

지표 부근에서의 대기오염물질 건성 침적속도에 관한 모수화

이 화 운 · 박 종 길* · 장 은 숙 · 문 난 경

부산대학교 대기과학과, 인제대학교 환경학과*
(1994년 9월 30일 접수)

A Simulation for Dry Depositon Velocity of Air Pollutants over various surfaces.

Hwa-Woon Lee, Jong-Kil Park*, Eun-Suk Jang
and Nan-Kyoung Moon

Dept. of Atmospheric Science, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea

**Dept. of Environmental Science, Inje University, Kimhae, 621-749, Korea*

(Manuscript received 30 September 1994)

Abstract

A predictive model is demonstrated for gas removal rates from the atmosphere by dry deposition. Typical deposition velocities are complex functions of surface types, atmospheric stabilities, friction velocities, air pollutants, and so on.

In this paper we simulated the calculation of dry deposition velocities near the earth surfaces, simultaneously we estimated real dry deposition velocities using the previous simulation. The measurement taken over a deciduous forest by Padro *et al.*(1988) were used to verify this model.

In the comparison of the value of deposition velocity between numerical computation and observation, there are partially overestimations and underestimations between them, but we can speak that they are in a good accordance.

Key Words : dry deposition, deposition velocity, atmospheric stability

1. 서 론

일반적으로 대기 오염 물질의 농도를 예측할 경우, 오염 물질이 지표면에서 완전 반사된다는 가정 하에 계산한다.

그러나, 대기 오염 물질의 침적 현상은 농작물의 피해, 식물의 성장 장애, 토양 오염, 수질 오염 등의 문제와 밀접하게 관련되어 있으므로 중요하게 다루어져야 할 뿐 아니라, 대기 오염 물질 농도 예측을

정확히 하기 위해서도 중요한 의미를 갖는다.

대기 오염 물질의 침적 현상에는 중력이나 분자 확산 등에 의해 지면이나 수면에 직접침강, 흡착하는 건성침적(dry deposition)과, 구름속에서 우적의 생성핵이 되어 제거되는 rainout, 낙하하는 우적에 씻겨 내리는 washout과 같은 습성 침적(wet deposition) 등이 있다.

본 연구에서는 여름의 맑은 날을 대상으로 건성 침적에 관하여, 지표 부근에서의 건성 침적속도를 계산할 수 있도록 모수화하는 동시에, 이를 이용한

건성 침적속도를 산정하여, 실제 대기에서의 관측치와 비교함으로써, 모수화된 모델의 타당성을 비교·검토하고, 기상 조건에 따른 건성 침적속도의 변화를 알아보려고 한다.

2. 침적 저항 모델

침적 현상은 단순한 과정의 결과가 아니고, 침적하는 동안 아주 복잡한 기상 현상과 많은 기상 요소에 영향을 받아서 나타나는 현상이기 때문에 침적 현상을 수학적으로 표현하는 것은 여러가지의 어려움을 내포하고 있다.

본 모델에서는, 침적속도 계산을 위해 Wesely and Hicks (1977)에 의해 소개된 관계식을 사용하였고, ground에 대한 어떤 오염물의 flux는 오염물 농도 C에 대하여 선형으로 비례한다고 가정한다.

$$\text{Flux} = V_d \times C \quad (1)$$

여기서, V_d 는 length/time의 단위를 가지는 침적속도이다. 이것은 대기 상태를 극히 간소화 한 결과이므로, 완전한 침적 현상을 묘사하지는 않는다. 그러나, V_d 는 수치 모델에서 침적을 결정하는데 있어서 아주 중요한 지표로 사용된다.

2.1 기본 방정식

침적속도를 구하기 위해서, 오염물 flux와 농도의 local gradient 관계를 살펴보면, 오염물의 downward flux, F는 농도의 local gradient에 비례한다.

$$F = -K \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

여기서, K는 trace gas에 대한 eddy 또는 분자 확산 계수이고, C는 trace gas의 농도이다.

침적속도를 계산하기 위한 지표층의 구분은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 turbulent layer와 laminar layer의 두 층으로 나누어진다.

침적속도에 관한 관계식을 얻기 위해서, 오염물 flux가 층을 통해 일정하다는 것과 trace gas에 대한 eddy 확산 계수가 난류층을 통한 heat 확산 계수와 같다는 가정을 이용해서 식(2)를 적분하게 되

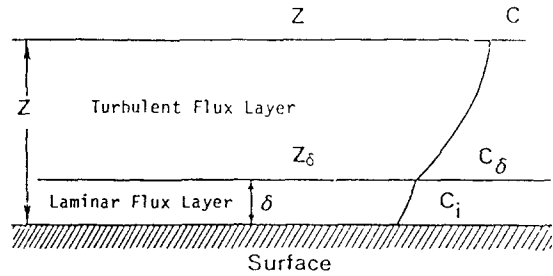


Fig. 1. Schematic of surface layers through which pollutants traverse as they are deposited.

면, 난류층을 통한 수송 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} F &= ku_* \frac{(C - C_\delta)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_\delta}\right) - \psi_h} \\ &= ku_* \frac{(C - C_\delta)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) - \psi_h + \ln\left(\frac{Z_0}{Z_\delta}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ψ_h 는 L의 함수인 보편 함수이고, Z_δ 는 laminar 층의 thickness, C_δ 는 laminar 층 top에서 농도, k는 von karman constant(약 0.4), Z_0 는 roughness length이다.

laminar층을 통한 오염물 flux는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{D_g}{Z_\delta} (C_\delta - C_i) \quad (4)$$

여기서, D_g 는 gas의 분자 확산 계수를 나타내고, C_i 는 interface의 오염물 농도를 나타낸다. 또한, 접촉면의 오염물 flux는 R_s 의 영향을 받으므로, 방정식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = \frac{C_i}{R_s} \quad (5)$$

이상의 식 (3), (4), (5)로 부터, C_δ , C_i 제거하고, flux에 대하여 정리하면 다음식과 같이 표현된다.

$$F = \frac{C}{\left[\frac{\ln(Z/Z_0) - \psi_h}{ku_*} \right] + \left[\frac{\ln(Z_0/Z_\delta) + \frac{Z_\delta}{D_g}}{ku_*} \right] + R_s} \quad (6)$$

식 (6)의 분모 항들이 각각 중요한 의미를 갖는데, 분모의 첫째 항은 공기 역학적 저항(R_a)을 나타내고, 둘째 항이 점성층 저항(R_b)을, 세째 항이 지표층 저항(R_s)을 나타낸다.

식 (6)은 $F = V_d \times C$ 와 같이 나타낼 수 있으므로,

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_s} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 그러므로, R_a , R_b , R_s 를 계산 하면, 침적속도를 계산할 수 있게 되는 것이다.

2.2 공기 역학적 저항

공기 역학적 저항은 저층 대기에서 안정도와 풍 속을 사용하여 계산할 수 있다.

식 (6)의 분모의 첫째 항에서 표현된 바와 같이 마찰 속도와 보편 함수를 알아야 공기 역학적 저항을 계산할 수 있다.

마찰 속도는 bulk Richardson number와 관련 되는데, bulk Richardson number는 다음과 같다.

$$R_{iB} = \frac{gz\Delta\theta_v}{\theta_{vg}u^2} \quad (8)$$

여기서, g 는 중력 가속도, z 는 저층 대기의 높이, $\Delta\theta_v$ 는 θ_{va} 에서 θ_{vg} 을 뺀 값, θ_{va} 는 저층 대기의 잠재 가온도(potential virtual temperature), θ_{vg} 는 ground에서의 잠재 가온도를 각각 나타낸다.

마찰속도는 Louis(1979)에 의하여, 불안정($R_i \leq 0$)한 경우

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[1 - \frac{9.4 R_i}{(1 + 7.4 B)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

안정($R_i > 0$)한 경우

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0}} \left[\frac{1}{(1 + \frac{9.4}{2} R_i)} \right] \quad (10)$$

$$B = 9.4 \sqrt{R_i \frac{z}{z_0} (k / \ln(z/z_0))^2} \quad (11)$$

을 사용하였다.

Monin-Obukhov length, L 은 다음으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{\theta_{vg} u_*^3}{kgH} \quad (12)$$

여기서, H 는 저층 대기에서 heat flux이며, 식 (13), (14)을 사용하여 계산된다.

대기 상태가 불안정($R_i \leq 0$)한 경우에는,

$$H = \frac{u \Delta \theta_v}{0.74} \left(\frac{k}{\ln \frac{z}{z_0}} \right)^2 \left[1 - \frac{9.4 R_i}{1 + 5.3 B} \right] \quad (13)$$

로 계산하고, 대기 상태가 안정($R_i > 0$)한 경우는

$$H = \frac{u \Delta \theta_v}{0.74} \left(\frac{k}{\ln \frac{z}{z_0}} \right)^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{9.4}{2} R_i} \right]^{1/2} \quad (14)$$

으로 계산한다.

Monin-Obukhov length, L 을 알면, ψ_h 는 다음의 근사로 계산되어 질 수 있다.

불안정($R_i \leq 0$)한 경우

$$\psi_h = \exp[0.598 + 0.39 \ln(-\frac{z}{L}) - 0.09 \ln(-\frac{z}{L})^2] \quad (15)$$

안정($R_i > 0$)한 경우

$$\psi_h = -\frac{5z}{L} \quad (16)$$

2.3 점성층 저항

점성층 저항은 다음의 근사로 계산한다(Pleim et al, 1984; Wesely and Hicks, 1977).

$$R_b = \frac{2}{ku_*} \left[\frac{\kappa}{D_g} \right]^{2/3} \quad (17)$$

여기서, κ 는 공기의 thermal diffusivity, u_* 는 마찰 속도, K 는 von karman constant(약 0.4), D_g 는 gas의 확산 계수를 나타낸다.

2.4 지표 저항

지표층 저항은 일사량과 침적되는 지표면 특성에 영향을 받으며 침적 현상을 다루는 데에 있어서 중요한 요소이다.

Table 1. Surface resistance and surface roughness in mid summer

Land type	Surface Resistance(s/m)		Roughness (cm)
	SO ₂	O ₃	
URBAN	1000	600	100
AGRICULTURE	120	72	25
DECIDUOUS	130	78	100
CONIFEROUS	240	144	100
RANGE	140	84	5

본 연구에서는 5개의 land use type에 대해서,

SO₂, O₃의 지표 저항 값과 거칠기 값을 Table 1에 제시한 바와 같이 사용하였다(The NCAR Eulerian Regional Acid Deposition Model, 1985).

3. 침적 속도의 계산 결과

지표면의 거칠기의 변화에 대한 SO₂의 침적속도의 변화는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 의하면, 거칠기가 커질수록 침적속도가 커지고 있음을 알 수 있고, 대기 상태가 불안정한 경우에는 거칠기에 대한 침적속도가 명확히 구분되지만, 대기 상태가 안정한 경우에는 침적속도에 큰 변화가 나타나지 않았다.

그리고, 거칠기가 큰 경우는 안정도에 따른 침적속도의 변화가 크게 나타났지만, 작은 경우는 안정도에 따른 침적속도의 변화가 작게 나타났다. 특히, 거칠기가 0.001인 해수면의 경우에는 침적 속도의 크기가 0.3이하의 작은 값으로 나타났다.

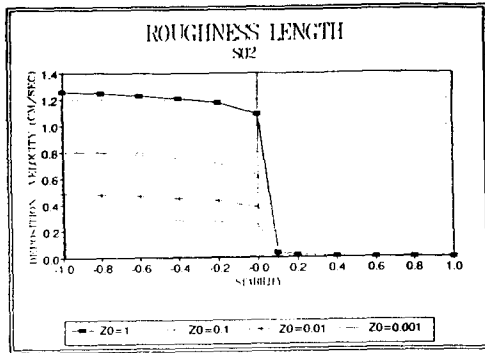


Fig. 2. The variations of deposition velocity of SO₂ for various roughness length on atmospheric stabilities.

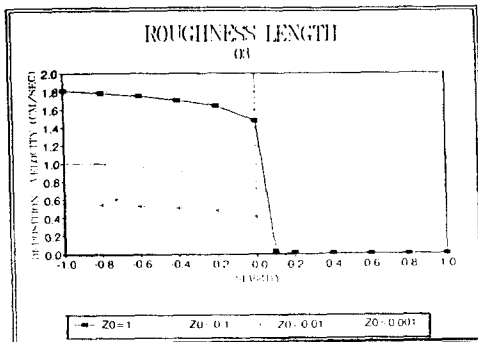


Fig. 3. The same figure 2. except for O₃.

거칠기의 크기 변화에 대한 O₃의 침적 속도의 변화를 Fig. 3에 나타내었는데, SO₂의 경우와 같은 결과로 나타났다

Fig. 4는 O₃의 경우 마찰 속도와 침적속도와의 관계를 알아 본 것이다. 지역은 deciduous forest surface에 대한 것으로 거칠기가 1m이고, 높이 33.4m에서 본 마찰 속도이다. 대기 상태가 불안정한 경우 안정한 경우에 비해서 마찰 속도가 컸고, 크기 변화도 크게 나타났다.

그림에서 침적속도와 마찰속도와의 관계를 비교해 보면, 밀접한 관계가 있음을 잘 알 수 있다.

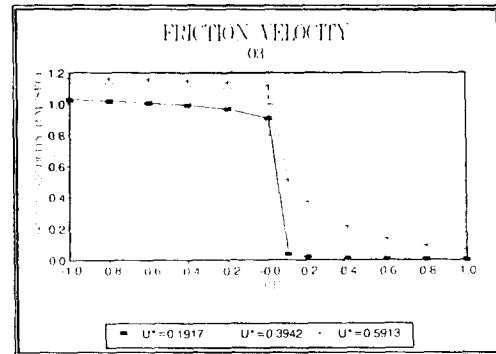


Fig. 4. The variations of deposition velocity of O₃ for friction velocity.

SO₂, O₃에 대하여 안정도에 따른 침적속도는 Fig. 5에 나타내었다. O₃의 침적속도는 ~1.8cm/sec의 범위를 가지고, SO₂의 침적속도는 ~1.25cm/sec의 범위로 나타났다. 전체적인 경향을 볼 때, O₃의 침적속도는 SO₂의 침적속도보다 큰 값을 나타내었다. 그러나, 대기 상태가 불안정한 경우는 두 gas 모두 극히 작은 값을 가지며 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

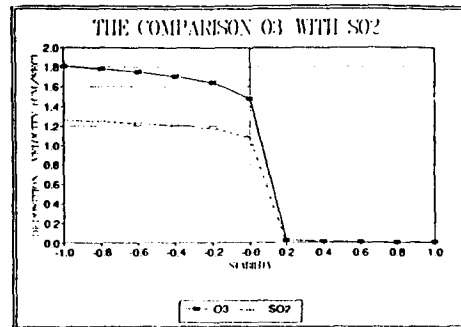


Fig. 5. The comparison of deposition velocity between O₃ and SO₂ on atmospheric stabilities.

Fig. 6은 5개의 land-use type에 대한 O₃의 침적 속도를 나타낸 것으로 관측 결과와 비교하기 위하여 모든 지표에 대하여 관측 지점과 동일한 33.4m의 고도에서 계산된 결과이다.

침적속도가 가장 크게 나타난 것은 지표가 deciduous 일 때이고, 다음으로 agriculture 순으로 나타났다. 대기 상태가 안정할 때는 전체적으로 침적속도 변화가 거의 없음을 알 수 있었다.

지표가 urban인 경우는 대기 안정도에 대한 변화가 작게 나타나는데, 이것은 지표 저항이 너무 커서 다른 요소의 영향이 상대적으로 작게 작용하기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 SO₂에 대하여 살펴본 것으로, 다른 조건은 Fig. 6과 동일하다. SO₂의 경우 침적 속도의 크기에는 차이가 있으나 지표가 deciduous일 때 침적속도가 가장 크게 나타났고, 다음이 agriculture로

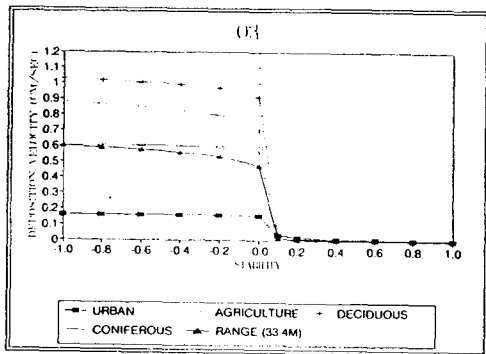


Fig. 6. The comparison of deposition velocity of O₃ over 5 land-use types. The computation height over all surfaces is 33.4m.

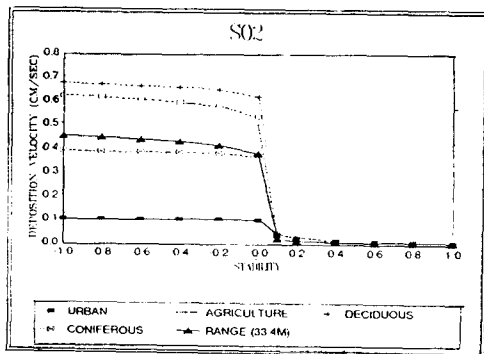


Fig. 7. The same figure 6. except for SO₂.

Fig.6과 같은 경향을 보였으며, urban의 경우도 비슷한 경향을 나타내었다. range의 경우에는 극히 안정할 때, 도시일 때보다 더 작은 값을 나타내고 있다. 그러므로, 대기 오염 물질 침적속도는 Lee et al.(1989)의 선행연구와 같이 기상조건의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

Fig. 8에서는 같은 5개의 land-use type에 대하여 O₃의 침적속도를 나타낸 것으로, Fig. 6, 7과는 달리, 33.4m의 동일한 고도에서가 아니고, 각각의 land-use type에 대하여 공기 역학적 저항, 점성층 저항, 지표층 저항을 모두 고려할 수 있도록 서로 다른 고도에서 침적속도를 계산한 것이다.

deciduous, coniferous, urban인 경우는 33.4m에서, agriculture인 경우는 9.4m에서, range인 경우

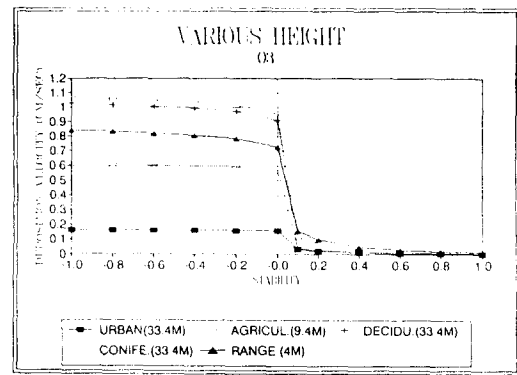


Fig. 8. The comparison of deposition velocity of O₃ over 5 land-use types. The computation heights are 33.4m over urban, deciduous and coniferous, and 9.4m, 4m over agriculture and range respectively.

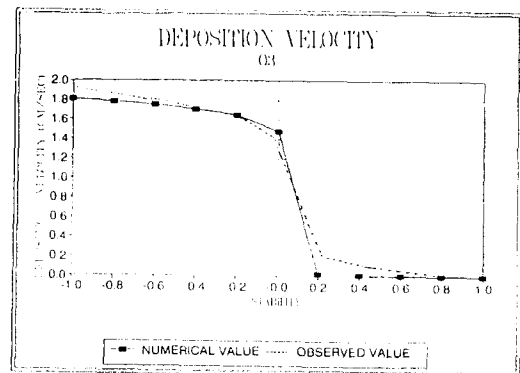


Fig. 9. The comparison of deposition velocity between numerical computation value and observation value for O₃.

는 4m에서 각각 계산되었다.

Fig. 6, 7, 8을 비교해 보면, 각각 다른 높이에서 계산된 결과와 동일하게 33.4m에서 계산 결과와는 달리 agriculture인 경우 침적속도가 가장 크고, deciduous, range, coniferous, urban의 순서로 나타났다.

대기가 불안정할수록 land-use type에 따른 침적속도의 차이가 크게 나타났고, 안정할수록 침적속도의 차이가 크게 나타나지 않았다. 그러나, range의 경우는 불안정할 때 다른 지표에 비해서 상대적으로 침적속도가 큼을 알 수 있었다.

Fig. 9는 O₃를 대상으로, 본 연구에서 구축한 침적 모델을 사용하여 계산한 값과 Padro *et al.*(1988)에 의해 CANADA 환경청에서 관측한 관측치와 비교를 나타낸 것이다.

그림에서, 관측치와 계산치를 비교해볼 때 부분적으로 overestimate와 underestimate의 경우가 보이지만, 비교적 좋은 일치를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서 지표 부근에서의 대기 오염 물질 침적속도를 계산하기 위한 모델을 모수화하고, 모수화된 모델을 사용하여 여러가지 경우의 침적속도를 계산하고, 계산되어진 결과와 관측된 결과를 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

침적속도는 canopy의 종류에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있었고, 본 연구 대상 canopy 중에서는 deciduous forest, agriculture의 surface에 대한 침적속도 값이 크게 나타났고, urban에서는 침적속도가 작게 나타났으며 거의 변화가 없었다. 이것은 urban에서의 지표 저항이 크기 때문으로 사료된다.

침적속도는 거칠기(Z₀), 마찰속도(U_{*})와 비례관계에 있음을 알 수 있었고, 전체적으로 비교할때, O₃의 침적속도가 SO₂의 침적속도보다 크게 나타났다. Padro *et al.*(1988)에 의한 CANADA 환경청 관측치와의 비교에서 관측치와 수치 모델을 사용한 계산

치는 좋은 일치를 보였다.

따라서, 본 연구에서 개발된 대기 오염 물질 침적속도 계산 수치 모델은 타당성이 있는 것으로 사료되어진다. 침적 현상은 공기 역학적 저항(R_a), 점성층 저항(R_b), 지표층 저항(R_s)의 함수이고, 특히 지표층 저항(R_s)의 영향을 크게 받으므로, 앞으로 지표층 저항 즉, canopy 저항에 대하여 더욱 세밀한 모수화를 한다면, 보다 정확한 대기 오염 물질 침적속도 예측 모델이 될 수 있을 것이다.

또한, SO₂, O₃ 이외의 지표에 침적되고 있는 중요한 많은 gas들에 대하여 많은 연구가 이루어져야 할 것이고, 침적 현상의 지표면 대상도 다양하게 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- Lee, H. W., J. K. Park and S. E. Moon, 1989, Simulation for deposition velocity of the pollutants, J. Korean Meteo. Soc. 25(3), 121-128.
- Louis, J. F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, Boundary Layer Met., 17, 1987-202.
- Padro, J. *et al.*, 1988, Eulerian Model Evaluation Field Study(EMEFS), Atmospheric Environment Service, Canada.
- Pleim, J. *et al.*, 1984, ADOM/TADAP Model Development Program, ERT P-B980-520, Prepared for OME, AES of Canada and the Umweltbundesamt, West Germany.
- The NCAR Eulerian regional acid deposition Model, 1985, NCAR/TN -256 + STR NCAR TECHNICAL NOTE.
- Wesly, 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. Cont. Assoc., 27, 1110-1116.