

碩士學位論文

제주도 서부지역에서의 SO₂ 및 O₃
건성침적플럭스 추정에 관한 연구



濟州大學校 大學院
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

環境工學科

李 妍 美

2001年 12月

제주도 서부지역에서의 SO₂ 및 O₃ 건성침적플릭스 추정에 관한 연구

指導教授 李 起 浩

李 姬 美

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2001年 12月



李姬美의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	許 喆 九 印
委 員	甘 相 奎 印
委 員	李 起 浩 印

濟州大學校 大學院

2001年 12月

A Study on the Estimation of Dry Deposition Fluxes of
SO₂ and O₃ over the western area in Jeju Island, Korea.

Joung-Mi Lee
(Supervised by professor Ki-Ho Lee)



A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

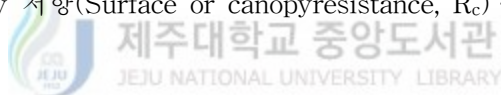
Department of Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2001. 12.

목 차

Summary

I. 서론	1
II. 이론적 고찰	3
1. 건성침적플럭스 산정	3
2. 건성침적속도	4
3. 다층저항모델	6
3.1. 공기역학적 저항(aerodynamic resistance, R_a)	8
3.2. 준-라미나 경계층저항(quasi-lamina boundary layer resistance, R_b)	10
3.3. Canopy 저항(Surface or canopy resistance, R_c)	11
III. 연구방법	17
1. 모델적용 대상 지역	17
2. 기상 및 대기질 자료	17
3. 모델에 사용한 입력자료	19
3.1. 오염물질 관련 입력자료	19
3.2. 식생 관련 입력자료	19
3.3 canopy 표면의 젖은 정도(wetness)의 산출	31
IV. 결과 및 고찰	22
1. 건성침적속도의 변동 특성	22
가. SO_2 의 건성침적속도	22
나. O_3 의 건성침적속도	30
2. 오염물질 농도의 변동 특성	37
가. SO_2 의 오염물질 농도	37
나. O_3 의 오염물질 농도	39



3. 건성침적플럭스	40
가. SO ₂ 의 건성침적플럭스	40
나. O ₃ 의 건성침적플럭스	42
다. 건성침적플럭스 평가	42
V. 결론	46
VI. 참고문헌	47



List of Figures

- Fig. 1. Schematic description of pathway multiple resistance for the dry deposition of gaseous pollutants used in Hicks(1987).
- Fig. 2. Topography of the model domain and the site of surface meteorological observation and air pollution monitoring.
- Fig. 4.1. The annual averaged diurnal variation of dry deposition velocity for SO_2 .
- Fig. 4.2. The diurnal variation of dry deposition velocity for SO_2 according to each season.
- Fig. 4.3. Comparison of dry deposition velocity of SO_2 and the relative humidity in ambient air.
- Fig. 4.4. Diurnal variation of dry deposition velocity for SO_2 over dry and wet surface.
- Fig. 4.5. Monthly variation dry deposition velocity for SO_2 .
- Fig. 4.6. The diurnal variation of canopy resistance for SO_2 .
- Fig. 4.7. The diurnal variation of dry deposition velocity for O_3 .
- Fig. 4.8. The diurnal variation of dry deposition velocity for O_3 according to each season.
- Fig. 4.9. A comparison of dry deposition velocity values between wet and dry surface for O_3 .

Fig. 4.10. Comparison of dry deposition velocity of O_3 and the relative humidity in ambient air.

Fig. 4.11. Comparison of dry deposition velocity of O_3 and the occurrence number of wet surface.

Fig. 4.12. Monthly variation of the dry deposition velocity for O_3 .

Fig. 4.13. The diurnal variation of canopy resistance for O_3 .

Fig. 4.14. The diurnal variation of average hourly concentrations of SO_2 .

Fig. 4.15. The diurnal variation of average hourly concentrations of O_3 .

Fig. 4.16. The diurnal variation of SO_2 dry deposition flux.

Fig. 4.17. Monthly variations of dry deposition flux and concentration for SO_2 .

Fig. 4.18. Comparison of dry deposition fluxes between daytime and nighttime for SO_2 .

Fig. 4.19. The diurnal variation of O_3 dry deposition flux.

Fig. 4.20. Monthly variations of dry deposition flux and concentration for O_3 .

Fig. 4.21. Comparison of dry deposition fluxes between daytime and nighttime for O_3 .

List of Tables

- Table 3.1. Information of acquired data for model application
- Table 3.2. The properties of gases of interest and some resistances and parameters estimating dry deposition velocities
- Table 3.3. Parameters and their values associated with plants
- Table 4.1. The number of times treated wet surface in the model run and the averaged dry deposition velocities of SO_2 over wet or dry surface
- Table 4.2. The value of dry deposition velocity for SO_2
- Table 4.3. The value of dry deposition velocity for O_3
- Table 4.4. The estimated dry deposition fluxes

Summary

This study is performed to estimate the dry deposition velocities and fluxes of SO₂ and O₃ over the western area in Jeju Island with the clean outdoor air in Korea. For this propose, the multi-layer resistance model is used together with the meteorological data and the ambient air quality monitoring data observed from December 1999 to November 2000 at the same site. From this study, some conclusions can be obtained.

In the western area in Jeju Island, the annual averaged dry deposition velocities of SO₂ shows 0.246±0.091 cm/s. The dry deposition velocity(V_d) of SO₂ shows the highest value of 0.408 cm/s in summer and the lowest value of 0.0999 cm/s in winter. The summer V_d is over 4.0 times of its winter value. The nightttime V_d is higher than that for daytime over the entire times except for winter. It can be concluded from these results that the V_d of SO₂ may be influenced by ground coverage and the surface wetness. Especially, the nightttime surface wetness highly enhances the uptake of SO₂, that is, the V_d of SO₂.

In the case of O₃, the V_d shows 0.097±0.027 cm/s in the annual average. The highest value of O₃ dry deposition velocity is 0.111 cm/s in summer and its lowest value of 0.08 cm/s appears in winter. It can be shown that there is not remarkable seasonal fluctuation in the V_d of O₃. The diurnal variation of V_d of O₃ shows that the V_d has low and constant values during the nighttime. On the other hand, during the daytime, the V_d initially increases with the time then begins to decreases. The maximum value occurs at the time between 13:00 and 14:00. In contrast to SO₂, the pronounced contrast between the wet and dry surfaces does not appear in the V_d of O₃.

The annual averaged dry deposition flux of SO₂ shows the value of 0.0086 μg/m²·s, which is very low compared to those for other regions in Korea. The SO₂ flux is the highest in summer and the lowest in winter. The difference of values between seasons is comparatively large. In the case of O₃, although the O₃ concentration in the ambient air over the entire area of Jeju Island is relatively higher than those for other region in korea, the flux

of O₃ shows the value of 0.098 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ in annual average, which is comparatively lower than other regions.



I. 서론

대기 중에 존재하는 오염물질이 지표면으로 침적되면 외부에 노출된 물질(물체)를 부식시킬 뿐 아니라 토양 및 수질에 영향을 미치게 되고 식물체에 직접적인 해를 끼칠 수 있다는 사실은 잘 알려져 있다. 이러한 대기오염물질의 제거 기작으로는 크게 습성침적(wet deposition)과 건성침적(dry deposition)으로 구분할 수 있다. 습성침적(wet deposition)은 응축, 흡수, 그리고 흡착의 방법으로 구름, 비, 눈 등과 입자상 및 가스상 오염물질의 상호작용에 의해 표면으로 침적하는 것이며, 건성침적(dry deposition)은 중력침강(sedimentation), 확산(diffusion), 충돌(impaction) 그리고 차단(interception) 등의 방법으로 입자상 및 가스상 물질들이 표면에 부착(uptake)함으로써 대기로부터 직접 표면으로 침적되어 제거되는 것을 의미한다(이병규, 1998). 이것은 표면과의 반응에 의한 가스상 물질의 흡수 및 중력과 난류에 의한 입자상 물질의 침적 과정을 포함한다(이종범 등, 1998). 이처럼 대기 침적 현상은 대기 중에서 주요한 세정 효과로 작용하며, 대기 중에 존재하는 각종의 화학물질을 대기로부터 자연계의 각종 표면으로 수송하는 중요한 역할을 하고 있다(Wesely, 1989). 그러므로 침적과정은 대기 중 오염물질의 체류시간 및 수송거리를 제한하고 대기중의 오염물 농도를 조절하게 되므로, 이에 대한 정확한 이해는 인위적인 오염 물질에 의한 환경문제를 평가하는데 있어 필수적이라 할 수 있다(Jung, 1996).

건성침적에 관해서는 일찍이 영국의 원자로 사고시 조사된 Chamberlain 등(1966)의 측정을 시작으로 많은 연구가 진행되어 오고 있으며, 근년에는 입자상 물질이외에 aerosol, ozone, PAN 등에 대해서도 행해지고 있다((Brimblecombe와 Spedding, 1974), (Whelpdale와 Shaw, 1974), (McMahon 등, 1976), (Sehmel, 1980)(Lee 등, 1989)). 산성 강하물 중에서도 건성침적플럭스는 1990년대 이후 매년 지속적으로 증가하고 있으며, 습성 침적량에 버금갈 정도로 알려져 있다. 최근 미국의 동남부 삼림지역에서의 연구에 의하면 습성침적과 건성침적을 합한 총 침적량 가운데 황(sulfur)의 30~60%, 질소(nitrogen species)의 30~70%가 건성침적에 의해 일어난다고 최근 연구가 지적하고 있으며, 북동미 지역은 전체 산성침적의 약 1/2 정도가 강우현상이 없을 때 일어난다고 보고하였다

(NAPAP, 1991). 그리고 대기 침적 현상에 의한 수체(water body)에의 영향에 관한 연구를 보면, 미국 5대 호에서 남 총량의 95% 이상이 대기로부터 기인한다고 밝히기도 했다. 미국 동부 체사피크 만의 경우 적조 현상의 원인 물질인 질소에 대한 대기 기여도가 25~40%에 이르는 것으로 보고되기도 했다. 이로써 산성전구 물질(acid precursors)의 경계층 내에서의 농도는 건성침적에 의해 조절될 수 있다. 이러한 연구결과들로 인해, 생태환경을 개선하기 위해서는 대기로부터 유입되는 오염물질의 근원적인 규제가 필수적인 사항으로 인식되고 있다.

우리나라의 경우 인접한 중국의 급속한 에너지 사용량 증대에 따른 대기오염 물질 배출량 증가에 의한 영향을 직·간접적으로 받을 수 밖에 없을 뿐 아니라 황사로 불리는 Asian dust의 영향권 내에 위치하고 있다. 따라서 우리나라로 유입되는 대기오염물질은 물론 자체적으로 배출된 오염물질의 침적량을 산정할 필요가 있다. 특히 제주도의 경우 우리나라 뿐 아니라 동북아의 대기오염물질 배경 농도를 관측할 수 있는 청정한 대기질을 유지한다고 알려져 있어 제주도에서의 대기침적량 산정에 관한 연구가 필요하다고 판단되나 현재까지는 연구가 이루어져 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라에서 배경농도를 관측할 수 있다고 판단되는 지역에서의 기체상 오염물질의 건성침적플럭스(dry deposition flux)의 수준을 평가해 보고자 시도하였다. 그렇지만 아직 제주도 전체의 식생대에 관한 종합적이고 구체적인 식물 상태 및 생리 자료가 체계적으로 파악되어 있지 않아 제주도 전역에 대한 건성침적플럭스 평가에는 어려움이 있으므로 본 연구에서는 제주도에서도 대부분이 농경지로 이루어진 서부 지역을 대상으로 SO₂와 O₃의 건성침적플럭스의 수준을 다층저항모델을 적용하여 평가해 보고자 했다. 이를 위해서 제주 서부지역에서 관측된 기상자료와 대기오염 자동측정망에서 측정된 농도 자료를 근간으로 다층저항모델에 의한 침적속도를 수치모의하고 건성침적플럭스를 구하였다.

이로써 향후 제주도로 유입되는 오염물질의 피해를 평가할 수 있고, 나아가 산림 생태계나 기타 생태계에 침적하는 오염물질, 특히 산성 물질의 침적플럭스 등을 정량적으로 평가함으로써 자연 생태계를 체계적으로 관리할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

II. 이론적 고찰

1. 건성침적플럭스 산정

지표층에서의 건성침적은 열, 수분 그리고 운동량의 표면 플럭스와 동일한 대기 교환 기구의 결과로서 나타난다. 따라서 지표층에서의 건성침적은 지면의 물리, 화학적 및 생물학적 특성에 크게 영향을 받게 된다.

습성침적의 경우 비교적 관측과 분석이 용이한 잇점 때문에 강수(설)샘플지점에서 빗물이나 눈 시료의 산성물질(acid species)을 통하여 많은 분석·연구가 수행되어져 왔다. 그러나 건성침적은 지형, 기상조건, 국지적인 오염원 등의 영향이 크기 때문에 정확한 건성침적플럭스를 추정하는데 어려움이 있어 건성침적에 의한 유입을 평가하는 것은 간단한 문제가 아니다.

대기오염물질의 건성침적플럭스(F)를 산출하는 방법으로는 와상관법(eddy correlation method)과 경도법(gradient method)이 많이 이용된다. 전자는 연직 바람(w)과 오염물질 농도의 순간 변동량(C')을 측정하여 이들 곱에 대한 평균($F = \overline{w' C'}$)으로 침적플럭스를 직접 산출하는 방법이다. 이를 위해서는 초음파 풍속 온도계 등과 같은 감응속도가 매우 빠른 난류 측정장치와 농도 측정장치가 필요한데, 이들은 고가일 뿐 아니라 다루기 어렵다. 또한 오염물질 농도의 변동량을 측정하는 것도 아주 어렵다. 따라서 이러한 미기상학적인 방법들을 현장 측정점에서 일상적으로 적용하기에는 너무 복잡하여 아직까지는 실용적이지 못하다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 실제 관측된 오염물질의 대기 중 농도자료와 기상요소자료들을 근거로 건성침적플럭스를 추정할 수 있는 모델을 통한 연구가 많이 수행되어져 왔다. 여기서는 대기 중 오염물질 농도와 건성침적 플럭스를 연결하는 인자로서 건성침적속도(dry deposition velocity)를 이용하여 이 건성침적 속도와 평균 농도의 곱으로부터 침적량($F = V_d C$)을 계산하게 된다. 그러므로 이 모델에서는 건성침적속도의 추정은 중요한 관건이 된다. 건성침적속도는 대기의 난류 및 지표면 상태에 의존하기 때문에 정확한 난류측정자료가 필요하다. 앞에서 서술한 초음파 풍속온도계 등을 이용할 경우 3차원 바람의 변동 성분 및 온도

의 변동성분을 측정함으로써 원하는 평균화 시간에 대한 여러 가지 난류자료를 얻을 수는 있으나 쉽지 않기 때문에 기상탑을 설치하여 두 층에서 측정한 평균 기상자료를 얻고, 이를 평균농도자료와 함께 공기역학적 접근 방법으로 오염물질 플럭스를 산출하는 경도법(gradient method)을 이용할 수 있다(이중범 등, 1998).

2. 건성침적 속도

건성침적의 중요성은 크게 인식되어지고 있음에도 불구하고 건성침적의 정량화에는 시/공간에 따른 변화와 표면과 대기 사이의 상호 작용 등이 영향을 미칠 수 있기 때문에 건성침적 현상의 추정 및 평가방법론에 있어서 많은 불확실성이 존재하고 있다. 다시 말해 침적속도를 고려하기 위한 구체적인 정보가 부족하다는 것이 현재까지 수행된 많은 모니터링 프로그램에서 제약요인이 되고 있는 실정이다. 현재까지 모델의 적용을 위한 많은 노력이 이루어져 왔을 뿐 아니라 기존의 모델이 안고 있는 문제점을 해결하고자 하는 시도도 많이 있었다. 특히 침적현상의 지표(indicator)라 할 수 있는 건성침적속도를 추정하기 위한 모델의 개발에 많은 연구가 이루어져 왔다. 이로써 몇몇 화학종에 대한 건성침적속도에 대해서는 이제 심도 있는 측정 프로그램을 통해서 측정되거나 또는 구체적으로 선정된 지배변수들을 실제 측정하는 것을 전제로 유도된 적절한 모델을 적용함으로써 계산될 수가 있다.

지표층에서의 오염물질 플럭스 (F_c)는 일반적인 미기상학적 방법에 의해 다음과 같이 국지농도의 수직 구배향으로 추정된다.

$$F_c = - (k u_* z) \frac{(dC/dz)}{\Phi_c(z/L)} \quad (1)$$

여기서 k 는 von Karman 상수이고 u_* 는 마찰속도이다. 대기안정도 (Φ_c)는 안정도 의존 무차원 농도구배이고 안정도는 고도 (z)와 Monin-Obukhove length scale (L)의 향으로 정량화된다. 미기상학적 flux-gradient 상관관계를 침적이 일어나는 고도 z 에서 지표까지 높이에 따라 적분하면

$$C_z - C_{oc} = (F_c / k u_*) [\ln(z/z_{oc}) - \Psi_c(z/L)] \quad (2)$$

가 된다. 여기서 C_{oc} 는 유효 표면에서의 오염물질 농도이고, 수정된 거칠기 길이 (z_{oc})는 거칠기 길이(z_o)에서 경계조건 $C_z = C_{oc}$ 에 대해서 얻어진 적분 상수이다. z_{oc} 는 현열과 수증기와 같은 특정 경우에 식물의 기공 효과를 설명하기 위해서 반드시 고려된다. z_{oc} 와 z_o 의 차이는 다음과 같은 확장된 방정식으로서 강조할 수 있다. 따라서 식(2)는

$$C_z - C_{oc} = (F_c / ku_*) [\ln(z/z_{oc}) + \ln(z_o/z_{oc}) - \Psi_c(z/L)] \quad (3)$$

로 된다.

건성침적을 다루는 일반적인 방법으로 저항유사법(resistance analogy)이 사용되며(Fowler(1978), Garland(1977), Thom(1975), Chamberlain(1966)), 식(3)에서 공기역학적 저항(R_a)는

$$R_a = (1/ku_*) [\ln(z/z_o) - \Psi_c(z/L)] \quad (4)$$

이고, 표면에 접해 있는 준-laminar 층을 통한 저항(R_b)은

$$R_b = (1/ku_*) \ln(z_o/z_{oc}) \quad (5)$$

이다.

한편, 접지층에서의 오염물질 플럭스를 이해하기 위해서는 유효표면에서의 오염물질 농도(C_{oc})를 알아야만 한다. 표면이 젖지 않는 한 C_{oc} 는 통상 0은 아니지만 식물에서 SO_2 농도는 기공 구멍에 노출된 엽육세포 근처 대기에서는 거의 0의 값을 갖는다. 따라서 식물 canopy 전체에 대한 기공 저항의 효과를 하나의 항, 즉 Canopy 저항(R_c)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{oc} = F_c R_c \quad (6)$$

식 (3)과 (6)에서 C_{oc} 를 소거하면, 저항유사법에 의한 저항과 측정된 대기오염물질의 농도 및 건성침적 플럭스의 관계는

$$C_z = (F_c / ku_*) [\ln(z/z_o) - \Psi_c(z/L) + ku_* R_b + ku_* R_c]$$

$$= F_c(R_a + R_b + R_c) \quad (7)$$

로 된다.

일반적으로 오염물질 질량 플럭스 (F_c)는 지표 부근의 대기 내 오염물질 농도에 선형적으로 비례하는 것으로 가정하여

$$F_c = V_d C \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 V_d 는 비례상수로서 속도의 차원을 가지고 있으므로 건성침적속도라고 일컫는다. 따라서 식(7)과 (8)으로부터 건성침적속도 (V_d)는 물질의 이동에 대한 총 저항을 직렬저항들의 합의 역으로써 계산하여 추정할 수 있다.

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (9)$$

3. 다층저항모델



가스상 오염물질의 건성침적과정은 기상 조건, 대기 농도, 표면 형태(조건), 화학적 성질 등 복합 특성들의 함수이다. 이처럼 복잡한 건성침적과정을 모델링 하기 위해 사용된 주 메카니즘은 대기 중에서 지표면으로 오염물질이 수송되어서 나타나는 건성침적 플럭스를 추정하기 위해서 Fig. 1에서와 같이 3가지 수송 즉, 대기중의 오염물질들을 표면위 수 밀리미터 내부까지 난류확산에 의한 수송, 표면 가까이의 층류 경계층을 통한 수송, 그리고 가스상 또는 입자상 물질이 표면에 흡착 또는 흡수되는 표면에 대한 수송과정으로 나누어 각각의 메카니즘들은 침적 저항으로서 통합시키게 된다. 즉 이에 대해서 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 Hicks 등(1987)에 의해 개발된 다층저항모델 (multiple layer resistance model)에서는 오염물질 제거문제에 대한 V_d 를 평가함에 있어서 3가지 수송과정을 3가지 저항의 개념 즉, 공기역학적 저항 (R_a), 준-라미나 경계층 저항(R_b), 그리고 canopy 저항(R_c)을 분리된 각 층에 도입하여 각각의 수송저항을 관련된 매개변수를 사용하여 표현함으로써 침적속도를 계산하도록

하고 있다. 이때 침적속도에 대한 관계식을 얻기 위해서 오염물질의 플럭스는 층 내에서는 일정하다고 가정하고, 경계면에서의 에너지와 물질 교환은 대부분 와류와 밀접하게 관련되어 있기 때문에 보통 미량 기체에 대한 난류 확산계수는 난류 층을 통한 열 확산계수와 같다고 가정한다.

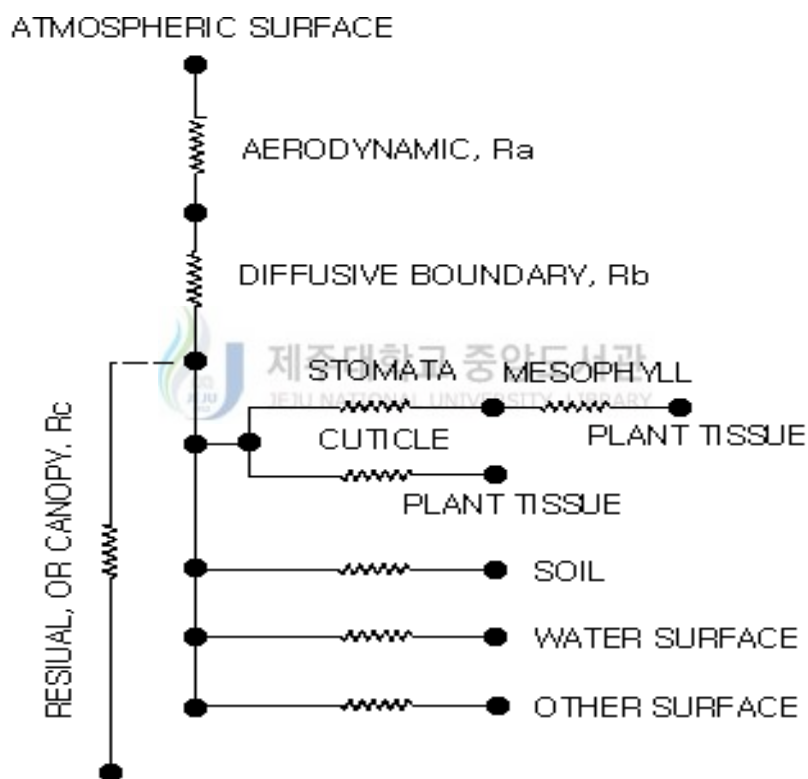


Fig. 1. Schematic description of pathway multiple resistance for the dry deposition of gaseous pollutants used in Hicks(1987).

3.1. 공기 역학적 저항(aerodynamic resistance, R_a)

공기역학적 저항은 대기로부터 표면 층류 경계층까지 물질의 난류 확산을 설명하는 것으로서 대기의 상태(풍속, 대기 안정도 등)와 표면의 성질에 따른 거칠기에 의해서 전적으로 결정된다는 사실은 이미 많은 연구자들에 의하여 구체적으로 설명되었다. 따라서 R_a 는 저층 대기에서 안정도와 풍속을 사용하여 식 (10)과 같이 표준 미기상학적 접근방법으로 계산될 수 있다.

$$R_a = (1/ku_*)[\ln(z/z_o) - \Psi_c(z/L)] \quad (10)$$

즉, R_a 는 대기 난류 교환에 의해 지배받는다. Hicks 등(1987)은 표준 미기상학적 접근 방법은 복잡하며 대기 안정도의 정확한 구별이 요구되므로 난류를 직접 측정하는 것이 더 좋은 접근 방법이라고 제안했다. 난류는 풍향의 표준편차 (σ_θ)로서 표현되며 개념적으로 σ_θ 는 표면 거칠기와 대기안정도에 대한 정보를 포함한다. 이를 보다 면밀하게 근사시키기 위해서 σ_θ 는 횡단면 풍속 성분의 표준편차 (σ_v)의 항으로서 표현할 수 있다.

$$\sigma_\theta \approx \sigma_v/u = [\sigma_v/u_*][u_*/u] = k[\sigma_v/u_*][\ln z/z_o - \Psi_m(z/L)] \quad (11)$$

이때 $\Psi_c(z/L)$ 과 $\Psi_m(z/L)$ 의 관계는 안정 및 중립조건에서는 거의 같다고 가정되며, 불안정조건에서는 통상적으로 R_a 가 다른 저항과 비교해서 상대적으로 낮기 때문에 이들 차이는 실제 중요성이 거의 없다고 본다. 결국 식(10)은

$$R_a \approx [\sigma_v/u_*]^2 / [u\sigma_\theta^2] \quad (12)$$

으로 나타낸다. 한편 R_a 는 대기 안정도에 따라 달라지게 된다. 즉, 거의 안정 및 중립된 성층에서는 σ_v/u_* 의 비는 약 2이며 불안정이 시작된 후에는 급격히 증가하여 3에 가까운 값으로 점진적으로 접근하게 된다. 따라서 R_a 계산은 현장관측을 통한 실제 경험적인 식에 의해

$$R_a \approx 4/[u\sigma_\theta^2] \quad (\text{안정} \cdot \text{중립조건})$$

$$R_a \approx 9/[u\sigma_\theta^2] \quad (\text{불안정조건}) \quad (13)$$

으로 간략화 할 수 있다(Hicks, 1981).

이처럼 다층저항모델에서 공기역학적 저항, R_a 에 대한 매개 변수화는 풍속과 난류강도의 측정치에 기초하여 난류 실측치인 풍향의 표준편차, σ_θ 을 이용하여 식 (12), (13)에 의거하여 계산된다. 그렇지만 현실적으로 모델의 입력자료 중 canopy wetness와 σ_θ 등에 대한 관측자료는 직접 적으로 제시하기 곤란한 경우가 많다. 따라서 σ_θ 가 관측되지 않을 경우에는 표준 미기상학적 접근방법을 이용하여 대기 안정도에 따른 함수로서 R_a 를 구할 수 있다. 즉 다음 식과 같이 난류 발생 소멸의 판정 조건을 확산 계수를 이용하여 대기 경계층에서 안정도 지표로서 gradient Richardson 수, R_{iB} 를 계산하였다.

$$R_{iB} = \frac{9.81 \times Z_{HT} \times \Delta\theta}{\theta \times U^2} \quad (14)$$

여기서 Z_{HT} 는 관측기준 높이이고 $\Delta\theta$ 는 $(\theta_z - \theta_0)$ 로서 관측높이와 지면에서의 온위의 차이를 말한다. 마찰속도 (u_*)는 운동량에 대한 미분계수 (F_m)에 의해 식 (15)과 (16)과 같이 계산되어진다(Louis, 1979).

대기가 불안정한 경우($R_{iB} \leq 0$)는

$$U_* = U \times [(C_{DN} \times F_m)^{0.5}] \quad (15)$$

$$\text{여기서 } F_m = 1 - \frac{9.4 \times R_{iB}}{(1 + 7.4 \times BB)}$$

이고, 대기가 안정할 때($R_{iB} > 0$)는

$$U_* = U \times [(C_{DN} \times F_m)^{0.5}] \quad (16)$$

$$\text{여기서 } F_m = \frac{1}{(1 + 4.7 \times R_{iB})^2}$$

$$BH_1 = 9.4 \times CDN \times ((Z_{HT}/Z_0)^{0.5})$$

$$BB = BH_1 \times (|R_{iB}|^{0.5})$$

이다. 이때 식 (14)에서 정의된 안정도 함수를 사용하여 식 (17)와 같이 대기 안정도에 따른 R_a 를 추정한다.

$$R_a = \frac{1}{C_{HN} \times F_m \times U} \quad (17)$$

여기서 $C_{HN} = C_{DN}/0.74$ 이다.

3.2. 준-라미나 경계층 저항(quasi-laminar boundary layer resistance, R_b)

준-라미나 경계층 저항이란 수용 표면에 접하는 경계부에서는 난류 수송 과정이 더 이상 지배되지 않으므로 이 곳에서는 운동량 전달과는 다른 방식으로 물질이 전달된다는 사실을 설명하는 저항이다. 이 저항은 식 (18)과 같이 표면에 대한 거칠기 길이 (z_o)와 적분 상수 (z_{oc})의 항으로서 표현된다.

$$R_b = (1/ku_*) \ln(z_o/z_{oc}) \quad (18)$$

이 저항은 분자 혹은 브라운 확산에 의해 크게 영향을 받는데 표면 전달 모델 (surface transfer model)에서는 S_c (Schmidt number)에 대한 R_b 의존성으로 표현하고 있다. 풍동 실험에서 표면 전달 함수(surface transfer function, B^{-1})를 사용하여 R_b 와 $\ln(z_o/z_{oc})$ 의 관계는 다음과 같이 표현하고 있다.

$$kB^{-1} = ku_* R_b = \ln(z_o/z_{oc}) \quad (19)$$

이 B^{-1} 과 R_b 및 u_* , z_o 및 S_c 를 관련시킨 각종 수식을 Brutsaert(1975)가 요약한 바 있다. Sepherd(1974)는 일부 식생 구조에는 예외가 있기는 하지만 식생에 대한 모든 경우에 있어 $ku_* \approx 2$ 라고 가정하는 것이 타당하다고 제시했으며, 실제로 인공 초지에 대한 풍동 실험에서 수증기의 수송에 대한 이 과정을 입증된 바 있다(Wesely 와 Hicks, 1977).

식물의 canopy에서 평평한 앞으로부터의 전달을 설명함에 있어서 kB^{-1} 은 $(S_c)^{2/3}$ 에 비례한다고 가정한 연구가 많으며 Brutsaert(1975)가 보고한 지수 값

은 풍동 실험에서 0.44~0.8의 범위로 변하는 결과와 일치하고 있다.

그 결과

$$kB^{-1} = ku_* R_b = 2(\nu/D_c)^{2/3} \quad (20)$$

따라서 R_b 는 Wesely와 Hicks(1977)가 제시한 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$R_b = (2/ku_*)(\nu/D_c)^{2/3} \quad (21)$$

3.3. Canopy 저항(surface or canopy resistance, R_c) g

마지막으로 지표면의 침적, 특히 지표의 대부분을 차지하고 있는 식생에의 침적과정을 Canopy 저항이라는 항으로서 고려한다. Canopy 저항 (R_c)은 지표상에서 매우 복잡한 분포 양상을 띠고 있는 식물계를 지표와 대기사이에서 하나의 층(canopy 층, 식생층)으로 고려하며, 대상 표면과 대상 오염물질의 특성을 표면의 개개 요소들을 포함한 모든 흡수과정들을 고려하여 하나의 값으로 결합시킨 것으로서 물질과 표면 사이의 물리·화학적 상호작용과 관련이 있다. 이러한 표면에 대한 수송은 지표면을 덮고 있는 canopy의 형태에 따라 달라진다. 특히 표면이 산림이나 기타 각종의 식물로서 이루어진 경우 기온, 습도, CO₂ 농도 등의 영향을 받는 식물의 활동, 침적 표면의 함수량, 산성도 등에 따라서 복잡하게 변화하므로 매개변수화가 대단히 어렵다. 또한 식물의 활동에 의한 영향을 고려하기 위한 각 식물종에 대한 연구가 이루어지고 있지만 측정자에 따라서 많은 차이를 보이고 있다.

이처럼 R_c 는 식생으로의 침적현상을 다루는 데에 있어서 중요한 요소이다.

R_c 를 결정하는 기본 개념에 대해서 살펴보면 잎 표면의 단위 면적당 유효 저항으로 표현된 전달에 대한 생물학적 저항의 항으로서 생물학적 경로 (특히 잎의 기공과 잎 외피를 거쳐서)에 관련된 저항을 정량화하는 경우(Jarvis,1976)와 “big-leaf” 모델에서는 지표면의 전체 canopy에 대한 개개 canopy 요소 표면들을 LAI(leaf area index)와 biomass의 다른 구성 요소와 관련된 당량으로 연결하여 단위 면적당 유효저항들의 통합된 결과에 관심을 갖는 경우로 생각할 수 있다. R_c 는 대상 가스와 침적 대상 표면의 식생 상태 즉, 토지 이용도에 따라서 큰 차이가 있을 뿐 아니라(Baldocchi 등, 1987) 지역마다 생물의 환경이 다르고, 식물의

종류도 다르므로 그 지역에 우점하고 있는 식물종 및 분포 상황 등을 파악하여 가능한 그 지역 생물 환경의 특성을 최대한으로 고려하여 각종 매개변수를 결정할 필요가 있다. Hicks는 canopy로의 침적 현상을 식생층 및 지표면의 표면 반응에 의한 수송과정으로 canopy의 분포상황을 고려하여 상세히 매개변수화하였다. 식생층으로의 침적효과를 보다 더 정확하게 표현하기 위해 지면의 표면저항과 식물층 표면저항으로 분리하였다. 즉, 식생층 내에 들어온 오염물질은 잎에 침적하는 것과 식생층을 통과하여 지면에 도달하는 것이 있으므로 표면저항 R_c 을 $R_{foliage}$ 와 R_{soil} 로 구분하여 계산하고 이를 병렬 합성시켜 R_c 를 계산하였다. 식물 표면에서 가능한 침적 경로는 기공(stomatal), 표피(cuticle), 엽육(mesophyll) 내부이며, 식물에 대해서 1차 흡수(uptake) 메카니즘은 열린 기공을 통한 확산인 것이다(Meyers, 1991). 그러므로 R_c 는 식물의 기공상태에 따른 차이에 따라 달라진다. 기공을 통한 전달은 확산에 의한 것으로서 미량가스의 분자확산에 대한 식물의 증산작용에 의하여 발생하는 기공저항 (r_{st})으로 표현되고 r_{st} 은 잎면적 지수(LAI), 광합성에 필요한 일사 에너지량, 토양 수분, 공기 중의 수증기압, 기온에 의해 결정되어진다((Noilhan 과 Planton, 1989), (Park,1994)). Jarvis(1971, 1976)는 잎의 수증기 이동에 대한 기공저항(r_{st})을 계산하기 위한 모델(multiplicative model)을 제시한 바 있다. 식(22)은 기공을 통한 수송을 설명한 것으로, r_{st} 은 잎 표면에서 유입되는 광합성 활성 복사 강도의 역함수로서 계산되며 이는 수증기에 대한 함수로 유도되며 습도, 수분 스트레스, 온도에 대해서 보정된다(Baldocchi 등, 1987).

$$r_{st} = \frac{r_{st}[1+(b'/I_p)]}{f_e \cdot f_w \cdot f_T \cdot f_s} \quad (22)$$

여기서 r_{st} 은 최소 기공저항이며, b' 은 광반응계수이다. f_e, f_w, f_T, f_s 는 0~1의 값을 가지는데, Jarvis(1976)에 의하면 다음과 같이 설명할 수 있다. f_e 는 대기의 수증기압 결손에 의존하는 요소로서 식(23)과 같이 대기 내 수증기압의 편차(D_e)가 증가할수록 기공 전도력은 선형적으로 감소하며 이는 대기의 증기압 효과를 설명한다.

$$f_e = 1 - b_e D_e \quad (23)$$

여기서 D_e 는 대기중 수증기 편차로서 $D_e = e_s(T) - e$ 로 계산되며, $e_s(T)$ 는 공기온도 T에서의 포화수증기압, e 는 실제 수증기압, b_e 는 경험값이다. f_w 는 식물이 뿌리로부터 습취할 수 있는 토양 수분의 가용정도에 따라 결정되는 요소로서 식(24)에서와 같이 수증기 응력에 대한 식물의 반응을 leaf water potential, w_p 을 매개변수로 하는 열역학적 항으로 정량화하며 식물의 수분 스트레스를 설명한다(Fisher 등, 1981).

$$\begin{aligned} f_w &= 1, & \text{if } W_p > \text{threshold} \\ &= aW_p + b, & \text{if } W_p < \text{threshold} \end{aligned} \quad (24)$$

f_T 는 계절적 온도 변화에 따른 효과를 나타내는 항으로서 식(25)으로서 정량화된다(Hicks 등, 1987).

$$\begin{aligned} f_T &= [(T - T_e)/(T_o - T_e)][(T_h - T)/(T_h - T_o)]^{B_t} \\ B_t &= (T_h - T_o)/(T_o - T_e) \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 T_h , T_e 는 기공이 더 이상 열리지 않을 때의 최고/최저 온도 한계치로서 식물중에 좌우되며, T_o 는 기공 교환이 최적일 때의 온도이다. 마지막으로 f_s 는 기공을 통한 수송은 분자 확산에 의한 것이므로 수증기로 측정된 경험적 인자를 보정하기 위한 항으로서 다음 식(26)으로 계산된다.

$$f_s = D/D_o \quad (26)$$

여기서 D는 대상이 되는 미량가스의 분자 확산도이고 D_o 는 r_{st} 의 초기 정량화에 상당하는 분자 확산도로서 통상 수증기의 분자 확산도로 취급된다. 오염물질 혹은 다른 기체들이 기공을 통해 공동에 들어가면 식물 세포들 내로 전달되거나 기공 공동 또는 엽육 세포들 사이의 틈새 내에서 화학 반응으로 파괴된다. 따라서 긍정적인 흡수체로의 수송을 설명하기 위해서는 엽육 저항(r_{mes})을 확산 기공 저항(r_{st})과 결합되어야만 한다. 따라서 열린 기공들을 통한 총 잎 부위 저항은

식(27)로서 나타난다.

$$r_s = r_{st} + r_{mes} \quad (27)$$

따라서 개별 잎에 대한 저항은 식(28)으로 계산된다.

$$r_{tot} = \frac{1}{1/r_{cut} + 1/r_s} \quad (28)$$

식(28)에서 표현된 식물체 내의 개개 잎 자체에 작용하는 표면저항을 식생대의 전체 잎으로 확장하여 해석하기 위해서 식(29)과 같이 LAI 개념을 도입하여 계산한다.

$$R_{foliage} = \frac{r_{tot}}{LAI} \quad (29)$$

여기서 잎면적지수(leaf area index, LAI)는 식물계의 전층을 통해서 잎이 수직 방향으로 작용하고 있는 면적을 표시하는 계수이며 식물 종에 따라 다르다. 그러나 잎은 광합성에 강한 함수이고 따라서 다른 우거진 잎들에 의한 그늘에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 단순히 LAI에 의한 환산은 LAI가 클수록 오차가 크게 된다(Baldocchi 등, 1987). canopy 내의 다양한 잎으로부터 전체 r_{st} 즉, canopy 저항 (R_s)를 계산하기 위해서는 가시광선에 대한 빛 강도의 profile을 sunlit과 shaded 잎면적으로 분할하여 가중시킨 PAR 함수의 계산이 필요하다((Norman, 1982), (Baldocchi 등, 1987)). LAI를 sunlit과 shaded 부분으로의 분할은 식(30)에 의해 계산된다(Norman, 1979).

$$L_s = [1 - \exp(K \cdot LAI)]/K$$

$$L_{sh} = LAI - L_s \quad (30)$$

여기서 K 는 소광계수로서 $0.5/\cos \alpha$ 로 표현되며, α 는 태양의 천장각이다. 또한 식(22)에서 사용된 복사선 강도(I_p)를 얻기 위해서 Weiss과 Norman(1985)에 의해 측정된 유입 지구 복사선을 PAR의 광선 성분(I_{pbeam})과 발산 성분(I_{pdiff})으로

분리하였다. 따라서 sunlit과 shaded 잎 면적으로 가중된 전체 병렬 잎 전체 기공 저항은 다음의 식(31)에 의해 계산된다.

$$R_s = \frac{1}{[L_s/r_s(K \cdot I_{psum}) + L_{sh}/r_s(0.5I_{pshade})]} \quad (31)$$

여기서 $I_{psum} = K \cdot I_{pbeam} + 0.5I_{p \cdot diff}$ 이다. 결국 식(31)에서 계산된 함수는 단위 지면 면적당 잎 전체에 대한 순 흡수 저항(net uptake resistance, $R_{foliage}$)은 R_s 와 가중된 r_{cut} 의 결합된 식(32)으로 나타난다.

$$R_{foliage} = \frac{1}{[1/R_s + LAI/r_{cut}]} \quad (32)$$

따라서 canopy 저항에서 식물의 종류에 따른 변화, 이들의 주요한 물리적 차이는 잎면적지수(LAI)와 최소기공저항에 있음을 알 수 있다. 고려될 수 있는 최종적인 침적 표면은 토양으로, 각 오염물질에 대한 지면의 표면저항은 R_{soil} 으로 표현된다. 그러나 토양저항은 떨어진 잎과 유기 생물체 등의 결합을 지닌 지면 피복의 특성 변화등 현장 자료의 제약으로 인해 정확한 모델 함수식을 제시하기가 어렵다. 단지 분석적인 모델의 완성을 위해서 R_{soil} 이 포함된다. 이상의 식에 의해서 전체 유효한 canopy 저항에 대한 근사식은 다음의 식(33)로서 산출된다.

$$R_c = \frac{1}{[1/R_{foliage} + 1/R_{soil}]} \quad (33)$$

여기서 얻어진 R_c 를 보면 PAR, LAI, 온도, leaf water potential에 강하게 의존됨을 보이고 확산복사, 식물분포, 오염물질의 화학종 역시 R_c 에 영향을 주는 인자임을 알 수 있다. 그러나 R_c 계산에 사용된 토양, 엽육 그리고 표피로의 이동에 관련된 매개 변수와 변수에 관한 구체적인 정보가 아주 부족하다. 그리고 침적 현상에 영향이 클 것으로 생각되는 매개변수로서 표면의 젖은 효과에 따른 영향을 들 수 있다. 앞에서 언급한 모든 관련성은 건성이고 증발이 완전한 잎을 지닌 canopy에 대한 유도였다. 그렇지만 용해성 화학종은 젖은 표면성에서는 쉽게 침적될 수 있을 것이고 오존과 같은 중은 물에 불용해성이므로 젖은 표면성에서는

저항이 증가하게 된다. 야간에 식물 표면의 젖음(wetness)을 유발하는 메카니즘을 3가지로 생각할 수 있는데, 주로 바람이 약하고 상대습도가 높은 경우에 대기 중 수증기가 응결하면서 생성되는 이슬(dew), 수증기가 토양으로부터 잎 표면으로 전달될 때 형성되는 증류(distillation), 그리고 습도가 높은 조건하에서 식물의 분출물(exudate)에 의한 액적(guttation) 등에 의해 발생된다((Monteith, 1957), (Padro, 1994)). 또 다른 형태는 강수에 의한 것이다. 이러한 3가지 형태를 구분하기 위한 충분한 자료는 확보하지 못했다. 모델에서는 식물 표면의 젖음(wetness)이 추정될 때 표면저항을 변화시키는 단순한 역할만 하게 된다.

Hicks 모델은 정확한 대기 농도 측정에 의존하며, 대부분의 가스 이동은 실험 조건에서의 평균 흡수를 다루고, 단기간에 미기상학적 측정에서 유도되며, 대기오염물질은 일정한 방향으로 표면으로 이동되는 경우로 가정하여, 표면 이질화와 지역복잡성과 관련된 영향에 대한 결과가 부족하다. 그리고 단지 몇몇 잘 이해된 식물 종과 오염물질 농도가 직접적으로 광합성 작용에 영향을 미치기에 충분하지 않는 그런 조건에 대해 적용하였다.



Ⅲ. 연구방법

1. 모델 적용 대상 지역

청정한 대기질을 보이는 제주지역, 특히 기상 자료와 대기질 관측이 동시에 이루어지고 있는 제주도 서부지역인 한경면 고산리 일대를 대상으로 하였으며 이 대상 지역은 서쪽의 해안으로부터 동쪽의 한라산 정상을 향하여 비교적 평탄하면서 완만한 경사를 이루는 지역이다. 이 지역의 토지 이용형태를 보면 밭(85%)과 과수원(100%)으로 이루어진 농경지와 초지(5%)로써 구분할 수 있다. 그리고 지역의 식물 재배 상황을 보면 6월에서 10월경까지는 대부분이 콩(70%)이고 이 시기에는 벼(10%)도 일부 재배되고 있다. 이 작물들은 7월에서 9월 사이가 가장 왕성한 성장이 이루어지는 시기이다. 11월부터 이듬해 5월 사이에는 대부분 감자, 양파, 보리 등이 골고루 재배되고 있으며 양파는 4월에서 5월경에, 감자와 보리는 5월에서 6월 사이에 수확이 이루어진다. 또한 8월에서 이듬해 6월 사이에는 마늘과 깨 등도 재배되고 있다. 이처럼 성장시기도 다양하게 나타나고 있으며, 동절기를 제외한 대부분의 시기에 지표의 피복상태에 있어서 큰 차이를 고려하기 어려운 지역이다.

2. 기상 및 대기질 자료

본 연구의 건성침적 모델 계산에 필요한 기상요소는 풍속, 기온, 지면온도, 일사량, 상대습도, 강수량, 기압으로서 기상관측자료는 북위 33°17′, 동경 126°10′, 해발 72m 에 위치하고 있는 제주고층레이더기상대(Fig. 2)에서 관측된 매시간별 지상기상관측자료를 활용하였다. 본 모델의 수행을 위해 1999년 12월부터 2000년 11월까지 1년간의 시간대별 평균 자료를 수집하였으며, 수집된 지상기상 관측자료 및 대기질 측정자료에 대한 유효성을 검토한 결과를 Table 3.1에 정리하였다. Table 3.1에서 보는 바와 같이 수집된 시간대별 지상기상 관측자료 중 일

사량이 관측되지 않는 기간(6월 27일~30일)과 지면온도에 관한 시간대별 자료가 누락된 기간(7월)의 자료를 제외하였다. 그리고 대상 오염물질의 농도 측정이 결측된 날은 물론이고 농도관측시간과 기상관측시간이 서로 1 : 1로 대응되지 않은 경우에는 농도 관측자료 및 기상관측 자료 모두를 제외시켰다.

그리고 대기질 자료는 기상관측지점에서 서쪽 방향으로 70m 떨어진 해안변에 위치한 대기질 자동 측정망에서의 측정 자료 중 아황산가스(SO₂)와 오존(O₃)에 대한 자료를 수집하여 이용하였다.

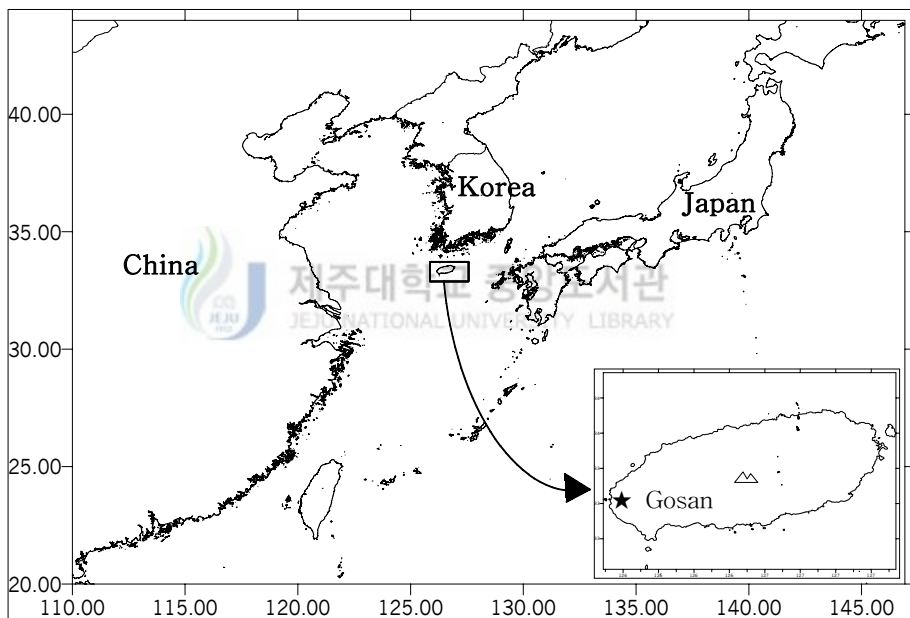


Fig. 2. Topography of the model domain and the site of surface meteorological observation and air pollution monitoring.

Table 3.1. Information of acquired data for model application

Month	No. of		Meteorological data		Air quality monitoring data		
	available data		Total No.	excluded	Total No.	Missing data	
	SO ₂	O ₃	of data	data	of data	SO ₂	O ₃
Dec.	734	413	744	-	744	10	331
Jan.	727	730	744	-	744	17	14
Feb.	694	696	696	-	696	2	-
Mar.	743	744	744	-	744	1	-
Apr.	711	711	720	-	720	9	9
May.	703	705	744	-	744	41	39
Jun.	624	624	720	96	720	-	-
Jul.	-	-	744	744	744	174	174
Aug.	499	463	744	-	744	245	281
Sep.	509	510	720	-	720	211	210
Oct.	730	730	744	-	744	14	14
Nov.	693	683	720	-	720	27	37
Total	7367	7009	8784	840	8784	761	1109

3. 모델에 사용한 입력자료

3.1. 오염물질 관련 입력자료

모델계산에 필요한 오염물질에 관한 입력자료를 Table 3.2에 나타냈다.

3.2. 식생 관련 입력자료

본 연구의 대상지역의 식생 상태 및 재배 현황을 볼 때 동절기를 제외한 대부분의 계절에서 지표의 피복상태가 거의 일정하다고 판단은 되지만 재배 작물의 종류가 다양하게 나타나고 있으나 이들 식물들에 대한 식물 생리와 관련된 LAI, 최소 기공저항, 식물의 광 반응 계수, 식물 활동의 최적온도, 기공 개폐시의 최고/최저 온도 등에 관해서는 직접 측정이 곤란할 뿐 아니라 구체적으로 밝혀진 자료

들이 없으므로 이와 관련한 자료들은 문헌을 통하여 가장 유사한 것으로 판단된 자료들을 Table 3.3에 정리하여 나타냈다. 그리고 본 연구에서는 실제 시기별로 재배되고 있는 다양한 식물의 종을 각각 고려할 수 없어 Table 3.3에서처럼 식물 형태를 2가지 형태가 골고루 분포하는 것으로 가정하였으며, 식물성장과 관련하여 동절기를 11월에서 3월 중순경까지 총 135일로 설정하였다.

Table 3.2. The properties of gases of interest and some resistances and parameters estimating dry deposition velocities

Variable	Units	SO ₂	O ₃	Reference
The diffusion coefficient ratio of water to the pollutant i (D_{H_2O}/D_i)	-	2.1	1.8	
Schmidt and Prandtl number correction ($(Sc/Pr)^{2/3}$)	-	1.34	1.14	
Cuticular resistance (r_{cut})	sm ⁻¹	7500	15000	
Soil resistance (r_{soil})	sm ⁻¹	1500	1500	Hicks(1987)
Mesophyll resistance (r_{meso})	sm ⁻¹	0	0	for the crop examined
Surface roughness(z_0)	m	0.03		Panofsky & Dutton(1984)

Table 3.3. Parameters and their values associated with plants

Variable	Units	Vegetation Type	
		crop & grass	short grass
Maximum LAI	-	4.5	2
Minimum LAI	-	0.01	0.5
Minimum stomatal resistant (r_{st}')	sm ⁻¹	30	200
Stomatal resistance curvature coefficient(b')	Wm ⁻²	60	50
Optimal leaf temperature (T_o)	°C	15	25
Maximum leaf temperature (T_h)	°C	25	45
Minimum leaf temperature (T_e)	°C	4	5
Reference		Sorteberg and Hov(1996)	Wilson(1989)

3.3. canopy 표면의 젖은 정도(wetness)의 산출

만 건조하고 잎이 충분한 식생 canopy에 대해서 유도한 것이다. 각 저항 성분

본 연구에서 다층저항모델은 기본적으로 증산 작용은 있어 민감도 분석을 통해 표면에서 젖은 정도가 건성침적에 영향을 미치는 중요한 매개변수임은 밝혀졌지만 Adema와 Heeres(1995), 아직은 canopy 표면의 젖은 정도의 연구에 대한 정확한 연구 결과는 없는 실정이다. 표면의 젖은 정도를 직접 실측하여 모델 입력 자료로 사용할 수 있으나 실측을 실시하지 않은 본 연구에서는 상대습도와 풍속을 변수로 한 M. Wesely의 공식을 근거로 canopy 표면의 젖은 정도를 추정하였으며 이는 결국 canopy 저항을 변화시키는 단순한 역할만을 하도록 하였다.



IV. 결 과 및 고찰

1. 건성침적속도의 변동 특성

가. SO₂의 건성침적속도



Fig. 4.1. The annual averaged diurnal variation of dry deposition velocity for SO₂.

Fig. 4.1은 SO₂의 건성침적속도를 매 시간대 별로 연간 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 SO₂의 건성침적속도의 변동을 시간대별로 보면, 야간 시간대의 건성침적속도가 주간 시간대에 비해 크게 높고, 일출을 전후하여 최대치를 보인 후 주간 시간대에는 감소하고 일몰 이후 시간대에는 다시 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 4.2는 SO₂에 대한 시간대별 평균 건성침적속도의 변동을 계절별로 구분하여 나타냈다. 그림에서 보면 건성침적속도가 비교적 크게 나타난 봄과 여름철의 경우 SO₂의 건성침적속도는 주간 시간대에 비해 야간 시간대에 증가함을 볼 수 있다. 특히 여름철의 경우에 건성침적속도의 주·야간 변동폭이 심하게 나타남을 볼 수 있다. 반면에 가을철과 겨울철의 경우에는 봄철과 여름철에 비해 각

시간대별 침적속도의 변동폭은 작게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 봄철에서 하절기를 거쳐 겨울철로 가면서 건성침적속도가 최대값을 보이는 시간대가 차례로 지연되는 경향을 보이며, 겨울철에는 야간 시간대보다 주간 시간대에 침적속도가 다소간 증가되는 경향임을 볼 수 있다. 이로서 SO₂의 경우, 주·야간에 따른 건성 침적속도의 변동 특성은 지표면의 상태에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉 SO₂의 건성침적속도가 주간 시간대에 비해 야간 시간대에 증가되는 경향을 보이는 것은, 특히 늦은 봄철에서 여름철에 이런 경향이 뚜렷한데, 이슬 등의 생성으로 인해 지표면 또는 잎 표면 등이 젖어 있을 때는 마치 열린 상태의 물처럼 표면 저항이 무시할 수 있을 정도로 작아지기 때문으로 생각된다(이병규, 1998). SO₂의 침적과정에서는 이슬이나 강수와 같은 현상으로 인해 지표면의 습한 정도(wetness)가 지배적인 영향을 미칠 수가 있으며, 이슬이나 강수에 의해 지표면이 젖는 효과를 고려하지 않으면 SO₂의 건성 침적량 합이 관측 결과보다는 적게 추정된다고 보고된 바도 있다(Erisman 등, 1994). 그리고 Fowler(1978)는 젖은 표면에서는 SO₂의 침적속도가 증가된다고 보고했다.

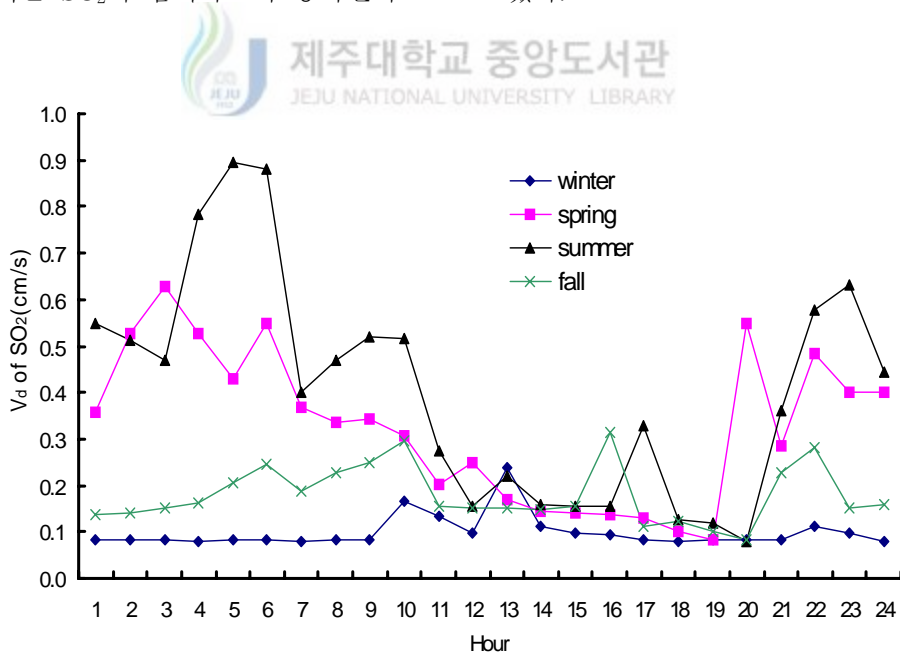


Fig. 4.2. The diurnal variation of dry deposition velocity for SO₂ according to each season.

Table 4.1. The number of times treated wet surface in the model run and the averaged dry deposition velocities of SO₂ over wet or dry surface

	Winter	Spring	Summer *	Fall
Sample No.	2184	2208	1368	2784
No times for wet surface	10	120	112	59
V _d over wet surface	1.101±1.30	4.843±1.05	4.519±1.50	3.787±2.45
V _d over dry surface	0.086±0.007	0.105±0.027	0.113±0.035	0.104±0.030

* The data for July are excluded.

The unit of dry deposition velocity(V_d) is cm/s.

Table 4.1은 본 모델을 수행함에 있어 표면이 젖은 상태로 처리된 횟수와 그때의 SO₂ 건성침적속도 그리고 표면이 건조한 상태일 때의 건성침적속도를 나타낸 것이다. 표에서 보면 타 계절보다 봄철과 여름철의 경우에 표면이 젖은 상태가 집중적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 표면이 건조할 때에 비해 젖어 있을 때의 건성침적속도 값이 훨씬 큼을 알 수 있다. 이로써 볼 때, SO₂의 경우 지표면의 식생 상태는 물론이고 표면의 젖은 상태 등에 따른 영향을 크게 받을 수 있고 또한 앞으로 SO₂의 건성침적속도를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 표면의 젖은 정도를 정량적으로 관측할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 4.3는 시간대별 평균 상대습도와 침적속도의 변동을 계절별로 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이 겨울철의 경우 평균 상대 습도가 70%이하 수준을 유지하면서 주·야간 변동폭도 다른 계절에 비해 아주 작음을 알 수 있다. 반면에 봄철과 여름철의 경우 겨울철에 비해 전체적인 평균 상대습도가 높을 뿐만 아니라 주·야간 변동폭도 겨울철에 비해 큼을 알 수 있다. 또한 상대습도의 변동 특성을 보면 새벽 시간대에 상대습도가 높으나 주간 시간대에 낮아지고 일몰 후부터 다시 증가하는 경향임을 알 수 있다. 가을철과 겨울철을 보면 상대습도와 건성침적속도의 시간별 변동이 서로 상반되는 경향이고 봄철과 여름철에는 상대습도와 건성침적속도의 시간별 변동은 유사한 경향임을 알 수 있다.

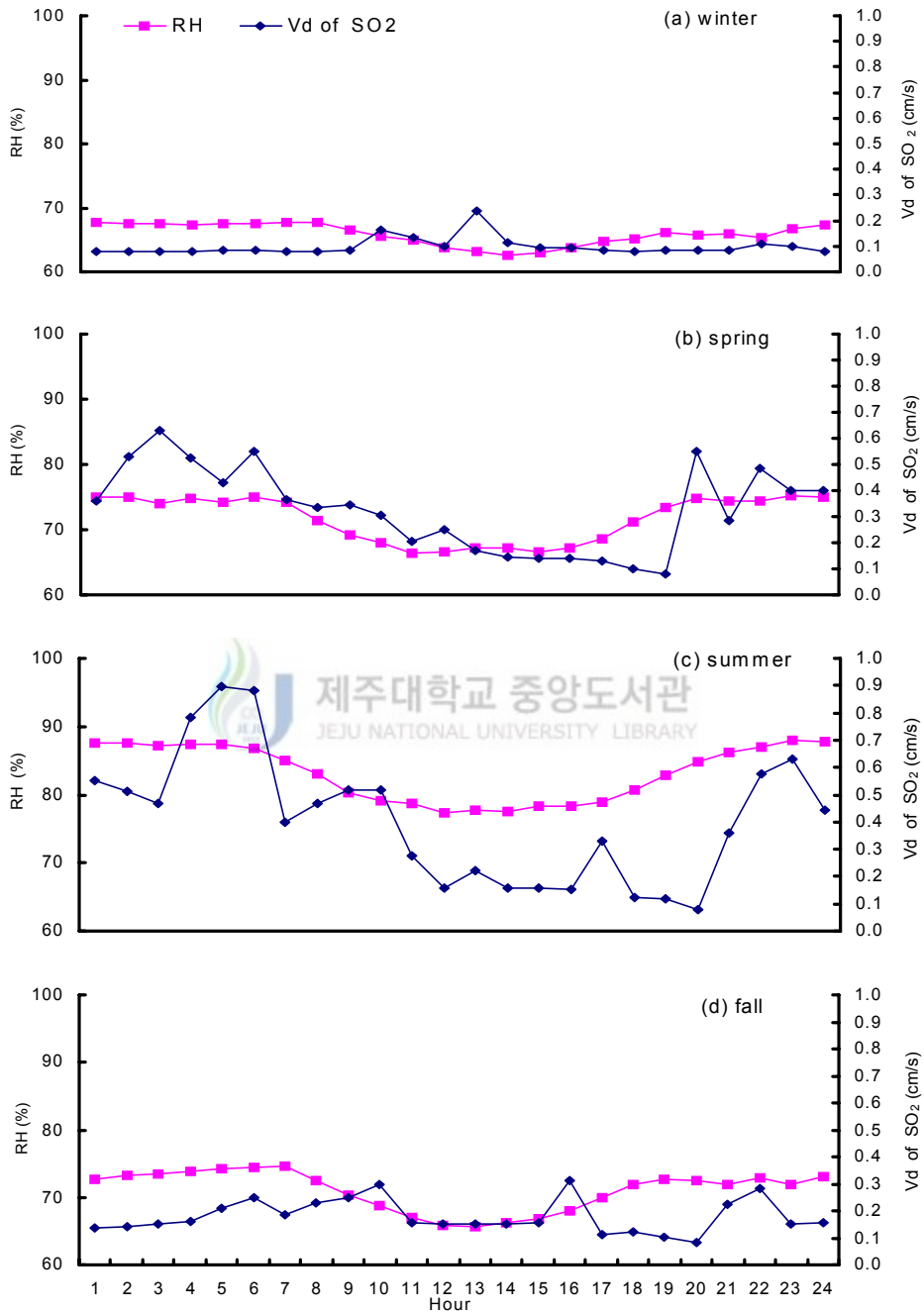


Fig. 4.3. Comparison of dry deposition velocity of SO₂ and the relative humidity in ambient air.

Fig. 4.4는 표면이 젖은 상태로 처리된 경우는 제외하여 건조한 상태로 평가된 경우와 표면이 젖은 상태로 평가된 경우에 대한 평균 건성침적속도를 시간대별로 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 표면이 건조한 상태의 경우 주간(12:00~18:00)에 건성침적속도가 증가하며 야간에는 낮은 값으로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그리고 식물에 의한 지면 피복이 없는 겨울철에는 주·야간의 증감이 타 계절에 비해 크게 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이로써 볼 때 주간(12:00~18:00)의 일사량에 의한 식물의 생리작용이 활발하여 SO_2 의 흡수(uptake)가 증진되는 것으로 판단된다. Fig 4.4의 결과를 볼 때 표면이 젖은 경우에 나타난 높은 건성침적속도 값과 건조한 상태일 때의 낮은 값을 시간대 별로 평균함으로 인해 SO_2 건성침적속도가 Fig. 4.1과 Fig. 4.2와 같이 주간에는 감소하고 야간에는 크게 증가하면서 그 변동폭이 심한 결과를 보인 것을 알 수 있다.

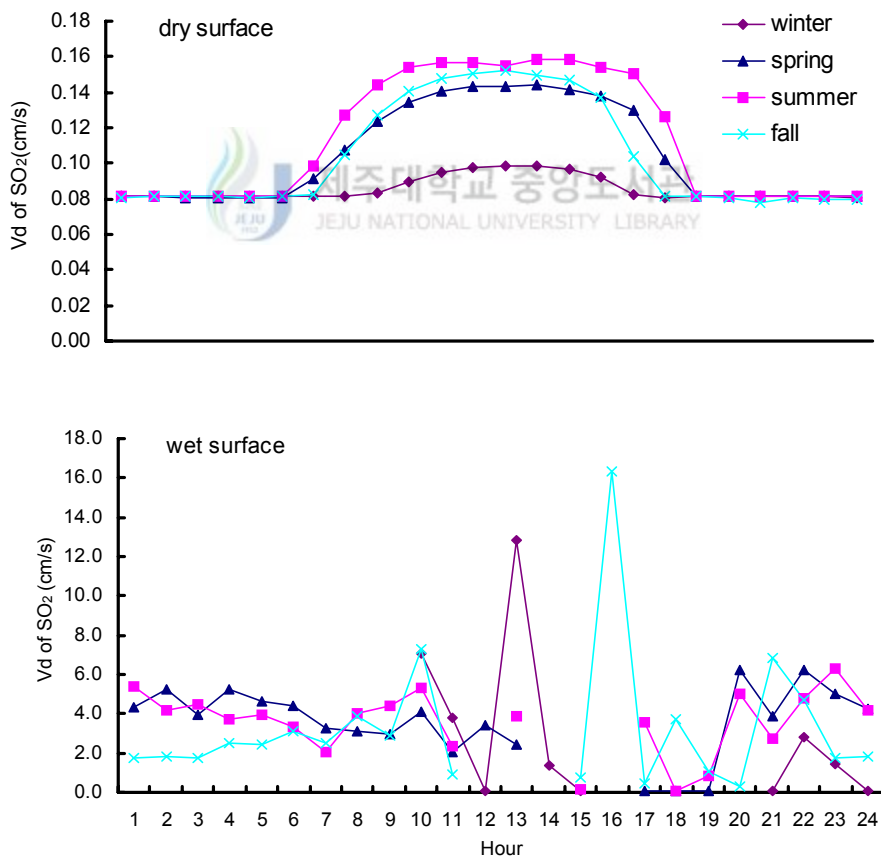


Fig. 4.4. Diurnal variation of dry deposition velocity for SO_2 over dry and wet surface.

Fig. 4.5는 월별 평균 침적속도를 나타낸 것으로 지면온도 측정이 누락되어 침적속도 계산이 불가능했던 7월의 경우는 제외하였다. Fig. 4.5에서 보면 6월에 건성침적속도가 최대를 보이고 2월에 최저값을 보임을 알 수 있다. 또한 SO₂ 건성 침적속도는 월별 변동이 비교적 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 겨울철에 침적속도는 낮고 봄철로 접어들어서 여름철에 이르면서 크게 증가한 후 8월부터 가을철로 이어지면서 감소함을 알 수 있다.

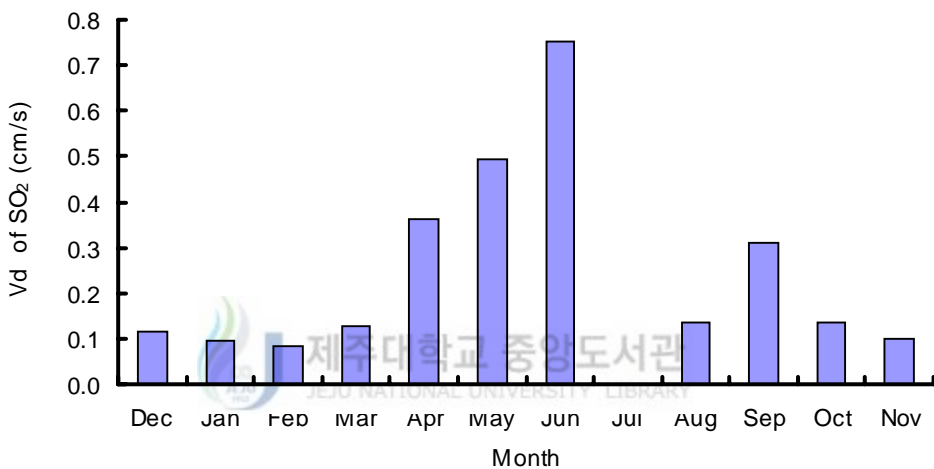


Fig. 4.5. Monthly variation dry deposition velocity for SO₂.

Fig. 4.6은 SO₂에 대한 canopy 저항(R_c)의 시간대별 변동을 월별로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 R_c 값은 대체로 주간에 비해 야간에 큰 값을 보임을 알 수 있다. 그리고 겨울철의 R_c 값의 주·야간 변동폭이 타 계절에 비해 작을 뿐 아니라 R_c 값 자체도 타 계절에 비해 비교적 큰 값을 유지함을 알 수 있다. 이런 결과를 보이는 것은 이 지역의 토지 이용 특성으로 보아 식물에 의한 지면 피복상태가 겨울철을 제외하고는 연 중 작물재배가 이루어지고 있는 점을 감안하여 모델을 수행함에 있어서 동절기에 식물 잎이 마르거나 수확되므로 인해 표면 피복 상태가 완전히 달라지는 시기를 11월부터 이듬해 3월 중순까지로 설정해 주었기 때문으로 판단된다.

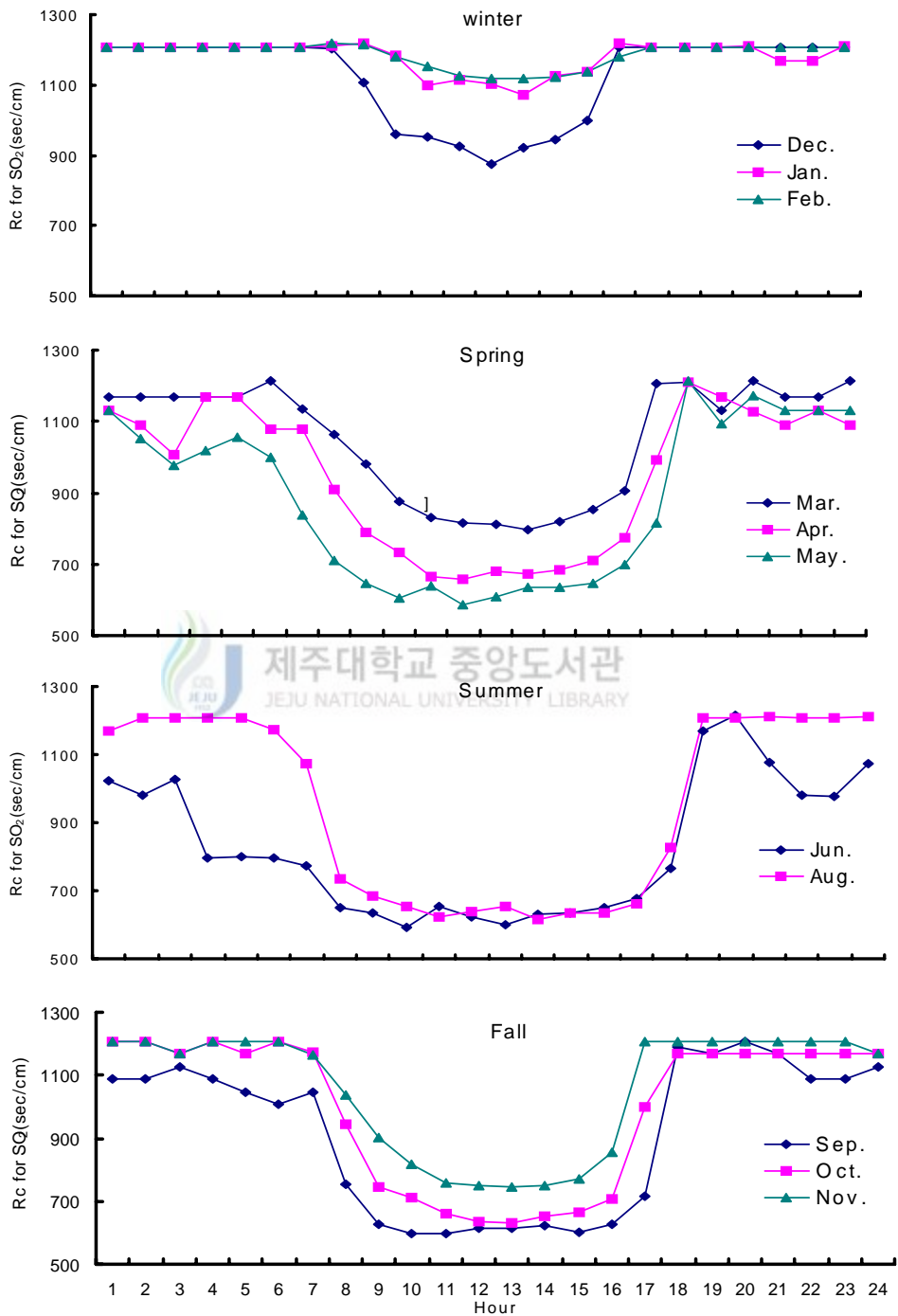


Fig. 4.6. The diurnal variation of canopy resistance for SO₂.

Table 4.2. The value of dry deposition velocity for SO₂

Season	Dry deposition velocity			Wetness **		
	Mean	Daytime (09:00~19:00)	Nighttime (20:00~08:00)	Day time	Night time	Total
Winter	0.099±0.036	0.115±0.049	0.085±0.009	6	4	10
Spring	0.327±0.164	0.182±0.084	0.450±0.102	22	98	120
Summer *	0.408±0.240	0.248±0.148	0.542±0.223	21	91	112
Fall	0.180±0.062	0.178±0.073	0.181±0.054	14	45	59
Annual	0.246±0.090	0.176±0.067	0.305±0.061	63	238	301

The unit of dry deposition velocity is cm/s.

* The data for July are excluded.

** Number of times when the surface is wet during the model run.

Table 4.2에서 보면 연평균 0.246 cm/s이고 여름철에는 1.7배 정도인 0.408 cm/s로 가장 높으며 그 변동 또한 심함을 알 수 있다. 다음으로 건성침적속도 값은 봄, 가을, 겨울의 순으로 나타났다. 특히 겨울철에는 연 평균의 40% 수준인 0.099 cm/s의 값을 보이면서 그 변동폭도 심하지 않음을 알 수 있다. 그렇지만 계절별로 보면 여름철에는 겨울철에 비해 4배 이상의 건성침적속도를 나타내고 있다. 그리고 겨울철을 제외한 타 계절에서 주간에 비해 야간에 건성침적속도가 높음을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어진 SO₂ 건성침적속도 값은 이 등(1998)이 춘천지역에서 초음파 풍속온도계에 의해 산출된 SO₂ 건성침적속도 값 및 변동폭(여름철: 0.65 cm/s, 겨울철: 0.43 cm/s)과는 상당히 낮은 수준임을 알 수 있다.

Fig. 4.5와 Fig. 4.6 및 Table 4.2의 결과를 종합해 볼 때, SO₂ 건성침적속도의 계절별 변동특성은 앞의 설명과 같이 식생 상태와 표면 특성에 밀접한 관련이 있다고 판단된다. 식물의 성장 및 생리 작용이 활발한 기간에는 지표면에 대한 잎의 표면적의 비율이 증가되고 기공을 통한 활발한 생리작용, 이슬 등에 의한 표면의 젖는 효과 등에 의해 건성침적속도가 증진된 것으로 생각된다.

나. O₃의 건성침적속도

Fig. 4.7은 본 연구의 대상 기간동안에 걸쳐 시간대별로 평균한 O₃의 침적속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 오존의 침적속도의 시간별 변화는 SO₂의 경우와는 상반된 경향임을 알 수 있다. 즉 야간 시간대에는 건성침적속도의 변동이 거의 없이 일정한 수준을 보이다가 일출 전후 시간대부터 크게 증가하여 오후 1~3시경에 최고값을 보인 후 일몰시까지 점차 감소한 후 다시 일정한 값을 보이는 증절모의 형태를 보이고 있다. 문(1996)도 O₃에 대해서 해가 뜨기 시작하여 대기가 불안정해지면서 오후 1~3시경에 침적속도의 피크(peak)를 이루고, 일사가 없는 새벽과 야간은 작은 침적속도를 보인다고 하여 본 연구결과와 거의 일치하는 경향을 제시한 바 있다. 그리고 Padro(1994)는 주간에는 일사가 광합성을 활성화시켜 O₃ 흡수가 증진된다고 보고했다.

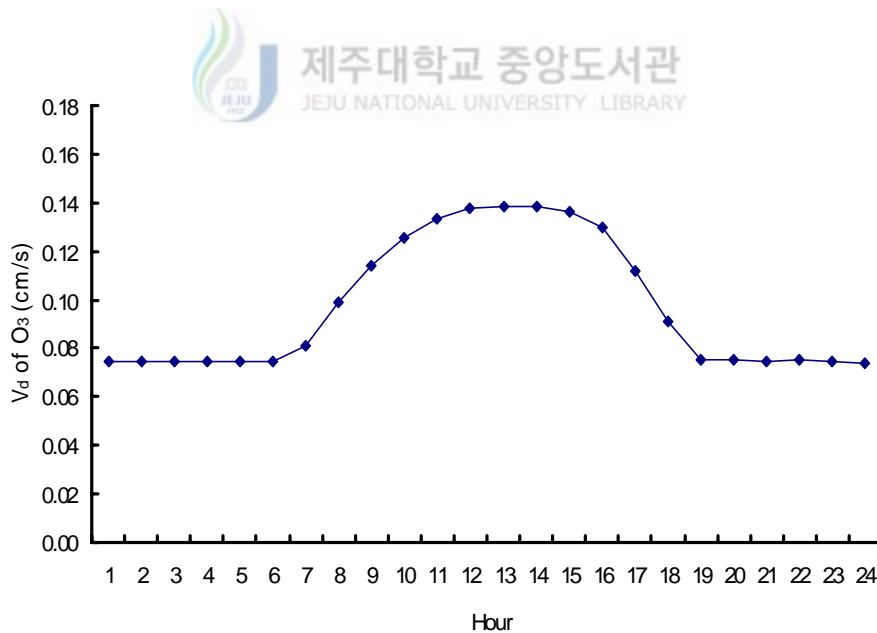


Fig. 4.7. The diurnal variation of dry deposition velocity for O₃.

Fig. 4.8에서는 시간대별 O₃의 침적속도를 계절별로 구분하여 나타냈다. 그림에서 보면 네 계절 모두 주간 시간대에는 건성침적속도가 증가하고 야간 시간대에는 일정한 경향을 나타내고 있으며, 봄, 여름, 가을철에 비해 겨울철의 주간 침적속도가 크게 낮아짐을 알 수 있다. 이는 앞서서도 이미 언급한 바와 같이 동절기에는 지표면에 식물이 거의 존재하지 않는다고 가정했을 뿐 아니라 동절기 일사량이 낮으므로 인해 나타난 결과라고 판단된다. Padro 등(1992)도 활엽수림에서 행한 연구에서 겨울철 O₃의 건성침적속도는 여름철의 약 30% 정도이며 이는 일사량과도 관련이 있다고 평가한 바 있다. 본 연구에서는 O₃의 계절별 평균 건성 침적속도는 여름철에 0.111±0.040 cm/s로 가장 높은 수준이었고 겨울철은 0.080±0.008 cm/s로 가장 낮은 수준을 보였으며, 봄철과 가을철에는 각각 0.102 cm/s와 0.101 cm/s로 거의 같은 수준을 보였다.

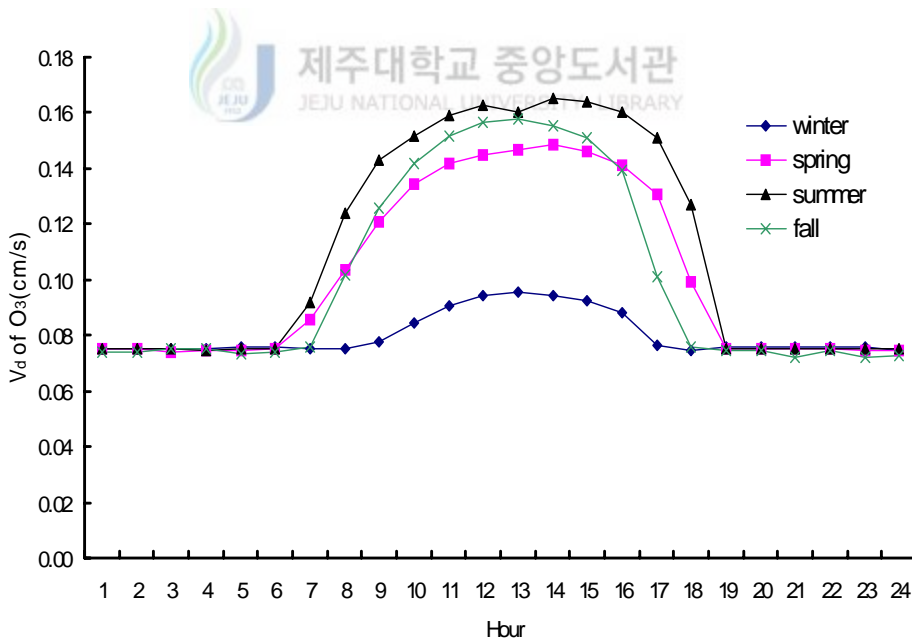


Fig. 4.8. The diurnal variation of dry deposition velocity for O₃ according to each season.

Fig. 4.9는 표면이 젖은 경우와 건조한 경우를 구분하여 산출된 O₃의 평균 건성침적속도를 시간별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 O₃ 건성침적속도는 야간에는 표면의 젖은 정도에 관계없이 거의 비슷한 값을 보이고 주간에는 표면이 젖은 경우에는 건조한 경우에 비해 크게 낮은 값을 보여 SO₂의 경우와는 상반된 경향을 보였다. Padro(1994)는 지표면이 젖은 상태에서는 기공의 영향이 그다지 중요하지 않으며 야간의 경우 canopy 상태가 습하거나 건조함에 관계없이 비슷한 평균값을 보이며, 주간에는 계절에 관계없이 canopy의 표면이 젖은 정도가 O₃ 흡수를 억제한다고 보고한 바 있다.

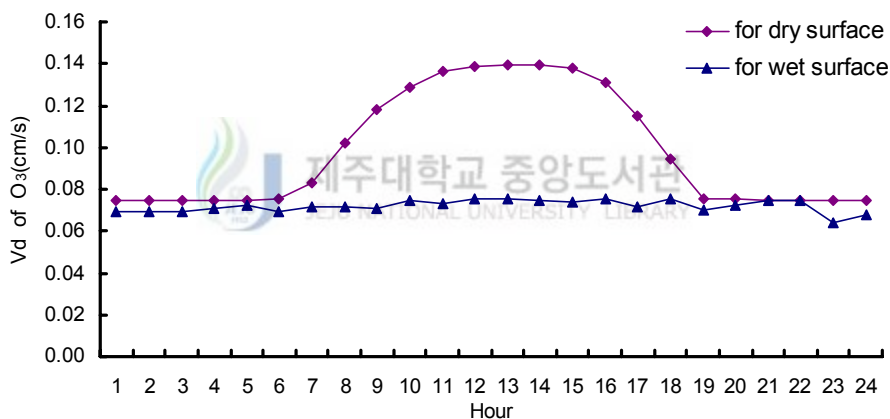


Fig. 4.9. A comparison of dry deposition velocity values between wet and dry surface for O₃.

Fig. 4.10는 O₃의 건성침적속도와 상대습도의 시간대별 변동을 계절별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 SO₂의 경우와는 달리 상대습도의 변동과 O₃의 건성침적속도는 서로 역의 상관성이 보임을 알 수 있다.

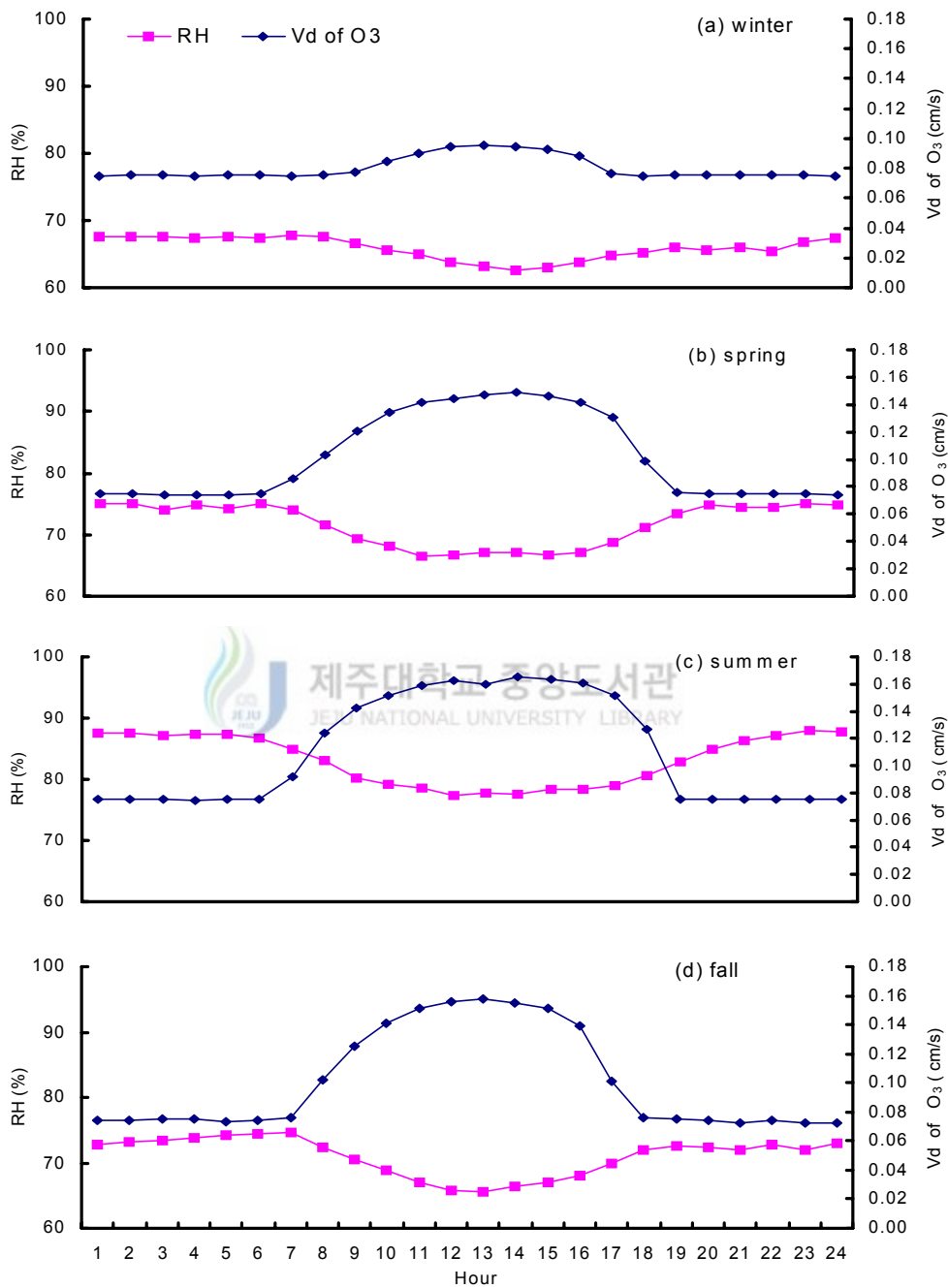


Fig. 4.10. Comparison of dry deposition velocity of O₃ and the relative humidity in ambient air.

Fig. 4.11은 모델 수행 과정에서 표면이 젖은 상태로 평가된 횟수를 시간대별로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 보면 O_3 의 건성침적속도가 야간 시간대에는 표면이 젖은 상태에 관계없이 일정하게 나타나고 주간 시간대에는 표면이 젖은 상태의 출현 횟수와는 상반된 경향을 보임을 알 수 있다. 주간의 표면이 젖은 상태인 경우는 이슬 등에 의한 것이 아니라 강수에 의한 것임을 감안할 때 O_3 의 건성침적속도는 주간에는 일사량에 크게 좌우됨을 짐작할 수 있다(wesely 등, 1983).

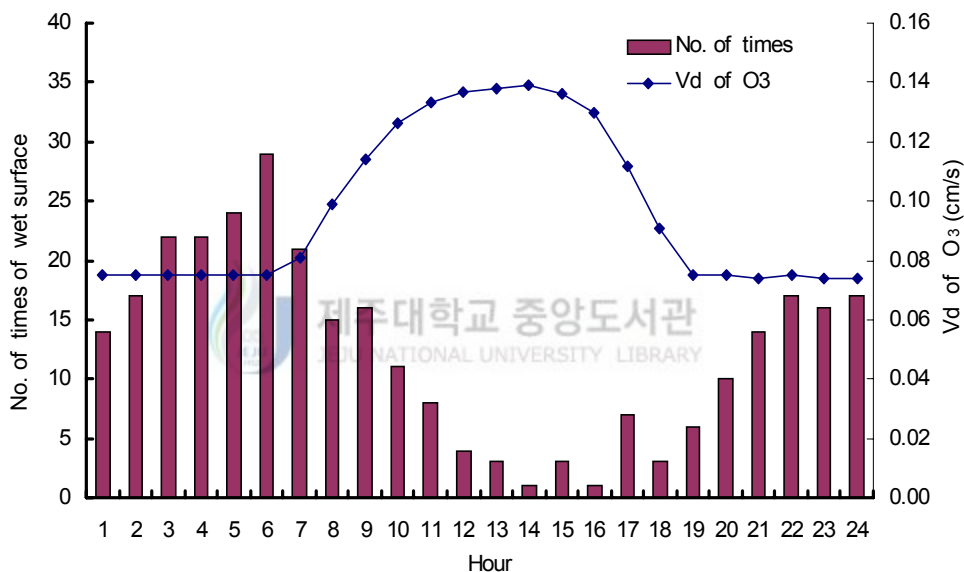


Fig. 4.11. Comparison of dry deposition velocity of O_3 and the occurrence number of wet surface.

Fig. 4.12는 O_3 의 월별 평균침적속도를 나타낸 것으로서 2월에 최저값을 보인 후 봄철에서부터 점차 증가하여 여름철에 최고값을 보이고 가을철이 되면서 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 그렇지만 O_3 침적속도의 월별 변동폭은 그다지 심하지 않은 완만한 변화를 보임을 알 수 있다. 이처럼 야간에 O_3 의 건성침적속도가 0이 되고 낮에 계절별 변동 또한 심하지 않은 건성침적속도 변동 특성을 보면 O_3 의 흡수에는 일사량 뿐 아니라 지면온도와 대기온도의 차이의 일 중 변화 등과 같이

지표 부근의 안정도와 대류를 좌우하는 요인들도 비교적 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

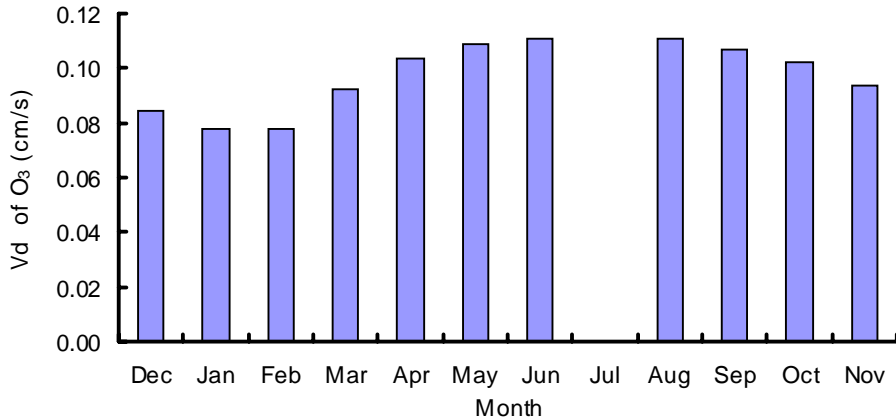


Fig. 4.12. Monthly variation of the dry deposition velocity for O₃.



Fig. 4.13는 O₃에 대한 canopy 저항(R_c)을 월별로 구분하여 시간대별로 정리한 것이다. O₃에 대한 R_c 값은 주간 시간대에 비해 야간 시간대가 큰 값을 가지면서 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 그리고 R_c 값의 주·야간 변동이 낮 시간대의 길이, 즉 일출 및 일몰에 따른 일사량의 변동에 대응하고 있음을 알 수 있다. SO₂의 경우와 같이 겨울철에 R_c 값의 변동폭이 타 계절에 비해 작으면서 그 값도 타 계절에 비해 비교적 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

Table 4.3에는 O₃에 대한 건성침적속도를 계절별로 평균한 값을 정리하여 나타냈다. 연평균 0.097±0.027 cm/s로 나타났으며, 여름철의 경우에는 0.111±0.040 cm/s로 가장 높은 수준이고 다음으로 봄철 0.102 cm/s, 가을철 0.101 cm/s, 겨울철 0.080 cm/s의 순으로 나타났으나 계절에 따른 건성침적속도의 수준은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그리고 주·야간의 건성침적속도를 비교해 보면 SO₂에서와 달리 야간에 비해 주간에 높게 나타나는데 이는 지표의 젖은 상태보다는 오히려 주간 일사량에 크게 좌우되기 때문으로 생각된다.

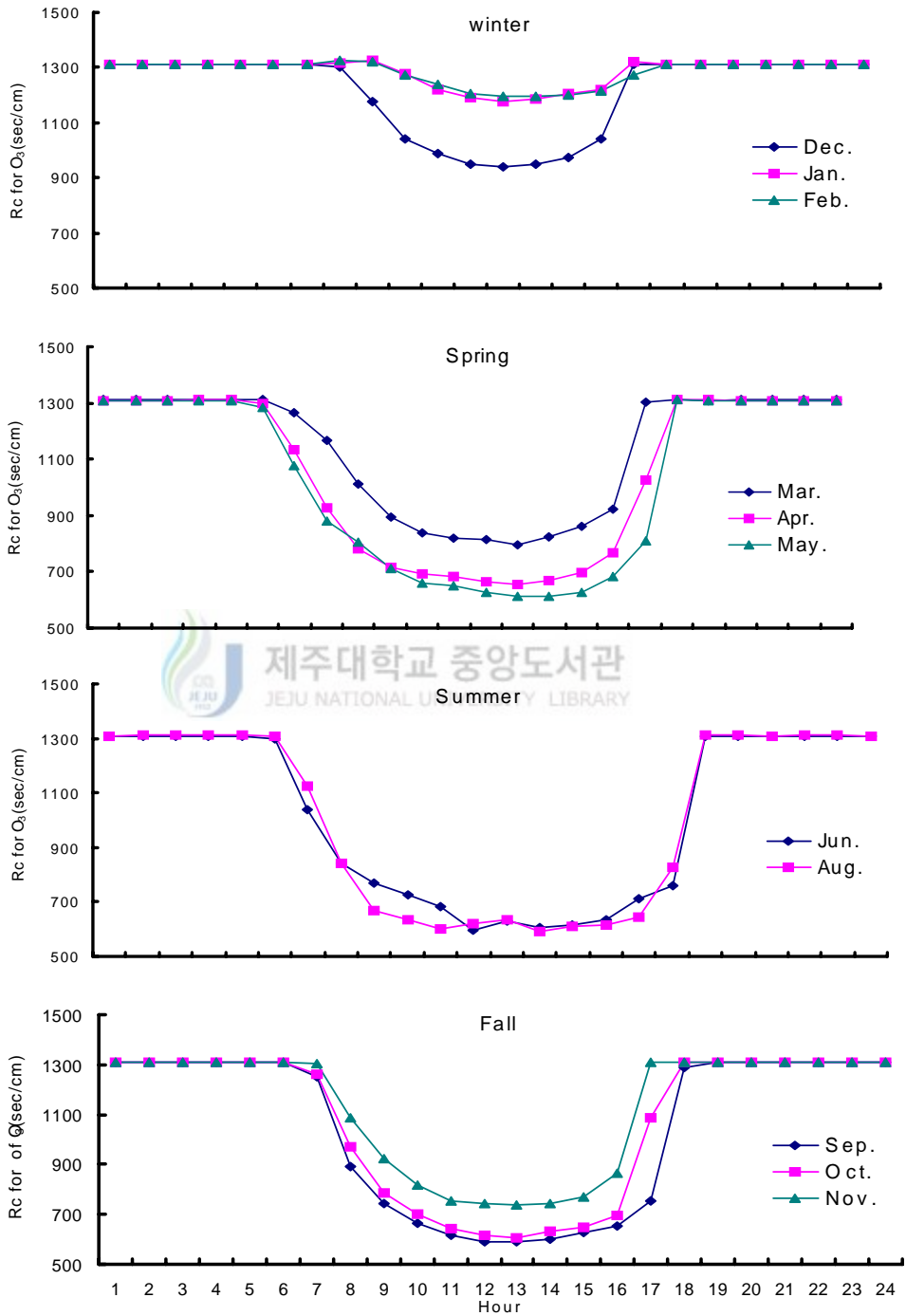


Fig. 4.13. The diurnal variation of canopy resistance for O₃.

Table 4.3. The value of dry deposition velocity for O₃

Season	Dry deposition velocity			Wetness **		
	Mean	Daytime (09:00~19:00)	Nighttime (20:00~08:00)	Day time	Night time	Total
Winter	0.080±0.008	0.086±0.008	0.075±0.000	6	4	10
Spring	0.102±0.031	0.130±0.023	0.078±0.008	22	98	120
Summer *	0.111±0.040	0.147±0.026	0.080±0.014	21	91	112
Fall	0.101±0.035	0.130±0.032	0.076±0.008	14	45	59
Annual	0.097±0.027	0.121±0.02	0.077±0.007	63	238	301

The unit of dry deposition velocity is cm/s.

* The data for July are excluded.

** Number of Times when the surface is wet during the model run.

또한 본 연구에서 O₃의 건성침적속도의 값은 노(2000)가 부산지역에서 농경지와 목초지에서 O₃ 건성침적속도의 일변화 범위는 여름철에 0.2~0.78 cm/s 인 것으로 보고한 결과와 비교할 때 상당히 낮은 수준임을 알 수 있다.

2 오염물질 농도의 변동 특성

제주도 서부 지역의 해안변에서 관측된 SO₂와 O₃의 대기 중 농도자료를 확보하여 그 변동 특성을 분석하였다. 여기에 제시된 농도자료는 오염물질 건성침적 플럭스를 산정하기 위해 기상자료 등 타 자료와 시간대별 및 월별로 일치시키는 등의 자료 검토를 실시하지 않은 대기질 변동 자료를 제시한 것이다.

가. SO₂의 오염물질 농도

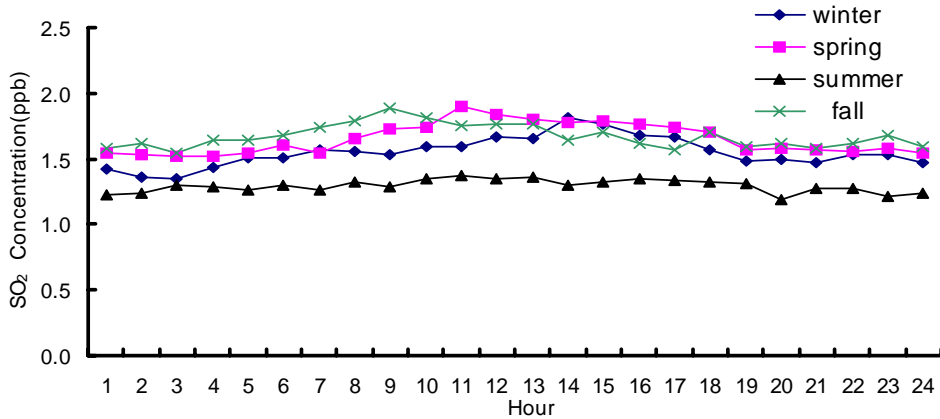


Fig. 4.14. The diurnal variation of average hourly concentrations of SO₂.

Fig. 4.14은 SO₂에 대한 대기 중 농도의 시간대별 변동을 계절에 따라 나타낸 것이다. 본 연구기간 동안 측정된 SO₂ 농도는 연평균 1.54±0.08 ppb 수준이었으며, 계절별로는 봄철에 1.65±0.12 ppb, 여름철에 1.29±0.05 ppb, 가을철에 1.67±0.09 ppb, 겨울철에 1.55±0.12 ppb 로서 봄철과 가을철에 높게 나타나고 여름철에 가장 낮은 수준을 보였다. 그리고 일 중 시간별 최고 농도가 봄에는 오전 11시경에, 여름에는 오전 11시경에, 가을철에는 오전 9시경에, 겨울철에는 오후 2시경에 최고 농도를 나타내고 있으나 각 계절별로 시간대별 변동폭은 작은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 대도시의 경우 국지적인 인위적 오염원과 기상학적 요인에 의해 계절에 관계없이 오전 8시경에 최고 농도를 보이고 오후 9시경에 두번째 높은 값을 보이는(전병일 등(1994), 윤순창(1992)) 경향과는 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 제주도 고산지역의 SO₂는 국지 오염원에 의한 직접적인 영향보다는 기류의 이동에 의해 한반도와 중국 등 주변으로부터 유입되었을 가능성을 시사하는 것이며, 또한 오염물질의 계절적 분포는 제주도를 지배하는 기단의 발원지와 관련이 있는 것으로도 보고한 바 있다((홍민선 등, 1992), (박경윤 등,1994), (장광미 등, 1996)). 계절적 변동은 뚜렷하게 나타나지는 않았으나 대체로 여름철의 농도가 다른 계절에 비해 낮게 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 이는 SO₂의 경우 여름철의 높은 기온과 일사량에 의해 SO₂가 SO₄²⁻로 변환되기 때문으로 생각된다(박종길, 1998).

나. O₃의 오염물질 농도

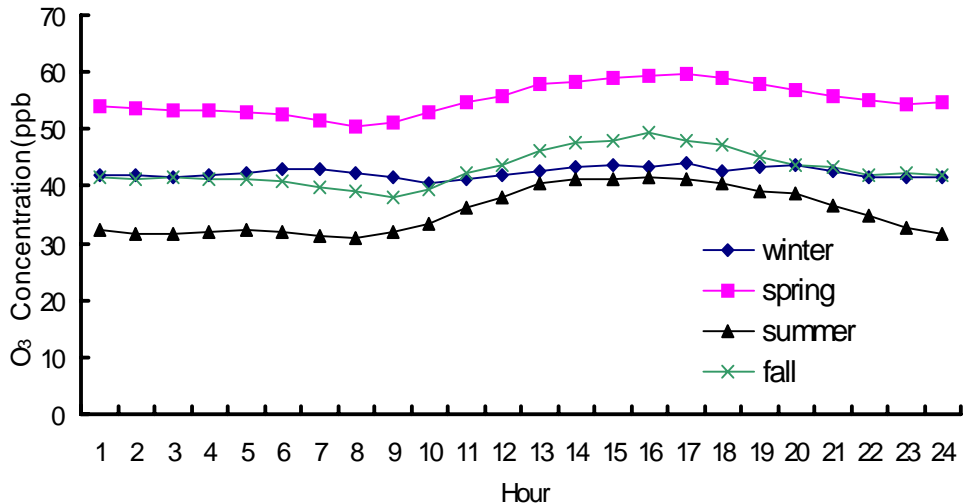


Fig. 4.15. The diurnal variation of average hourly concentrations of O₃.

Fig. 4.15은 대기 중 오존 농도의 시간대별 변동을 계절에 따라 나타낸 것이다. 본 연구기간 동안 측정된 오존의 농도는 연평균 43.67 ± 2.63 ppb 였으며, 계절별로는 봄철에 55.2 ± 2.76 ppb로 가장 높게 나타났고 여름철에 35.6 ± 4.05 ppb로 낮은 농도를 보였다. 그림에서 보면 O₃의 일 중 시간별 농도 변화는 전체적으로 오전 8시경에 최소가 나타나고 오후 5시경에 최고치를 나타냄을 알 수 있다. 이는 대도시에서의 시간별 O₃ 농도 변화와 유사한 변화형태를 보이고 있지만 대도시에 비하여 제주도 고산의 연평균 O₃ 농도는 높은 반면 일 변화폭은 약 8.4 ppb 정도로서 대도시의 변화폭 (20 ppb) 과 비교할 때 약 40% 수준에 지나지 않음을 볼 수 있다. 이는 O₃ 농도의 일변화에 영향을 주는 주요 요인(NO, NO₂ 농도 및 일사량)들 중에서 NO_x 및 HC 등의 인위적 오염물질이 대도시에 비해서 상대적으로 제한되어 있기 때문으로 보고된 바 있다((홍민선 등,1992), (박경윤 등, 1994)).

3. 건성침적 플럭스

가. SO₂의 건성침적 플럭스

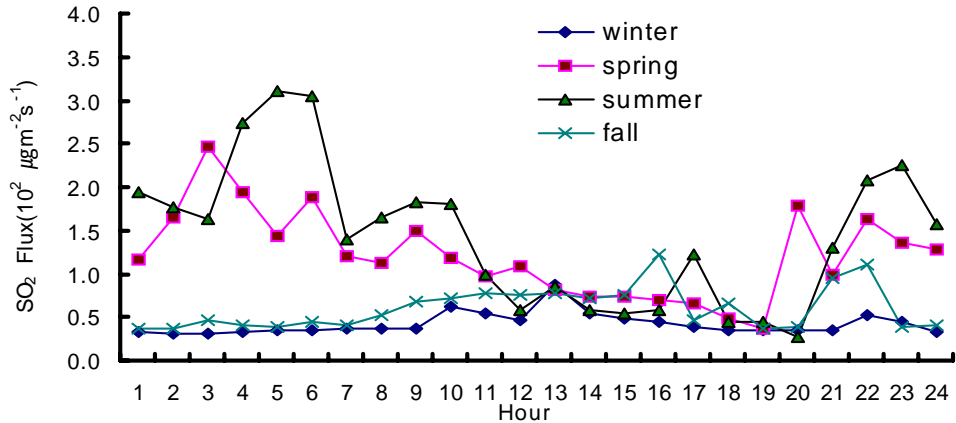


Fig. 4.16. The diurnal variation of SO₂ dry deposition flux.

Fig. 4.16은 대기 중 SO₂ 농도와 추정된 침적속도로부터 산출된 SO₂ 플럭스에 대한 시간별 변화 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 SO₂ 플럭스는 여름철과 봄철에는 주간과 야간에 따라서 절대적인 크기 변화가 심하여 야간의 플럭스가 주간의 플럭스를 크게 초과함을 알 수 있다. 반면 가을과 겨울철의 경우에는 시간별 변화가 아주 작은 것으로 나타났다. 이런 경향은 건성침적속도의 시간별 변화 경향과 유사함을 알 수 있다. SO₂의 경우 일 중 시간별 플럭스 변화는 오전 6시와 오후 22시경에 최대가 나타나고 오후 19시경에 최소치가 나타났다.

Fig.4.17는 SO₂ 건성침적 플럭스와 SO₂ 농도를 월별로 나타낸 것이다. Fig. 4.15를 보면 6월에 가장 높은 값을 보이고 1월에 가장 낮은 값을 보이면서 월별 변동폭은 상당히 크게 나타났다. 이처럼 하절기로 접어들면서 대기 중 SO₂ 농도가 낮아짐에도 불구하고 플럭스가 높은 값을 보이는 것은 식물의 생육이 활발해질 뿐 아니라 이슬의 생성이 빈번해짐에 따른 표면의 젖음 효과에 기인한 것으로 생각된다. SO₂의 계절별 플럭스의 크기를 비교해 보면 대체로 여름철의 플럭

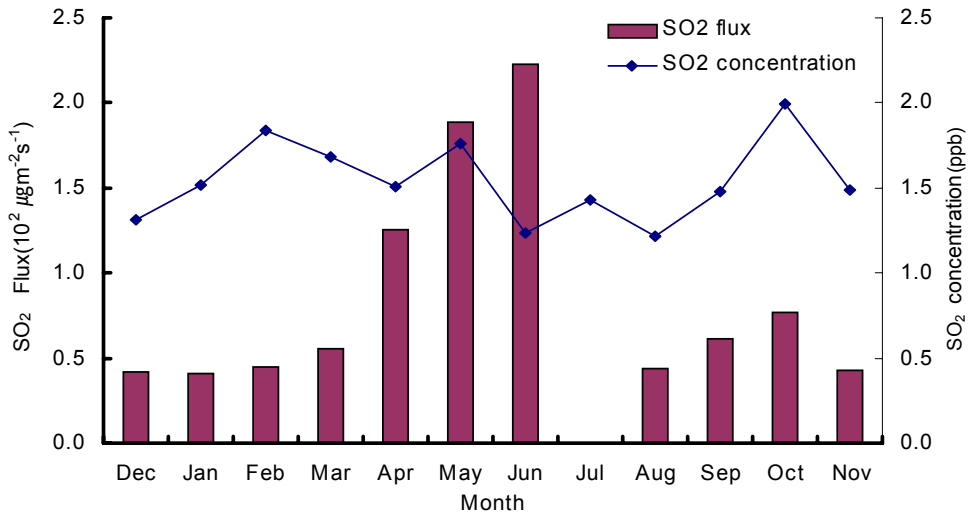


Fig. 4.17. Monthly variations of dry deposition flux and concentration for SO₂.

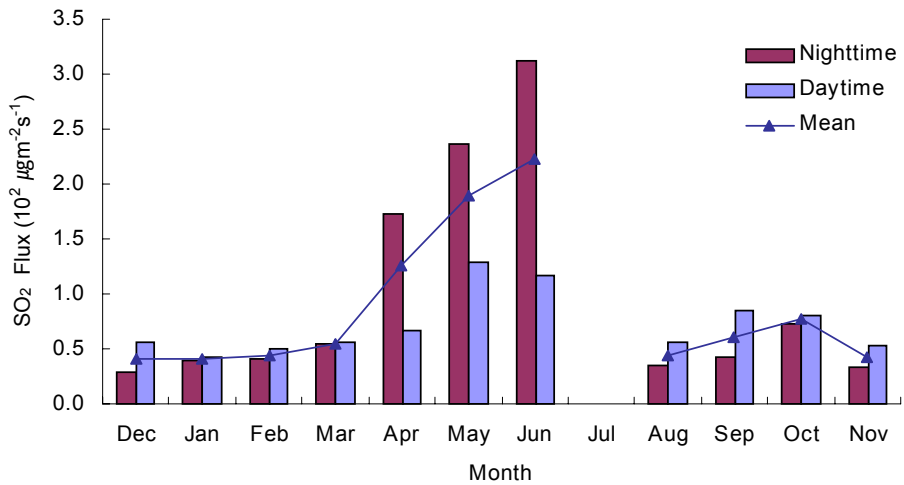


Fig. 4.18. Comparison of dry deposition fluxes between daytime and nighttime for SO₂.

스가 다른 계절에 비해 높고 봄, 가을, 겨울을 순으로 감소하고 있음을 볼 수가 있다. 이러한 SO₂ 플럭스의 계절적 변동은 대기 중 SO₂의 농도가 아주 낮을 뿐 아니라 월별 변동 또한 작으므로 인해 건성침적속도의 경향을 대체로 따르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.18은 SO₂의 월별 건성침적 플럭스를 주·야간으로 구분해서 나타낸 것이다. Fig.4.17에서 플럭스가 크게 증가하는 4월부터 6월까지의 야간 플럭스가 주간 플럭스의 2배 이상으로 나타났고 그 외의 달에서는 주·야간 플럭스가 비슷한 수준이지만 오히려 주간의 플럭스가 야간에 비해 다소 높은 경향임을 알 수 있다.

나. O₃의 건성침적 플럭스

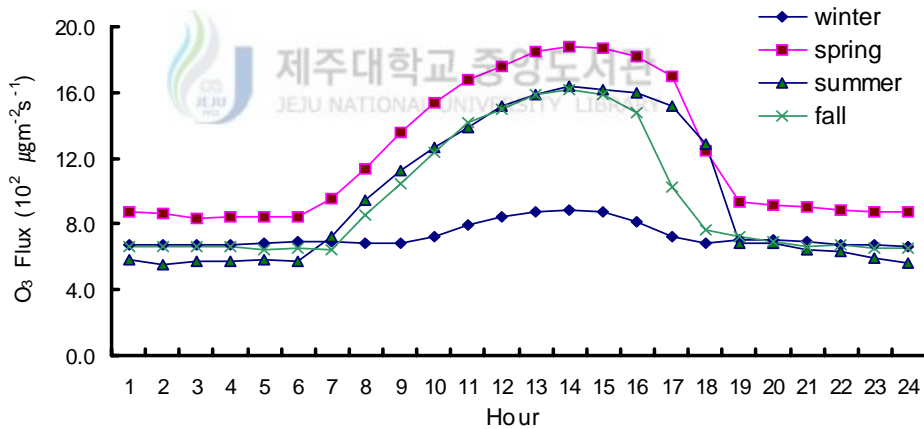


Fig. 4.19. The diurnal variation of O₃ dry deposition flux.

Fig.4.19은 O₃ 플럭스의 시간별 변화 경향으로서 O₃ 플럭스 변동특성을 보면 주간 시간대에 증가되고, 야간 시간대에는 주간에 비해 크게 감소한 수준에서 일정한 경향을 보이고 있다. 타 계절에 비해 겨울철의 각 플럭스 증감폭이 크게 작아짐을 볼 수 있다.

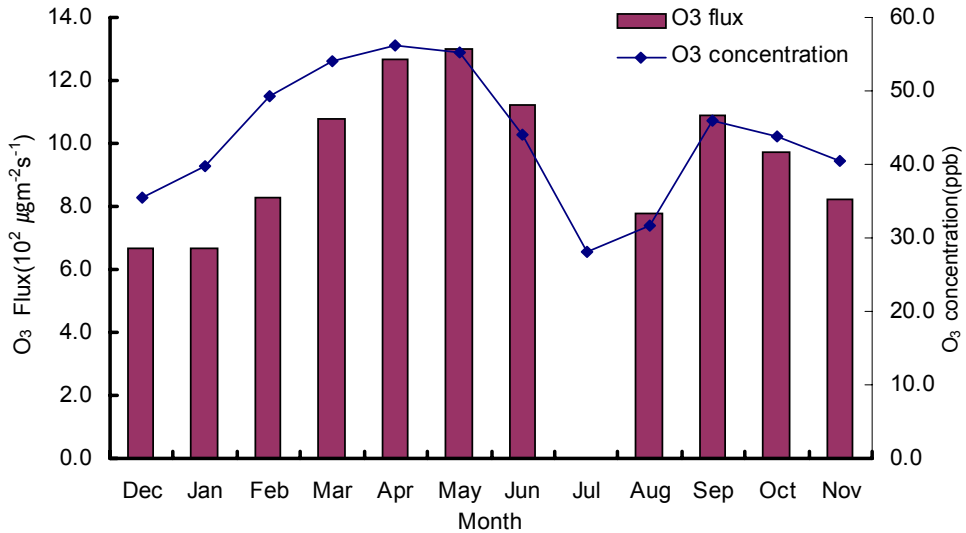


Fig. 4.20. Monthly variations of dry deposition flux and concentration for O₃.



Fig.4.20은 O₃의 건성침적 와 O₃의 농도의 월별 변동을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 5월과 9월에 두개의 정점이 나타나는 분포를 보임을 알 수 있다. 이는 봄철과 가을철에 대기 중 오존 농도가 높은 것과 하절기에 주간에 일사량이 증가함에 따라 식물 생장이 왕성해 지면서 O₃의 흡수가 증진됨에 따른 결과로 생각된다. 이러한 겨울철 주간의 O₃ 플럭스는 여름철 주간의 경우에 비해 낮다고(Padro 등(1992)) 평가한 결과와 유사함을 알 수 있다. O₃ 플럭스의 계절별 변동을 보면 봄철 플럭스가 가장 크고 겨울철이 가장 작은 수준임을 알 수 있다. 본 연구기간 동안에 제주도 지역의 경우 O₃의 농도가 봄철에 가장 높게 나타났고 겨울철보다 오히려 여름철에 가장 낮은 농도 수준을 보이지만 계절별 농도 차이가 크지 않음을 감안할 때 O₃ 플럭스는 건성침적속도의 변동 경향에 크게 의존함을 알 수 있다.

Fig.4.21는 O₃의 월별 침적 플럭스를 주·야간으로 구분하여 정리한 것이다. O₃의 경우 겨울철을 제외한 모든 계절에서 주간 플럭스가 야간 플럭스보다 높게 나타나고 있으며 주·야간 플럭스의 차이도 크게 나타남을 알 수 있다.

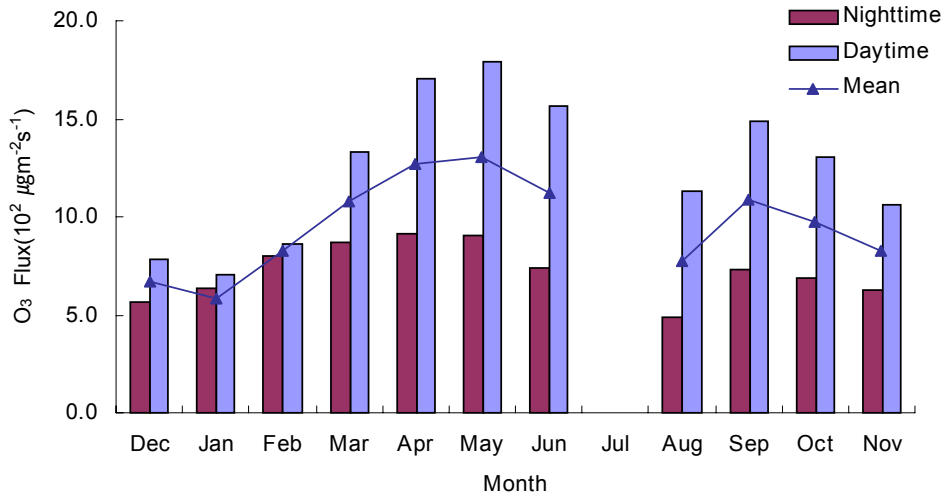


Fig. 4.21. Comparison of dry deposition fluxes between daytime and nighttime for O₃.



다. 건성침적 플럭스평가

모델을 통해 추정된 건성침적속도와 평균 오염물질을 이용하여 산출된 제주도 서부지역에서의 건성침적 플럭스를 타 자료와 비교하여 Table 4.4에 나타내었다. 물론 건성침적량을 평가함에 있어서 우리나라는 타 지역에서 연구 자료가 극히 제한되어 있을 뿐 아니라 지표면 상태나 특성 그리고 토지이용형태 등이 지역마다 다르므로 직접적인 평가는 곤란하지만 모델에서 추정된 값의 비교를 위해 타 지역의 자료를 함께 제시하였다.

인위적인 배출원의 직접적인 영향이 거의 없는 제주도 서부지역에서 SO₂ 건성침적 플럭스를 산정한 결과는 다음과 같다. SO₂의 경우 대기 중 SO₂ 농도가 아주 낮음에도 불구하고 연 평균 플럭스는 0.0086 μg/m²·s 수준으로 타 지역과 비교할 때 아주 낮은 수준임을 알 수 있다. O₃의 경우 제주도 서부지역에서 측정된 O₃ 농도가 타 지역에 비해 낮은 수준이 아님에도 불구하고 연평균 플럭스는

0.098 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 으로 타 지역이나 외국의 자료에 비해 아주 낮은 수준임을 알 수 있다.

Table 4.4. The estimated dry deposition fluxes

Season	This study		Seoul ¹⁾	Chunchon ²⁾	Pusan ³⁾	Cotton field ⁴⁾	Grass field ⁵⁾
	SO ₂	O ₃	SO ₂	SO ₂	O ₃	O ₃	O ₃
Winter	1.482	33.991	58.19	10.08			
Spring	4.262	56.737	38.86	6.57	2.14	2.14	42.86
Summer	7.793	52.390	15.68	8.46	~	~	~
Fall	2.113	44.424	23.21	15.66	107.1	128.57	53.57
Annual	3.107	46.318	33.99	12.98			

unit : $\times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$

1) 김시완, 박순웅(1996)

2) 이종범 등(1998)

3) 노순아(2000)

4) Padro(1996)

5) Padro 등(1998)

V. 결 론

청정한 대기질을 보이는 제주도 지역에서 오염물질의 건성침적량의 수준을 평가하고자 대부분 농경지로 구성된 제주도 서부 지역을 대상으로 다층저항모델을 적용하여 SO₂와 O₃ 건성침적속도와 플럭스를 산정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제주도 서부지역에서 SO₂의 연평균 건성침적속도는 0.246±0.091 cm/s 이었으며 여름철에는 연평균 값의 1.7배 정도인 0.408 cm/s로 가장 높았고 다음으로 봄철 0.327 cm/s, 가을철 0.099 cm/s, 겨울철 0.099 cm/s의 순으로 나타났다. 그리고 여름철과 겨울철의 건성침적 속도는 4배 이상의 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한 겨울철을 제외한 나머지 계절에서는 주간보다는 야간의 건성침적속도가 높게 나타났다. 따라서 SO₂의 건성침적속도는 식물에 의한 표면의 피복상태는 물론이고 이슬 등에 의한 표면의 젖음 효과에 의해 건성침적속도가 크게 증진됨을 알 수 있었다.

2. 제주도 서부지역에서 O₃의 연평균 건성침적속도는 0.097±0.027 cm/s 수준이고 여름철에 0.111 cm/s로 가장 높았고, 다음으로 봄철 0.102 cm/s, 가을철 0.101 cm/s, 겨울철 0.080 cm/s의 순이었다. 그렇지만 계절에 따른 건성침적속도의 수준은 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 시간대별 변동은 야간 시간대에는 거의 일정한 수준을 보이고 주간에는 증가하여 최고값을 보인 후 다시 감소하는 형태를 보였다. 따라서 O₃의 건성침적속도는 SO₂와는 달리 야간의 표면 젖은 정도에는 무관하고 주간의 일사량의 변화에 크게 좌우됨을 알 수 있었다.

3. 제주도 서부 지역에서 건성침적 플럭스를 산정한 결과 SO₂의 경우는 연평균 flux는 0.0086 μg/m²·s로서 타 지역과 비교할 때 아주 낮은 수준을 나타냈으며 계절별로는 여름철에 건성침적 플럭스가 가장 높고 겨울철이 낮았으며 계절별 차이가 상당히 크게 나타났다. O₃의 경우에는 대기 중 O₃의 농도가 타 지역에 비해 낮은 수준이 아님에도 불구하고 연평균 플럭스가 0.098 μg/m²·s로써 타 지역에 비해 낮은 수준이었으며 봄철에 가장 높고 겨울철이 가장 낮은 수준이었으나 계절별 차이는 크지 않았다.

참 고 문 헌

김시완, 박순용, 1996, 서울 지방의 산성 오염 물질의 건성침착량 추정, 한국 기상학회지, 32(2), 325-338.

노순아, 2000, 오존의 건성침적 특성에 관한 수치모의, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문, 54pp.

문난경, 1996, 중규모에서의 대기 오염 물질 침적 모델에 관한 연구, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문, 90pp.

박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1994, 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.

박종길, Eric R. Allen, 1998, 기상요소에 의한 대기오염물질의 건성침적량 추정, 환경연구노트, 7, 54-70.

이병규, 1998, Atmospheric Deposition of PAHs and Metals onto the Bay Areas : Measurement Techiques and Source Apportionment, 환경연구노트, 7, 14-31.

이종범, 박세영, 김용국, 조창래, 1998, 초음파 풍속온도계를 이용한 SO₂ 건성 침착속도의 계절변화 특징, 한국대기보전학회지, 14(5), 415-478.

윤순창, 1992, 한반도의 대기 오염 분석 결과, 한반도의 국지기상 특징과 대기환경 Workshop 자료집, 서울대학교 자연과학대학 대기환경연구소.

장광미, 이호근, 서명석, 박경윤, 강창희, 허철구, 심상규, 1996, 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO₂ 농도 변화 특성, 12(5), 541-554.

전병일, 김유근, 이화운, 1994, 부산 지역의 SO₂ 농도 변화 특성에 관한 고찰, 대기환경보전학회지, 10(4), 245-251.

홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경윤, 1992, 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 257-261.

Adema, E. H., and P. Heeres, 1995, Dry deposition of dioxide and ammonia on wet surface and the surface oxidation kinetics of bisulphite, *Atmos. Environ.*, 29, 1091-1103.

Baldocchi, D. D., Hicks, B. B. and Camara, P., 1987, A canopy stomatal

resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces, *Atmos. Environ.*, 21, 91-101.

Brimblecombe, P., and D. J. Spedding, 1974, The absorption of low concentrations of sulphur dioxide into aqueous solutions.

Brutsaert, W., 1975, The roughness length for water vapor, sensible heat and other scalars. *Atmos. Environ.*, 32, 2028-2031.

Chamberlain, A. C., 1966, The transport of gases to from grass and grass-like surfaces. *Proceeding Royal Soc.*, 290pp.

Erisman, J. W., Pul, A. V. Wyers, P., 1994, Parameterization of surface resistance for the quantification of atmospheric deposition of acidifying pollutants and ozone, *Atmos. Environ.*, 28, 2595-2607.

Fisher, M. J. Charles-Edwards, D. A. and Ludlow, M. M., 1981, An analysis of the effects of repeated short-term soil water deficits on stomatal conductance to carbon dioxide and leaf photosynthesis by the Legume *Macroptilium atropurpureum* cv. Siratro, *Aust. J. Plant Physiol.* 8, 347-357.

Fowler, D., 1978, Dry deposition of SO₂ on agricultural crops, *Atmos. Environ.*, 12, 369-373.

Gerland J. A., 1977, The dry deposition of sulphur dioxide to land and water surfaces, *Proc. R. Doc. Land.*, A 354, 245-268.

Hicks, B. B., 1981, An examination of turbulence statistics in the surface boundary layer, *Boundary Layer Meteorology*, 21, 389-402.

Hicks, B. B., Baldocchi, D. D., Meyers, T. P., Hosker Jr., R. P. and Matt, D. R., 1987, A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities, *Water, Air, and Soil Pollution*, 36, 311-330.

Jarvis, P. G., 1971, The estimation of resistances to carbon dioxide, in *Plant Photosynthetic Production: Manual of Methods*, 566-631.

Jarvis, P. G., 1976, The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field *Phil. Trans. R. Soc. London ser. B.*, 273, 593-610.

Jung J. Y., 1996, A study on the dry deposition model of air pollutants according to weather conditions, Master of Science Thesis, Inje University, p65.

Lee H. W., J. K. Park, and S. E. Moon, 1989, Simulation for the deposition velocity of the pollutants, *J. of the Korean Meteorological Society*, 25, No.3, 121-128.

Louis, J. F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the

atmosphere, *Boundary Layer Meteorology*, 17, 187-202.

McMahon, T. A., P. J. Denison., and R. Fleming, 1976, A long-distance air pollution transportation model incorporation washout and dry deposition components. *Atmos. Environ.*, 10, 751-761.

Meyers, T. P., B. B. Hicks, R. P. Hosker, Jr., J. D. Womack, and L. C. Statterfield, 1991, Dry deposition inferential measurement techniques-II. Seasonal and annual deposition rates of sulfur and nitrate, *Atmos. Environ.*, 25A, 2361-2370.

Monteith, J. L., 1957, Dew, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 83, 322-241.

NAPAP, 1991, Acidic deposition, State of Science and technology.

Norman J. M., 1979, Modelling the complete crop canopy, *Modification of the Aerial Environment of Plants*, 249-277.

Norman J. M., 1982. Simulation of microclimates. *Biometeorology In Integrated Pest Management*, 65-99.

Noilhan, J. M., and S. Planton, 1989, A simple parameterization of land surface process for meteorological models, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.

Norman, J. M., 1982, Simulation of microclimates, *Biometeorology in Integrated Pest Management*, 65-99.

Padro, J., Neumann, H. H. and Hartog, G. D., 1992, Modelled and observed dry deposition velocity of O₃ above a deciduous forest in the winter, *Atmos. Environ.*, 26A, 775-784.

Padro, J., Massman, W. J., Hartog, G. D., Neumann, H. H., 1994, Dry deposition velocity of O₃ over a vineyard obtained from models and observations: The 1991 California ozone deposition experiment, *Water, Air, and Soil Pollution*, 75, 307-323.

Padro, J., 1994, Observed characteristics of the dry deposition velocity of and above a wet deciduous forest, *The Science of the Total Environment*, 146/147, 395-400.

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.

Padro, J., L. Zhang and W. J. Massman, 1998, An analysis of measurements and modeling of air-surface exchange NO-NO₂-O₃ over grass, *Atmos. Environ.*, 32, 1365-1375.

Panofsky, H. A., and J. A. Dutton, 1984, *Atmospheric Turbulence*, Wiley, 397pp.

Park, S. U., 1994 : The effect of surface physical conditions on the

growth of the atmospheric boundary layer. *J. of Korean Meteor. Soc.*, 30, 119-134.

Sehmel G. A., 1980, Particle and annual gas dry deposition: a review, *Atmos. Environ.*, 14, 983-1011.

Shepherd J. G., 1979, Measurement of the direct deposition of sulphur dioxide onto grass and water by the profile method. *Atmos. Environ.*, 8, 69-74.

Sorteberg, A. and Hov, O., 1996, Two parameterization of the dry deposition exchange for SO₂ and NH₃ in a numerical model, *Atmos. Environ.*, 30, 1823-1840.

Thom A. S., 1975, Momentum, mass and heat exchange of plant communities. *Vegetation and the Atmosphere*, 1, 57-109.

Walcek, C. J., R. A. Brost, H. S. Chang, and M. L. Wesely, 1986 : SO₂, Sulfate and HNO₃ deposition velocities computed using regional landuse and meteorological data. *Atmos. Environ.*, 20, 949-964.

Weiss, A. and Norman, J. M., 1985, Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components, *Agric. Forest Meteorol.*, 34, 205-213.

Wesely, M. L. and Hicks, B. B., 1977, Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation,, *J. Air Pollut. Control. Assoc.*, 27(11), 1110-1116

Wesely M. L., 1989, Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, *Atmos. Environ.*, 6, 1293-1304.

Whelpdal, D. M., and P. W. Shaw, 1974, Sulphur Dioxide Removal by Turbulent Transfer over grass, Snow and Water Surfaces, *Tellus*, 26, 196-205.

Wilson M. F., 1989, The construction and use of land surface information in a general circulation climate model. Unpublished Ph. D. thesis, University of Liverpool, United Kingdom, 346pp.

반 성 문

너무도 오랜 기간이 걸렸습니다.
그러나 그 오랜 시간은 논문의 완성도를 위한 준비 기간이 아닌 막연히
그냥 보내버린 기간이었습니다.

지금 돌이켜 보니 아주 멀리 돌아 온 길이었던 것 같습니다.
그 길을 돌아오는 동안 주위 분들에게 많은 짐을 맡겨 버렸습니다.
참 너무도 무심한 행동이었는데도 그 분들은 끝까지 그 짐을 들고
계셨습니다.

이제 그 고마움과 죄송함을 글로 표현하기에는 너무도 크기에 오히려
처음 무지의 자세일 때보다 더 부끄러움을 갖게 됩니다.

이 기 호 교수님

정말 죄송스럽고 고맙습니다.

그리고 항상 관심과 조언을 아끼지 않으셨던
허철구 교수님, 감상규 교수님 감사합니다.

새로운 학문을 해나가면서 많은 가르침을 주셨던
오윤근, 허목, 이용두, 조은일 교수님 정말 감사드립니다.

1998년부터 시작된 인연이 어느덧 2002년 시작의 길에 와 있습니다.
그 가르침과 고마움을 이제는 제 일터에서 열심히 해 나가겠습니다.

그리고 그동안 바쁜 업무중에도 무사히 마칠 수 있도록 많은 배려를
해주신 제주지방기상청 직원 여러분께 감사드립니다.

끝으로 항상 막내등이로 늘 걱정이 끊이지 않지만,
항상 든든한 울타리가 되는 엄마, 오빠, 언니, 그리고 경찬 오빠
사랑합니다.