

## 지표면의 종류에 따른 오존의 건성침적속도에 관한 수치모의 Numerical Simulation for Dry Deposition Velocity of Ozone According to Land-use Types

이 화 운\* · 노 순 아 · 문 난 경

부산대학교 대기과학과

(2003년 6월 27일 접수, 2003년 9월 5일 채택)

Hwa Woon Lee\*, Soon-A Roh and Nan-Kyoung Moon

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 27 June 2003, accepted 5 September 2003)

### Abstract

Ozone is an important atmospheric pollutant that is occurred in tropospheric chemical process and it also affects the human health and plants. For a correct application of abatement strategies for ozone, it is necessary to understand the factors that control atmospheric ozone removal by dry deposition processes. The present study investigates the numerical simulation of the dry deposition velocity ( $V_d$ ) obtained from PNU/DEM (Pusan National University Deposition Model). PNU/DEM includes seasonal categories, meteorological factors, surface properties and land-use types and proposes for an accurate numerical computation. And, this study examines the ability of the PNU/DEM to compute  $V_d$  of ozone over water surfaces and evaluates PNU/DEM by comparing its estimated  $V_d$  to past observed  $V_d$  over water.

The parametrization was found to yield  $V_d$  values generally in good agreement with the observations for the deciduous forest and the coniferous forest. Ozone is removed slowly at wet surface or water due to its low water solubility. Therefore  $V_d$  values over water were lower than  $V_d$  values over the other surfaces. Comparison of PNU/DEM simulated  $V_d$  values to observations of ozone  $V_d$  that have been reported in the literature implies that PNU/DEM produces realistic results.

**Key words** : Dry deposition velocity, Ozone, Land-use

### 1. 서 론

대기오염물질의 정확한 건성침적속도를 계산하기 위해서는 식생 상태의 계절적·지리적 변화 및 캐노

피 (canopy)를 구성하는 식생의 종류에 대한 적절한 묘사와 기상인자들의 영향에 대한 정확한 표현이 요구된다. 또한 건성침적현상의 연구를 위해 신뢰할 수 있는 건성침적속도의 측정 체계와 지역적·공간적 특성을 고려한 모델이 요구되며 많은 학자들에 의해 다양한 방법으로 연구가 계속되고 있다.

식생 및 지표면의 종류에 따른 건성침적속도의 차

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail: glaycat@korea.com

이를 비교한 연구로 SO<sub>2</sub>에 대하여 Shreffler(1978)는 숲에서의 건성침적속도가 잔디에서의 값보다 크게 나타남을 보인 사례가 있다. 또한 Hill and Chamberlain (1976)은 식물로 덮인 지표면에 대하여, Garland (1977)는 잔디와 토양 및 물에 대하여, Baldocchi (1988)는 활엽수림, Hicks *et al.* (1989)은 옥수수밭과 콩밭에 대하여, Fowler and Unsworth (1979)는 밀밭에 대하여 유사한 계산을 하였다. Padro, J. (1996)는 포도밭, 목화밭, 잔디와 숲에 대한 여름의 건성침적속도를 관측한 오존의 건성침적속도를 사용하여 모델 계산값과 비교·분석하였다. 문난경 (1996)은 PNU/DEM (Pusan National University Deposition Model)을 구성하였으며, 이산화황과 오존의 건성침적속도를 계산하고, 관측값과 비교하여 그 타당성을 검증한 바 있다.

이러한 건성침적속도에 관한 선행연구 가운데, 수면 또는 해수면에서 나타나는 건성침적현상에 대해서는 다른 지표면 종류에 비해 상대적으로 알려진 바가 많지 않다. 수면에서 건성침적현상을 고찰한 연구로 Hick and Liss (1976)가 호수와 바다에 대한 SO<sub>2</sub>의 건성침적속도를 계산한 경우가 있다. 또한, McQueen *et al.* (1997)이 오염물질의 건성침적속도와 현열 및 잠열 플럭스를 계산하여 Chesapeake Bay의 buoy 관측자료를 사용하여 평가한 연구가 있다.

오존은 물에 대하여 용해도가 낮으므로 젖은 지표면이나 수면에서는 다른 물질에 비해 느리게 제거되는 특성을 가지며 (Galbally and Roy, 1980), 해수면에서 오존의 침적속도는 0.02~0.1 cm s<sup>-1</sup>의 값을 보이는 것으로 나타난 바가 있다 (McKay *et al.*, 1992). 그러나 해수면에서 오존의 침적속도와 단위 면적당 제거율은 낮지만 해양의 표면적이 넓으므로 침적은 대류권 오존을 제거하는 데에 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 PNU/DEM을 사용하여 여름과 겨울 두 가지 계절을 대상으로 다양한 지표면에 대하여 건성침적속도를 계산하였다. 지표면 저항 모수화에는 식물과 토양의 영향이 고려되었고, 지표면은 농경지 (agricultural land), 목초지 (range land), 농경지와 목초지가 혼합된 지표면 (mixed agricultural and range land), 활엽수림 (deciduous forest), 침엽수림 (coniferous forest), 혼합림 (mixed forest including wetland), 습지 (nonforested wetland), 낮은 관목과 바위가 있는 평지 (rocky open areas with low-growing shrubs)와 목화밭 (cotton field), 포도밭 (vineyard) 그리고 수면

(water)으로 분류하였다.

또한 각 지표면에서 계산된 건성침적속도를 선행 연구에서 관측된 다양한 지표면에서의 건성침적속도와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

## 2. PNU/DEM의 구조

여러 가지 지표면 종류 중, 수면에서는 식물과 토양의 영향이 나타나지 않으므로 지면과는 다른 메카니즘으로 건성침적속도를 고찰해야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 크게 지면과 수면으로 지표면을 나누어 수면에 대해서 지면과는 다른 모수화 방법을 사용하여 오존의 건성침적속도를 계산하였다.

### 2.1 지면에 대한 모수화 방법

건성침적속도는 풍속, 마찰 속도, 지표면 거칠기, 대기 안정도, 캐노피 습윤도 (canopy wetness) 등의 영향을 받는데, 난류층의 공기역학적 저항, 층류층의 점성층 저항 그리고 지표면의 특성에 따른 오염물질의 수송시 발생하는 저항인 지표면 저항(또는 canopy 저항)을 포함하여 세 가지 저항을 고려하여 계산하였다.

건성침적속도이론에 의해 건성침적속도는 다음과 같이 나타내어진다.

$$V_d = \frac{1}{(R_a + R_b + R_c)} \tag{1}$$

여기서, R<sub>a</sub>는 공기 역학적 저항, R<sub>b</sub>는 점성층 저항,

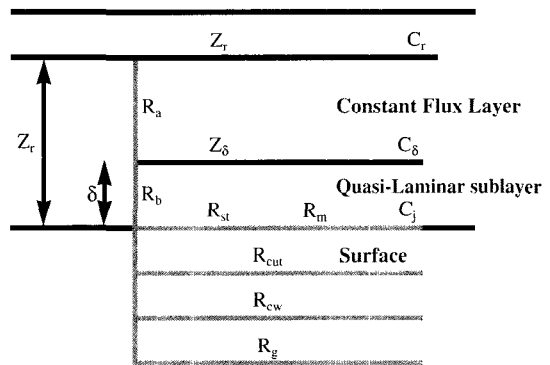


Fig. 1. Resistance network for dry deposition velocity.

$R_c$ 는 지표면 저항으로 그림 1에 건성침적속도를 구하기 위한 저항 성분을 모식도로 나타내었다.

공기 역학적 저항  $R_a$ 는 저층 대기에서의 풍속과 안정도, 그리고 토지 이용 형태에 따라 다르게 계산되며, 다음과 같이 표현된다.

$$R_a = (\ln(z_r/z_0) - \psi_H) / k u_* \quad (2)$$

여기서,  $z_r$ 은 건성침적속도가 계산되는 고도이며,  $z_0$ 은 각 land-use 형태와 계절에 따라 결정되는 지표 거칠기 길이이다.  $k$ 는 von Karman 상수이고,  $\psi_H$ 는 안정도 보편함수이다.

마찰 속도 ( $u_*$ )는 Bulk Richardson 수 ( $R_{iB}$ )를 사용하여 불안정한 대기와 안정한 대기로 나누어 계산할 수 있다 (Louis, 1979).

즉, 대기가 불안정한 경우 ( $R_{iB} \leq 0$ )에는

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[ 1 - \frac{9.4 R_{iB}}{(1+7.4C)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

그리고 대기가 안정한 경우 ( $R_{iB} > 0$ )에는

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[ \frac{1}{\left(1 + \frac{9.4}{2} R_{iB}\right)} \right] \quad (4)$$

으로 주어진다. 여기서 Bulk Richardson 수,  $R_{iB}$ 는

$$R_{iB} = \frac{gz \Delta \theta_v}{\theta_{vg} u^2} \quad (5)$$

로 주어진다. 그리고 식 (3)의  $C$ 는

$$C = 9.4 \sqrt{R_{iB} \frac{z}{z_0}} (k / \ln(z/z_0))^2 \quad (6)$$

로 주어진다. 여기서  $g$ 는 중력 가속도,  $z$ 는 저층 대기의 높이,  $\Delta \theta_v = \theta_{va} - \theta_{vg}$ 이며,  $\theta_{va}$ 는 저층 대기의 가온위,  $\theta_{vg}$ 는 지면에서의 가온위,  $u$ 는 풍속이다.

보편 함수  $\psi_H$ 는 Monin-Obukhov 길이 스케일로 나타낼 수 있고, 대기가 불안정한 경우 ( $R_{iB} \leq 0$ )에는

$$\psi_H = \exp \left[ 0.598 + 0.39 \ln \left( -\frac{z}{L} \right) - 0.09 \ln \left( -\frac{z}{L} \right)^2 \right] \quad (7)$$

그리고 안정한 경우 ( $R_{iB} > 0$ )에는

$$\psi_H = -\frac{5z}{L} \quad (8)$$

로 주어진다 (NCAR, 1985). 그리고 Monin-Obukhov 길이 스케일은

$$L = -\frac{\rho C_p \theta_{vg} u_*^3}{k g H} \quad (9)$$

로 주어진다. 여기서  $H$ 는 저층 대기에서 현열 플럭스 (heat flux)이다. 이 현열 플럭스는 대기가 불안정한 경우 ( $R_{iB} \leq 0$ )에는

$$H = \frac{u \Delta \theta_v}{0.74} \left( \frac{k}{\ln \frac{z}{z_0}} \right)^2 \left[ 1 - \frac{9.4 R_{iB}}{1 + 5.3C} \right] \quad (10)$$

그리고 대기가 안정한 경우 ( $R_{iB} > 0$ )에는

$$H = \frac{u \Delta \theta_v}{0.74} \left( \frac{k}{\ln \frac{z}{z_0}} \right)^2 \left[ \frac{1}{1 + \frac{9.4}{2} R_{iB}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

로 계산할 수 있다 (Louis, 1979).

점성층은 일정 플럭스층의 난류 수송 과정이 더 이상 적용되지 않는 준-라미나층 (quasi-laminar layer)이다. 점성층을 통한 수송에 대해서는 입자에 대한 분자 확산이나 브라운 확산만이 의미를 가지며, 지표면과 접촉하고 있는 얇은 층에서의 기체상 입자의 수송에 대한 점성층 저항  $R_b$ 는

$$R_b = \frac{1}{u_*} \left( \frac{\nu}{D_j} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (12)$$

로 주어진다 (Pleim *et al.*, 1984). 여기서  $D_j$ 는  $j$ 종류 기체의 확산도이고,  $\nu$ 는 공기의 점성계수이다.

식물이 있는 지표면에서 식물이 성장하는 시기에 는 지면에 대한 침적 현상은 식물체에 의한 uptake에 비해 무시될 정도로 작다. 밤에는 잎의 표피와 지면 위로 드러난 식물 표면에 대한 침적이 지면에 대한 침적보다 더욱 중요하다. 지표면의 특성에 따라 가장 큰 차이를 보이는 것이 지표면 캐노피 저항이므로, 다른 층의 저항보다 지표면의 성질을 잘 고려해서 계산하여야 한다.

지표면에 식생이 존재하는 경우의 총 저항은

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \quad (13)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $R_c$ 는 지표면 캐노피 저항이고,  $R_p$ 는 균엽저항을,  $R_{cut}$ 는 건조한 표피 저항을,  $R_{cw}$ 는 습한 표피 저항을,  $R_g$ 는 토양에 의한 저항을 나타낸다.

균엽저항 (foliage resistance)  $R_p$ 는 크게 기공 저항  $R_{st}$ 와 엽육 저항  $R_m$ 으로 나눌 수 있는데, 이 저항은 잎 면적 지수인 LAI (Leaf Area Index)와 국지 저항 (local resistance)을 사용하여 계산될 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$R_p = R_{st} + R_m = \frac{(r_{st} + r_m)}{LAI} \quad (14)$$

여기서  $r_m$ 은 국지 엽육 저항이며  $r_{st}$ 는 국지 기공 저항으로 다음과 같이 주어진다 (O'Dell *et al.*, 1977). 즉

$$r_{st} = \frac{P}{(B * D_j)} \quad (15)$$

여기서  $P$ 는 기공 상수 (stomatal constant)로  $2.3 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 를 사용하였으며,  $B$ 는 다음 식으로 추정할 수 있다.

$$B = B_{max} \sin\left((t - t_d) \frac{\pi}{12}\right) + B_{min} \quad (16)$$

여기서  $t$ 는 시간이고,  $t_d$ 는 해가 뜨는 시간이며, 최대 기공값  $B_{max}$ 은  $10 \mu\text{m}$ , 최소기공값  $B_{min}$ 은  $0.1 \mu\text{m}$ 이다.

$R_{cut}$ 는 건조한 canopy의 표피에 대한 저항으로

$$R_{cut} = \frac{r_{cut}}{LAI \times (1 - CWC)} \quad (17)$$

으로 주어진다. 여기서  $CWC$  (canopy water content)는 캐노피가 수분을 함유한 정도를 나타내는 것으로 습한 (wetness) 정도를 나타내는 파라미터이다.  $r_{cut}$ 는 국지 표피저항 (local leaf resistance)으로 다음과 같다.

$$r_{cut} = \frac{A_0}{A_j} r_{cut_0} \quad (18)$$

여기서  $r_{cut_0}$ 는 가스의 종류에 따른 표피저항을,  $A_0$ 는 표피나 지표면에 대한 화학적 반응성을, 그리고  $A_j$ 는

가스의 생물학적 반응성을 나타내는 요소로 각각 16, 15, 27.8을 사용하였다.

이슬이 생긴 경우의 습한 표피 저항을 나타내는  $R_{cw}$ 는

$$R_{cw} = \frac{r_{cw}}{LAI \times CWC} \quad (19)$$

로 주어진다. 여기서  $r_{cw}$ 는

$$r_{cw} = \frac{H_j}{\alpha_j^*} \left( \frac{10^5}{u} \right) \quad (20)$$

로 주어진다. 여기서  $H_j$ 는 Henry의 상수로 2.1이며,  $\alpha_j^*$ 는 물에서 기체의 용해도를 나타내는 매개변수 (Slinn *et al.*, 1978)로 10을 사용하였으며,  $u$ 는 습한 표피에 대한 풍속이다.

토양에 대한 저항  $R_g$ 는

$$R_g = \frac{A_0}{A_j} R_{g_0} \quad (21)$$

으로 주어지며  $R_{g_0}$ 는 오존에 대한 지표면 저항값으로  $5 \text{ s cm}^{-1}$ 를 사용하였다.

## 2.2 수면에 대한 모수화 방법

수면은 식물과 토양의 영향을 받지 않으므로, 식물과 토양에 관한 저항 성분에 관계된 지표면 저항을 고려하지 않고, 공기역학적 저항과 점성층 저항만으로 건성침적속도를 계산하였다. 수면에서의 건성 침적속도는 다음 식 (22)와 같다.

$$V_d = \frac{1}{(R_a + R_b)} \quad (22)$$

공기역학적 저항  $R_a$ 와 점성층 저항  $R_b$ 는 각각 위의 식 (2)와 식 (12)를 사용하였다.

수면에서의 공기역학적 저항과 점성층 저항의 계산을 위한 마찰 속도  $u_*$ 는 다음 식으로 계산하였다.

$$u_* = \frac{\kappa u}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \Psi_m} \quad (23)$$

여기서,  $\kappa$ 는 von Karman상수이고  $u$ 는 풍속이며  $z$ 는 풍속을 측정된 고도이다.  $z_0$ 는 지표 거칠기 길이로 수면에서는 지표 거칠기 길이를 마찰속도에 비례하는

**Table 1. Surface roughness length to land-use type.**

Land-use Type	Surface roughness length (m)	
	Summer	Winter
Agricultural land	0.25 <sup>a</sup>	0.15 <sup>b</sup>
Range land	0.05 <sup>a</sup>	0.02 <sup>b</sup>
Mixed agricultural and range land	0.1 <sup>a</sup>	0.08 <sup>b</sup>
Deciduous forest	1.0 <sup>a</sup>	0.9 <sup>b</sup>
Coniferous forest	1.0 <sup>a</sup>	0.3 <sup>b</sup>
Mixed forest including wetland	1.0 <sup>a</sup>	0.5 <sup>b</sup>
Nonforested wetland	0.03 <sup>c</sup>	0.02 <sup>b</sup>
Rocky open areas with low-growing shrubs	0.02 <sup>c</sup>	0.01 <sup>b</sup>
Cotton field	0.1 <sup>d</sup>	-
Vineyard	0.2 <sup>d</sup>	-
Water, both salt and fresh	0.0024 <sup>c</sup>	0.0024 <sup>c</sup>

<sup>a</sup>: NCAR Eulerian Regional Acid Deposition Model (1985)

<sup>b</sup>: Zhang *et al.* (1996)

<sup>c</sup>: Wilson M.F. (1984)

<sup>d</sup>: Padro, J. (1996)

것으로 가정하는 NCAR (1985)의 식을 사용하였다.

$$z_0 = \frac{0.032 \times u_*^2}{g} + 0.0001 \quad (24)$$

이때, 지표 거칠기 길이를 구하기 위해 마찰속도가 요구되므로 초기 지표 거칠기 길이를 Wilson (1984)에 근거한 수면에 대한 지표 거칠기 길이인 0.0024로 두어 마찰속도를 계산한 후 위의 식 (24)에 대입하여 공기역학적 저항과 점성층 저항 계산에 필요한 지표 거칠기 길이를 구하였다. 수면을 포함한 여러 가지 지표면에 대한 지표 거칠기 길이는 표 1에 나타내었으며, 수면에 대해서는 해수와 담수의 지표 거칠기 길이를 동일하게 주어 'Water, both salt and fresh'인 경우를 사용하였다.

$\Psi_m$ 은 안정도 보편함수로 수면에서 대기가 불안정한 상태일 때 Hsu *et al.* (1999)에 의해 제안된 식을 사용하였다.

$$\Psi_m = \left(\frac{z}{L}\right) = 1.0496 \left(-\frac{z}{L}\right)^{0.4591} \quad (25)$$

대기가 안정한 상태일 때의 보편함수는 Panofsky and Dutton (1984)에서 제안한 다음 식 (26)을 사용하였다.

$$\Psi_m = \left(\frac{z}{L}\right) = -5 \frac{z}{L} \quad (26)$$

여기서, L은 Monin-Obukhov 길이로 다음 식 (27)을 사용하여 계산하였다.

$$L = \frac{\theta_{vg} u_*^3}{k g H} \quad (27)$$

여기서, H는 저층 대기의 현열 플럭스(heat flux)이며, 안정도에 따라 Louis (1979)에 의해 보수화된 식 (10)과 (11)을 사용하였다.

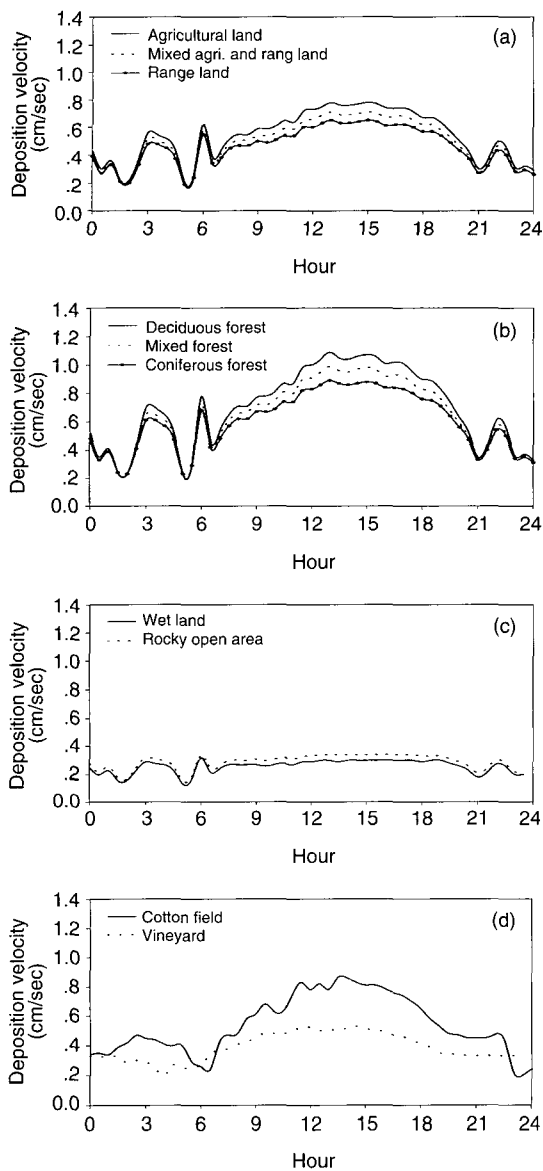
### 3. 적용방법

여름과 겨울에 대하여 지표면 특성에 따른 식물과 토양의 영향을 저항 성분과 매개변수를 통하여 고려하였다. 지표면의 종류에 따른 특성을 반영할 수 있도록 지표면 거칠기 길이와 앞 면적 지수, 토양에 관한 저항 성분, 표면 저항 등이 계절과 지표면 종류에 따라 다양하게 주어졌다. 지표면의 특성을 반영할 수 있도록 사용된 여러 가지 성분 중 지표면 종류에 따른 지표면 거칠기 길이를 표 1에 나타내었다. NCAR (1985), Zhang *et al.* (1996), Wilson (1984), Padro, J. (1996) 등의 선행연구에서 사용된 계절분류와 지표면 종류에 따른 지표면 거칠기 길이 중에서 본 연구의 사례에 가장 적합한 지표면 거칠기 길이를 사용하였다. Wesely *et al.* (1983)에 의한 계절분류에서 여름(mid summer with lush vegetation)에 대하여 계산하였으며, 겨울에 대해서는 늦가을(late autumn after frost, no snow)에 대하여 계산하였다. 본 연구에서는 지표면에 눈이 쌓여있지 않은 경우를 가정하여 건성 침적속도를 계산하므로 Wesely *et al.* (1983)의 계절분류 중 겨울(winter, snow on ground and subfreezing)을 적용하지 않았다. 지표면에 눈이 쌓여있는 경우는 토양 성분과 식생에 관한 성분이 다르게 고려되며 눈에 대한 성분이 추가로 고려되어야 하는데, 겨울의 건성침적속도 분포와 토양의 습한 정도(wetness)에 따른 건성침적속도 추정을 위해서 중요한 부분이므로 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 4. PNU/DEM의 적용 결과

#### 4.1 여름의 지표면에 따른 건성침적속도

본 연구에서는 1988년과 1990년 여름과 겨울에



**Fig. 2.** Diurnal variations of calculated dry deposition velocities of ozone over various land-use types in summer.

Canada의 Boden forest에서 캐나다 환경청에 의해 관측된 EMEFS (Eulerian Model Evaluation Field Study) 자료를 사용하여 지표면 종류에 따라 오존의 건성침적속도를 계산하였다. 사용된 관측자료에 관한 측정방법과 이론적인 설명 및 분석은 Shaw *et al.*

(1988)에 나타나 있다. 그림 2에 land-use에 따른 지표면을 세 가지씩 나누어 건성침적속도를 나타내었으며, 각각의 지표면에 대한 건성침적속도의 일변화 경향을 살펴보았다.

농경지, 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서의 건성침적속도 일변화를 그림 2a를 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  $0.2 \sim 0.78 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.2 \sim 0.65 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.2 \sim 0.7 \text{ cm s}^{-1}$ 로 농경지에서 주간의 건성침적속도가 가장 크게, 목초지에서 가장 낮게, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서 그 중간값으로 나타났다. 목초지보다 거칠기 길이가 큰 농경지에서 큰 건성침적속도를 나타냈다. 이는 건성침적속도의 모수식에 따라 거칠기 길이가 클수록 마찰속도가 크게 나타나므로 보다 큰 건성침적속도를 가지게 되는 것이다.

그림 2b에서 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  $0.23 \sim 1.09 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.23 \sim 0.99 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.23 \sim 0.89 \text{ cm s}^{-1}$ 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.

그림 2c에서 습지, 관목과 바위가 있는 평지에서 건성침적속도는 각각  $0.17 \sim 0.28 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.18 \sim 0.36 \text{ cm s}^{-1}$ 을 나타내었다. 습지 및 관목과 바위가 있는 평지에서 건성침적속도는 거의 유사한 분포를 보였다. 두 가지 지표면 모두 식생이 거의 없지만 관목이 있는 평지에서 주간의 건성침적속도가 조금 크게 나타나고 이는 식물의 영향으로 인한 것으로 생각된다.

그림 2d에는 목화밭과 포도밭에서의 건성침적속도 분포를 나타내었으며, 각각  $0.2 \sim 0.86 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.2 \sim 0.53 \text{ cm s}^{-1}$ 을 나타내었다. 포도밭보다 목화밭에서

**Table 2. Comparison of measured values and modelled values of O<sub>3</sub> dry deposition velocities in summer.**

Land use	PNU/DEM		Observation				
	Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )	Land use	Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )	Condition	Reference
Agricultural land	0.53	0.2~0.78	Corn		0.2~0.8	Day	Wesely <i>et al.</i> (1978)
			Grass	0.56	0.05~0.2	Day	Padro, J. (1996)
					0.06~1.0		Delaney and Davies (1983)
			Orchards		0.3~0.5	Day	Walton <i>et al.</i> (1997)
		0.05~0.2	Night				
			Soybean		0~0.6		Garland and Derwent (1979)
Mixed agricultural and range land	0.46	0.2~0.7					
Range land	0.49	0.2~0.65					
Cotton field	0.54	0.2~0.86	Cotton	0.4	0.2~0.8	Wet Dry	Padro, J. (1996), Zhang <i>et al.</i> (1996) Grantz <i>et al.</i> (1997)
					0.32 0.40		
Vineyard	0.37	0.2~0.53	Grape	0.27		Wet	Grantz <i>et al.</i> (1995)
				0.30		Dry	
Deciduous forest	0.69	0.23~1.09	Deciduous forest	1.0	0~1.8	Dry day	Padro, J. (1992, 1996)
					0~1.2	Wet day	Padro <i>et al.</i> (1994)
				0.2	0~1.2	Night	
			0.81			Godowitch (1990)	
			Beech	0.4	0.1~1.7	April, May	Pilegarrd <i>et al.</i> (1995)
Mixed forest	0.64	0.23~0.99					
Coniferous forest	0.6	0.23~0.89	Pine forest		0~1.16		Sanchez and Rodriguez (1997)
				1.0			Lenschow <i>et al.</i> (1982)
			0.64		0.2~0.5	Night	Greenhut (1983) Lopez <i>et al.</i> (1993)
			Spruce		0~0.7	June	Pilegarrd <i>et al.</i> (1995)
Wetland	0.38	0.17~0.28					
Rocky open areas	0.32	0.18~0.36					

상대적으로 큰 주간의 건성침적속도를 볼 수 있었다. 따라서 건성침적속도는 지표면 거칠기 길이와 앞에 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, 주간에는 식물의 활동이 활발한 지표면인 숲에서의 건성침적속도가 다른 지표면에 비해 보다 크게 나타났다.

표 2에는 지표면 종류에 따라 PNU/DEM으로 계산된 오존의 건성침적속도와 선행 연구에서 관측된

오존의 건성침적속도를 비교하였는데, 농경지로 분류될 수 있는 옥수수밭, 잔디, 과수원, 콩밭에서 관측된 오존의 건성침적속도와 농경지에서 계산된 건성침적속도를 비교하였다. PNU/DEM의 계산값은 농경지에서의 0.2~0.78 cm s<sup>-1</sup>의 분포를 보여 Wesely *et al.* (1978)에 나타난 옥수수밭에서의 관측값 분포인 0.2~0.8 cm s<sup>-1</sup>과 유사한 결과를 나타내었으며 잔디, 과수원, 콩밭에서의 관측값 (Walton *et al.*, 1997; Padro, 1996; Delaney and Davies, 1983; Garland and Derwent, 1979; McMahan and Denison, 1979)과도 유사한 분포를 보였다. PNU/DEM의 계산값은 목화밭과 포도밭에서 각각 0.2~0.86 cm s<sup>-1</sup>, 0.2~0.53 cm s<sup>-1</sup>의 일변

화와  $0.54 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.37 \text{ cm s}^{-1}$ 의 일평균값을 보여, Padro, J. (1996)와 Zhang *et al.* (1996), Grantz *et al.* (1997)에 나타난 목화밭에서의 관측된 일변화 및 일평균값과 Grantz *et al.* (1995)에 나타난 포도밭에서의 일평균값에 유사한 분포를 보였다.

활엽수림에 대하여 Padro, J. (1992, 1996)와 Padro *et al.* (1994)은 맑은날에  $0 \sim 1.8 \text{ cm s}^{-1}$ , 습한 날에  $0 \sim 1.2 \text{ cm s}^{-1}$  사이의 분포를 보였으며, Godowitch (1990)에서  $0.81 \text{ cm s}^{-1}$ 의 평균값을 보였다. PNU/DEM에서 활엽수림에 대해 계산된  $0.69 \text{ cm s}^{-1}$ 의 일평균값 및  $0.23 \sim 1.09 \text{ cm s}^{-1}$ 의 일변화는 이들 관측값과 유사한 결과를 나타내었다. 또한 활엽수에 해당하는 너도밤나무 (beech)에서 관측된 건성침적속도 분포와 일변화 (Pilegard *et al.*, 1995)에도 유사한 분포를 보였다. 침엽수림에서 PNU/DEM으로 계산된  $0.6 \text{ cm s}^{-1}$ 의 일평균값 및  $0.23 \sim 0.89 \text{ cm s}^{-1}$ 의 일변화는 소나무 숲 (pine forest)과 전나무 (spruce)에서 관측된 선행연구의 건성침적속도에 거의 유사한 분포를 나타내었다 (Sanchez and Rodriguez, 1997; Pilegard *et al.*, 1995; Lopez *et al.*, 1993; Greenhut, 1983; Lenschow *et al.*, 1982).

선행연구에서는 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면, 혼합림, 습지와 관목과 바위가 있는 평지와 유사한 지표면에서 오존의 건성침적속도 관측값이 나타나있지 않아 일변화 분포와 일평균값을 비교할 수 없었다. 그러나 농경지와 활엽수림, 침엽수림 등에서 관측된 선행연구 결과와 PNU/DEM을 사용하여 계산된 건성침적속도가 유사한 분포와 일평균값을 보여 PNU/DEM을 사용한 오존의 건성침적속도 추정이 유의함을 알 수 있었다.

#### 4.2 겨울의 지표면에 따른 건성침적속도

겨울의 맑은 날에 대하여 여름의 경우와 마찬가지로 오존의 건성침적속도를 지표면 특성에 따라 계산하였으며 선행 연구에서 관측된 건성침적속도와 비교하였다. PNU/DEM에서는 겨울의 계절적 특성이 지표면의 종류에 따른 지표면 거칠기 길이와 일면적 지수, 토양에 관한 저항 성분, 표면 저항 등을 통하여 고려되었다.

모든 지표면에 대하여 여름의 일변화에 비해 주간 건성침적속도가 낮게 나타났는데, 이는 여름에 비해 태양복사가 약화되고 식물잎이 감소하며 기공작

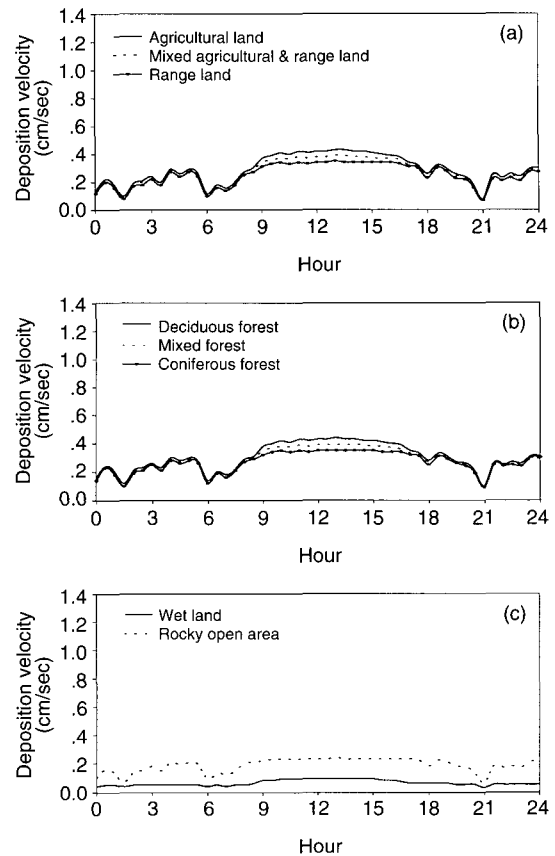


Fig. 3. Diurnal variations of calculated dry deposition velocity of ozone over various land-use types in winter.

용이 활발하지 못한 겨울의 계절적 특성 때문이다.

겨울에 대한 농경지, 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서 건성침적속도 일변화 분포를 그림 3a에 나타내었다. 농경지, 목초지, 농경지와 목초지가 혼합된 지표면에서 건성침적속도는 각각  $0.17 \sim 0.43 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.17 \sim 0.35 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.18 \sim 0.39 \text{ cm s}^{-1}$ 로 여름의 경우와 마찬가지로 주간 농경지에서 건성침적속도가 가장 크게, 목초지에서 가장 낮게 나타났으며 야간의 건성침적속도는 세 가지 지표면에서 유사한 값을 보였다.

그림 3b에서 활엽수림, 혼합림, 침엽수림의 경우 건성침적속도의 일변화는 각각  $0.17 \sim 0.44 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.17 \sim 0.39 \text{ cm s}^{-1}$ ,  $0.17 \sim 0.35 \text{ cm s}^{-1}$ 이며 주간 건성침적속도가 활엽수림에서 가장 큰 값을 보인다. 겨울



Table 3. Comparison of measured values and modelled values of O<sub>3</sub> dry deposition velocities in winter.

Land use	PNU/DEM		Observation				
	Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )	Land use	Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )	Condition	Reference
Agricultural land	0.29	0.17~0.43					
Mixed agricultural and range land	0.27	0.18~0.39					
Range land	0.25	0.17~0.35					
Deciduous forest	0.3	0.17~0.44	Deciduous forest		0.11~0.45		Wesely <i>et al.</i> (1983)
					0.23~0.45	Day	Padro, J. (1992,1996)
					0~0.5	Dry	Padro <i>et al.</i> (1994)
					0~0.4	Wet	
Mixed forest	0.28	0.17~0.39					
Coniferous forest	0.26	0.17~0.35					
Wetland	0.06	0.07~0.1					
Rocky open areas	0.22	0.11~0.22					

에 대하여 대부분의 지표면에서 건성침적속도가 유사한 일변화를 보이는데, 겨울에는 식물의 성장과 활동이 여름에 비해 약화되어 대부분의 지표면이 거의 비슷한 상태를 유지하기 때문으로 생각된다.

그림 3c에서 습지, 관목과 바위가 있는 평지에서 건성침적속도는 각각 0.07~0.1 cm s<sup>-1</sup>, 0.11~0.22 cm s<sup>-1</sup>을 나타내었다. 습지에서 건성침적속도는 일변화가 거의 나타나지 않았으며, 관목이 있는 평지에서 여름에 비해 낮은 주간 건성침적속도가 나타났고 역시 일변화가 거의 나타나지 않았다.

겨울에는 식물의 잎이나 기공에 의한 저항이 약화되고 이러한 특성이 고려된 PNU/DEM의 지표면에 대한 건성침적속도는 여름에 비해 낮게 나타났다. 겨울에는 식물의 잎이 거의 존재하지 않고, 식물의 활동이 활발하지 못하여 식생의 형태로 구분한 지표면에 대해서는 건성침적속도의 차이가 크지 않았다.

겨울에 대하여 활엽수림을 제외한 지표면에서는 오존의 건성침적속도에 대한 연구가 거의 없었던 관계로 관측값과 비교할 수는 없었지만, 겨울의 활엽수림에 대하여 PNU/DEM으로 계산된 건성침적속도를 선행연구에서 관측된 건성침적속도와 비교하여 표 3에 나타내었다. Wesely *et al.* (1983)에서 관측된 오존의 건성침적속도는 0.11~0.45 cm s<sup>-1</sup>의 분포를 보였으며, Padro, J. (1992, 1996)와 Padro *et al.* (1994)은

주간에 0.23~0.45 cm s<sup>-1</sup>, 마른 지표면에서 0~0.5 cm s<sup>-1</sup>, 젖은 지표면에서 0~0.4 cm s<sup>-1</sup>의 분포를 나타내었다. 활엽수림에서도 겨울철 PNU/DEM으로 계산된 건성침적속도는 0.3 cm s<sup>-1</sup>의 평균값과 0.17~0.44 cm s<sup>-1</sup>의 일변화 분포를 보여 관측값과 유사한 결과를 나타내었다.

#### 4.3 수면에 대한 건성침적속도

그림 4에 PNU/DEM으로 수면에 대해 위의 모수화 방법을 사용하여 수치모의한 48일간의 건성침적속도를 나타내었으며, 그림에 나타난 바(bar)는 각 시간당 계산된 건성침적속도 중 10~90% 사이에 나타난 값이고, 상자(box)는 25~75%사이의 값을, 굵은 선은 전체 수치모의 결과를 일 중 시간별로 평균한 건성침적속도값이다. 수면에 대하여 PNU/DEM을 사용하여 수치모의한 오존의 건성침적속도 분포는 0.001~0.08 cm s<sup>-1</sup>이었으며, 일평균값은 0.05 cm s<sup>-1</sup>로 나타났다. 그리고 건성침적속도가 야간에는 작게 나타나고 주간에는 커지는 일변화 분포를 약하게 볼 수 있었다.

표 4에는 선행연구의 수면에서 관측된 건성침적속도와 PNU/DEM으로 수치 모의된 건성침적속도를 비교하여 제시하였다. 호수에서 오존의 건성침적속도가 0.002~0.04 cm s<sup>-1</sup>의 분포를 보인 관측 결과

Table 4. Comparison of measured values and modelled values of O<sub>3</sub> dry deposition velocities over the water.

Land use	PNU/DEM		Land use	Observation		Reference
	Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )		Mean (cm s <sup>-1</sup> )	Range (cm s <sup>-1</sup> )	
Water	0.05	0.001~0.08	Lake		0.002~0.04	Wesely <i>et al.</i> (1981)
			Ocean	0.04		Garland and Penkett (1976)
				0.05		Lenschaw <i>et al.</i> (1982)

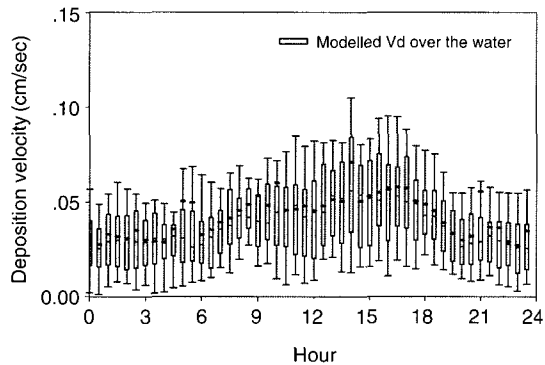


Fig. 4. Diurnal variation of calculated dry deposition velocity over the water.

(Wesely *et al.*, 1981)가 있으며, 해양의 경우 Garland and Penkett (1976)와 Lenschaw *et al.* (1982)에 의해 각각 0.04 cm s<sup>-1</sup>, 0.05 cm s<sup>-1</sup>의 일평균값을 보인 관측결과가 있다. 관측된 건성침적속도와 PNU/DEM에 의해 계산된 건성침적속도는 유사한 일변화와 일평균값을 보여 PNU/DEM을 사용한 수면에서의 건성침적속도의 추정이 유의하다고 할 수 있다.

선행연구에 나타난 식물지표의 영향이 고려된 지표면에서의 건성침적속도와 비교하면, 활엽수림에서 관측된 건성침적속도 분포가 0~1.8 cm s<sup>-1</sup>, 일평균값이 1.0 cm s<sup>-1</sup>로 나타났고(Padro, 1996), PNU/DEM을 사용하여 활엽수림에서 계산된 건성침적속도 분포가 0.23~1.09 cm s<sup>-1</sup>, 일평균값이 0.69 cm s<sup>-1</sup>로 나타난 것과 비교하면 지면에 대하여 구한 건성침적속도의 0.1배의 값을 나타내었다. 수면에 대한 오존의 건성침적속도는 지면의 영향이 거의 없고 식물 지표의 영향이 없으므로, 일변화폭이 크지 않고 다른 지표면에서 나타나는 야간에 작고 주간에 큰 건성침적속도의 일변화가 상대적으로 약하게 나타났다.

오존은 물에 대하여 용해도가 낮으므로 젖은 지표

면이나 수면에서는 느리게 제거되는 특성을 가지고 있는데, 다른 지표면에 비해 수면에서 낮게 관측되고 수치모의되는 오존의 건성침적속도는 이러한 오존의 일반적인 특성으로 설명될 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 PNU/DEM을 사용하여 여름과 겨울의 다양한 지표면에 대하여 건성침적속도를 계산하였다. 건성침적속도는 지표면 거칠기 길이와 토양 성분, 잎에 의한 대류 현상 및 지표면 특성에 크게 영향을 받는데, PNU/DEM에는 이들 특성이 모두 반영되도록 고려되어있다. 야간에는 지표면의 건성침적속도가 거의 비슷하게 나타났지만 주간에는 식생의 종류에 따른 차이가 나타나 지표면의 종류에 따른 건성침적속도가 다르게 나타났다. 이때 거칠기 길이가 클수록 건성침적속도가 크게 나타났으며, 식물의 활동이 활발한 지표면에서의 건성침적속도가 그렇지 않은 지표면에 비해 크게 나타났다. 따라서 여러 가지 지표면 중 식물의 활동이 활발한 지표면인 숲에서의 건성침적속도가 보다 큰 값을 보였다. 그리고 겨울에는 여름에 비해 낮은 건성침적속도 분포를 보였는데, 겨울에는 낮은 기온과 상대적으로 적은 일사량 등의 영향과 식물의 잎이 적으므로 식생의 활동이 여름에 비해 활발하지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

또한, 수면에 대해 지표면과는 다른 메커니즘을 사용하여 오존의 건성침적속도를 계산하였고, 선행연구에서의 관측값과 비교해 보았다. 수면에서는 식물 지표의 영향이 없으므로 일변화폭이 크지 않고 다른 지표면에서 나타나는 야간에 작고 주간에 큰 건성침적속도의 일변화가 상대적으로 약하게 나타났다. 선행연구에서 오존은 물에 대하여 용해도가 낮으

므로 젖은 지표면이나 수면에서는 느리게 제거되는 특성을 가지고 있어 다른 지표면에 비해 수면에서 낮은 건성침적속도 분포로 관측된 결과를 볼 수 있었는데, PNU/DEM을 사용하여 수면에 대한 계산한 건성침적속도는 수면에서의 선행연구 결과와 유사한 결과를 나타내고 있었다.

다양한 지표면에 따라 PNU/DEM으로 계산된 오존의 건성침적속도와 선행 연구에서 관측된 오존의 건성침적속도를 비교한 결과, 계산값과 관측값은 유사한 일변화 분포와 일평균값을 보여 PNU/DEM을 통한 건성침적속도의 추정이 유의함을 알 수 있었다. 그러므로 PNU/DEM을 사용하여 여러 가지 지표면에 대하여 건성침적속도를 수치모의하고 건성침적 현상을 분석한다면 보다 정확하고 신뢰성이 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그리고, 여름과 겨울의 다양한 지표면에 대한 건성침적속도의 계산값과 관측값과 비교한 결과는 타 연구에 자료로도 제공될 수 있을 것으로 생각된다.

현재의 건성침적속도 모수화 방법이 유의한 결과를 보이지만, 보다 향상된 모수화를 위해선 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료되며, 다양한 지표면과 겨울에 대한 모수화 방법에 대한 검증과 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- 문난경 (1996) 중규모에서의 대기 오염 물질 침적 모델에 관한 연구, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문.
- Baldocchi, D.D. (1988) A multi-layer model for estimating sulphur dioxide deposition to deciduous oak forest canopy, *Atmos. Environ.*, 22, 869-884.
- Delaney, A.C. and T.D. Davies (1983) Dry deposition of  $\text{NO}_x$  to grass in rural East Anglia, *Atmos. Environ.*, 17, 1391-1394.
- Fowler, D. and M.H. Unsworth (1979) Turbulent transfer of sulphur dioxide to wheat crop, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 105, 767.
- Galbally, I.E. and C.R. Roy (1980) Destruction of ozone at the earth's surface, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 106, 599-620.
- Garland, J.A. and S.A. Penkett (1976) Absorption of peroxy acetyl nitrate and ozone by natural surfaces, *Atmos. Environ.*, 10, 1127-1131.
- Garland, J.A. (1977) The dry deposition of sulphur dioxide to land and water surfaces, *Proc. R. Soc. Lond.*, A 354, 245-268.
- Garland, J.A. and R.G. Derwent (1979) Destruction at the ground and the diurnal cycle of concentration of ozone and other gases, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 97, 18-29.
- Godowitch, J.M. (1990) Vertical ozone fluxes and related deposition parameters over agricultural and forested landscapes, *Bound.-Layer meteorol.*, 50, 375-404.
- Grantz, D.A., X.J. Zhang, W.J. Massman, A. Delany, and J.R. Pederson (1995) Effects of stomatal conductance and surface wetness on ozone deposition in field grown grape, *Atmos. Environ.*, 29, 3189-3198.
- Grantz, D.A., X.J. Zhang, W.J. Massman, A. Delany, and J.R. Pederson (1997) Ozone deposition to a cotton field: stomatal and surface wetness on ozone deposition in grown grape, *Agricu. Forest Met.*, 85, 19-31.
- Greenhut, G.K. (1983) Resistance of a pine forest to ozone uptake, *Bound.-Layer meteorol.*, 27, 387-391.
- Hicks, B.B. and P.S. Liss (1976) Transfer of  $\text{SO}_2$  and other reactive gases across the air-sea interface, *Tellus*, 28, 348-354.
- Hicks, B.B., D.R. Matt, and R.T. McMillen (1989) A micro-meteorological investigation of surface exchange of  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$ : A case study, *Bound.-Layer meteorol.*, 47, 321-336.
- Hill, A.C. and E.M. Chamberlain (1976) *In atmosphere surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants*, CONF-740921 NTIS, U.S. Dept. of Commerce, Springfield, Virginia.
- Hsu, S.A., B.W. Blanchard, and Zhangde Yan (1999) A simplified equation for Paulson's  $\Psi_m(Z/L)$  formulation for over water applications, *Amer. Meteor. Soc.*, 623-625.
- Lenschow, D.W., R. Pearson, and B.B. Stankov (1982) Measurement of ozone vertical flux to ocean and forest, *J. Geophys. Res.*, 87, 8833-8837.
- Lopez, A., J. Fontan, and A. Minga (1993) Analysis of atmospheric ozone measurements over a pine forest, *Atmos. Environ.*, 27A, 555-563.

- Louis, J.F. (1979) A parameteric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Bound.-Layer meteorol.*, 17, 187-202.
- McKay, W.A., B.A. Stephens, and G.J. Dollard (1992) Laboratory measurements of ozone deposition to sea water and other saline solutions, *Atmos. Environ.*, 26A, 17, 3105-3110.
- McMahan, T.A. and P.J. Denison (1979) Empirical atmospheric deposition parameters—a survey, *Atmos. Environ.*, 13, 571-585.
- McQueen, J.T., R.A. Valigura, and B.J.B. Stunder (1997) Evaluation of the RAMS model for estimating turbulent fluxes over the Chesapeake Bay, *Atmos. Environ.*, 31, 22, 3803-3819.
- NCAR (1985) *The NCAR Eulerian Regional Acid Deposition model*, ADMP-85-3, NCAR/TN-256+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado., 178pp.
- O'Dell, R.A., M. Taheri, and R.L. Kabel (1977) A model for uptake of pollutants by vegetation, *J. Air Poll. Cont. Assoc.*, 27, 1104-1109.
- Padro, J. (1992) Modelled and observed dry deposition velocity of O<sub>3</sub> above a deciduous forest in the winter, *Atmos. Environ.*, 26A, 5, 775-784.
- Padro, J., W.J. Massman, R.H. Shaw, A. Delaney, and S.P. Oncley (1994) A comparison of some aerodynamic resistance methods using measurements over cotton and grass from the 1991 California ozone deposition experiment, *Bound.-Layer meteorol.*, 71, 32-339.
- Padro, J. (1996) Summary of ozone dry deposition velocity measurements and model estimates over vineyard, cotton, grass and deciduous forest in summer, *Atmos. Environ.*, 30, 2363-2369.
- Panofsky, H.A. and J.A. Dutton (1984) *Atmospheric Turbulence*, Wiley, 397pp.
- Pilegard, K., N.O. Jensen, and P. Hummelshøj (1995) *Deposition of nitrogen oxides and ozone to Danish forest sites. Acid Rain Research: Do We Have Enough Answer?*, Heji, G.J. and J.W. Erisman, editors, Elsevier Science, Amsterdam, pp. 31-40.
- Pleim, J., A. Venkatram, and R. Yamartino (1984) *Prepared for OME, AES of Canada and the umwelt-bundesamt, west germany ADOM/TADAP model development program*, ERT P-B980-520.
- Sanchez, M.L., R. Rodriguez, and A. Lopez (1997) Ozone dry deposition in a semi-arid steppe and in a coniferous forest in southern Europe, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 47, 792-799.
- 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 meteorol.*, 45, 391-409.
- Shreffler, J.H. (1978) Factors affecting dry deposition of SO<sub>2</sub> on forests and grasslands, *Atmos. Environ.*, 12, 1497-1503.
- Slinn, W.G.N., L. Hasse, B.B. Hicks, A.W. Hogan, D. Lai, P.S. Liss, K.O. Munnich, G.A. Sehmel, and O. Vittori (1978) Some aspects of the transfer of atmospheric trace constituents past the air-sea interface, Review paper, *Atmos. Environ.*, 12, 2055-2087.
- Walton, S., M.W. Gallagher, T.W. Choularton, and J. Duyzer (1997) Ozone and NO<sub>2</sub> exchange to fruit orchards, *Atmos. Environ.*, 31, 2767-2776.
- Wesely, M.L., J.A. Eastman, D.R. Cook, and B.B. Hicks (1978) Daytime variation of ozone eddy fluxes to maize, *Bound.-Layer meteorol.*, 15, 361-373.
- Wesely, M.L., D.R. Cook, and R.M. Williams (1981) Field measurements of small ozone fluxes to snow, wet bare soil and lake water, *Bound.-Layer meteorol.*, 20, 459-471.
- 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.
- Wilson, M.F. (1984) *The construction and use of land surface information in a general circulation climate model*, Unpublished Ph. D. thesis, University of Liverpool, United Kingdom, 346pp.
- Zhang, L., J. Padro, and J.L. Walmsley (1996) A multi-layer model vs single-layer models and observed O<sub>3</sub> dry deposition velocities, *Atmos. Environ.*, 30, 339-345.