

Canopy를 고려한 대기오염물질의 건성침적모델에 관한 연구

이 화 운 · 박 종 길* · 이 부 용 · 장 은 숙

부산대학교 대기과학과, *인제대학교 환경학과
(1994년 11월 18일 접수)

A Study on the Dry Deposition Model of Air Pollutants Considering Canopy Effect

Hwa-Woon Lee, Jong-Kil Park*, Bu-Yong Lee and Eun-Suk Jang

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

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

(Manuscript received 18 November 1994)

Abstract

A numerical model has been developed to predict the deposition of air pollutants considering canopy effect. In this model, the deposition velocity is calculated using the deposition resistances(aerodynamic resistance, viscosity resistance, surface resistance).

Using the results, a comparative study was made between the model calculation and observation results.

The calculated daily variation of deposition resistances and in daytime most of the model cases are well agreed with observation results, and a slight difference was found in nighttime.

From the results, it is suggested that the present model is capable of estimating the deposition velocity of air pollutants considering characteristics of canopy layer.

Key Words : canopy effect, dry deposition.

1. 서 론

대기오염 현상은 도시를 중심으로 하여 식생환경의 파괴와 더불어 공해로서 인간의 건강을 해칠 뿐 아니라, 생활 환경 전반에 문제가 되고 있다. 그러므로 대기오염을 방지하고 대기질을 개선하기 위한 환경 영향 평가로서, 대기오염물질 농도를 정확히 예측하는 것은 대단히 중요하다. 대기오염물질농도를 정확히 예측하기 위해서는 대기오염물질의 확산 문제 뿐만이 아니라 오염물질의 지표면에의 침적, 특히 지표의 대부분을 차지하고 있는

식생에의 침적을 고려할 필요가 있다. 여러가지 오염물질들에 대하여 지표면의 성질에 따른 침적현상의 차이에 관한 연구는 Chamberlain(1966), Garland와 Penkett(1976), Judeikis와 Wren(1978) 등에 의하여 이루어 졌다. Lee *et al.*(1989)는 대기의 안정도 등과 같은 미기상이 침적속도에 미치는 영향에 대하여 조사하였고, Lee *et al.*(1994)는 지표 부근에서의 대기오염물질의 건성 침적속도를 모수화함에 있어서 식생을 고려하였으나 지표저항을 지표면 종류에 따라 각각 다른 상수로서 표현하였다.

본 연구에서는 식생층 및 지표면의 표면 반응에 의한 수송과정을 상세히 모수화 하여, canopy를 고려한 대기오염물질의 건성침적모델을 개발함으로써, canopy의 분포상황에 따른 침적현상을 정확히 표현 할 수 있도록 합과 동시에 모수화한 침적현상의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 건성침적 현상의 모수화

침적현상은, 주로 대기안정도, gas의 종류, 침적대상면의 재질과 상태에 지배된다. 이러한 여러 인자들의 영향을 고려하기 위하여 대기중으로부터 지표면으로의 침적과정을 Fig. 1과 같이 난류 경계층내의 난류확산에 의한 수송과정, 점성 경계층내의 분자확산에 의한 수송과정, 식생층 및 지

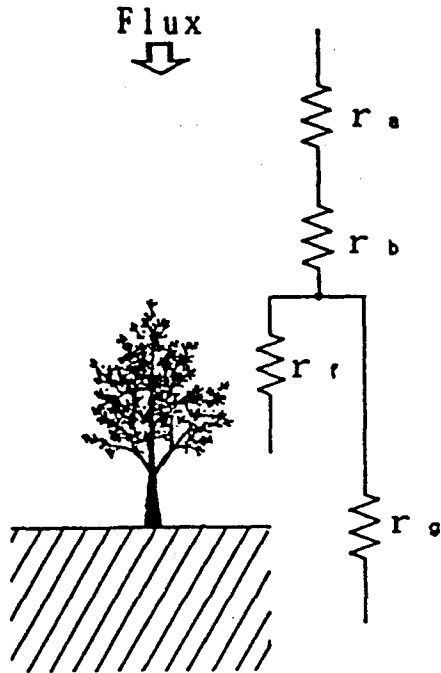


Fig. 1. Transportation model of air pollutants considering canopy effect. (r_a : aerodynamic resistance, r_b : viscosity resistance, r_r : plant resistance, r_g : surface resistance)

면의 표면 반응에 의한 수송과정으로 나누어 생각한다. 각 수송과정은 각각 공기 역학적 저항 r_a , 점성층저항 r_b , 식생층에 의한 저항 r_r 및 지표면의 표면저항 r_g 의 수송저항으로 표현하고, r_r 와 r_g 를 합성하여 표면저항 r_s 라고 한다.

2.1 기초방정식

침적현상을 표현하는 양으로서 일반적으로 침적속도가 많이 쓰여진다. 침적속도 계산을 위해 어떤 오염물의 침적 flux는 오염물의 농도 C 에 의하여 선형으로 비례한다고 가정하면, 침적속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_g(z) = F_d / C(z) \quad (1)$$

여기서 F_d 는 침적 flux이고, V_g 는 침적속도이며 수치모델에 있어서 침적률을 결정는데 중요한 지표로 사용된다.

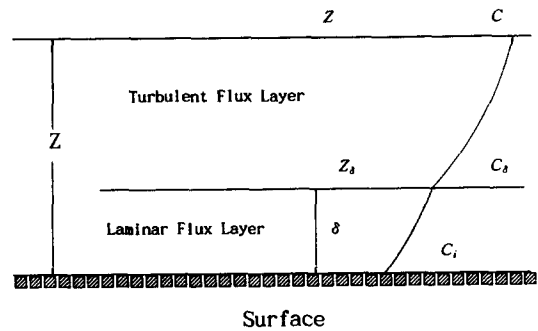


Fig. 2. Schematic diagram of surface layers through which pollutants traverse as they are deposited.

침적속도를 계산하기 위하여 지표층의 구분은 Fig. 2와 같이 turbulent flux layer와 laminar flux layer의 두층으로 나누고 층내에서의 오염물 flux는 일정하며, gas에 대한 난류확산 계수는 난류층을 통한 열확산계수와 같다고 가정한다.

수송저항은 침적속도의 역수로 표현할 수 있고, 전 저항 r 은 3가지 저항의 직렬 결합이라고 생각

할 수 있으므로 다음과 같이 표현되어진다(Wesley and Hicks, 1977).

$$r = \frac{1}{V_g} = \frac{C(z)}{F_d} = \frac{(C - C_\delta) + (C_\delta - C_i) + C_i}{F_d} \quad (2)$$

식(2)의 마지막 오른쪽 첫째항은 공기역학적 저항 r_a 를 나타내고, 둘째항은 점성층저항 r_b 를 나타내며, 셋째항은 지표면저항 r_s 를 나타내므로 전저항 r 은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$r = r_a(z) + r_b + r_s \quad (3)$$

그러므로 침적속도는 각 수송저항을 관련 parameter를 사용하여 표현함으로써 계산 할 수 있다.

2.2 공기역학적 저항

공기역학적 저항 r_a 는 대기안정도, 풍속 등과 같은 미기상 요소를 사용하여 다음과 같이 표현되어진다.

$$r_a(z) = \int_{z_0}^z (1/K) dz \quad (4)$$

윗식은 다음식 (5), (6)의 오염물질의 연직방향 확산계수 K 와 Businger *et al.*(1971)의 Universal Function(보편함수) Ψ_h 를 대입하면 식(7)과 같이 표현되어 대기상태에 따라 다른 값이 된다.

$$K = U^* C^* / (\partial C / \partial z) = x U^* z / \Psi_h \quad (5)$$

$$\Psi_h \begin{cases} 0.84(1 - 7.9\xi)^{-1/2} (\xi \leq 0, \text{불안정층}) \\ 1.14(0.74 + 4.1\xi) (\xi > 0, \text{안정층}) \end{cases} \quad (6)$$

$$r_a(z) = [\Phi_h(z/L) - \Phi_h(z_0/L)] / x U^* \quad (7)$$

여기서, Φ_h 는

$$\begin{aligned} & \Phi_h(z/L) - \Phi_h(z_0/L) \\ &= 0.84 [\ln(z/z_0) - 2 [\ln(1+Y)] \frac{Y}{Y_0}], \quad \xi \leq 0 \\ &= 1.14 [0.74 \ln(z/z_0) + 4.1 [\xi] \frac{\xi}{\xi_0}], \quad \xi > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$Y = (1 - 7.9\xi)^{1/2}, \quad (9)$$

$$Y_0 = (1 - 7.9\xi_0)^{1/2} \quad (10)$$

가 되며, U^* 는 마찰속도이며, C^* 는 접지층의 오염물질의 농도, ξ 는 대기안정도 Parameter(= z/L), L 은 Moninobukbov's length, κ 는 karmann의 상수(=0.4)이다.

2.3 점성층 저항

점성층내의 물질 수송에 대하여, Stanton수 St 는 Shad수 $Sh(= k_d z_0 / D)$, Schmidt수 $Sc(= \nu / D)$ 및 거칠기 Reynolds수 $Re^*(= U^* z_0 / \nu)$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} St &= Sh / (Sc \cdot Re^*) \\ &= (k_d z_0 / D) (\nu / U^* z_0) (D / \nu) \\ &= k_d / U^* \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 k_d 는 물질 전도율, ν 는 공기의 동점성계수이다. 한편, 점성층내의 gas flux, F_d 는

$$F_d = k_d [C_\delta - C_i] / r_b \quad (12)$$

로 표현되기 때문에, 점성층 저항 r_b 는 정의에 의해

$$r_b = k_d [C_\delta - C_i] / F_d = 1 / k_d \quad (13)$$

가 되고, 식 (11)을 대입하면

$$r_b = St^{-1} U^{*-1} \quad (14)$$

와 같이 된다. 그러므로 r_b 는 대상이 되는 가스의 종류와 지표면 상태에 의해 결정된다. 여러가지의 지표면에 대한 Stanton수의 평가식이 몇가지 소개되어 있으나(Owen and Thomson, 1963; Chamberlain, 1966), 본 연구에서는 바다와 내륙으로 나누어 바다측에 대해서는 Chamberlain (1966)의 매끈한 면에 대한 Stanton수의 식

$$St^{-1} = 5 [S_c - 1 + \ln [1 + 0.83(S_c - 1)]] \quad (15)$$

을, 내륙측에 대하여는 Wesley와 Hicks(1977)에 의한 Stanton수의 식

$$St^{-1} = 5(S_c/P_r)^{2/3} \quad (16)$$

을 사용한다. 여기서, P_r 은 Prandtl수이다. 이 식 St^{-1} 은 지표의 상황에 따라 달리 표현되지만, 선행 연구(北田와 Peters, 1980; McRae *et al.*, 1982)에서 도시에 적용하여도 좋은 결과를 보여 주고 있으므로, 여기서도 내륙측에 이 식을 사용하기로 한다.

2.4 표면저항

표면저항 r_s 는 대상이 되는 gas와 침적대상 면의 특성에 의해 결정되고, 기온, 습도, CO_2 의 농도 등에 영향을 받는 식물의 활동, 침적면의 함수량, 산성도 등에 따라 복잡하게 변화 하므로 모수화가 어렵다. 그러므로 많은 연구자에 의해 gas와 토양의 종류를 대상으로 실험한 연구결과가 보고되고 있다. 본 연구에서는 식생의 침적을 고려하기 위해 표면저항 r_s 를 Fig. 1의 r_g 와 r_f 로 나누어서 생각한다.

r_g 에 대해서는 여러 문헌조사(Garland, 1977; Thompson and Zafirion, 1983; Garland and Penkett, 1976; Judeikis and Stewart, 1976; Bruaun and Wilson, 1970; Spedding, 1969; Garland, 1976)에 의해 gas의 종류와 지표의 상황에 따라 Table 1에 나타난 바와 같이 일정한 값을 사용하도록 하였다.

Table 1. Surface resistance with different physical properties of surface.

	r_g (s/cm)			
	SO_2	NO_2	NO	O_3
sea surface	0.56	834.0	5850.0	24.0
urban	0.3	0.3	0.3	0.3
land surface	0.06	7.0	153.0	0.2

r_f 에 대해서는 여러가지 식물에 대해 연구가 이루어져 있지만(Wesely and Eastman, 1982; Colbeck and Marrison, 1985) 측정자에 따라 많은 차이가 있는데, 이러한 차이는 각각의 실험 조건

과 식물의 기공 상태에 따른 차이가 원인으로 생각된다. 본 연구에서는 식생층의 저항을 Robert and Murphy(1985)에 의해

$$r_f = \frac{r_{stmata}}{LA} \times \frac{DH_2O}{D_i} \quad (17)$$

로 표현하였다. 여기서 LA 는 지면의 총면적에 대한 잎의 면적을 나타내는 Leaf Area Index이고, r_{stmata} 은 기공저항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{stmata} = r_c \left[\frac{S_{max \downarrow}}{S_h + 0.03S_{max \downarrow}} + SS + \left(\frac{W_{with}}{W_s} \right)^2 \right] \quad (18)$$

여기서 $S_{max \downarrow}$ 는 태양복사의 최대값이며, SS 는 계절에 따라 변화하는 함수로 식물의 성장기에는 $SS=0$, 그외에는 $SS \gg 0$ 이다. W_{with} 는 식물이 있는 토양의 수분량이고, W_s 는 식물의 뿌리 부근의 수분량이며, r_c 는 식물의 종류에 따라 변하는 계수이며, 여기서는 Deardorff(1978)에 의해 200(s/m)로 하였다.

r_{stmata} 는 수증기에 대한 값이므로, 河内(1980)에 의해 수증기와 각 물질의 확산계수의 비 DH_2O / D_i 를 사용함으로써 각 물질에 대한 저항을 구한다.

표면저항 r_s 는 r_g 와 r_f 를 사용하여 구한다. 식생층내에 들어온 오염물질은 잎에 침적하는 것과 식생층을 통과하여 지면에 도달하는 것이 있으므로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 표면저항값은 병렬 합성하여 구한다. 이때 식생층과 지면의 면적 비를 생각하여 r_s 를 다음식으로 표현하였다.

$$r_s = \frac{1}{\frac{1-\delta_f}{r_g} + \frac{\delta_f}{r_f}} = \frac{r_f r_g}{\delta_f r_g + (1-\delta_f) r_f} \quad (19)$$

이때 δ_f 는 식물에 의해 지면이 덮혀진 정도를 나타내는 것으로 $0 \leq \delta_f \leq 1$ 이다.

식(19)와 같이 표면저항을 계산함으로써, 식생의 분포상황에 따른 침적속도의 차이를 모델화 할 수 있다.

이와 같이 구하여진 각각의 저항을 사용하여 식(3)에 의하여 전 수송저항을 구하고, 식(1)에 의해 침적 flux를 계산하여 오염물질의 이류확산식의 경계조건에 첨가하면 침적을 고려한 이류, 확산 현상을 표현할 수 있다.

3. 계산 결과 및 고찰

r_a 와 r_b 를 사용한 침적속도의 계산결과에 대한 검토는 Lee *et al.*(1989)에 나타나 있으므로, 여기

서는 상세히 모수화한 r_s 에 대하여 검토하고자 한다.

Table 1에 표현된 각 물질에 대한 지면의 표면 저항 r_a 의 값과 식생모델에 의해 구해진 기공저항 r_{stoma} 로부터 식(17)을 이용하여 r_f 를 구하여 식(19)로부터 표면저항 r_s 를 구하였다. δ_f 의 계산은 0에서부터 1까지의 7종류에 대하여 행하였다. $\delta_f = 0$ 의 경우는 도시의 표면저항을 사용하고 그외의 경우는 지면의 표면저항을 사용하였다.

각 물질에 대한 표면저항의 계산결과를 Fig. 3에 나타내었다. r_f 의 값은 낮에 기공이 열려 있는

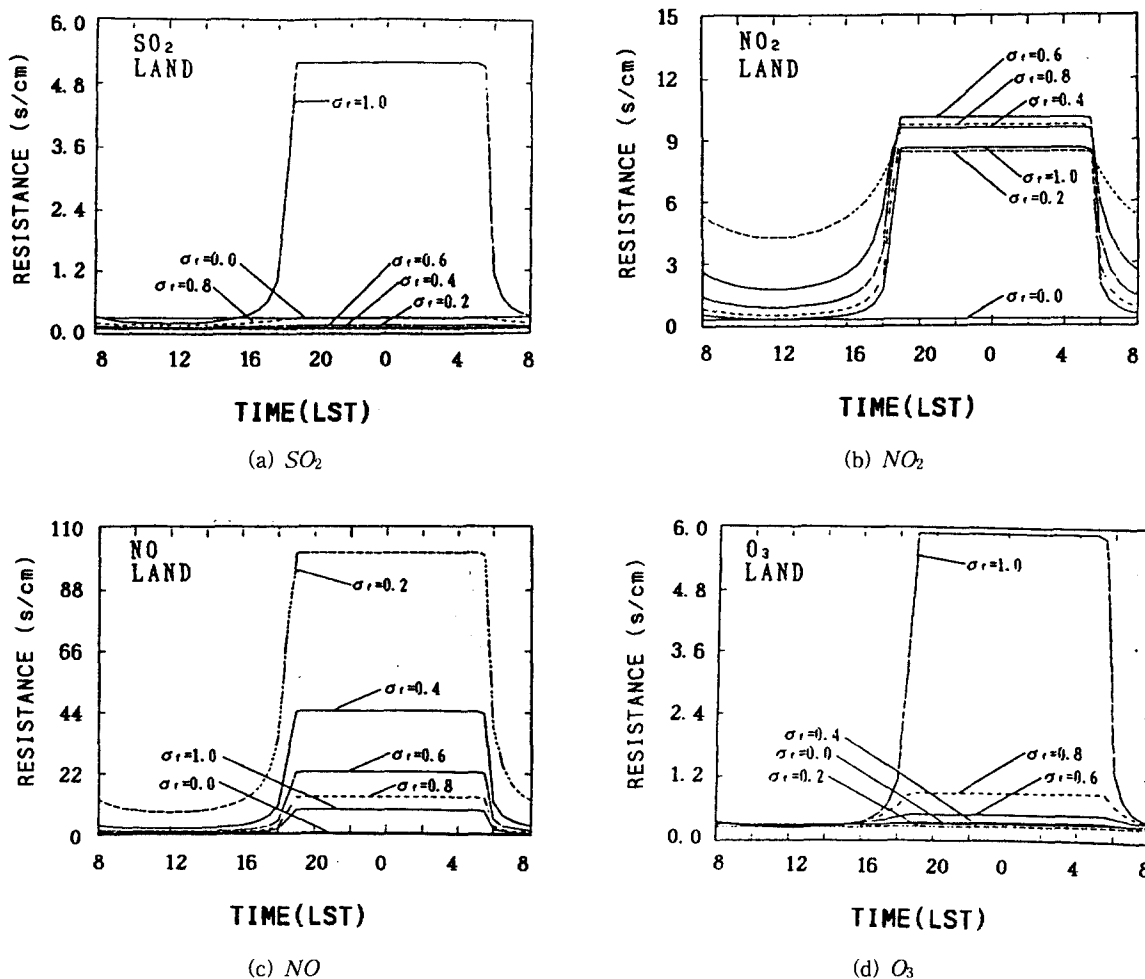


Fig. 3. Calculated results of surface resistance for gases.

경우에는 도시의 값 0.3보다도 작은 값이지만, 밤에 기공이 닫혀 있는 경우에는 대단히 큰 값을 나타내며, 거의 변화가 없었다.

SO_2 와 O_3 의 경우는 지면에 대한 표면 저항이 작으므로, δ_f 의 값이 클수록 저항값이 커져서 침적되기가 어려울 것으로 생각된다.

Mc Mahon(1978)에 의하면 SO_2 의 경우, 식생에 대한 저항값은 측정자에 의해 차이가 있지만 대략적으로 0.1-1(s/m)으로 나타내므로, Fig. 3(a)의 주간의 계산결과와 거의 일치한다.

NO_2 의 저항값은 SO_2 의 저항값에 비해 크고, 주간에는 $\delta_f=0.2$ 의 경우가 r_s 최대값을 나타낸다. 이것은 구하여진 r_g 의 값이 7.0(s/m)이므로, 주간과 야간의 r_f 와의 대소관계가 변하기 때문이다.

NO 의 저항값은 대단히 크므로, 침적되기 어려운 물질임을 알 수 있다. Wesely와 Eastman(1982)에 의한 NO_2 와 O_3 의 r_s 값의 실측치를 Fig. 4에 나타내었다.

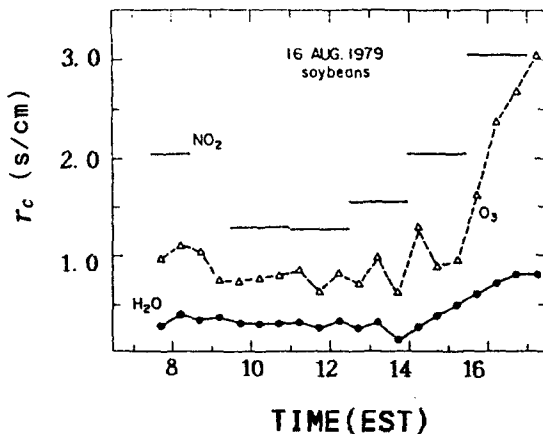


Fig. 4. Observation data of surface resistance(SO_2 , O_3).

NO_2 와 O_3 에 대한 r_s 의 계산치를 나타낸 Fig. 3(b), (d)와 NO_2 와 O_3 에 대한 r_s 의 실측치를 나타낸 Fig. 4를 비교하면 NO_2 의 경우 오후에는 r_s 의 최대값이 실측치에 비해 본 연구의 계산값이 크게 나타나지만, 주간의 NO_2 , O_3 의 r_s 값은 계산치와

실측치가 거의 일치하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 대기오염물질 농도의 정확한 예측을 위하여, 난류경계층 내의 난류 확산에 의한 수송과정과 점성층내의 분자확산에 의한 수송과정과 함께 식생층 및 지표면의 표면 반응에 의한 수송과정을 상세히 모수화 함으로써, canopy를 고려한 대기오염물질의 건성침적모델을 개발하였다.

본 모델을 사용하여 식물의 덮여진 정도에 따라 7종류에 대하여 수송저항을 계산하였다. 그 결과는 다음과 같다.

식생층의 표면저항의 값은 기공이 열려있는 낮의 경우보다 기공이 닫혀있는 밤의 경우에 대단히 큰 값을 나타내며, 값의 변화도 적었다. SO_2 와 O_3 의 경우 식생층이 많을수록 표면저항의 값이 크므로 침적되기가 어렵고, NO_2 의 저항값은 주간에는 $\delta_f=0.2$ 의 경우에 r_s 의 최대값이 나타났다.

NO_2 와 O_3 의 r_s 값의 실측치와 계산치를 비교하면, 오후에 NO_2 의 r_s 최대값은 계산치가 실측치에 비해 약간 크게 나타나지만 전체적으로 r_s 의 값은 실측치와 계산치가 거의 일치 하였다.

실측 자료는 관측자에 의하여 약간의 차이가 있고, 야간의 data는 적으므로 엄밀한 검토는 할 수 없지만, 본 연구에서 작성한 canopy를 고려한 대기오염물질의 침적모델을 사용하여 계산된 식생층으로의 침적저항은 거의 타당한 값을 나타내고, 일변화 경향도, 실측치에 가깝게 나타나므로, 표면저항을 일정한 상수로 표현하는 것보다는 본 연구에서 작성된 모델을 사용하는 것이 식생층의 성질을 잘 묘사하여 침적속도를 계산 할 수 있다고 생각되어진다.

감사의 글

이 연구는 "Canopy를 고려한 대기오염물질의 확산·침적모델에 관한 연구"에 대한 1994년도 한

국학술진흥재단 지방대육성연구비 지원에 의해 이루어진 것입니다. 한국학술진흥재단의 연구비지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Braun R. C. and Wilson M. J., 1970, The Removal of Atmospheric Sulphur by Building Stones, *Atmos. Env.*, 4, 371~378.
- Businger, J. A., J. C. Wyngaard, and E. F., Bradley, 1971: Flux-Profile Relationship in the Atmospheric Surface Layer, *J. Atmos. Sci.*, 28, 181~189.
- Chamberlain, A. C., 1966, The Transport of Gases to and from Grass and Grass-like Surfaces. *Proceeding Royal soc.*, A290.
- Colbeck I. and R. M. Harrison, 1985, Dry Deposition of Ozone : Some Measurement of Deposition Velocity and of Vertical Profiles to 100Meters, *Atmos. Env.*, 19, No.11, 1807~1818.
- Deardorff, J. W., 1978, Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer of Vegetation, *J. Geophys. Res.*, 83, C4, 1889~1903.
- Garland J. A., 1977, Dry Deposition of SO₂ and other gases, *Proc. Symp. on Surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants*, 1974. Richland, Washington, 212~227.
- Garland, J. A. and S. A. Penkett, 1976, Absorption of Peroxyactynitrate and Ozone by Natural Surfaces, *Atmos. Env.*, 10, 1127~1131.
- Judeikes H. S. and T. B. Stewart, 1976, Laboratory Measurement of SO₂ Deposition Velocities on Selected Building Materials and Soils, *Atmos. Env.*, 10, 769~776.
- Judeikis, H. S. and A. G. Wren, 1978, Laboratory Measurements of NO and NO₂ Deposition onto Soil and Cement Surfaces, *Atmos. Env.*, 12, 2315~2319.
- 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.
- Lee, H. W., J. K. Park, E. S. Jang and N. K. Moon, 1994, A Simulation for Dry Deposition Velocity of Air Pollutants over Various Surfaces. *J. Korean Envir. Sci. Soc.* 3(4) 367~371.
- McMahon T. A. and P. J. Denison, 1978, Empirical Atmospheric Deposition Parameters-A Survey, *Atmos. Env.*, 13, 571~585.
- McRae, G. J., W. R. Goodbim, and J. J. Seinfeld, 1982, Development of a Second- Generation Mathematical Model for Urban Air Pollution-1. Model Formulation, *Atmos. Env.*, 16, 679~696.
- Owen, P. R. and W. R. Thomson, 1963, Heat Transfer across Rough Surfaces, *J. Fluid Mech.*, 15, 321~334.
- Robert L. and C. E. Murphy, 1985, The Dry Deposition of Sulfur Dioxide and A Loblolly Pine Plantation, *Atmos. Env.*, 19, No.5, 797~802.
- Spedding D. J., 1969, Sulphur Dioxide Uptake by Limestone, *Atmos. Env.*, 3, 683.
- Thompson A. M. and O. C. Zafiriou, 1983, Air-Sea Fluxes of Transient Atmospheric Species, *J. Geophys. Res.*, 88, 6696~6708.
- Wesely M. L. and J. A. Eastman, 1982, An Eddy-Correlation Measurement of NO₂

- Flux to Vegetation and Comparison to O₃ Flux, Atmos. Env., 16, No.4, 815~820.
- Wesley, M. L. and B. B. Hicks, 1977, Some Factors that Affect the Deposition Rates of Sulfur Dioxide and Similar Gases on Vegetation, J. Air Poll. Control Assoc., 27, 1110~1116.
- 北田梅廣 L. K. Peters, 1980, CO-CH₄ 系のGlobalな輸送反應Model, 大氣汚染學會志, 15, 91~108.
- 河内成, 1980, 植物葉におけるオゾン吸収速度と氣孔擴散抵抗との關係, 大氣汚染學會志, 第15券, 第3號, 109~117.