

## 공기역학적 저항 모수화에 따른 오존의 건성침적속도 비교

이 화 운 · 문 난 경 · 노 순 아  
부산대학교 대기과학과  
(2002년 3월 11일 접수; 2002년 7월 5일 채택)

## A Comparison of Dry Deposition Velocity of Ozone to Aerodynamic Resistance Parameterization

Hwa Woon Lee, Nan-Kyoung Moon and Soon-A Roh  
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 617-736, Korea  
(Manuscript received 11 March, 2002; accepted 5 July, 2002)

The aerodynamic resistance( $R_a$ ) to vertical transfer in the surface boundary layer can be formulated in terms of the friction velocity, height of observation, vertical heat flux and surface roughness. Unlike previous studies which focused on the role of  $R_c$ , present study perform additional tests using a variety of  $R_a$  formulae. Several  $R_a$  formulations available in the literature, suitable for unstable conditions, were tested for their influence on the dry deposition velocity. The canopy resistance( $R_c$ ) determines the shape of the diurnal pattern, while a small amplitude diurnal cycle in  $V_d$  was attributed to the aerodynamic resistance. The aerodynamic resistance is the major contributor to the formation of spikes in nighttime and  $R_a$  is relatively important at night because the canopy resistance is smaller. All formulations show similar diurnal cycle and yield good agreement with the observations. Although present  $V_d$  formulations are suitable for numerical air quality models, the research must continue for further improvements in resistance parameterizations.

Key words : Dry deposition velocity, aerodynamic resistance, ozone

### 1. 서론

오존 건성침적속도에 대한 선행연구에서 canopy의 영향에 대한 연구가 이루어졌고, canopy 저항의 역할이 다른 저항에 비하여 우세하다는 것이 입증된 바 있다. 그러나 canopy 저항이 약화되는 때에는 공기역학적 저항이 중요한 역할을 함을 보인 연구<sup>1-4)</sup>와 공기역학적 저항의 다양한 모수화 방법을 비교한 연구가 이루어졌으며, 공기역학적 저항의 모수화에 관한 연구가 필요함이 논의되었다.<sup>3)</sup>

문난경<sup>1)</sup>은 주간 경우 canopy 저항이 건성침적속도에 가장 큰 영향을 미치고 풍속, 마찰속도, 지표 거칠기 길이 등의 요소는 그 영향이 뚜렷하지 않고 변화폭도 적게 나타남을 보였고, 반면 야간에는 침적속도 변화에 canopy 저항보다 풍속과 마찰속도,

거칠기 길이 등이 건성침적속도에 우세한 작용을 한다는 것을 보였다. 또한, 식물저항의 일변화가 크지 않은 겨울철의 건성 침적 속도에 공기역학적 저항이 큰 영향을 미친다는 결과가 나타난 바 있으며,<sup>2)</sup> Padro J. *et al.*<sup>3)</sup>의 연구에서 공기역학적 저항과 건성 침적 속도와의 관계가 밀접하며, Padro<sup>4)</sup>에서 공기역학적 저항이 영향을 미칠 수 있는 경우와 무시되어지는 경우가 있음을 보였다.

본 연구에서는 대기오염물질의 건성침적속도를 수치모델하기 위한 중요한 인자중 하나인 공기역학적 저항의 여러 가지 모수화 방법을 비교하고, 이들 모수화 방법으로 계산된 결과를 관측치에 비교하여 공기역학적 저항의 영향을 분석하였다.

### 2. 연구 방법

지표면 저항이 건성침적속도의 일변화에 큰 영향을 미치는 것에 비하여 공기역학적 저항은 오전과 야간의 건성침적속도에 영향을 미치며, 식물저항의

Corresponding Author : Hwa Woon Lee, Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 617-736, Korea  
Phone : +82-51-510-2291  
E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

일변화가 여름에 비해 크지 않은 겨울의 건성침적 속도에 비교적 많은 영향을 미친다.<sup>2)</sup> 이것은 공기역학적 저항이 마찰속도와 대기 안정도 그리고 지표 거칠기 등의 함수이므로 나타나는 결과이며, 몇 가지 모수화 방법이 제시되어왔다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 공기역학적 저항을 선행연구에 제시된 모수화 방법과 PNU/DEM(Pusan National University Deposition Model)의 모수화 방법을 이용하여 오존의 건성침적속도를 계산하고, 관측된 오존의 건성침적속도와 비교·분석하여 공기역학적 저항과 침적속도와와의 관계를 살펴보았다. 선행연구에서 제시된 공기역학적 저항 모수화 방법은 Monteith,<sup>5)</sup> Hatfield<sup>6)</sup>와 Choudhury<sup>7)</sup>를 사용하였고 이에 따른 건성침적속도를 계산하였다. 또한, 1988년 7월 7일에서 8월 30일까지 활엽수림에 대하여 실시한 EMEFS (Eulerian Model Evaluation Field Study, Canada 환경청, 1988)의 오존 건성침적 관측치를 사용하여 공기역학적 저항의 계산 방법에 따른 건성침적속도 계산 결과를 비교하였다.

### 3. 이론적 배경

건성침적이론에서 건성침적속도는 풍속, 마찰 속도, 지표 거칠기, 대기 안정도, canopy wetness 등의 영향을 받는데, 난류층의 공기역학적 저항(aerodynamic resistance), 층류층의 점성층 저항(sub-layer resistance) 그리고 지표면의 특성에 따른 오염물질의 수송시 발생하는 저항인 지표면 저항(또는 canopy 저항)을 포함하여 세 가지 저항을 고려하여 다음과 같이 계산되어진다.

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

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

#### 3.1. PNU/DEM의 모수화

본 연구에서 공기역학적 저항의 모수화에 따른 오존의 건성침적속도의 변화를 살펴보기 위한 PNU/DEM의 이론은 이화운 등<sup>8)</sup>에 나타나 있으며, 공기역학적 저항의 모수식은 다음과 같다.

$$R_a = (\ln(Z_r/Z_0) - \psi_H) / k u_* \quad (2)$$

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, 일정 플럭스층의 난류 수송 과정이 적용되지 않으며 입자에 대한 분자 확산이나 브라운 확산만이 의

미를 가진다. canopy 저항은 지표의 특징과 그 식생에 따라 가장 큰 차이를 보이므로 지표의 성질이 잘 고려되어야하므로, 기공 저항(stomatal resistance), 엽육 저항(mesophyll resistance), 표피 저항(cuticle resistance), 지면 저항(ground resistance)을 고려하여 구성되어졌다.

#### 3.2. Monteith의 모수화 방법

Monteith<sup>5)</sup>는 공기역학적 저항 모수화 식을 식(3)과 같이 표현하였다.

$$R_a = R'_a (1 - 5R_{iB})^{-2} \quad (3)$$

여기서,  $R'_a$ 는 대기가 중립상태일 때의 공기역학적 저항(Viney<sup>9)</sup>)이고 Monteith<sup>5)</sup>에 의한 공기역학적 저항은  $R'_a$ 에 비례하여 안정도에 의존하는 모수화 방법으로 표현된다.  $R'_a$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$R'_a = \frac{1}{\chi^2 u} \gamma_h \gamma_m \quad (4)$$

여기서,  $\chi$ 는 von Karman 상수를 나타내고  $u$ 는 풍속을 나타낸다.  $\gamma_h$ 와  $\gamma_m$ 은 다음 식(5)와 같다.

$$\gamma_h = \ln\left(\frac{z-d}{z_{0h}}\right), \quad \gamma_m = \ln\left(\frac{z-d}{z_{0m}}\right) \quad (5)$$

여기서,  $z$ 는 풍속과 대기온도의 측정고도이고,  $z_{0h}$ ,  $z_{0m}$ 는 각각 열(heat)과 운동량(momentum)의 거칠기 길이를 뜻한다.  $d$ 는 영점 변위 고도(zero displacement height)이다.

안정도를 나타내는 Bulk Richardson Number,  $R_{iB}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$R_{iB} = \frac{g(z-d)(T_a - T_s)}{u^2 T_a} \quad (6)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도이며  $T_a$ ,  $T_s$ 는 각각 대기와 지표면 온도를 나타낸다.

#### 3.3. Hatfield의 방법

Hatfield<sup>6)</sup>는 운동량 수송의 공기역학적 저항을 묘사하기 위해 Monteith<sup>5)</sup>에 의해 처음 제안된 중립이 아닌 상태에 대한 열수송의 공기역학적 저항을 다음과 같이 사용하였다.

$$R_a = R'_a (1 + 5R_{iB}) \quad (7)$$

여기서,  $R'_a$ 는 식(4)를,  $R_{iB}$ 는 식(6)을 각각 사용하였다.

#### 3.4. Choudhury의 방법

Choudhury *et al.*<sup>7)</sup>은 많은 시행착오를 통해 대기가 불안정한 상태일 때의 공기역학적 저항  $R_a$ 를 다음과 같이 나타내었다.

$$R_a = R'_a (1 - 5R_{iB})^{-\frac{3}{4}} \quad (8)$$

또한,  $R_a'$ 는 식(4)를,  $R_{iB}$ 는 식(6)을 각각 사용하였으며, 식(5)의 계산에 나타나는  $z_{0k}$ 를  $z_{oh} = z_{om}/7$ 로 가정하여 공기역학적 저항 모수화를 유도하였다.

3.5. 박순웅의 방법

박순웅<sup>10)</sup>은  $R_{iB}$ 에 따라 대기가 불안정한 상태일 때와 안정한 상태일 때 서로 다른 공기역학적 저항 식을 유도하였다.  $R_{iB}$ (Garratt<sup>11)</sup>)는 식(9)와 같다.

$$R_{iB} = \frac{g}{\theta_o} \frac{z_u^2(\theta_a - \theta_g)}{z_T \bar{u}_a^2} \quad (9)$$

여기서,  $z_T$ 와  $z_u$ 는 각각 대기온도와 풍속이 관측된 고도이며,  $g$ 는 중력가속도이고,  $\theta_o$ 는 평균 지표층 온도,  $\theta_a$ 는 고도  $z_T$ 에서 관측된 기온,  $\theta_g$ 는 지표면 온도를 나타내며,  $\bar{u}_a$ 는 고도  $z_u$ 에서 관측된 평균 풍속이다.

대기가 불안정한 상태( $R_{iB} < 0$ )에 대해 공기역학적 저항  $R_a$ 는 다음과 같다.

$$R_a = \frac{1}{C_{HN} \left[ 1 - \frac{10R_{iB}}{1 + b_H |R_{iB}|^{1/2}} \right] \bar{u}_a} \quad (10)$$

여기서,  $C_{HN}$ 은 대기의 중립 안정도에서 열에 대한 끌립 계수로 다음 식으로 표현된다.

$$C_{HN} = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z_u}{z_o}\right) \ln\left(\frac{z_T}{z_{oT}}\right)} \quad (11)$$

$k$ 는 von Karman 상수이고  $z_o$ 는 지표 거칠기 길이,  $z_{oT}$ 는 열적 지표 거칠기 길이를 나타낸다.

대기가 불안정한 상태의 공기역학적 저항 식(10)에서  $b_H$ 는

$$b_H = (6.3 - 0.18 C_{DN}^{-1/2}) C_{HN} 10 \left( \frac{z_T}{z_{oT}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

와 같고, 여기서  $C_{DN}$ 은 중립 안정도에서 운동량에 대한 끌립 계수이고 다음 식으로 표현된다.

$$C_{DN} = \frac{k^2}{\left[ \ln\left(\frac{z_u}{z_o}\right) \right]^2} \quad (13)$$

대기가 안정한 상태( $R_{iB} > 0$ )에 대하여  $R_a$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$R_a = \frac{1}{C_{HN} [(1 + 5R_{iB})^{-2}] \bar{u}_a} \quad (14)$$

4. 모수화에 따른 건성침적속도 비교

건성침적속도 연구에 있어 canopy 저항이 우세한 성분임이 입증된 바가 있지만 공기역학적 저항이 상대적으로 중요한 경우가 나타나며, 공기역학적 저항은 건성침적속도의 오전과 밤의 일변화 분포에

많은 기여를 하고 식물저항이 크지 않은 야간의 경우 침적속도 변화에 canopy 저항보다 풍속과 마찰속도, 거칠기 길이 등이 건성침적속도에 우세한 작용을 한다.

본 연구에서는 공기역학적 저항에 따른 건성침적속도를 살펴보기 위하여, PNU/DEM, Monteith, Hatfield, Choudhury, 박순웅의 공기역학적 저항 모수화 방법으로 계산된 건성침적속도와 관측된 건성침적속도를 비교하였다. 점성층 저항과 지표면 저항은 PNU/DEM의 방법을 사용하여 활엽수림에 대해 계산하였으며, 계산된 건성침적속도를 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 이때 1988년 여름 Canada 환경청에 의한 EMEFS의 관측된 기상자료를 사용하여 건성침적속도를 계산하였으며, 동일한 날 관측된 건성침적속도와 비교하였다.

Fig. 1(a)에서 PNU/DEM, Monteith, Hatfield, Choudhury, 박순웅의 공기역학적 저항을 사용한 경우는 관측된 건성침적속도와와의 관계에서 각각 0.2233, 0.1933, 0.2434, 0.2787, 0.2087의 평균 제곱근 오차 (root mean square error)를 나타내었다. 다섯 가지 모수화 방법은 부분적인 과대평가와 과소평가를 나타내며 관측값에 대체로 유사한 일변화를 보였다. 11시부터 15시 사이에는 모든 모수화 방법들이 과소평가를 보였으며, Monteith의 방법은 15시부터 20시 사이에 관측된 건성침적속도와 유사한 일변화를 보여 그 시간대의 다른 모수화 방법들이 과대평가를 보이는 것과 차이를 나타내었다. PNU/DEM과 박순웅의 방법을 사용한 경우 오전과 야간에 나타나는 관측값의 진동을 어느 정도 잘 따르고 있음을 볼 수 있었다.

Fig. 1(b)에는 각각의 방법으로 계산된 공기역학적 저항의 일변화를 나타내었다. PNU/DEM, Monteith, 박순웅의 공기역학적 저항분포를 보면, 오전과 야간의 건성침적속도 분포에 큰 진동이 나타나 이들 모수화 방법이 같은 시간대의 관측값에 유사한 일변화를 보이는데 기여한다. 또한 건성침적속도의 일변화에서 나타나는 오전과 야간의 진동은 Fig. 1(b)에서 나타난 공기역학적 저항의 영향이 반영된 것으로 설명될 수 있다. 주간의 공기역학적 저항은 비교적 작은 값을 나타내어 같은 시간에 큰 값을 보이는 canopy 저항과 차이를 보이며, 이로 인해 건성침적속도의 주간 분포는 canopy 저항의 경향을 주로 따른다는 것을 알 수 있다.

따라서 공기역학적 저항은 건성침적속도 일변화의 크고 작은 진동, 특히 오전과 야간의 진동을 나타내는데 기여함을 알 수 있으며, 야간에는 canopy 저항의 건성침적속도에 대한 기여가 낮으므로 상대

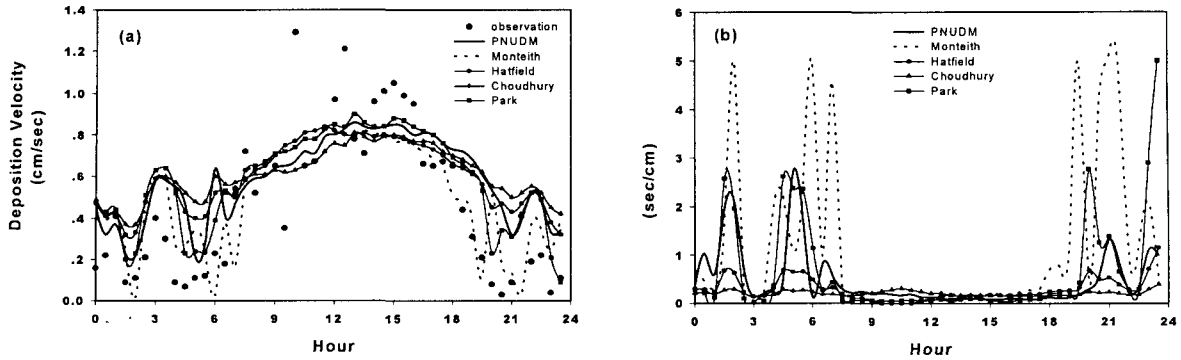


Fig. 1. Diurnal variations of (a) the dry deposition velocity of  $O_3$  obtained from PNU/DEM  $R_b$ ,  $R_c$  and  $R_a$  for PNU/DEM, Monteith's method, Hatfield's method, Choudhury's method and Park's method and (b) calculated  $R_a$ s.

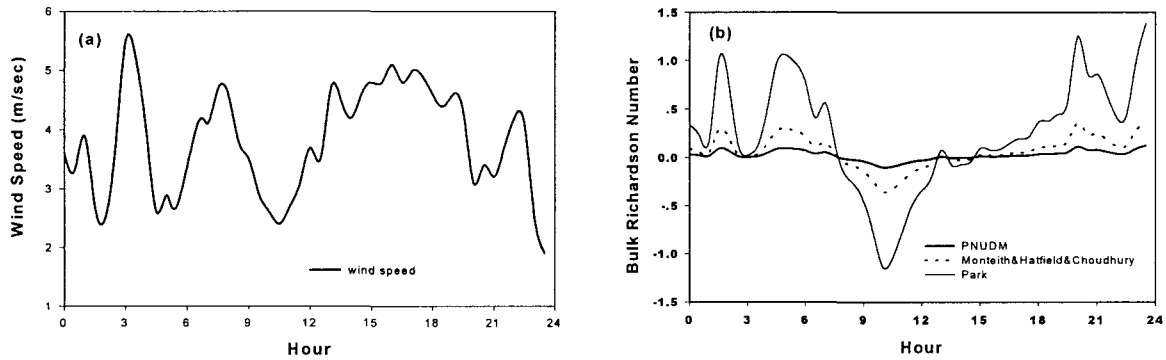


Fig. 2. Diurnal variations of (a) observed wind speed and (b) calculated bulk Richardson number over the deciduous forest in summer.

적으로 공기역학적 저항의 영향이 중요해진다고 할 수 있다.

건성침적속도에 영향을 미치는 풍속, 마찰속도, 안정도와와의 관계에 대한 기존 연구<sup>1)</sup>에 근거하여 풍속과 안정도 분포를 살펴보았다. Fig. 2(a)에 건성침적속도를 계산하기 위해 사용된 풍속과 Fig. 2(b)에 안정도를 나타내는 파라미터(parameter)인  $R_{iB}$ 를 나타내었는데, 식(6)에 나타난 것처럼 Monteith, Hatfield와 Choudhury의 공기역학적 저항 모수화 방법은 동일한  $R_{iB}$ 를 사용하므로 Monteith, Hatfield, Choudhury의  $R_{iB}$ 와 PNU/DEM의  $R_{iB}$ , 그리고 박순웅의  $R_{iB}$ 를 비교하였다. 공기역학적 저항의 오전과 야간에 나타나는 진동은 Fig. 2(a)에 나타난 동일한 시각의 풍속의 영향으로 사료되고 풍속의 영향이 잘 반영된 결과로 볼 수 있다. 새벽과 야간의 건성침적속도와 풍속의 분포를 보면 상당히 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 2(a)에 나타난 야간의 풍속 분포와 Fig. 1(a)에 나타나는 야간의 건성

침적속도 진동이 유사함을 볼 수 있으며, 야간에 나타나는 순간적인 건성침적속도의 진동은 풍속의 영향에 의한 것임을 알 수 있다. 이상에서 풍속의 분포는 건성침적속도의 순간적으로 크게 나타나는 진동과 건성침적속도의 크고 작은 변화를 결정한다고 할 수 있다. 박순웅의 방법을 사용한 건성침적속도에서 오전과 야간에 나타나는 진동은 공기역학적 저항의 영향에 의한 것이며, Fig. 2(b)에서 나타나듯 다른 방법들에 비해 큰 값으로 나타나는  $R_{iB}$ 의 진동이 계산에 반영된 것으로 사료된다. 주간에는 다섯 가지 방법을 이용한 건성침적속도가 거의 비슷한 분포를 보이는데, 같은 시간대에 공기역학적 저항의 차이가 잘 나타나지 않은 것과 관계되며, 풍속의 영향보다는 Fig. 2(b)에 나타난 안정도와 관계된 것으로 사료된다.

따라서 건성침적속도의 계산에 있어 풍속의 분포는 오전과 야간에 나타나는 건성침적속도의 순간적인 진동과 건성침적속도의 크고 작은 변화를 결정한다고 할 수 있으며, 안정도의 영향이 건성침적속

도 일변화의 우세한 흐름을 결정하는데 반영된다고 할 수 있다.

그리고 PNU/DEM의 공기역학적 저항 모수화 방법은 여러 가지 다른 공기역학적 저항 모수화 방법 및 관측 자료와의 비교에서 좋은 결과를 보였으며, 이를 사용한다면 보다 정확한 건성침적속도의 추정에도 유용할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 여름철 활엽수림에서 오존에 대한 공기역학적 저항 모수화 방법에 따른 건성침적속도를 살펴보기 위하여, PNU/DEM, Monteith, Hatfield와 Choudhury의 공기역학적 저항 모수화 방법에 대하여 건성침적속도를 계산하고 그 결과를 관측값과 비교하였다. 건성침적속도 계산 결과의 검증을 위하여 사용된 관측값은 Canadia의 활엽수림에서 실시된 EMEFS 자료이다.

PNU/DEM, Monteith, Hatfield, Choudhury, 박순웅의 공기역학적 저항을 사용한 경우, 부분적인 과대평가와 과소평가를 나타내며 관측된 건성침적속도와와의 관계에서 각각 0.2233, 0.1933, 0.2434, 0.2787, 0.2087의 평균 제곱근 오차(root mean square error)를 나타내어 관측값에 대체로 유사한 일변화와 분포를 보였다. 따라서 PNU/DEM의 공기역학적 저항 모수화 방법 및 관측 자료와의 비교에서 좋은 결과를 보여 건성침적속도의 추정에 유용함을 알 수 있었다.

이들 모수화 결과를 통해, 지표면 저항이 건성침적속도 일변화의 패턴을 결정하는 반면 공기역학적 저항은 일변화의 크고 작은 진동, 특히 야간의 진동을 나타내는데 기여함을 알 수 있었다. 이를 통해 식생에 의한 저항의 영향이 약화되는 야간에는 상대적으로 공기역학적 저항의 영향이 중요해진다고 할 수 있었다.

또한 공기역학적 저항을 계산하기 위한 요소 중 풍속과 안정도를 분석하였으며, 건성침적속도의 계산에 있어 풍속의 분포는 오전과 야간에 나타나는 일변화의 순간적인 진동과 크고 작은 변화에 영향을 미침을 알 수 있었다. 그리고, 안정도의 영향이 건성침적속도 일변화의 우세한 흐름을 결정하는데 반영된다고 할 수 있었다.

현재의 건성침적속도 모수화 방법이 수치모델에 대해 적합하긴 하지만, 보다 향상된 저항의 모수화를 위해서 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료되며, 활엽수림이 아닌 다른 지표면과 다른 계절에 대한 공기역학적 저항과 canopy 저항에 대한 모수화 방법에 대한 검증과 연구가 계속적으로 이

루어져야 할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 1999년도 부산대학교 학술연구조성비에 의하여 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) 문난경, 1996, 중규모에서의 대기 오염 물질 침적 모델에 관한 연구, 부산대학교 일반대학원 석사 학위논문.
- 2) Padro, J., H. H. Newmann, and G. D. Hartog, 1991, An investigation of the ADOM dry deposition module using summertime O<sub>3</sub> measurements above a deciduous forest. *Atmospheric Environment*, 25A, 8, 1689-1704.
- 3) Padro, J., W. J. Massman, R. H. Shaw, A. Delany, 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, *Boundary-Layer Meteorology*, 71, 327-339.
- 4) Padro, J., 1996, Summary of ozone dry deposition velocity measurements and model estimates over vineyard, cotton, grass and deciduous forest in summer, *Atmospheric Environment*, 30, 2363-2369.
- 5) Monteith, J. L., 1973, *Principles of environmental physics*, Arnold London, G.B., 241pp.
- 6) Hatfield, J. L., 1983, Evapotranspiration obtained from remote sensing methods, *Adv. Irrig.*, 2, 395-416.
- 7) Choudhury, B. J., R. J. Reginato, and S. B. Idso, 1986, An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux, *Agric. For. Meteorol.*, 37, 75-88.
- 8) 이화운, 김유근, 문난경, 2000, 하계 활엽수림에서의 대기오염물질 건성침적속도의 일변화 추정, *한국기상학회지*, 309-316.
- 9) Viney, N. R., 1991, An empirical expression for aerodynamic resistance in the unstable boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 381-393.
- 10) 박순웅, 1995, 건성 침착이 지상 오염 농도에 미치는 영향, *한국기상학회지*, 31, 2, 97-115.
- 11) Garratt, J. R., 1992, *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, 316pp.