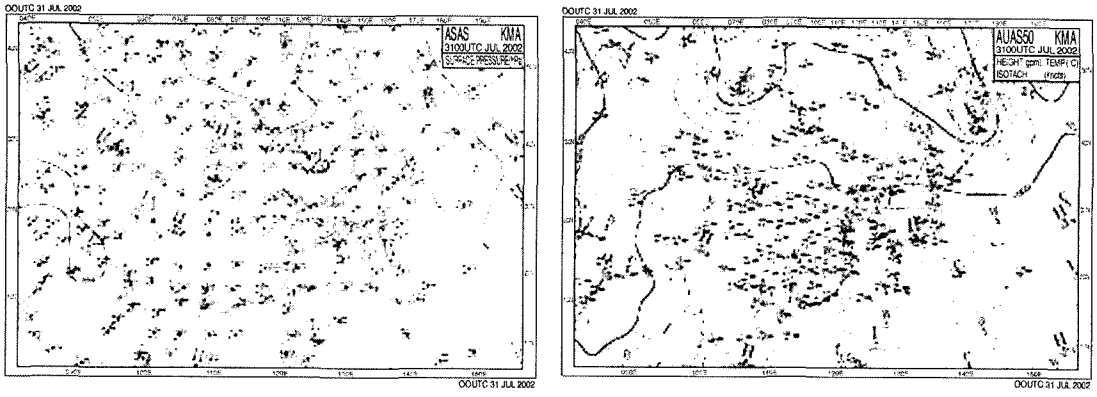
여기서, R_c는 총 지표면 저항이고, R_p는 잎의 기공 및 엽육에 대한 저항이고, R_{cut}는 건조한 표피 저항을, R_{cw}는 습한 표피 저항을, R_g는 지면 저항을 각각 나타낸다.

3.3 기상장 모델링

3.3.1 계산 사례일 선정

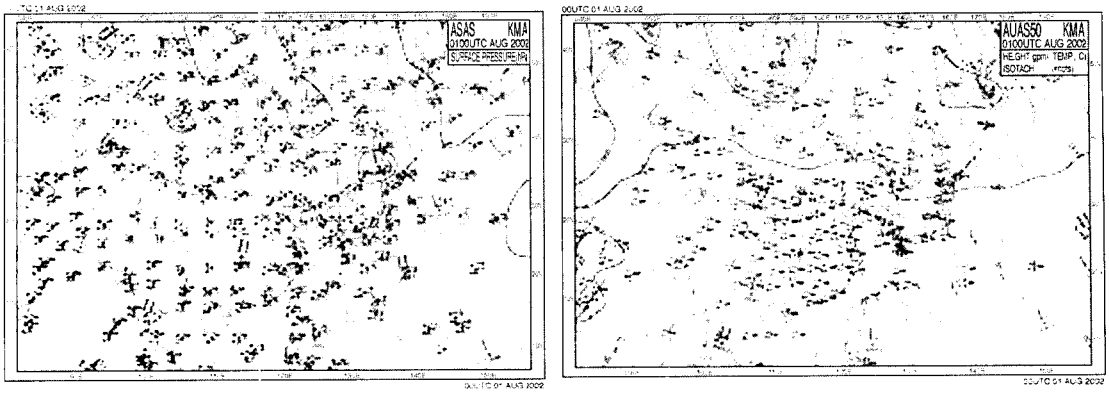
계산 사례일은 부산지역에서 맑은 날씨를 보이는 전형적인 여름날의 종관상황을 나타내는 2002년 7월 31일에서 8월 1일로 하였으며, 한국 기상청에서 제공하는 사례일에 대한 일기도를 그림 1과 그림 2에 제시하였다.

2002년 7월 31일 00UTC (0900LST)의 경우(그림 1) 먼저, 지상일기도에서 우리나라는 완연하게 북태평양 고기압의 영향을 받는 가운데 1012 hPa 등압선이 한반도 중부를 지나고 있고 1008 hPa 등압선은 한·중 국경을 지나고 있다. 500 hPa 상층일기도에서도 우리나라는 북태평양 고기압의 영향을 받는 가운데 5880 gpm 등고선이 한반도를 감싸고 있다. 또한



(a) Surface weather map (b) 500 hPa weather map

Fig. 1. Weather maps for 0000UTC on 31 July 2002.



(a) Surface weather map (b) 500 hPa weather map

Fig. 2. Weather maps for 0000UTC on 1 August 2002.

전일과 동일하게 5°C 등온선이 연해주 및 동해지역을 통과하는 가운데 온도능의 영향을 받고 있다. 그리고 한 · 중 국경지역으로 온난이류가 분석되고 있다. 따라서 전국은 남서 내지 남풍이 지배적으로 부는 가운데 중부 일부지역을 제외하고 대체로 맑은 날씨를 나타내고 있다. 기온은 전일보다 2°C 정도 상승한 가운데 최저기온은 24~27°C, 최고기온은 27~34°C를 기록하였다.

2002년 8월 1일 00UTC (0900LST) 지상일기도의 경우(그림 2) 1012 hPa 등압선이 한반도 중부지역을 통과하는 가운데 1008 hPa 등압선은 원산만 및 발해만을 통과하고 있다. 역시 우리나라는 준 정체성인 북태평양 고기압의 영향을 받고 있는 가운데 전형적인 무더운 여름 날씨를 나타내고 있다. 500 hPa 상층일기도의 경우 우리나라는 북태평양 고기압의 영향을 받고 있는 가운데 여전히 5880 gpm 등고선이 한반도를 감싸고 있으며 5°C 등온선의 온도능 영향을 받고 있다. 그러나 전일과는 달리 온난이류가 없는 가운데 5°C 등온선의 온도능도 다소 완화되었다. 따라서 전국은 대체로 맑은 가운데 서 내지 남서풍의 2 m s^{-1} 내외의 바람이 주로 불고 있다. 기온은 전일과 비슷한 가운데 최저기온은 23~26°C, 최고기온은 26~33°C를 기록하였다.

3.3.2 기상장 수치모의 결과

대상지역은 부산광역시와 기장군의 일부 및 김해 일부 지역을 포함한 영역을 고려하였으며, 구릉지와 산지지형이 나타나고 복잡한 해안선은 물론 낙동강과 삼각주를 포함한 지역이다. 이러한 지역에서는 지형에 의한 영향이 기상장 모델링 결과에 중요하며, 지형에 따른 기상장의 변화와 시간별 추이가 잘 모사되어야 할 것이다. 기상장 모델링에 사용된 CSU-RAMS는 이러한 대상지역에서의 기상장 분석에 적합한 모델로 사료된다.

모델링의 대상일은 전형적인 맑고 무더운 여름날인 2002년 7월 31일을 선정하였다. 모델링 선정일을 중심으로 전후 1일씩을 모델링 기간에 추가하여 안정화시켰으며, 따라서 2002년 7월 30일부터 8월 1일까지를 모델링하여 그 중 7월 31일에 대한 바람장과 온도장 결과를 분석하였다. 수치모의된 기상장 결과는 건성침적 모델링을 수행하기 위해 사용하였다.

그림 3은 대상지역에서의 수평 바람장 분포를 나타낸 것이다. 복잡한 지형과 해안이 인접해 있는 연안 복합 도시지역의 특색이 잘 나타나 있다. 0400LST의 결과를 보면, 새벽과 야간에 나타나는 육풍이 바다로 나가는 현상과 바람이 낙동강을 따라 연안을 향해 나가는 분포를 잘 모사하고 있다. 낮은 구릉과 산지 사이에 나온 골을 따라 바람의 이동이 나타남을 볼 수 있으며, 대체로 남풍이 나타나고 있다. 0800LST에는 일출과 함께 시작된 복사열로 인해 해풍이 점차 나타남을 살펴볼 수 있다. 부산연안에서 동풍이 나타나며 내륙에 약한 해풍과 지형에 따른 국지풍이 나타나고 있다. 1200LST에는 해풍이 점차 발달하여 오전보다 높은 풍속을 나타내고 있으며, 대

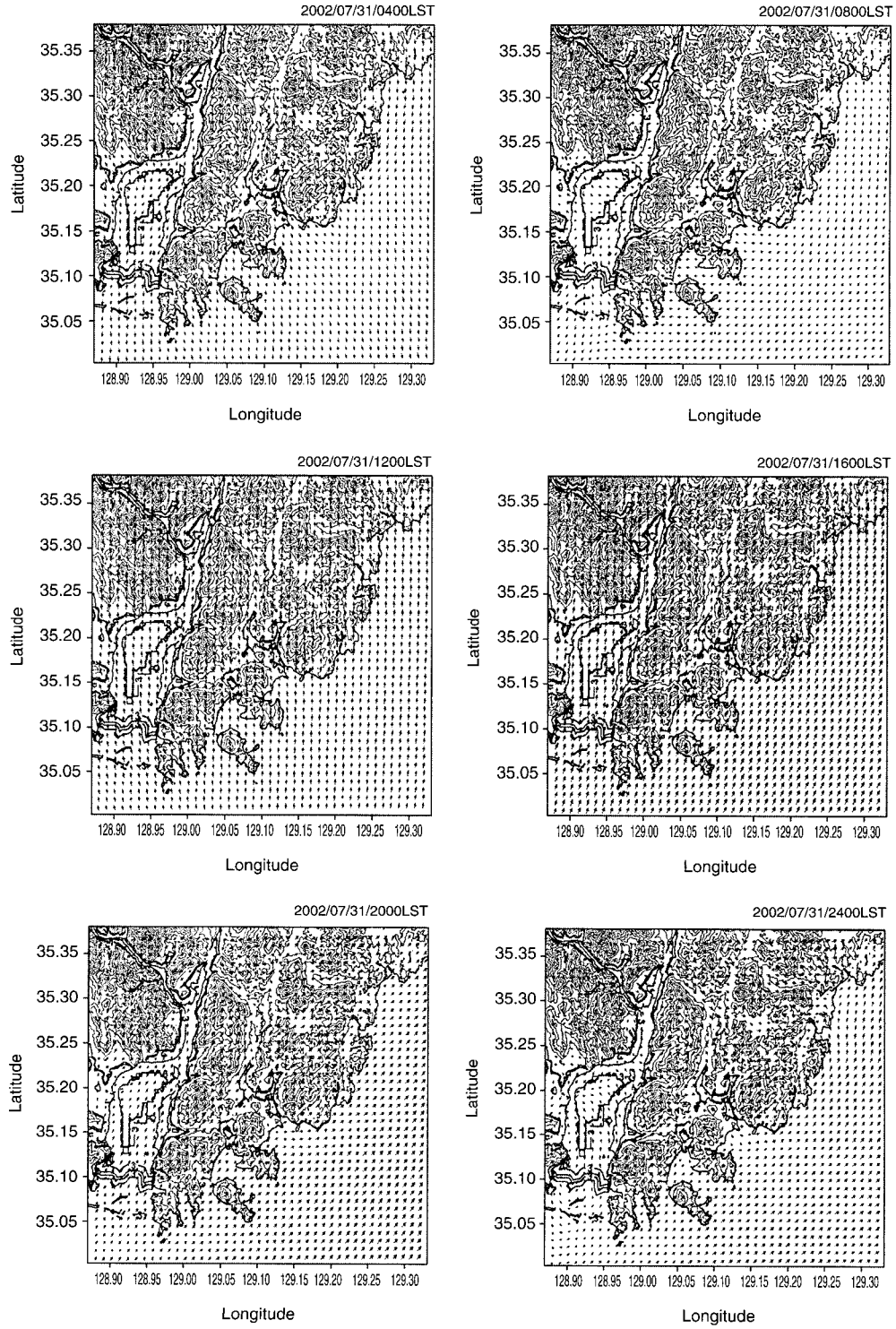


Fig. 3. The horizontal distributions of the simulated wind field at 50 m level (Unit : m s^{-1}).

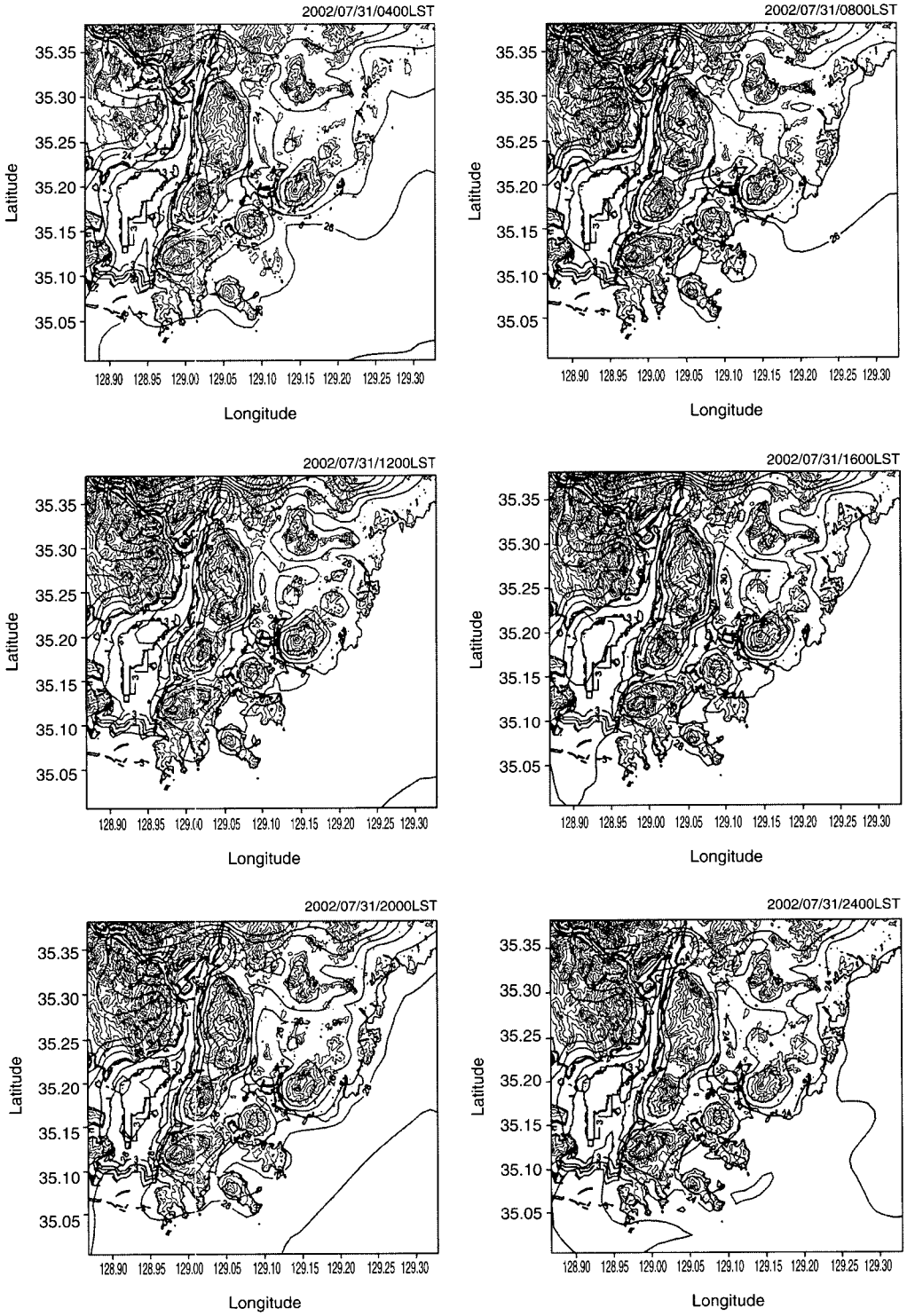


Fig. 4. The horizontal distributions of the simulated temperature at 50 m level (Unit : °C).

체로 남풍계열의 바람이 나타났다. 강을 따라 해풍의 이동이 나타남을 볼 수 있다. 1600LST에도 해풍이 나타났으며 남풍이 우세하지만 동쪽으로의 전향된 바람의 분포가 나타났다. 산지 사이의 골에는 풍속이 비교적 약해졌고 골을 따라 부는 국지풍을 볼 수 있었다. 2000LST에는 주간의 해풍이 약화된 분포를 볼 수 있으며 골을 따라 나타나는 국지풍은 더욱 약하게 나타났다. 대체로 남서풍 계열의 바람이 나타났고 강을 따라 내륙으로 들어가는 바람은 연안에서의 바람보다 풍속이 약하였다. 2400LST에는 주간의 풍속보다 약하지만 국지풍과 육풍이 잘 모사되고 있으며 구릉의 영향으로 골을 따라 풍향의 전향이 나타나고 있다. 특히 모델링 영역의 북서쪽에 분포한 복잡한 지형에서 전향된 바람이 잘 나타났다.

전형적인 여름날인 2002년 7월 31일을 모사한 수평 온도장 분포를 그림 4에 나타내었다. 일반적인 여름의 새벽과 야간 온도장 분포를 나타내고 있는 0400LST의 경우를 보면, 산지와 구릉지보다 평지가 높은 기온을 나타내었다. 강과 산지를 따라 등온선의 분포가 뚜렷하게 나타나며 지형의 영향을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 0800LST에는 이전시간대보다 온도의 분포가 약간 높아졌음을 볼 수 있다. 12LST에는 산지와 평지에서 온도 분포의 차이가 오전보다 더 크게 나타났으며, 평지가 더 높은 온도를 보였다. 1600LST에는 주간의 복사열로 인해 이전 시간대보다 더 높은 온도 분포를 나타내었고 평지에서 30°C 이상의 기온을 보이는 곳도 나타났다. 2000LST에는 주간의 복사열로 인해 새벽과 오전 시간대보다 높은 온도 분포를 나타내고 있으나, 일몰이후 기온이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 2400LST에는 기온이 떨어져 평지지역에 24°C 정도의 기온분포가 나타났다.

3.4 침적 모델링

3.4.1 기상 요소에 따른 수치모의

기상 요소에 따른 PNU/DEM의 민감도를 분석하기 위해 풍속, 태양복사, 안정도를 변화시키면서 오존의 건성침적속도를 수치모의하였다.

PNU/DEM에서 오존의 건성침적속도에 대한 태양복사와 풍속의 영향을 태양복사가 200, 400, 600, 800 W m^{-2}일 때 풍속의 증가에 따른 건성침적속도 변화를 통해 살펴보았다(그림 5a). PNU/DEM에서 태양복사는 잎 기공의 개폐와 지표온도에 영향을 주는 것으로 고려되어 건성침적속도를 결정하는데 중요한 역할을 하고, 풍속은 공기역학적 저항 및 점성층 저항의 모수화와 마찰속도에 영향을 미친다. 풍속이 증가할수록 건성침적속도의 크기가 커지는데, 이는 난류가 풍속의 증가에 수반되어 증가하는 것으로 설명되어질 수 있다. 풍속이 1.5 m s^{-1} 이하일 때 태양복사에 따른 건성침적속도의 차이는 거의 나타나지 않지만 풍속의 증대에 따라 건성침적속도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 풍속이 1.5 m s^{-1} 이상이 되면 건성침적속도는 서서히 증가하는 분포를 보였다. 약 1.5 m s^{-1} 이상의 풍속에서는 태양복사가 커질수록 오존의 건성침적속도 역시 커지는 분포를 나타났으며, 풍속에 따른 건성침적속도의 변화가 서서히 나타났다. 따라서, 건성침적속도와 태양복사의 관계에서 어느 정도 이상의 풍속일 때 태양복사가 건성침적속도의 크기에 영향을 주는 것을 알 수 있

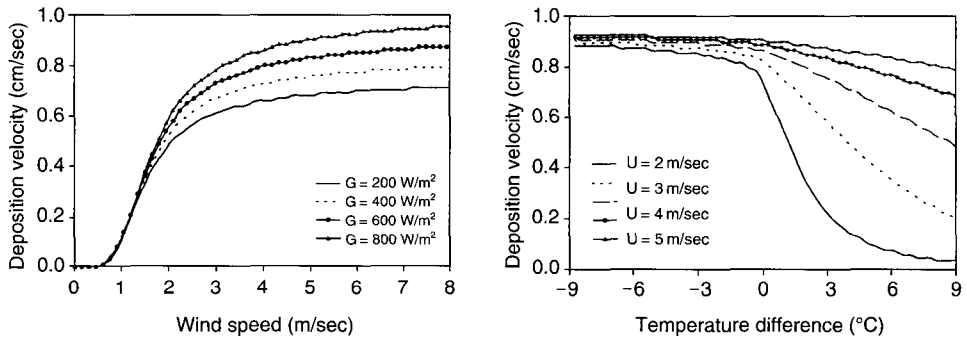


Fig. 5. Sensitivity of O_3 (a) dry deposition velocities to wind speed and solar insolation, and (b) dry deposition velocities to vertical temperature difference and wind speed over deciduous forest.

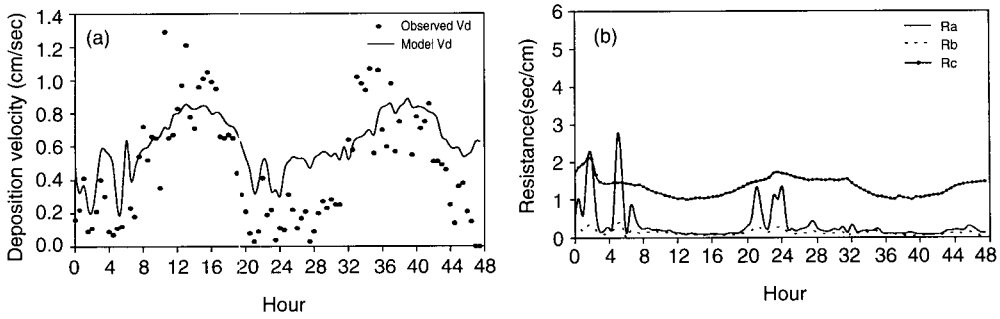


Fig. 6. Diurnal variation of (a) observed and modeled O_3 dry deposition velocity and (b) resistances obtained from PNU /DEM for sunny days and dry ground in summer.

었다.

또한, 그림 5b에 지표와 대기 사이의 연직 온도 차이로 나타나는 안정도 및 풍속이 오존의 건성침적속도에 미치는 영향과 그 관계를 나타내었다. 온도 차이가 음수로 나타나는 불안정 상태의 대기에서 건성침적속도는 보다 큰 값을 보이는데, 대기가 불안정한 상태일 때 난류가 발달하여 건성침적속도가 커지기 때문이다. 대기가 불안정한 상태일 때는 풍속에 따른 건성침적속도의 차이가 거의 나타나지 않지만, 대기가 안정한 상태일 때 풍속이 강할수록 건성침적속도가 급격히 커지는 분포를 볼 수 있었다. 이러한 분포는 대기가 안정한 상태인 새벽과 야간에 발생하는 순간적인 강한 풍속이 건성침적속도의 순간적인 진동을 유도하는 일변화 특성과 관계지어 설명할 수 있다.

3.4.2 여름에 대한 사례 분석

여름철 활엽수림에 대하여 관측된 기상 자료와 PNU/DEM을 통해 건성침적속도를 수치모의하고 각 저항성분별로 분석하여 보았다(그림 6). 본 연구에서 사용한 관측된 기상 자료와 건성침적속도 자료는 1988년 여름에 Canada의 Boden forest에서 캐나다 환경청에 의해 관측된 EMEFS (Eulerian Model Evaluation Field Study) 자료이다. 사용된 관측자료에 관한 측정방법과 이론적인 설명 및 분석은 Shaw *et al.* (1988)에 나타나 있다.

맑은 날에 대하여 그림 6a에는 계산된 건성침적속도와 관측된 건성침적속도를, 그림 6b에는 계산된 건성침적속도의 각 저항들을 나타내었다. 그림 6a에서 계산된 건성침적속도는 관측된 건성침적속도의 일변화와 비교하여 0.2324의 평균 제곱근 오차(root mean square error)를 보이며 유사한 분포를 나타내었다. 따라서 여름철 맑은 날에 대하여 PNU/DEM을 사용한 오존의 건성침적속도 계산은 유의한 결과를 보일 것으로 생각된다.

그림 6b에서 건성침적속도의 일변화는 지표면 저항의 일변화와 가장 유사한 경향을 보여, 건성침적속도의 계산시 지표면 저항의 영향이 가장 우세한 것으로 사료된다. 야간과 새벽에 나타나는 건성침적속도의 진동은 공기역학적 저항에 의한 것이며 마찰속도의 영향으로 사료된다.

3.4.3 지표면 종류에 따른 건성침적속도의 수치모의

Wesely *et al.* (1983)에 의한 계절분류에서 여름(mid summer with lush vegetation)에 대하여 지표면 종류에 따른 오존의 건성칙적속도 변화를 수치모의하였다(그림 7). 지표면의 종류에 따른 식물과 토양의 영향을 고려할 수 있도록 저항의 계산에 사용되는 몇 가지 저항 성분과 매개 변수 및 지표 거칠기 길이(z_0)를 다양하게 변화시켰다. land-use에 따른 지표면을 세 가지씩 나누어 건성침적속도를 나타내었으며, 각각의 지표면에 대한 건성침적속도의 일변화 경향을 살펴보았다.

그림 7a에서 나타낸 농경지, 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서의 건성침적속도 일변화를 보면, 야간에는 세 가지 지표면의 건성침적속도가 거의 비슷한 값을 보이지만, 주간에는 일사로 인한 식물의 활발한 기공작용으로 지표면 종류에 따른 차이가 나타났다. 농경지, 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서 건성침적속도의 일변화는 각각 0.2

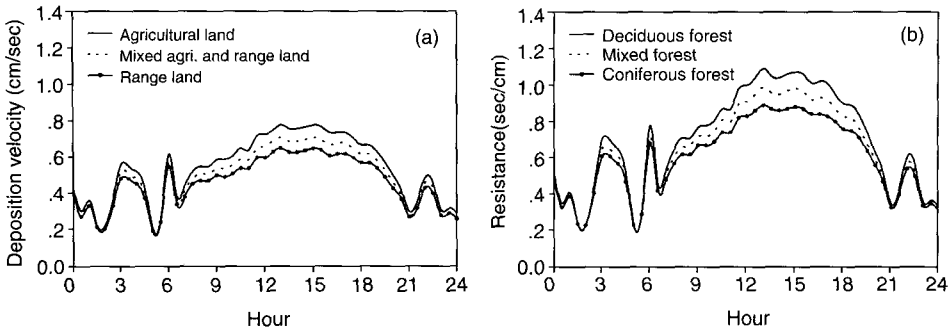


Fig. 7. Diurnal variation of calculated dry deposition velocity over various land-use types in summer.

~0.78 cm s^{-1}, 0.2~0.65 cm s^{-1}, 0.2~0.7 cm s^{-1}로 농경지에서 주간의 건성침적속도가 가장 크게, 목초지에서 가장 낮게, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서 그 중간값으로 나타났다. 목초지보다 거칠기 길이가 큰 농경지에서 큰 건성침적속도를 나타났다. 이는 건성침적속도의 모수식에 따라 거칠기 길이가 클수록 마찰속도가 크게 나타나므로 보다 큰 건성침적속도를 가지게 되는 것이다.

그림 7b에서 다른 지표면에 비해 식생의 활동이 활발한 숲에서 건성침적속도의 일변화를 살펴보았다. 숲은 다른 지표면에 비해 큰 지표면 거칠기 길이를 가지며 비교적 큰 건성침적속도를 보였다. 세 가지 숲에서 야간의 건성침적속도는 거의 차이가 없지만 주간에는 활엽수림의 침적속도가 가장 크고, 혼합림, 침엽수림의 순으로 작아진다. 활엽수림, 혼합림, 침엽수림의 경우 건성침적속도는 각각 0.23~1.09 cm s^{-1}, 0.23~0.99 cm s^{-1}, 0.23~0.89 cm s^{-1}이며, 활엽수림에서 가장 큰 주간 건성침적속도를 나타내었다. 잎 면적 지수가 큰 활엽수림의 경우 식물에 대한 저항 성분의 영향으로 세 가지 숲 중 건성침적속도가 가장 크게 나타난 것으로 생각된다.

따라서 건성침적속도는 지표면 거칠기 길이와 잎에 의한 대류 현상 및 지표면 특성에 크게 영향을 받으므로, 주간에는 식생의 종류에 따른 기공작용, 대류현상 등의 차이가 나타나 지표면의 종류에 따라 건성침적속도가 다르게 나타남을 알 수 있다. 야간에는 서로 다른 지표면에서 건성침적속도가 거의 비슷하게 나타나지만, 식물의 활동이 활발한 지표면인 숲에서의 건성침적속도가 다른 지표면에 비해 보다 크게 나타났다.

3.4.4 오존의 건성침적 수치모의 결과

CSU-RAMS의 기상장 모델링 결과를 사용하고, PNU/DEM의 건성침적속도 모델을 사용하여 오존의 건성침적속도를 수치모의한 결과를 4시간 간격으로 다음 그림 8에 나타내었다. 수면에서 낮은 값을 보이는 오존의 건성침적속도 특성으로 인해 부산 연안해에서 낮은 건성침적속도를 나타내었으며, 0.05 cm s^{-1}의 전체 시간에 대한 평균값과 0.026~0.07 cm s^{-1}사이의 분포를 나타내었다. 부산 내륙지역에서 건성침적속도의 평균값은 0.5 cm s^{-1}였으며, 0.32~0.9 cm s^{-1}의 분포를 보여 바다에 비해 10배가 큰 건성침적속도를 볼 수 있었다. 식물의 활동이 활발한 산지지역인 북구 백양산 일대, 금정산 일대와 해운대 장산 및 구곡산 일대에서 큰 건성침적속도가 나타났다. 이러한 건성침적속도는 식물에 의한 기공작용이 활발한 주간에 더욱 뚜렷이 나타는 특성을 가지므로, 오전인 0800LST부터 건성침적속도가 커지기 시작하여 1200LST에 금정산 일대와 해운대 장산 및 구곡산 일대 산지지역에서 최대 건성침적속도를 보인다. 또한 강한 풍속으로 인한 높은 건성침적속도가 영도와 감만동 부근에 나타났다. 1600LST에 건성침적속도는 1200LST에 비해 낮지만 북구 백양산 일대와 기장 일대 등의 산지에서 높은 건성침적속도 분포를 보였다. 2000LST이후 건성침적속도가 작아지기 시작하여 2400LST에는 오전 0400LST보다 더 낮은 건성침적속도 분포를 보였다.

부산 지역에 대한 건성침적속도 수평 분포에서 기장 일대와 백양산 일대에는 각 시간대에서의 최대

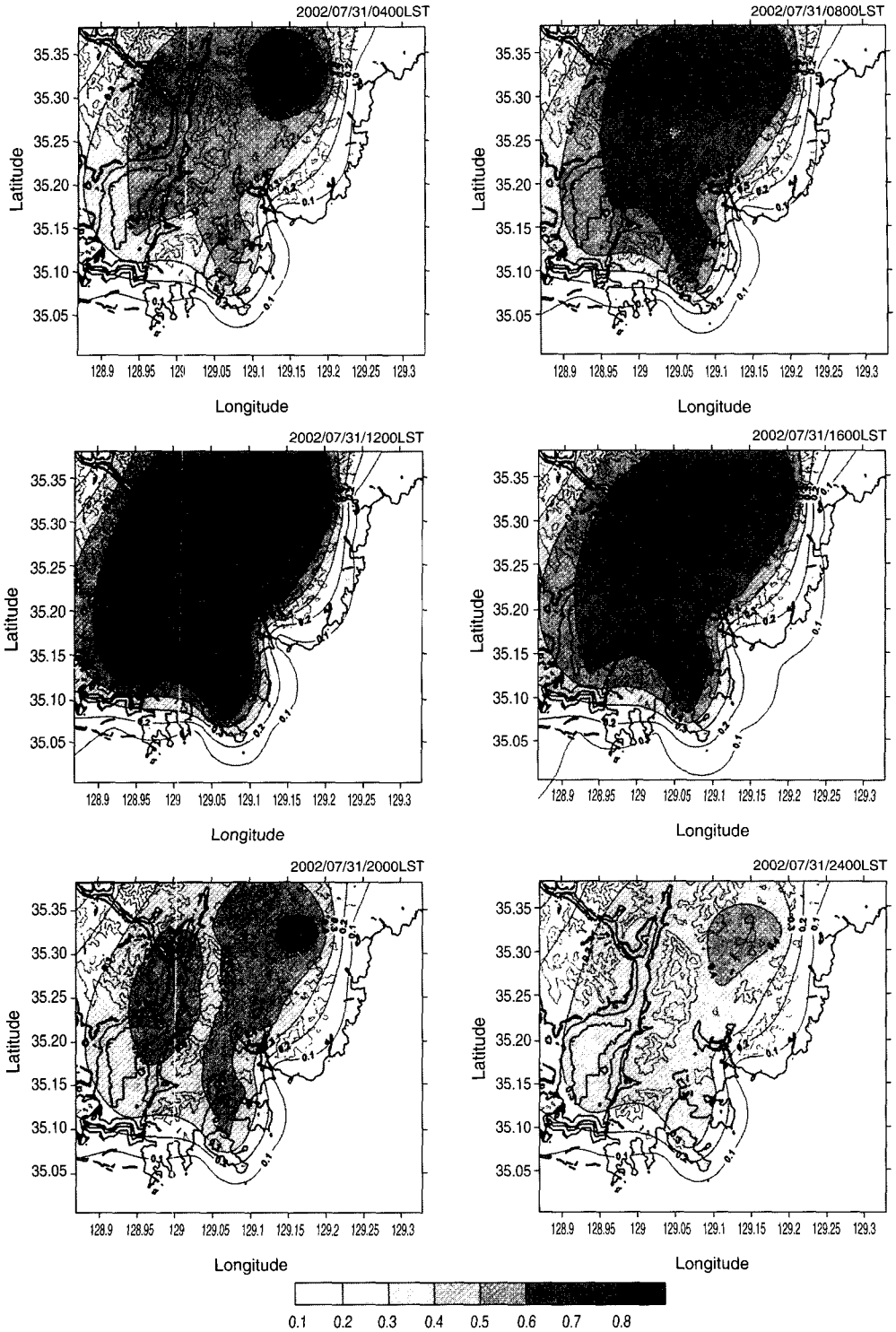


Fig. 8. Horizontal distributions of the estimated O_3 dry deposition velocity (cm s^{-1}) in Busan.

건성침적속도가 항상 나타나 식생이 많이 분포하는 녹지 지역에서 큰 값을 보이는 건성침적속도의 특징을 살펴볼 수 있었으며, 영도와 감만동 부근에서 주간의 해풍에 의한 강한 풍속으로 비교적 높은 건성침적속도가 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 복잡한 산지 지형을 가진 연안지역의 기후 특징이 반영된 기상장과 기상인자 및 지표면의 영향을 고려한 건성침적모델을 사용하여 오존의 건성침적속도를 계산하였다.

CSU-RAMS를 사용하여 전형적인 맑고 무더운 여름날에 대하여 수치모의한 대상지역의 기상장을 분석한 결과, 지형에 따른 기상장의 변화와 시간별 추이를 잘 모사하였으며 복잡한 지형과 해안이 인접해 있는 연안 복합 도시지역의 특색이 잘 나타나 있었다. 시간의 추이에 따른 해륙풍의 모사와 산지 및 구릉지의 분포에 따른 산곡풍의 모사는 물론, 강과 산지를 따라 등온선의 분포가 뚜렷하게 나타나며 지형에 따른 온도장을 잘 모사하고 있음을 알 수 있었다.

건성침적모델인 PNU/DEM으로 계산된 건성침적속도의 특성을 파악하기 위하여 침적속도와 기상 인자들 사이의 관련성을 살펴보고, 농경지, 목지, 활엽수림, 침엽수림, 나지 등의 다양한 지표면에 대하여 건성침적속도를 계산하였다. 건성침적속도는 지표면 거칠기 길이와 잎에 의한 대류 현상 및 지표면 특성에 크게 영향을 받으므로, 주간에는 식생의 종류에 따른 기공작용, 대류현상 등의 차이가 나타나 지표면의 종류에 따라 건성침적속도가 다르게 나타났다. 야간에는 서로 다른 지표면에서 건성침적속도가 거의 비슷하게 나타나지만, 식물의 활동이 활발한 지표면인 숲에서의 건성침적속도가 다른 지표면에 비해 보다 크게 나타났다.

CSU-RAMS으로 수치모의된 기상장을 사용하고 PNU/DEM을 사용하여 오존의 건성침적속도를 수치모의하여 부산 지역에 대한 건성침적속도 수평 분포를 분석하였다. 대상영역 중 식생이 많이 분포하는 녹지 지역에는 각 시간대에서의 최대 건성침적속도가 나타나, 식생이 많이 분포하는 지역에서 큰 값을 보이는 건성침적속도의 특징을 살펴볼 수 있었으며, 해안에 인접하여 주간의 해풍에 의한 강한 풍속이 나타나는 지역에서 비교적 높은 건성침적속도가 나타났다.

도시화에 따른 지역 기후의 변동을 고려하여 건성침적속도를 계산한 결과, 국지적 대기 순환계에 영향을 미치는 도시지역에 대하여 유의한 기상장을 분석할 수 있었으며, 오존의 건성침적속도는 바람장과 지표면의 영향이 반영되어 타당한 값을 나타내었다.

본 연구와 같이 지역적 대기 유동장의 수치모의를 통해 도시지역의 기상장을 제공하여, 대기오염물질의 물리적인 현상과 화학적인 과정을 수치 모의한다면 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있으며, 이를 통해 대기질 예측 시스템을 구축한다면 관련 연구분야에 대한 학문적 발전과 관심 및 중요성을 부각시키는 효과를 가져올 것이다. 또한 지역적 규모의 기상장을 수치모의함으로써 도시건설과 녹지조성 및 인공호수의 배치 등의 도시화에 따른 대기질 관리를 추진하기 위한 참고자료로도 활용 가능할 것이며 효과적인 환경정책의 계획이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00668-0) 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김유근, 이화운, 홍정혜(1998) 입자상 물질의 습성 침적에 관한 수치모의, 한국대기보전학회지, 14(5), 433-441.

김유근, 오인보, 황미경(2003) UAM-V를 이용한 부산지역 고농도 오존사례 수치모의, 한국대기환경학회지, 19(1), 1-11.

원경미, 이화운(1998) 부산의 지형적 특성을 고려한 O_3의 건성침적속도 시뮬레이션, 한국대기보전학회지, 14(5), 421-431.

원경미, 이화운 (1999) 연안도시지역에서 대기오염의 3차원 수치예측모델링-(I) 침적현상이 대기질에 미치는 영향예측, 한국대기환경학회지, 15(5), 625-638.

이순환, 이화운, 김유근(2002) 복잡지형에서 도시화에 따른

대기오염 확산에 관한 시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.

이학성, 강충민, 강병욱, 김희강 (1999) 서울지역 여름철과 겨울철 산성 오염물질의 농도 특성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 15(2), 113-120.

Businger, J.A., J.C. Wingaard, Y. Izumi, and F. Bradley (1971) Flux profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.

Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell, and D.J. Walcek (1987) A three-dimensional Eulerian acid deposition model : physical concepts and formulation, J. Geophy. Res., 92, 14681-14700.

Clark, T.L. (1977) A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation, J. Comput. Phys., 24, 186-215.

Deardorff, J.W. (1978) Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, J. Geophys. res., 83, 1889-1903.

Gal-Chen, T. and R.C.J. Somerville (1975) On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equation, J. Comput. Phys., 17, 209-228.

Harley, R.A., A.G. Russel, G.J. McRae, G.R. Cass, and J.H. Seinfeld (1993) Photochemical modeling of the Southern California Air Quality Study, Env. Sci. and Tech., 27, 378-388.

Helfand. G. and J.C. Labraga (1988) Design of a nonsingular level 2.5 second-ordar closure model for the prediction of atmospheric turbulence, J. Atmos. Sci., 45, 113-132.

Lalas, D.P., V.R. Veris, G. Karras, and G. Kallos (1982) An analysis of the SO_2 concentration levels in Athenes, Greece, Atmos. Environ., 16(3), 531-544.

Liu, S.C., M. Trainer, F.C. Fehsenfeld, D.D. Parrish, E.J. Williams, D.W. Fahey, G. Huber, and P.C. Murphy (1987) Ozone production in the rural troposphere and implications for regional global ozone distributions, J. Geophys. Res., 92, 4191-4207.

Louis, J.F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Bound.-Layer moteor., 17, 187-202.

Massman, W.J., J. Pederson, A. Delany, D. Grantz, G. den Hartog, H.H. Neumann, S.P. Oncley, Jr. R. Pearson, and R.H. Shaw (1994) An evaluation of the regional acid deposition model surface module for ozone uptake at three sites in the San Joaquin Valley of California, J. Geophys. Res., 99, 8281-8294.

McCumber, M.C. and R.A. Pielke (1981) Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Part I : Soil layer, J. Geophys. Res., 86, 9929-9938.

McKendry, I.G. (1993) Ground-level ozone in Montreal, Canada, Atmos. Environ, 27B(1), 93-103.

McQueen, J.T., R. Roland, Draxler, and Glenn D. Rolph (1995) Influence of Grid Size and Terrain Resolution on Wind Field Predictions from an Operational Mesoscale Model, J. Appl. Meteoro., 34, 2166-2181.

Mellor, G.L. and T. Yamada (1974) A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layer, J. Atmos. Sci., 31, 1971-1806.

Mellor, G L. and T. Yamada (1982) Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.

Mesinger, F. and A. Arakawa (1976) Numerical method used in atmospheric models, GARP Publication Series, No. 14, WMO/ICSU Joint Organizing Committee, 64pp.

Noto, K. (1996) Dependence of heat island phenomena on stable stratifacation and heat quantity in a calm environment, Atmos. Environ., 30, 475-485.

Padro, J.D. and G.C. Edwards (1991) Sensitivity of ADOM dry deposition velocities to input parameters : a comparison with measurements for SO_2 and NO_2 over three land-use types, Atmosphere-Ocean, 29, 667-685.

Padro, J. D. (1996) Summary of ozone dry deposition velocity measurements and model estimate over vineyard, cotton, grass and deciduous forest in summer, Atmos. Environ., 30, 2363-2369.

Park Soon-Ung, Young-Hee Lee, and Eun-Hee Lee (2002) Estimation of nitrogen dry deposition in South Korea, Atmos. Environ., 36(31), 4951-4964.

Pielke, R.A. and M. Uliasz (1998) Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models-limitations and strengths, Atmos. Environ., 32, 1455-1466.

Pleim, J., A. Venkatram, and R. Yamartino (1984) Prepare OME, AES of Canada and the umwelt-boundesamt, west germany ADOM/TADAP model development program. ERT P-B980-520.

Shaw, R.H., den Hartog G., and H.H. Neumann (1988) Influence of foliar density and thermal stability on profiles of Reynolds stress and turbulence intensity in

a deciduous forest, Bound.-Layer moteor., 45, 391-409.

Tremback, C.J. and R. Kessler (1985) A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models. Preprints, 7th Conference on Mumerical Weather Prediction, 17-20 June 1985, Montreal, Canada, AMS.

Tripoli, G.J. and W.R. Cotton (1982) The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model -1982. Part I : General theoretical framework and sensitivity experiments, J. de Rech. Atmos., 16, 185-220.

Walcek, C.J., R.A. Brost, J.S. Chang, and M.L. Wesely (1986) SO_2, sulfate and HNO_3 deposition velocities computed using regional landuse and meteorological data, Atmos. Environ., 20, 949-964.

Wesely, M.L. and B.B. Hicks (1977) Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation, J. Air Pollut. Control Assoc., 27, 1110-1116.

Wesely, M.L., D.R. Cook, R.L. Hart, B.B. Hicks, J.L. Durham, R.E. Speer, D.H. Stedman, and R.J. Trapp (1983) Eddy-correlation measurements of dry deposition of particulate sulphur and submicron particles. In : Precipitation scavenging, Dry deposition and resuspension, Volume 2, Dry deposition and resuspension (edited by Pruppacher, H.R., R.G. Semonin and W.G.N. Slinn), 943-952.