

지표면 wetness에 따른 오존의 건성침적속도 특성

이 화 운 · 김 유 근 · 문 난 경
부산대학교 대기과학과
(2001년 10월 6일 접수; 2003년 4월 14일 채택)

The Characteristics of the Dry Deposition Velocity for O₃ regarding Surface Wetness

Hwa Woon Lee, Yoo-Keun Kim and Nan-Kyoung Moon
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 6 October, 2001; accepted 14 April, 2003)

It has been researched the relationship between deposition velocity and factors which could affect the deposition phenomena and deposition velocity also has been estimated for several land-use types. The typical deposition velocities are complex functions of surface types, atmospheric stabilities, friction velocities, air pollutants and so on. The canopy resistance is major contribution to the model's total resistance for O₃. Canopy wetness is also an important factor to calculate deposition velocity. We considered the canopy wetness as canopy water content(CWC) in our Model. But, it is not easy to observe CWC over each land-use types. In this study, we use CWC observed by EMEFS(CANADA Environment Service, 1988) to examine the influence of CWC in estimation of O₃ dry deposition velocity(V_d) in summertime. The value of O₃ V_d range 0.2 ~ 0.7 cm s⁻¹ on dry surface and 0.01 ~ 0.35 cm s⁻¹ on wet surface in daytime.

Key words : CWC, Canopy wetness, Dry deposition velocity, O₃

1. 서 론

식생 표면에 대한 습윤도(wetness)는 여러 가지 과정에 의하여 나타난다. 이에 관한 연구로 Monteith는 야간의 식생에 대한 습윤도를 높이는 현상인 이슬(dew), 증류(distillation) 그리고 식물표면의 배수현상(guttation)의 발생에 대하여 정의하였다. 이슬은 약한 풍속과 높은 상대습도의 조건 아래에서 수증기의 응결로 발생하고, 증류는 토양으로부터 잎 표면으로의 수증기 전달에 의하여 발생하며 마지막으로 배수현상은 높은 습도의 조건 아래에서 발견되는 식물의 삼출액으로 분류하였다.¹⁾ 그러나 실제로 이 세 가지 형태에 의하여 나타나는 습윤도를 구분하는 것은 상당히 힘든 일이다. 따라서 습윤도를 가장 뚜렷하게 상승시키는 또 다른 형태의 현상은 주간과 야간동안 발생하는 강수 현상이다. 식생의 습윤

도가 가스상 입자에 대한 건성 침적 현상에 영향을 미친다는 연구는 이루어진 바 있으나, 그 메커니즘은 현재 그 이해가 명확하지 못한 실정이다.^{2,3)} 이 부분에 있어서 이론적 연구와 관측을 통한 연구가 증가되고 있지만, 습한 지표면에 대한 적합한 지표면 저항의 매개변수화(parameterization) 개발에 그다지 유용한 정보 제공이 되지 않고 있다. 건성 침적 현상의 수치모의에 있어 이러한 지표면 습윤도에 대하여 여러 가지 연구가 Wesley⁴⁾에 의하여 이루어진 바 있으며, Garland⁵⁾는 영국에서 SO₂에 대한 침적물이 전체 배출량의 약 27%로 나타남을 보였고, Brimblecombe⁶⁾는 이슬로 인하여 약 2.4%의 가스상 물질이 제거됨을 계산하였다.

지표면의 습윤도에 따른 건성 침적 속도에 관한 연구는 다양한 지표면 상태에서 건성 침적량의 정확한 추정을 위해 필요하므로, 본 연구에서는 1988년 여름 Canada의 Boden forest에서 실시된 EMEFS(Eulerian Model Evaluation Field Study)의 관측 자료를 토대로 지표면 wetness에 따른 O₃의 침적

Corresponding Author : Hwa Woon Lee, Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone : +82-51-510-2291
E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

속도를 산정하여 그 특성을 살펴보았다. 사용된 관측자료에 관한 측정방법과 이론적인 설명 및 분석은 Shaw *et al.*⁶⁾에 나타나 있다.

2. 연구 방법

2.1. 건성 침적 모형

침적 현상은 일정 플럭스층(constant flux layer)과 침적층(deposition layer)의 난류(turbulent flow)와 층류(laminar flow)의 복합적인 현상과 식생의 성질에 따라 복잡하게 발생한다. 침적속도 계산은 일정 플럭스층과 침적층의 난류와 층류의 풍속, 대기 안정도, 마찰속도, 지표 거칠기 길이 등과 관련되어 나타나는 공기역학적 저항(aerodynamic resistance)과 오염물질의 종류에 따른 분자확산, 공기의 점성도 등으로 나타나는 침적층 저항(deposition-layer resistance) 및 식생의 잎과 지면의 성질에 따른 지표면 저항(surface resistance)으로 이루어진다.

건성 침적 모형은 PNU/DEM(PNU/DEM, Pusan National University/Deposition Model)을 사용하였으며, PNU/DEM에 대한 자세한 내용은 선행 연구 논문에서 상세히 나타나 있다.⁷⁾

건성 침적 속도 이론에 의해 건성 침적 속도는 다음과 같이 나타내어진다.

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

여기서, R_a 는 공기 역학적 저항, R_b 는 점성층 저항, R_c 는 지표면 저항이다.

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

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

여기서 마찰 속도(u_*)는 Bulk Richardson 수(R_{iB})를 사용하여 불안정한 대기와 안정한 대기로 나누어 계산할 수 있다.⁸⁾

즉 대기가 불안정한 경우에는

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

그리고 대기가 안정한 경우에는

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

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

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

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, θ_{va} 는 저층 대기의 가운데위, θ_{vg} 는 지면에서의 가운데위, u 는 풍속이다.

보편 함수 ψ_H 는 Monin-Obukhov 길이 스케일로 나타낼 수 있고, 대기가 불안정한 경우에는

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

그리고 안정한 경우에는

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

로 주어진다.⁹⁾ 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

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

그리고 대기가 안정한 경우

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

로 계산할 수 있다.⁸⁾

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

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

로 주어진다.¹⁰⁾ 여기서 D_j 는 j 종류 기체의 확산도

이고, ν 는 공기의 점성계수이다.

식물이 있는 지표면에서 식물이 성장하는 시기에 는 지면에 대한 침적 현상은 식물체에 의한 uptake 에 비해 무시될 정도로 작다. 밤에는 잎의 표피와 지 면 위로 드러난 식물 표면에 대한 침적이 지면에 대 한 침적보다 더욱 중요하다. 지표면의 특성에 따라 가장 큰 차이를 보이는 것이 지표면 캐노피 저항이 므로, 다른 층의 저항보다 지표면의 성질을 잘 고려 해서 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 저항이 고, R_p 는 기공 저항 R_{st} 와 엽육 저항 R_m 의 합으로 계산되고, R_{cut} 는 건조한 표피 저항을, R_{cw} 는 습한 표피 저항을, R_g 는 지표면 저항을 나타낸다.

군엽저항(foliage resistance) R_p 는 크게 기공 저항 R_{st} 와 엽육 저항 R_m 으로 나눌 수 있는데, 이 저항 은 잎 면적 지수인 LAI(Leaf Area Index)와 국지 저항(local resistance)들을 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.¹¹⁾

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

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

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

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

R_{cut} 는 건조한 canopy의 표피에 대한 저항으로

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

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 표피저항, A_0 는 표피나 지표면에 대한 화학적 반응성, A_j 는 가스의 생물학적 반응성을 나타내는 요소로 각각 16, 15, 27.8을 사용하였다.

이슬이 생긴 경우의 습한 표피 저항을 나타내는 R_{cw} 는

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

로 주어진다. 여기서 r_{cw} 는

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

로 주어진다. 여기서 H_j 는 Henry의 상수로 2.1이며, a_j^* 는 물에서 기체의 용해도를 나타내는 매개변 수로¹²⁾ 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 저항값 으로 5 s cm^{-1} 를 사용하였다.

2.2. 식생 습윤도에 따른 침적 속도 계산

본 연구에서는 EMEFS에 포함되어있는 식생 습윤도(CWC)의 관측자료를 이용하여 CWC가 40%이 상의 경우를 지표면이 습한 상태라 선정하고¹³⁾, 그 선정된 자료를 여름철 주간과 야간의 경우로 각각 나누어 O_3 에 대한 건성 침적 속도를 산정하였다. 이것은 주간과 야간의 기상 조건과 지표면 상태가 달리 나타나므로, 그에 따른 O_3 건성 침적 속도의 특성을 파악하기 위하여 실시한 것이다.

3. 결 과

Fig. 1은 주간에 대해 지표면이 건조한 상태와 습한 상태에 따른 침적 속도의 계산결과로서, O_3 의 건성 침적 속도는 건조한 지표면의 경우 약 $1.18 \sim 1.78 \text{ cm s}^{-1}$, 습한 지표면의 경우 약 $0.4 \sim 0.7 \text{ cm s}^{-1}$ 의 범위를 보이고 건조한 지표면인 경우 습한 지표면의 경우보다 침적 속도가 크게 나타났으며, EMEFS의 관측치와 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 각 경우의 강수 유무와 이슬, 종류, 식물의 배수 현상 등에 의한 기상 조건에서 나온 침적

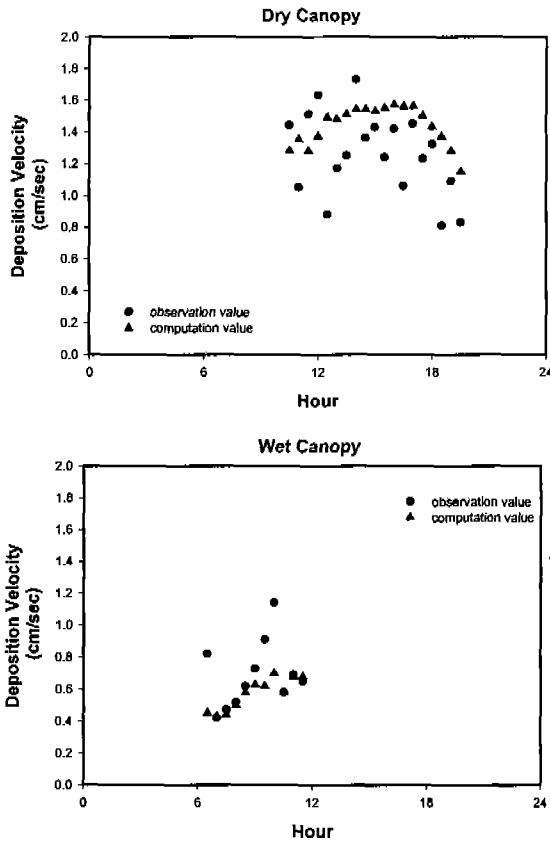


Fig. 1. The daytime deposition velocity of O_3 for dry and wet canopies in summertime.

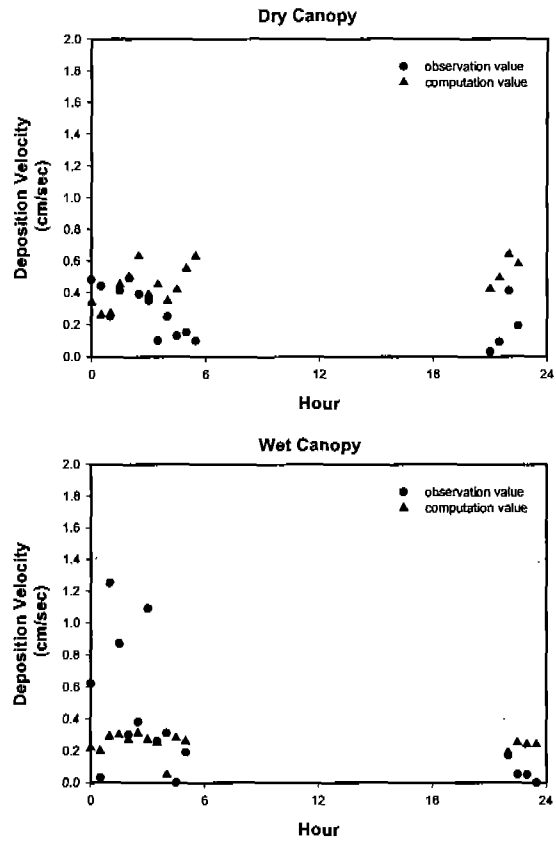


Fig. 2. The nighttime deposition velocity of O_3 for dry and wet canopies in summertime.

속도의 결과이므로 그 정확한 메커니즘은 알 수 없지만, 대체적인 경우 낮동안은 건조한 지표면이 되는 기상 조건 아래에서는 습한 지표면이 될 수 있는 조건에서보다 침적 속도가 크다고 할 수 있다. 이것은 건조한 토양보다 습한 토양에서 훨씬 큰 지표면 저항을 가진다는 선행 연구와 유사한 결과이며^{14,15)}, 이는 침적 대상 물질인 O_3 가 물에 대해 낮은 용해도를 가지는 특성으로 인해 주간의 습한 지표면의 경우 O_3 의 제거가 느리게 나타나는 결과이다.

Fig. 2는 야간에 대해 지표면이 건조한 상태와 습한 상태에 따른 O_3 의 건성 침적 속도의 계산 결과이다. O_3 의 건성 침적 속도는 건조한 지표면의 경우 약 $0.2 \sim 0.7 \text{ cm s}^{-1}$, 습한 지표면의 경우 약 $0.01 \sim 0.35 \text{ cm s}^{-1}$ 의 분포를 나타내고 있다. 야간의 건조한 지표면에 대한 O_3 의 건성 침적 속도의 경우는 관측치와 유사한 분포를 보일 뿐만 아니라, 일반적으로 야간에 O_3 가 가지는 건성 침적 속도를 나타내고 있다. 그러나 야간의 습한 지표면에서 관측된 O_3 의 건성 침적 속도를 살펴보면 1.2 cm s^{-1} 이상의 값이 나

타나 있다.⁶⁾ 이것은 일반적으로 야간에 O_3 가 가지는 건성 침적 속도보다 수배에 달하는 높은 값을 보인 것으로, 표본일의 관측당시 특이 기상조건 등에 의한 결과로 사료되며 정확한 해석이 되지 않는 부분이었으며, O_3 의 화학적 특성으로도 뚜렷한 원인을 찾을 수 없었다.

4. 결 론

식생 지표면의 습윤도에 따른 O_3 의 건성 침적 속도를 살펴보면 낮동안은 건조한 지표면인 경우에 침적 속도가 크게 나타났고 상대적으로 밤시간은 그 경향이 뚜렷하지 않았으며, 단지 낮동안 건조한 지표면이 발생될 수 있는 기상 조건의 경우 침적 속도가 클 수 있다고 말할 수 있다. 또한 이러한 결과는 O_3 의 특성으로 나타나는 것이며, 만약 물에 대한 용해도가 비교적 큰 SO_2 를 대상으로 지표면 습윤도에 따른 건성 침적 속도를 살펴본다면 그 결과에 차이가 있을 것으로 사료된다.

현재까지 식생 지표면의 습윤도가 침적 속도에

영향을 미친다는 이론만 존재 할 뿐 그 메커니즘을 찾지 못하고 있는 형편이므로, 이에 대한 보다 정확한 메커니즘을 연구할 필요가 있을 것이다. 침적 속도의 계산에 상대적으로 중요하게 작용⁷⁾하는 지표면 저항을 보다 정확히 계산하기 위하여 각 식생 지표면의 생물학적 특징과 화학적 특징이 잘 고려된 모수화를 통하여 그 매개변수들의 정확한 값을 사용하는 것이 중요한 문제로 남는다. 또한 우리나라에서도 여러 가지 지표면에 대한 침적 속도 관측의 필요성을 느끼며, 지표면 습윤도에 따른 침적 속도의 관측 역시 중요한 자료로 요구되어진다.

참 고 문 헌

- 1) Monteith, J. L., 1957, Dew. Quart. J. R. Met. Soc., 83, 322-341.
- 2) Brimblecombe, P., 1978, Dew as a sink for sulphur dioxide. Tellus, 30, 151-157.
- 3) Fowler, D. and M. N. Unsworth, 1979, Turbulent transfer of sulphur dioxide to a wheat crop. Quart. J. R. Met. Soc., 105, 767-783.
- 4) Wesely, M. L., 1989, Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. Atmos. Environ., 23, 1293-1304.
- 5) Garland, J. A., 1977, The dry deposition of sulphur dioxide to land and water surfaces. Proc. R. Soc. Lond., A354, 245-268.
- 6) Shaw, R. H., G. den Hartog and H. H. Neumann, 1988, Influence of foliar density and thermal stability on profiles of Reynolds stress and turbulence intensity in a deciduous forest, Boundary-Layer Meteorology, 45, 391-409.
- 7) 이화운, 김유근, 문난경, 2000, 하계 활엽수림에서의 대기오염물질 건성침적속도의 일변화 추정, 한국기상학회지, 36(3), 309-316.
- 8) Louis, J. F., 1979, A parameteric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Boundary-Layer Meteorology, 17, 187-202.
- 9) NCAR, 1985, The NCAR Eulerian Regional Acid Deposition model, ADMP-85-3, NCAR/ TN-256+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado., 178pp.
- 10) 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.
- 11) O'Dell, R. A., M. Taheri and R. L. Kabel, 1977, A model for uptake of pollutants by vegetation, Journal of Air Pollution Control Association. 27, 1104-1109.
- 12) 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 a air-sea interface, Review paper, Atmospheric Environment. 12, 2055-2087.
- 13) Chamedis, W. L., 1987, Acid dew and the role of chemistry in the dry deposition of reactive gases to wetted surfaces. J. Geophys. Res., 92, 11895-11908.
- 14) Galbally, I. E. and C. R. Roy, 1980, Destruction of ozone at the earth's surface. Quart. J. R. Met. Soc., 106, 599-620.
- 15) Hicks, B. B., D. D. Balcocchi, T. P. Meyers, R. P. Hosker and D. R. Matt, 1987, A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities. Wat. Air Soil Pollt., 36, 311-330.