

碩士學位論文

제주지역에서 SO₂와 O₃의
건성침적플럭스 추정



濟州大學校 大學院

環境工學科

金 秀 美

2003年 12月

제주지역에서 SO₂와 O₃의 건성침적플럭스 추정

指導教授 李 起 浩

金 秀 美

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金秀美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

2003年 12月

Estimation of Dry Deposition Flux of SO₂ and O₃ over Jeju Island

Su-Mi Kim

(Supervised by professor Ki-Ho Lee)

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirement for the
degree of Master of Engineering



This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Chul-Goo Hu, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Sang-Kyu Kam, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Ki-Ho Lee, Prof. of Environmental engineering

December, 2003

Department of Environmental Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

Summary	vi
1. 서 론	1
2. 이론적 고찰	3
2.1. 건성침적과정의 해석	3
2.2. 건성침적모델	4
2.2.1. 공기역학적 저항(aerodynamic resistance, R_a)	6
2.2.2. 점성층 저항(quasi-laminar boundary layer resistance, R_b)	8
2.2.3. 표면 저항(surface or canopy resistance, R_c)	9
3. 연구방법	15
3.1. 모델 적용영역	15
3.2. 토지이용형태의 분류	15
3.3. 기상 및 농도 자료의 수집 및 적용	18
3.4. 건성침적속도 산정	20
4. 결과 및 고찰	22
4.1. 건성침적속도의 영향요소에 대한 민감도 분석	22
4.1.1. 풍속	22
4.1.2. 일사량	25
4.1.3. 기온과 지면온도의 차이(t_a-t_g)	25
4.1.4. 대기안정도	28
4.2. 제주지역의 건성침적속도	30
4.2.1. 건성침적속도의 월별 변동	30
가. SO ₂	30

나. O ₃	31
4.2.2. 시간적 변동특성	32
가. 주·야간 변동	32
나. 강수에 따른 건성침적속도의 변화	32
다. 건성침적속도와 각 저항과의 관계	37
4.2.3. 건성침적속도의 공간적 분포특성	40
가. 분포도	40
나. 고도별 분포	42
4.3. 제주지역의 건성침적플럭스	45
4.3.1. 오염물질 농도	45
가. SO ₂	45
나. O ₃	46
4.3.2. 건성침적플럭스 평가	47
가. 월별 변동	47
나. 공간적 분포도	48
다. 건성침적량 평가	50
5. 결 론	52
NOMENCLATURE	53
6. 참고문헌	55

List of Figures

Fig. 1. Schematic diagram of pathway resistances used in the dry deposition model, where r_c is derived via Equation (14)	10
Fig. 2. Grid system and landuse map used in this study	17
Fig. 3. Location of meterological observation stations and air quality monitoring stations	19
Fig. 4-1. Effect of wind speed on dry deposition velocity in stable condition	23
Fig. 4-2. Effect of wind speed on dry deposition velocity in unstable condition	24
Fig. 5. Effect of solar radiation on dry deposition velocity	26
Fig. 6. Effect of t_a-t_g on dry deposition velocity according to wind speed	27
Fig. 7. Relationship with SO_2 and O_3 dry deposition velocity and Richardson number	29
Fig. 8. Monthly variation of SO_2 dry deposition velocity in Jeju Island	30
Fig. 9. Monthly variation of O_3 dry deposition velocity in Jeju Island	31
Fig. 10. Monthly variation of SO_2 and O_3 dry deposition velocity according to day and night time	33
Fig. 11. Monthly variation of SO_2 and O_3 dry deposition velocity according to non-rain and rain day	34
Fig. 12. Monthly variation of SO_2 and O_3 dry deposition velocity between day time and night time for non-rain day and rain day	36
Fig. 13-1. Monthly variation of resistances and dry deposition velocity for SO_2	38
Fig. 13-2. Monthly variation of resistances and dry deposition velocity for O_3	39
Fig. 14. Distribution of SO_2 and O_3 dry deposition velocity in Jeju Island	41
Fig. 15. Monthly variation of SO_2 concentration	45

Fig. 16. Monthly variation of O₃ concentration 46
Fig. 17. Monthly variation of SO₂ dry deposition flux and concentration 47
Fig. 18. Monthly variation of O₃ dry deposition flux and concentration 48
Fig. 19. Distribution of SO₂ and O₃ dry deposition flux in Jeju Island 49



List of Tables

Table 1. Roughness length value(m) used in the model(Wesely, 1989)	6
Table 2. Input resistances(s/m) to the model for computation of surface resistances(r_c). Entries of 9999 indicate that there is no air-surface exchange via that resistance pathway	13
Table 3. Landuse types and seasonal categories used in Wesely's model	14
Table 4. Comparison of classification of landuse types between Jeju GIS and this study	16
Table 5. Meteorological factors observed at meteorological stations	19
Table 6-1. The value of SO ₂ dry deposition velocity in Jeju Island	43
Table 6-2. The value of O ₃ dry deposition velocity in Jeju Island	44
Table 7. Dry deposition fluxes(g/km ² · hr) in Jeju Island	50
Table 8. Dry deposition amount(kg/day) in Jeju Island	51
Table 9. Total dry deposition amount(ton) in Jeju Island	51

Summary

This study was performed to estimate the dry deposition velocities and fluxes of SO_2 and O_3 using Wesely's approach, and to clarify the characteristic of the temporal and spatial distributions of dry depositions throughout Jeju Island. For this purpose, the hourly averaged meteorological data and air quality monitoring data were collected for one year of 2002. The GIS data for landuse types were also used in this study.

The dry deposition velocities of SO_2 and O_3 increase with wind speed and solar radiation. The dry deposition velocities are highly increased under the unstable atmospheric condition.

Over entire Jeju Island, the annual average of dry deposition velocities for SO_2 and O_3 shows the range of 0.14~0.44 cm/sec and 0.22~0.44 cm/sec, respectively. These deposition velocities appears to be the largest in summer. During the day time, the dry deposition velocities of SO_2 and O_3 are higher than those for night time, due to the turbulence intensity. Spatial distributions of dry deposition velocities over Jeju Island shows higher near the seaside area and lower in mountainous area.

The annual dry deposition fluxes of SO_2 and O_3 are 0.46 ppb · cm/sec and 11.74 ppb · cm/sec, respectively. These fluxes are low compared to those for other regions in Korea. The level of SO_2 flux is high in Jeju city and Seogwipo city due to the high SO_2 concentration. On the other hand, the O_3 flux appear to be low in both urban and mountainous area.

It can be predicted that the annual dry deposition amount of SO_2 and O_3 over Jeju Island are approximately 2,700 ton and 67,900 ton, respectively.

1. 서론

대기는 해양이나 호소에서 발견되는 많은 입자상·가스상 물질과 기타 오염물질의 주요한 공급원으로서 역할을 하고 있다. 이러한 대기로부터 침적되는 오염물질로 인한 환경에의 악영향 즉, 호소의 산성화, 산림자원이나 농작물에의 피해 등이 알려지면서 대기오염물질의 침적에 대한 많은 관심이 고조되고 있다. 특히 SO₂, O₃ 등의 기체상 오염물질이 식물 표면에 침적되면 식물의 생물학적 활동에 피해를 줄 수 있으며, 건물 등의 물체를 부식시키는 등 환경의 화학적 특성을 변화시킨다(원과 이, 1998).

대기 중의 가스상 물질들이 난류수송에 의해 지표로 침적되는 과정은 대기 중에서 중요한 세정효과로 작용하며, 지표로 대기 중 화학물질을 수송하는데 중요한 의미가 있다(Voldner 등, 1986; Wesely, 1989). 대기로부터 침적되는 과정 중 습성침적에 관한 평가는 관측과 분석이 비교적 용이하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 그렇지만 건성침적은 지형, 기상조건, 국지적인 오염원 등이 크게 작용하므로 정확한 침적량 추정과 침적과정에 대한 해석이 어렵고 직접 측정도 곤란할 뿐만 아니라 기자재 설치에도 많은 비용이 요구되는 등 측정상의 기술적·경제적 문제 때문에 아직도 그 결과에 많은 논란이 있지만 이 과정에 대한 평가를 위한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 결함을 보완하기 위해 기상학적 변수를 근거로 침적률을 추론하기 위한 모델을 개발해 오고 있다.

대기에서 오염물질의 건성침적 제거에 대한 선행연구의 결과를 살펴보면, Voldner 등(1986)은 북미에서의 산성물질에 대한 격자별 평균 건성침적속도를 산정하여 특정한 지역과 시간에 대한 건성침적속도는 그 지역의 기상조건과 표면상태에 따라 실질적으로 그 평균치가 다르게 나타남을 제시하였고 건성침적속도의 시·공간적 변화가 중요함을 강조하였다. Walcek 등(1986)은 중규모의 기상모델을 통해 예측된 기상데이터를 이용하여 미국 동부와 캐나다 남동부에서 토지이용형태(landuse types)에 따른 SO₂, 황산염과 HNO₃에 대한 건성침적속도를 산출하였는데 토지이용형태에 따른 기상학적 변화가 침적속도에 중요하게 영향을 미칠 수 있다는 것을 제시하였으며 젖은 표면(wet surface)에 대한 침적속도가 건조한 표면(dry surface)에 대한 결과의 2배가

됨을 보였다. Wesely(1989)는 침적지점으로의 이동경로를 식생이 있는 캐노피의 상부, 하부, 지표면의 세 부분으로 나누어 표면 저항을 계산하는 방법을 제시하여 침적속도 계산에 있어서 표면 저항이 중요함을 강조하고 이를 상세하게 모수화한 바 있다. 김과 박(1996)은 Wesely(1989)의 저항유사법을 서울지방에 적용하여 산성오염물질인 SO₂와 NO₂의 건성침적량을 정량적으로 추정하였다. 이 등(1994, 1998)은 부산의 지형적 특성을 고려하여 O₃에 대해 건성침적속도를 수치 모의함으로써 대기안정도가 침적속도에 미치는 영향에 대해 조사하고 지표면 상태에 따라 건성침적속도의 많은 차이가 있음을 보였다.

제주도는 지역 내 인위적 오염원의 영향을 무시할 수 있는 청정 지역으로 우리나라의 배경농도를 관측하고 평가할 수 있는 최적의 입지적 조건을 지니고 있을 뿐만 아니라 산림자원을 포함한 식물 생태환경이 비교적 잘 보전되고 있으며 고도별로 토지이용형태가 아주 다양한 특징을 지니고 있다. 따라서 제주도를 대상으로 건성침적현상을 연구함에 있어서 이러한 지리적 특성을 세부적으로 고려하여 평가할 필요가 있다.

이(2001)는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 Hicks 등(1987)에 의해 개발된 다층저항모델(multiple layer resistance model)을 이용하여 대부분이 농경지로 이루어진 제주도 서부지역을 대상으로 SO₂와 O₃의 건성침적플럭스를 평가한 바 있으나, Hicks 모델을 적용함에 있어서 제주도 전역의 종합적이고 구체적인 식물 상태 및 생리 자료가 체계적으로 파악되어 있지 않은 관계로 특정 지역에 대해서만 고려하였다. 지금까지 제주도가 지닌 입지적 여건을 전반적으로 고려하여 대기 침적 특성을 평가하기 위한 시도는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대기오염물질의 건성침적을 해석하기 위해 지표면 특성을 보다 상세하게 모수화한 Wesely의 분류방식을 근간으로 하여 제주도 전역에 대해 SO₂와 O₃의 건성침적량을 평가하고자 했다. 이를 위해서 제주도 전역을 대상으로 구축된 지리정보시스템의 토지이용형태 및 식생 분포에 관한 자료와 제주도 전역에 설치된 국지기상관측자료를 활용하여 제주지역의 자연환경특성이 최대한 반영되도록 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1. 건성침적과정의 해석

침적과정에 의해 대기 중 오염물질의 체류시간 및 수송거리가 제한되고 대기 중 오염물질의 농도를 조절하게 되며, 크게 두 가지 방식으로 침적된다. 첫째로 습성침적(wet deposition)은 대기오염물질이 비, 우박, 눈 등에 용해되거나 부착되어 지표면에 도달하는 자연적 과정으로 습성침적 양상은 지형에 따라 결정되며 오염물질의 습성침적량은 비의 양과 수용체의 위치에 크게 의존한다(Erisman 등, 1995). 일반적으로 습성침적은 바켓이나 깔때기의 열림(opening)을 통해 강수나 강설시료를 직접 채취하여 비교적 쉽게 측정할 수 있다.

두 번째로는 오염물질 그 자체나 또는 여러 오염물질들이 물리·화학적 과정을 거쳐 새로운 오염물질의 형태로 되어 직접 강하되는 건성침적(dry deposition)을 들 수 있다. 지표층에서의 건성침적은 지표면의 물리, 화학적 및 생물학적 특성에 크게 영향을 받게 된다. 대기오염물질의 건성침적을 측정하기 위해 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 건성침적을 평가하는 가장 정확한 방법 중 하나는 미기상학적 방법인데, 흔히 와관상법(eddy correlation method)이라 부르기도 한다. 와관상법은 난류측정장치와 농도측정장치를 이용하여 연직바람(w)과 오염물질 농도(C)의 순간 변동량을 측정함으로써 미기상학적인 방법으로 건성침적플럭스($F = \overline{w'C}$)를 직접 산출하는 방법이다. 연직바람의 변동량을 측정하기 위한 난류 측정 장치로는 초음파 풍속온도계 등이 이용되지만 장치가 고가이고 다루기가 어렵다(이 등, 1998). 또한 이 방법은 특정한 조건하에서 건성침적을 측정하는데 유용하지만 식물, 도시지역, 해안지역 등이 다양하게 존재하는 비균질 표면에는 적용하기가 곤란하다(Davidson 등, 1985). 건성침적현상은 대기의 난류강도 및 지표면 상태 등에 의존하기 때문에 정확한 난류 측정자료가 요구된다. 이를 위해 앞에서 서술한 초음파 풍속온도계를 이용할 경우에는 3차원 바람의 변동 성분 및 온도의 변동성분을 측정함으로써 원하는 시간에 대한 여러 가지 난류자료를 얻을 수 있다. 그렇지만 이러한 난류 측정이 어려울 경우 기상탑을 설치하여 두 고도 이상에서의 평균기상자료를 측정하고 평균농도자료와 함께 공

기억학적 접근방법으로 오염물질의 침적을 측정하는 경도법(gradient method)을 이용할 수 있다(이 등, 1998). 이 방법은 1% 이하의 화학적 차이를 구별해 내는 화학적 농도센서를 사용한다. 세 번째 방법은 건성침적현상을 측정하는 가장 직접적인 방법으로 표면-시료 채취법(surface-sampling method)이 있으며 이 방법은 눈 덩어리의 분석법, 식물 잎을 세정(leaf washing)한 후 전자현미경에 의해 분석하는 방법, 그리고 식물 시료를 용해하여 분석하는 방법 등을 포함한다. 이러한 건성침적의 직접적인 측정방법은 장치가 고가일 뿐 아니라 측정상의 기술적 문제 때문에 실용적이지 못하다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 지표면으로의 건성침적을 다루는 일반적인 방법으로 저항유사법(resistance analogy)이 사용된다. 건성침적플럭스는 저항유사법에 의해서 구한 각 층을 통과할 때 생기는 저항의 합의 역수인 건성침적속도(V_d)와 평균농도(C)의 곱($F = V_d C$)으로 나타낼 수 있다. 이 방법에서는 건성침적속도의 측정이 중요한 관건이 된다. 이를 위해 모델을 통한 연구가 많이 이루어지고 있는데 현재 일반적으로 많이 사용되는 건성침적 모델은 RADM(Regional Acid Deposition Model), ADOM(Acid Deposition and Oxidant Model), CALGRID model 등이며 이들 모델을 구성하는 모듈은 건성침적과정에 의해 지표로 침적되는 산성오염물질의 침적플럭스를 산정할 수 있도록 구성되어 있다.

2.2. 건성침적모델

대기 중 가스와 입자상물질의 건성침적과정은 오염물질의 농도와 경계층에서의 난류이동과정, 침적되는 물질의 물리·화학적 성질, 그리고 오염물질을 흡수하거나 부착되는 표면의 성질에 의해서 제어된다(Erisman 등, 1995). 즉 가스상 오염물질의 건성침적과정은 기상조건, 침적되는 표면의 물리·화학적 및 생물학적 특성, 대기 중 오염물질의 농도 등의 함수이다. 이러한 건성침적과정을 이해하기 위해서 일반적으로 사용되는 주요 메커니즘은 3가지 수송 즉, 저층 대기에서의 난류확산에 의한 수송, 표면 가까이의 층류 경계층을 통한 수송, 그리고 가스상 또는 입자상 물질이 표면에 흡착 또는 흡수되는 표면에 대한 수송과정으로 나눈다.

건성침적과정에 의해 특정한 지역에 일정 기간동안 침적되는 대기오염물질의 침적

량을 알기 위해서는 대기 중의 오염물질이 지표면으로 수송되어 나타나는 건성침적 플럭스를 추정할 수 있어야 한다. 일반적으로 지표로 향하는 임의의 오염물질의 플럭스(flux, $F_d(\text{ppb} \cdot \text{cm}/\text{sec})$)는 오염물질의 농도 $C(\text{ppb})$ 에 선형적으로 비례한다고 가정하여

$$F_d = V_d \times C \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $V_d(\text{cm}/\text{sec})$ 는 건성침적속도(dry deposition velocity)로서 임의의 오염물질에 대해 시간과 공간에 따라 매우 변화가 심하며 많은 기상요소 및 환경요인들에 의해 영향을 받는다. 이 관계식은 대기의 상태를 매우 간소화한 형태이므로 완전한 침적현상을 묘사하지는 않지만 건성침적속도는 수치모델에서 침적율을 결정하는데 있어서 아주 중요한 지표로 사용된다. 이와 같은 건성침적속도를 평가함에 있어서 저항유사법(resistance analogy)이 도입된 다층저항모델(multiple layer resistance model)에서는 앞에서 설명한 3가지 수송과정에 나타날 수 있는 3가지 저항의 개념 즉, 난류층에서의 공기역학적 저항(R_a), 준-라미나층에서의 점성층 저항(R_b), 그리고 수용체의 표면 저항 혹은 canopy 저항(R_c)을 적용하며 오염물질의 이동에 대한 총 저항($R_t(\text{s}/\text{m})$)을 각 수송저항의 직렬저항의 합으로 하고 이의 역수를 취해서 건성침적속도를 산정한다.

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} = \frac{1}{R_t} \quad (2)$$

이때 건성침적속도에 대한 관계식을 얻기 위해서 오염물질의 플럭스는 난류층을 통해서 일정하고 미량가스에 대한 난류확산계수가 난류층을 통한 열 확산계수와 같다고 가정한다.

본 장에서는 건성침적현상을 평가하기 위해 식생층 및 지표면에 의한 수송과정 등을 상세히 고려하여 대기오염물질의 건성침적속도를 보다 정확히 계산할 수 있는 모델을 구성하고자 한다. 그리고 기존에 많은 모델이 연구되고 있으나 여기서는 이(2001)가 제주 서부지역에 대해 적용했던 Hicks 모델과 비교하여 설명하고자 한다.

2.2.1. 공기역학적 저항(aerodynamic resistance, R_a)

공기역학적 저항은 대기로부터 표면 층류 경계층까지 오염물질의 난류확산에 의한 수송과정을 나타낸 것으로 주로 지역 대기에서의 난류강도에 의해 지배된다. 즉 공기역학적 저항은 저층 대기에서의 풍속, 대기안정도, 그리고 지표면 성질에 따른 거칠기 길이로 계산되며 일반적으로 Sheih 등(1979)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$R_a = \frac{\ln(z/z_0) - \Psi_h}{ku_*} \quad (3)$$

여기서 z 는 저층 대기의 높이(m) 즉 건성침적속도가 계산되는 고도를 말하며, z_0 는 거칠기 길이(roughness length(m)), Ψ_h 는 보편함수, k 는 von Karman 상수(약 0.4), u_* 는 마찰속도(m/s)이다. 본 연구에서 z 는 일반적으로 안정도를 평가하는 표준 높이인 10m를 가정하고, 안정도와 풍속과 더불어 건성침적속도를 산정하기 위해 필요한 z_0 는 제주지역의 지표특성을 고려한 실질적인 값이 없기 때문에 표면거칠기의 불연속성, 지형기복 그리고 나무와 건물 같은 장애물의 영향을 포함하는 지역적 규모의 모델링에 적용하기 위해 충분히 고려하여 평가된 기존 연구의 값을 선택하여 적용하였다. 각 계절과 landuse types에 대한 거칠기 길이 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Roughness length value(m) used in the model(Wesely, 1989)

landuse type	seasonal category			
	spring	summer	autumn	winter
urban	1	1	1	1
agriculture	0.03	0.25	0.1	0.005
range	0.02	0.05	0.05	0.05
deciduous forest	1	1	1	1
coniferous forest	1	1	1	1
mixed forest	1	1	1	1

한편 Hicks 모델에서는 공기역학적 저항을 산정함에 있어서 난류를 직접 측정하는

것이 더 좋은 접근방법이라고 제안하고 표면거칠기와 대기안정도에 관련된 풍향 표준편차(σ)를 입력자료로 하여 경험식에 의해 간소화한 형태를 사용한다. 그러나 현재 우리 나라의 기상자료로는 Hicks 모델이 요구하고 있는 풍향 표준편차에 대한 입력자료를 직접 측정할 수 없기 때문에 현실적으로 Hicks 모델을 이용한 공기역학적 저항의 산출이 불가능하다. 이러한 문제점은 풍속, 대기 안정도 등 대기의 특성과 표면의 성질에 따른 거칠기 길이를 사용하여 표준 미기상학적 접근방법으로 공기역학적 저항을 추정할 수 있는 방정식(식 (3))을 사용하고 계산에 필요한 마찰속도와 현열 플럭스는 안정도에 따른 Louis(1979)의 식을 적용하여 극복할 수 있다.

마찰속도는 우선 다음 식에 제시한 대기 경계층에서의 안정도 평가 지표로서 Richardson number(R_{ib})를 이용하여 저층 대기에서의 안정도, 표면거칠기와 풍속으로부터 산정된다.

$$R_{ib} = \frac{gz(\theta_{va} - \theta_{vg})}{\theta_{vg}u^2} \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도(9.81m/s^2), θ_{va} 와 θ_{vg} 는 각각 높이 z 와 지표면에서의 가온위(virtual potential temperature), 그리고 u 는 높이 z 에서의 풍속(m/s)이다.

마찰속도는 대기의 상태가 안정($R_{ib}>0$)한 경우와 불안정($R_{ib}\leq 0$)한 경우로 나누어 다음 식으로부터 산정된다(Louis, 1979).

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z/z_0)} \left[\frac{1}{(1+4.7R_{ib})} \right], \quad R_{ib}>0 \quad (5)$$

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z/z_0)} \left[1 - \frac{9.4R_{ib}}{(1+7.4B)} \right]^{1/2}, \quad R_{ib}\leq 0 \quad (6)$$

$$B = 9.4 \left[\frac{k}{\ln(z/z_0)} \right]^2 \left[|R_{ib}| \frac{z}{z_0} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Monin-Obukhov length, L 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{\theta_{vg} u_*^3}{kgH} \quad (8)$$

여기서 H 는 저층 대기에서의 heat flux(virtual potential temperature flux)이며, Louis(1979)에 의해 모수화된 다음 식을 사용하여 계산된다.

$$H = \frac{u \Delta\theta_v}{0.74} \left[\frac{k}{\ln(z/z_0)} \right]^2 \left[\frac{1}{(1+4.7R_{ib})} \right]^2, \quad R_{ib} > 0 \quad (9)$$

$$H = \frac{u \Delta\theta_v}{0.74} \left[\frac{k}{\ln(z/z_0)} \right]^2 \left[1 - \frac{9.4R_{ib}}{(1+5.3B)} \right], \quad R_{ib} \leq 0 \quad (10)$$

여기서 $\Delta\theta_v = \theta_{va} - \theta_{vg}$ 이고, B 는 식 (7)에 정의된다.

식 (3)에서 보편함수(stability correction function) Ψ_h 는 Monin-Obukhov length, L 의 형태로 나타낼 수 있다(Wesely와 Hicks, 1977).

$$\Psi_h = -5 \frac{z}{L}, \quad R_{ib} > 0 \quad (11)$$

$$\Psi_h = \exp \left\{ 0.598 + 0.39 \ln \left(-\frac{z}{L} \right) - 0.09 \left[\ln \left(-\frac{z}{L} \right) \right]^2 \right\}, \quad R_{ib} \leq 0 \quad (12)$$

2.2.2. 점성층 저항(quasi-laminar boundary layer resistance, R_b)

표면에 인접하고 있는 얇은 대기층을 통한 가스상 입자의 수송에 대한 저항으로 이 층에서는 난류가 지표까지 도달되지 않고 laminar flow가 발달하게 된다. 즉 laminar layer를 통한 수송에서는 난류 수송과정이 더 이상 적용되지 않고 오염물질의 분자확산이나 브라운 확산이 중요하게 작용하며 점성층 저항(R_b)은 Wesely와 Hicks(1977)에 의해 제안된 다음 식을 사용하였다.

$$R_b = \frac{2}{ku_*} \left[\frac{x}{D_x} \right]^{2/3} \quad (13)$$

여기서 κ 는 대기의 열적 확산계수(thermal diffusivity)이고, D_x 는 대기 중 미량가스의 분자확산계수(molecular diffusivity)이다.

2.2.3. 표면 저항(surface or canopy resistance, R_c)

지표면에서의 침적, 특히 지표의 대부분을 차지하고 있는 식생층으로의 침적과정을 표면 또는 캐노피 저항(R_c)으로 표현한다. 많은 연구(Baldocchi 등, 1987; Hicks 등, 1987; Wesely, 1989)에서 표면 저항은 광합성 활동(photosynthetic activity), 일사량 및 각 가스가 침적되는 지표면의 특성에 영향을 받으며 침적현상을 다루는 데 있어서 중요한 요소이다. 표면 저항은 대상 가스와 침적되는 표면의 특성 및 식생 상태 즉, 토지이용형태에 따라서 큰 차이가 있을 뿐 아니라(Baldocchi 등, 1987) 지역마다 식물의 종류가 다르므로 그 지역에 우점하고 있는 식물종 및 분포 상황 등을 파악하여 가능한 그 지역의 환경 특성을 최대한으로 고려할 필요가 있다.

Hicks 모델의 경우 표면 저항은 지표상에서 매우 복잡한 분포양상을 띠고 있는 식물계를 지표와 대기 사이에 하나의 층(식생층 또는 캐노피층)으로 고려하여 대기와 식물조직 사이의 이동을 통한 흡수과정을 상세히 포함한다. 그리고 식물의 활동에 의존하는 캐노피층의 저항을 개개 잎에 대한 기공저항, 잎의 표피저항, 엽육저항 등을 고려하여 이를 식물계의 분포를 표시하는 잎면적지수(LAI, leaf area index)로서 전체 캐노피에 대해 확장 해석한 것이다. 이와 같은 Hicks 모델에서는 개개 식물종에 대한 표면 요소를 고려하기 때문에 식생에 관련된 많은 생물학적 자료가 필요하다. 그러므로 이(2001)의 연구에서 보는 바와 같이 대부분 농경지가 분포되어 있는 제주도 서부 지역에 적용할 경우에는 몇몇 작물종에 대한 생물학적 특성을 고려하여 평가할 수 있으나 다양한 식물종이 분포하고 있는 제주전역에 대해 적용하기에는 한계가 있다. 또한 Hicks 모델에서는 모델에 필요한 자료의 대부분을 측정에 의존하였으며 다양한 지표 특성과 침적현상에 영향이 클 것으로 판단되는 표면의 젖은 효과에 대한 결과가 부족하다.

따라서 본 연구에서는 표면 저항 산정에 있어서 다양한 토지이용형태와 계절 등에 따른 지표 특성을 세부적으로 분류하고, 화학적·생물학적 변수 등을 고려하여 산정한 Wesely(1989)의 접근방식을 적용하였다. 표면 저항은 일부 측정된 많은 저항성분

과 표면 형태와의 반정량적인 상호관계에 의해 산정되며 식물 캐노피에서 표면 저항은 식물의 기공활동, 표피와 엽육저항 그리고 미량가스의 용해도와 반응도에 의존한다(Walcek 등, 1985).

각 저항의 구조는 Fig. 1에 나타내었고, 총 표면 저항은

$$R_c = \left[\frac{1}{(r_s + r_m)} + \frac{1}{r_{lu}} + \frac{1}{(r_{dc} + r_{cl})} + \frac{1}{(r_{ac} + r_{gs})} \right]^{-1} \quad (14)$$

로 나타낼 수 있다.

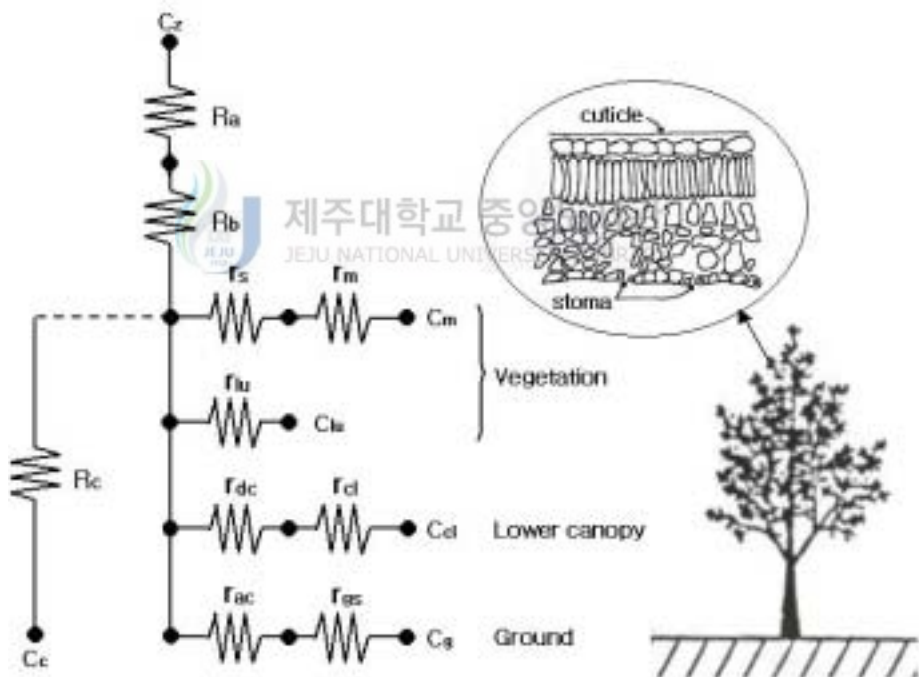


Fig. 1. Schematic diagram of pathway resistances used in the dry deposition model, where r_c is derived via Equation (14)

위 식의 첫 번째 항에서 r_s 는 캐노피 기공저항(stomatal resistance)을 말하고 앞의

기공을 통한 확산에 의한 값으로 태양방사와 온도에 의존하며 다음의 일반적인 함수로 표현한다.

$$r_s = r_i \left\{ 1 + \left[200 \left(\frac{1}{G + 0.1} \right) \right]^2 \right\} \left\{ 400 \frac{1}{T_s(40 - T_s)} \right\} \quad (15)$$

여기서 G 는 일사량(W/m^2), T_s 는 표면대기온도($^{\circ}C$)이며 $0 \sim 40^{\circ}C$ 의 범위를 넘으면 기공을 통한 이동이 멈춰진다는 가정을 충족시키기 위해 큰 값으로 r_s 를 놓는다. r_i 는 캐노피에 대한 최소 기공저항으로 Table 2에 제시하였다.

가스상 오염물질이 기공을 통해 유입되면 식물 세포 내로 전달되거나 기공 공동 또는 엽육세포 사이의 틈새 내에서 화학반응으로 파괴된다. 따라서 궁극적인 흡수체로의 수송을 설명하기 위해서 일반적으로 열린 기공을 통한 이동에 대한 전체 저항은 기공저항과 엽육저항을 더하여 표현하며(Hicks 등, 1987) 물질 x 에 대한 결합 최소 기공·엽육저항은 다음으로 알 수 있다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$r_{smx} = r_s \frac{D_{H_2O}}{D_x} + r_{mx} \quad (16)$$

여기서 D_x 는 대기 중 가스 x 에 대한 분자확산계수, D_{H_2O} 는 수증기에 대한 분자확산계수, r_{mx} 는 대상가스 x 에 대한 엽육저항(mesophyll resistance)이다. 일반적으로 D_{H_2O}/D_x 는 SO_2 의 경우 1.9, O_3 는 1.6이며, SO_2 와 O_3 에 대한 엽육저항은 실제적으로 0이다. 단, 강우의 영향이 있을 경우 $3r_s$ 로 산정한다.

r_{lu} 는 상부 캐노피에서 잎 표면에 대한 저항으로 그 추정값을 Table 2에 나타내었다. 특히 강우에 의해 젖은 표면에 대한 SO_2 부착저항을

$$r_{lus} = \left[\frac{1}{5000} + \frac{1}{3r_{lu}} \right]^{-1} \quad (17)$$

로 평가하고, O_3 에 대해서는

$$r_{luO} = \left[\frac{1}{1000} + \frac{1}{3r_{lu}} \right]^{-1} \quad (18)$$

로 나타낸다.

특히 식물이 거의 존재하지 않는 도시지역의 경우 표면이 젖어있을 때 SO₂에 대한 r_{lu} 값은

$$r_{luS} = 50 \text{ sm}^{-1} \quad (19)$$

을 적용한다.

저항 r_{dc} 는 햇빛이 지면 또는 하부 캐노피를 가열할 때 발생하는 작은 대류에 의한 저항이며

$$r_{dc} = 100 \left[1 + 1000 \frac{1}{G+10} \right] \left(\frac{1}{1+1000\phi} \right) \quad (20)$$

로 산정하고, ϕ 는 그 지형으로 들어오는 일사 각도를 나타낸다.

r_{cl} 은 하부 캐노피에서 잎, 작은 가지, 나무 껍질 또는 다른 노출된 표면에 대한 저항을 나타내고, 지표면 저항 r_{gs} 는 토양이나 잎 지푸라기 등에 의한 지표면에서의 부착을 의미한다. 또한 r_{ac} 는 캐노피의 높이와 밀도에 의존하는 이동에 대한 저항으로 이 값들은 landuse types와 계절에 따라 정해지며 Table 2에 나타내었다.

Wesely(1989)는 앞에서 설명한 SO₂와 O₃의 표면 저항 계산에 이용되는 초기 입력 저항값을 Table 3에 제시한 11개의 landuse types와 5개의 seasonal categories에 대해 각각 적용하였으며 본 연구에서는 제주지역 실정에 적합하다고 판단되는 6 landuse types와 4 seasonal categories에 해당되는 값을 입력치로 적용하였다.

Table 2. Input resistances(s/m) to the model for computation of surface resistances(r_c). Entries of 9999 indicate that there is no air-surface exchange via that resistance pathway

Resistance component	landuse types*					
	1	2	3	4	5	6
Seasonal category 1 : spring						
r_i	9999	120	240	140	250	190
r_{lu}	9999	4000	4000	4000	2000	3000
r_{ac}	100	50	80	1200	2000	1500
r_{gsS}	500	150	350	500	500	200
r_{gsO}	300	150	200	200	200	300
r_{clS}	9999	4000	4000	4000	2000	3000
r_{clO}	9999	1000	500	500	1500	700
Seasonal category 2 : summer						
r_i	9999	60	120	70	130	100
r_{lu}	9999	2000	2000	2000	2000	2000
r_{ac}	100	200	100	2000	2000	2000
r_{gsS}	400	150	350	500	500	100
r_{gsO}	300	150	200	200	200	300
r_{clS}	9999	2000	2000	2000	2000	2000
r_{clO}	9999	1000	1000	1000	1000	1000
Seasonal category 3 : autumn						
r_i	9999	9999	9999	9999	250	500
r_{lu}	9999	9000	9000	9000	4000	8000
r_{ac}	100	150	100	1500	2000	1700
r_{gsS}	400	200	350	500	500	100
r_{gsO}	300	150	200	200	200	300
r_{clS}	9999	9000	9000	2000	2000	4000
r_{clO}	9999	400	400	400	1000	600
Seasonal category 4 : winter						
r_i	9999	9999	9999	9999	250	500
r_{lu}	9999	9999	9000	9000	4000	8000
r_{ac}	100	10	100	1000	2000	1500
r_{gsS}	400	150	350	500	500	200
r_{gsO}	300	150	200	200	200	300
r_{clS}	9999	9999	9000	9000	3000	6000
r_{clO}	9999	1000	400	400	1000	600

*(1)urban land, (2)agriculture land, (3)range land, (4)deciduous forest, (5)coniferous forest, (6)mixed forest

Table 3. Landuse types and seasonal categories used in Wesely's model

landuse types	seasonal categories
urban land	transitional spring with partially green short annuals
agricultural land	
range land	
deciduous forest	midsummer with lush vegetation
coniferous forest	
mixed forest	
water, both salt and fresh	autumn with unharvested cropland
barren land, mostly desert	
non-forested wetland	late autumn after frost, no snow
mixed agricultural land and range land	
rocky open areas with low-growing shrubs	

3. 연구방법

3.1. 모델 적용영역

본 연구에서의 모델 적용영역은 제주도의 인근 부속도서를 제외한 제주도 본도를 대상으로 하고 7.5×5.0km의 일정한 격자 간격으로 구분하여 총 64개의 격자로 구성하였다(Fig. 2).

제주도는 한반도의 남서 해상에 위치하여 동경 126° 08′ ~ 126° 58′, 북위 33° 06′ ~ 34° 00′에 위치해 있다. 평면도상의 모양은 장축의 길이 73km, 단축의 길이 31km인 타원체로 한라산을 정점으로 하여 동서사면은 매우 완만한 경사(3° ~ 5°)를 이루고 남북사면은 보다 급한 사면(5° ~ 7°)을 나타낸다(제주도, 2002).

3.2. 토지이용형태의 분류



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주도는 지리적 위치, 해발고도와 한라산의 지세 등의 환경적 요인으로 난대, 온대, 한대성 식물까지 다양한 식생 분포를 보이고 있다. 제주도의 지형을 살펴보면, 해발 200m 이하 해안지역은 전체 면적의 55%를 차지하여 주로 농경지나 거주지로 이용되고 있고, 200~600m 사이의 중산간지역은 전체 면적의 32%를 차지하고 있으며 주로 목초지나 유희지로 이용되고 있다. 그리고 600m 이상의 산악지역은 전체 면적의 13%를 차지하고 있다(제주도, 2002).

본 연구에서는 제주도 전역에 대한 지리정보시스템(GIS : geographic information system)에서 제공되는 토지이용도(landuse map)와 임상도(forest map)를 근간으로 하였으며, GIS에서 제공되는 토지이용형태 및 식생 분류는 Table 4와 같다. 이로부터 본 연구에서는 Wesely의 분류기준에 적합하도록 하기 위해 제주도의 토지이용 및 식생 분포를 도시지역(urban), 농경지(agricultural land), 목초지(range land), 활엽수림(deciduous forest), 침엽수림(coniferous forest), 혼합림(mixed forest)으로 분류하였으며 그 분류내용은 Table 4에 수록하였다.

Table 4. Comparison of classification of landuse types between Jeju GIS and this study

	GIS classification	classification of landuse type (This study)	
landuse map	urban	urban	
	the site for building facilities		
	the site for public institution		
	the site for tourist facilities		
	the site for industrial facilities		
	the site for agricultural facilities		
	road	agricultural land	
	ground		
	rice field		
	farm		
fruit ranch	range land		
agricultural and livestock farm			
grassland			
cemetery			
the site for physical facilities	deciduous forest		
deciduous forest			
indeciduous and deciduous forest			
oak forest			
torreya nut forest			
indeciduous forest			
oak artificial forest			
forest map		korean fir forest	coniferous forest
		coniferous forest	
		cedar forest	
	cypress forest		
	pine forest		
	larch forest		
	cedar and cypress forest		
	pine artificial forest		
	rigida pine forest		
	Japanese black pine forest		
coniferous and deciduous mixed forest	mixed forest		
coppice land			

현재 제주도에 구축되어 있는 GIS자료 중 토지이용도에서 도시·취락지, 건물시설용지, 공공시설용지, 관광시설용지, 공업시설용지, 도로, 나대지, 시설농업용지(농업용 하우스시설)는 도시지역(urban)으로 구분하고 논, 밭, 과수원은 농경지(agricultural land)로 하였으며 농수축산용지, 초지, 묘지, 체육시설용지(골프장)는 목초지(range land)로 구분하였다. 그리고 토지이용도에서 산림지로 구분된 지역은 다시 GIS자료의 임상도를 이용하여 활엽수림, 침엽수림, 혼합림으로 나누었다. 임상도에서 낙엽활엽수림, 상록·낙엽활엽수림, 참나무림, 상수리나무림, 비자나무림, 상록활엽수림, 참나무인공림은 활엽수림(deciduous forest)으로 구분하고 구상나무림, 침엽수림, 삼나무조림지, 편백조림지, 소나무림, 낙엽송조림지, 삼나무·편백조림지, 소나무인공림, 리기다소나무림, 곰솔조림지는 침엽수림(coniferous forest)으로 하였으며 침·활엽수 혼합림, 잡목지는 혼합림(mixed forest)으로 구분하였다.

이렇게 분류된 토지이용형태를 적용하여 Fig. 2와 같이 새로운 토지이용도를 작성하였다.

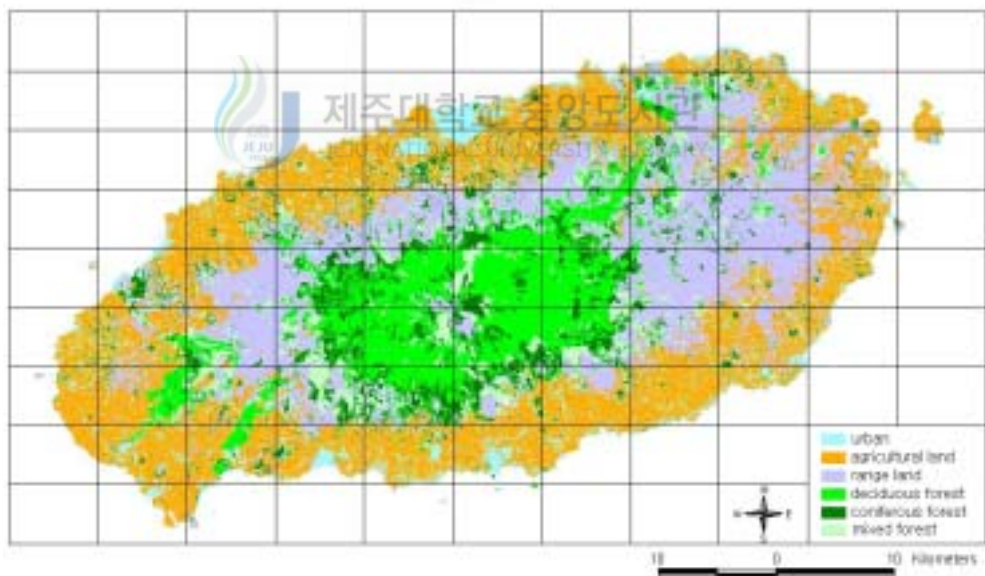


Fig. 2. Grid system and landuse map used in this study

3.3. 기상 및 농도 자료의 수집 및 적용

건성침적과정에서 공기역학적 저항을 정의하기 위해서는 각 격자점에서의 기상학적 입력자료가 필요하다. 본 연구에서 건성침적속도를 산출함에 있어서 필요한 기상관측자료는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 제주도내 동서남북의 해안변에 위치한 4군데의 기상관측소와 13개의 무인자동기상관측소(AWS : automatic weather station)에서 2002년 1월부터 2002년 12월까지 관측된 1시간 평균기상자료를 사용하였다.

각 기상관측소에서 측정되고 있는 기상관측요소를 정리하면 Table 5와 같다. 표에서 보는 바와 같이 모든 기상관측소에서 공통적으로 측정되는 항목은 풍속, 기온, 강수량이며 AWS에서는 습도, 일사량, 해면기압, 지면온도가 관측되지 않고 있다. 또한 일사량의 경우 제주와 고산관측소에서만 측정이 되고 있어 본 모델에서 각 격자점에 대해 기상자료를 적용함에 있어서 문제점이 따른다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 연구에서는 측정되지 않는 이러한 기상요소는 다음과 같이 적용하였다. 무인자동기상관측점에서에서의 기압은 제주시 기상관측소의 기압을 기준으로 각 관측점의 해발고도에 따라 역추정하여 이용하였고, AWS에서 관측되고 있지 않는 습도와 지면온도는 해안지역 그리고 제주시와 서귀포시 인근의 AWS 자료에는 제주시와 서귀포시 기상관측소 자료를 평균하였으며 그 외 관측소의 자료는 고산과 성산관측소의 자료를 평균하여 적용하였다. 그리고 제주시와 고산관측소에서만 측정되고 있는 일사량의 경우에는 제주도 전역에서 큰 차이가 없을 것이라 가정하여 모든 지점에 동일한 평균값을 사용하였다. 또한 해당 격자에 기상관측소가 존재하는 경우에는 그 지점의 자료를 이용하였고 그 외에는 고도를 고려하여 인근 관측소의 평균치를 적용하였다.

건성침적속도는 표면의 젖은 정도와 식물계의 생리적 상태 예를 들어, 식물 잎 표면의 기공이 열려 있는 주간인지 기공이 닫혀 있는 야간인지에 따라 달라진다(Sehmel, 1980). 따라서 본 연구에서는 재구성한 기상데이터를 건조한 표면(dry surface)과 젖은 표면(wet surface)에서의 건성침적속도 차이를 알아보기 위해 비강수일(non-rain day)과 강수일(rain day)로 나누어 비강수일을 건조한 표면 그리고 강수일을 젖은 표면으로 가정하였고, 강수일과 비강수일에 대하여는 다시 주간시간대(day time)와 야간시간대(night time)로 구분하여 모델에 적용하였다. 본 연구에서는 1일 강수량이 0.1mm 이상인 날을 강수일로 분류하였다.

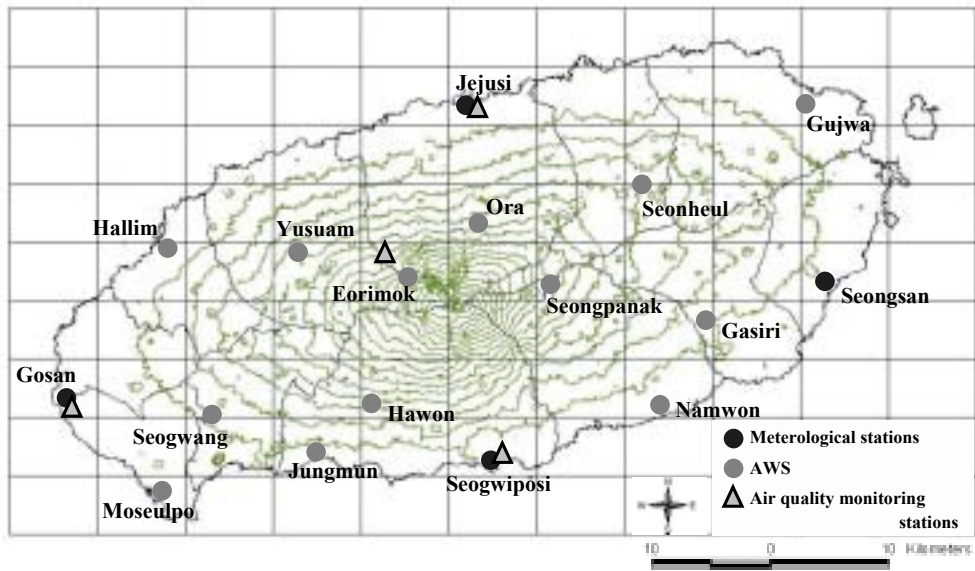


Fig. 3. Location of meteorological observation stations and air quality monitoring stations

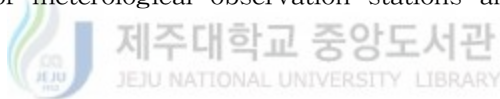


Table 5. Meteorological factors observed at meteorological stations

Meteorological stations(4 stations)	AWS(13 stations)
wind speed	wind speed
air temperature	air temperature
humidity	-
amount of precipitation	amount of precipitation
air pressure(sea level)	-
ground temperature*	-
solar radiation**	-

* measurement interval is every 6 hours.

** observed at Jejudi and Gosan stations only.

건성침적플럭스 산정에 이용되는 SO₂와 O₃의 농도측정자료는 제주지역의 해안부근에 위치한 이도동, 동홍동, 고산의 대기오염관측망과 한라산 지역에 설치한 천아오름의 관측점에서 측정된 2002년도 자료를 활용하였다. 단, 산림지역인 해발 700m에 위치한 천아오름에서의 대기질 관측은 2003년부터 가동되어 주로 생활 중심지인 해안 지역에 비해 인위적인 배출에 의한 영향이 낮아서 연간 농도수준의 변화가 크지 않을 것으로 판단하고 2003년 1월부터 최근까지 측정된 자료를 이용하였다.

또한 대기오염관측망도 제주도 전역에 걸쳐 4군데 밖에 없기 때문에 각 격자점에 적용하기에 무리가 있지만 제주지역의 경우 오염물질의 농도를 크게 증감시키는 인위적 오염원이 없을 뿐 아니라 인간활동이 주로 제주시와 서귀포시 지역에 밀집되어 있으므로 다음과 같은 가정하에서 농도를 적용하여 침적플럭스를 산정하였다. 즉 오염원의 영향이 있는 제주시와 서귀포시 지역에는 각각 이도동과 동홍동에서 관측된 농도자료를 이용하였으며 오염원이 거의 없는 주로 농경지와 목초지로 이루어진 해안지역과 중산간지역에는 모두 고산자료를 그리고 산림지로 이루어진 600m 이상의 산악지역에는 천아오름에서 관측된 농도자료를 적용하였다. 제주지역에 해당하는 각 격자점에서의 건성침적플럭스는 식 (1)을 이용하여 각 격자별로 산정한 건성침적속도 (V_d)와 오염농도(C)의 곱으로 계산하게 된다.

3.4. 건성침적속도 산정

본 모델의 입력자료로서 건성침적속도 계산에 필요한 기상요소는 풍속, 기온, 지면 온도, 일사량, 상대습도, 해면기압, 강수량이며 제주도내 기상관측소에서 관측된 1시간 평균기상자료를 사용하였다. 그리고 직접측정이 곤란할 뿐만 아니라 제주지역에서 구체적으로 밝혀진 자료가 없는 표면거칠기 길이 및 표면 저항을 구성하는 일부 저항요소들의 값은 문헌을 통하여 가장 유사하다고 판단되는 자료를 선택하였다. 이들을 모델 입력자료로 사용하여 2.2절에서 설명한 건성침적모델에서 건성침적속도를 구성하는 공기역학적 저항(R_a), 점성층 저항(R_b) 그리고 표면 저항(R_c)을 각각 산정하였다. 그리고 이 세 저항의 합의 역수를 취하여 오염물질에 대한 건성침적속도(V_d)를 구하였다. 이와 같이 산정한 SO₂와 O₃의 건성침적속도를 제주지역에서의 시·공간적

지표특성에 따른 변동특성을 파악하기 위해 제주전역의 토지이용형태, 강수의 유무 및 주·야간에 따른 변화를 평가하는데 주안점을 두었다. 그리고 제주전역에서 각 격자별로 토지이용형태를 고려하여 SO₂와 O₃의 건성침적속도를 산정하고 건성침적속도의 월별 변동과 제주전역의 건성침적속도 분포특성을 파악하였다.



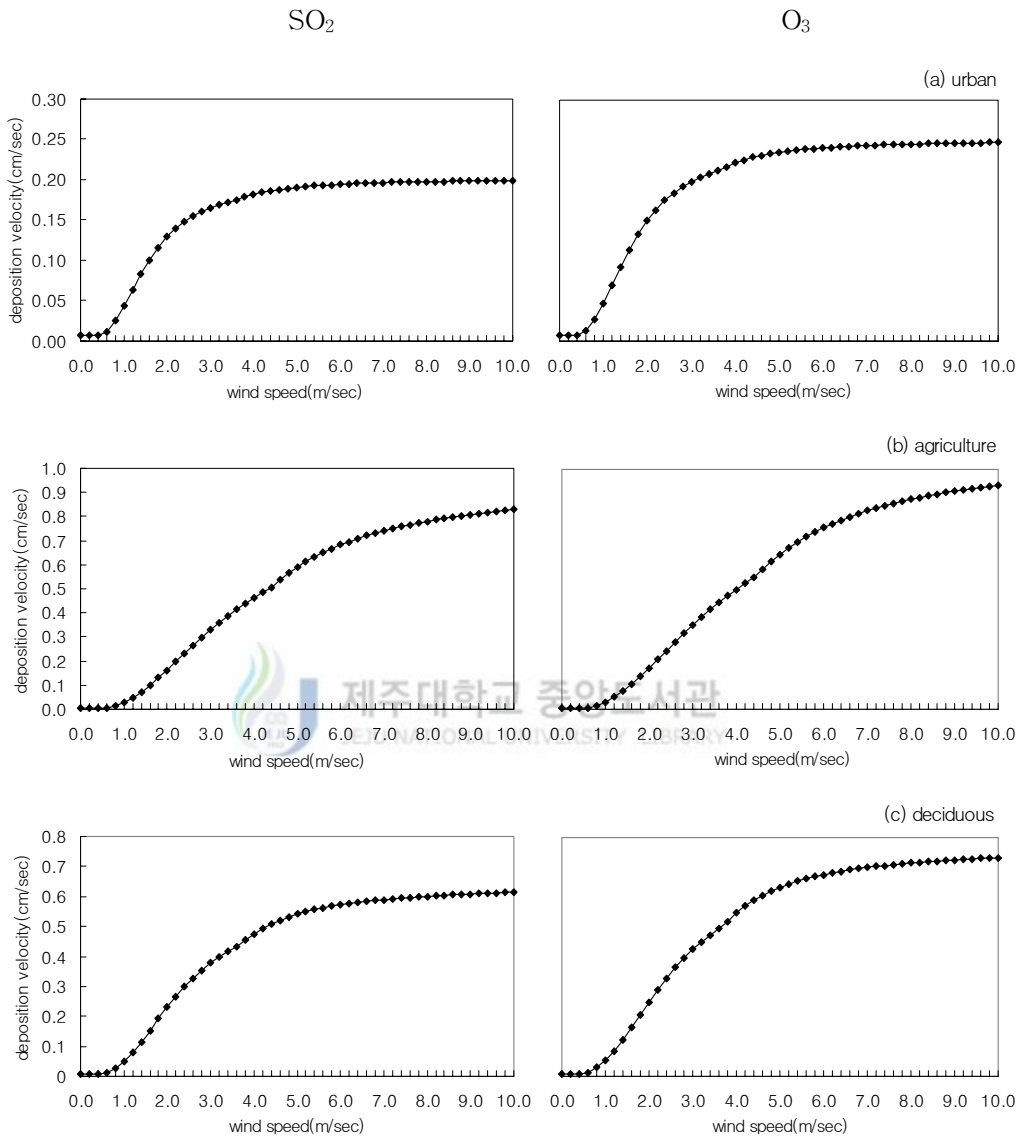
4. 결과 및 고찰

4.1. 건성침적속도의 영향요소에 대한 민감도 분석

토지이용형태에 따른 건성침적속도(V_d)는 국지기상요소의 영향을 크게 받으므로 국지기상요소의 변화에 따른 건성침적속도의 변동특성을 파악하고자 하였다. 2장에서 살펴본 바와 같이 건성침적속도는 크게 공기역학적 저항(R_a), 점성층 저항(R_b), 그리고 표면 저항(R_c)과 관계된다. 이들 각 저항에 영향을 미치는 주요 기상요소 중 풍속, 기온과 지면온도의 차이($t_a - t_g$)는 주로 공기역학적 저항에 관여하며 일사량과 기온은 표면 저항과 관계가 깊다. 따라서 이 절에서는 건성침적속도에 영향을 미치는 요소에 대한 민감도를 분석하고 모델의 특성을 파악해 보고자 한다.

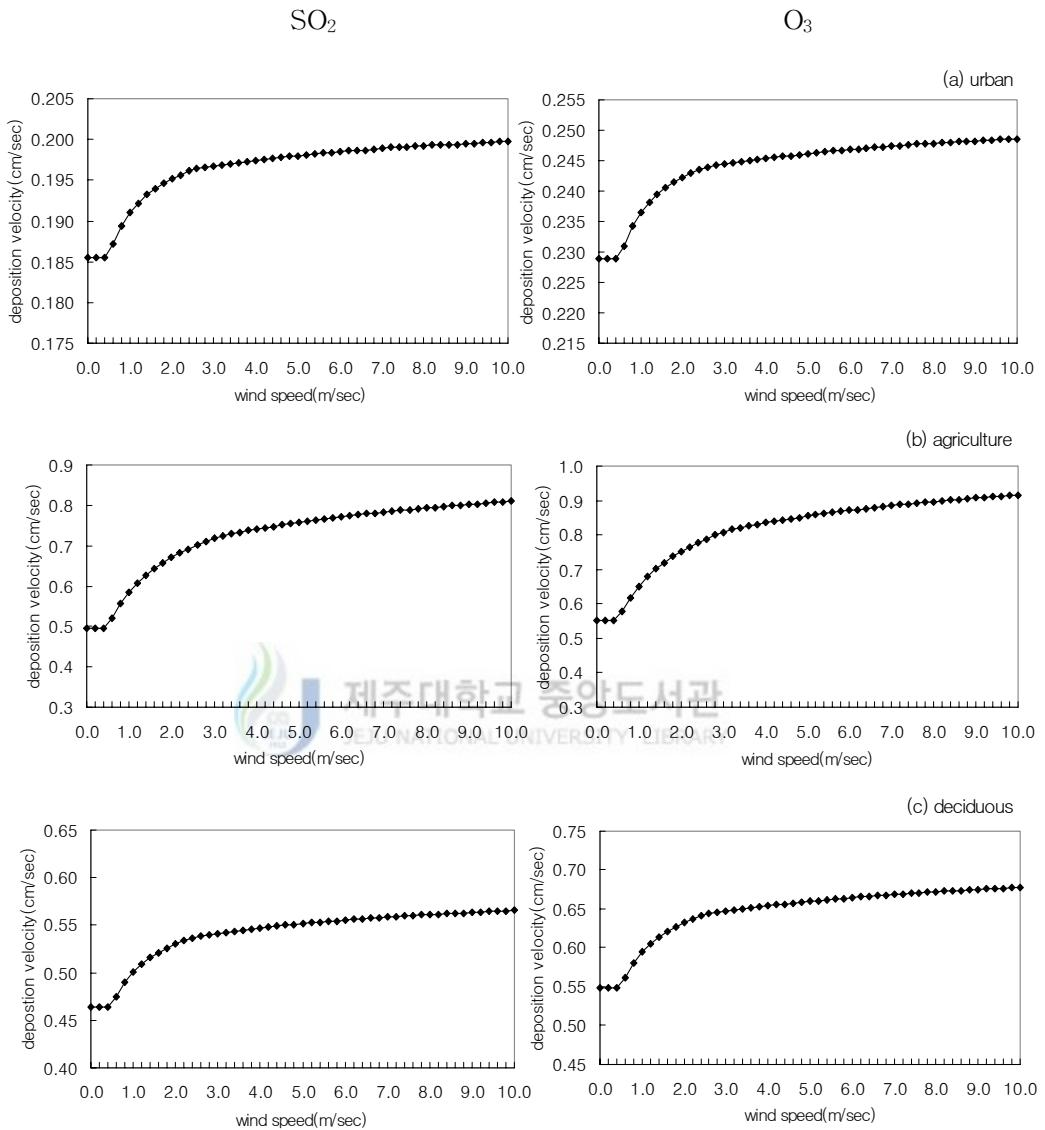
4.1.1. 풍속

Fig. 4-1과 4-2는 제주지역의 연평균 일사량인 $300\text{W}/\text{m}^2$ 일 때 풍속의 변화에 대한 SO_2 와 O_3 의 건성침적속도의 변동을 대기의 상태가 안정할 때와 불안정할 때로 나누어 나타낸 것이다. SO_2 와 O_3 에 대해서 모두 풍속이 커질수록 건성침적속도는 증가하며 어느 정도의 풍속 이상에서는 풍속에 따른 건성침적속도의 변화가 작게 나타났다. 특히 대기가 안정한 상태일 때 풍속에 따른 건성침적속도의 변동이 크게 나타났다. 노(2000)도 대기가 불안정한 상태일 때는 풍속에 따른 건성침적속도의 차이가 거의 나타나지 않으나 안정한 상태에서는 풍속이 강할수록 건성침적속도가 급격히 커지는 것을 보인 바 있다. 그리고 이 등(1998)이 초음파 풍속온도계로 측정된 결과에 따르면 풍속이 강한 주간에는 공기역학적 저항이 작고 풍속이 약해지는 야간에는 공기역학적 저항이 크게 나타나 풍속에 의해 공기역학적 저항이 영향을 받는다고 하였다. 건성침적속도에 대한 풍속의 영향을 보면 건성침적속도 범위의 차이는 보이지만 각 토지이용형태에 대해서 동일한 형태의 변동특성을 나타냈다.



$G=300\text{W}/\text{m}^2$

Fig. 4-1. Effect of wind speed on dry deposition velocity in stable condition



$G=300\text{W}/\text{m}^2$

Fig. 4-2. Effect of wind speed on dry deposition velocity in unstable condition

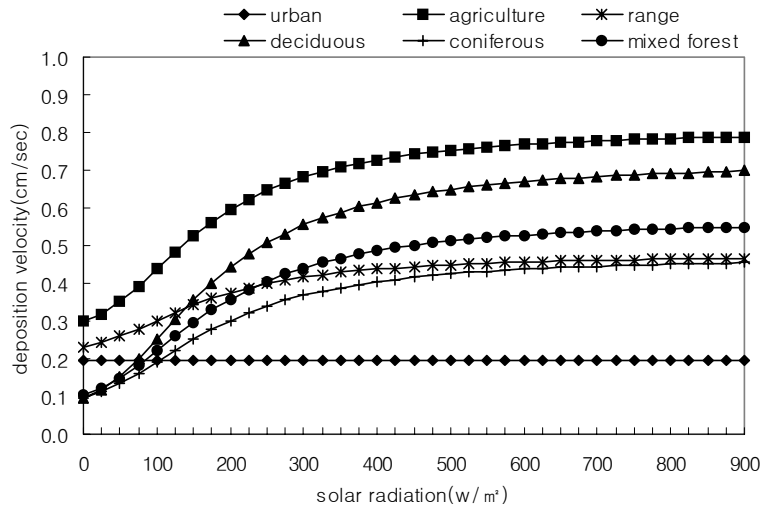
4.1.2. 일사량

제주지역의 평균 풍속인 3m/s를 기준으로 하여 일사량의 변화에 따른 건성침적속도의 변동을 각 토지이용형태별로 Fig. 5에 나타내었다. 일사량은 기온 및 지면온도 상승의 원인이 될 뿐만 아니라 식물의 광합성 활동과 연관되어 건성침적속도에 중요한 영향을 미친다. 식생의 영향이 없는 것으로 가정한 도시지역의 경우에는 일사량에 관계없이 건성침적속도가 일정하게 나타났으나 식생의 영향이 나타나게 되는 다른 지역에서는 일사량이 많을수록 건성침적속도가 증가하는 경향을 보였다. 또한 일사량이 250W/m^2 이상에서는 일사량의 증가에 따른 건성침적속도의 증가가 둔화됨을 알 수 있다.

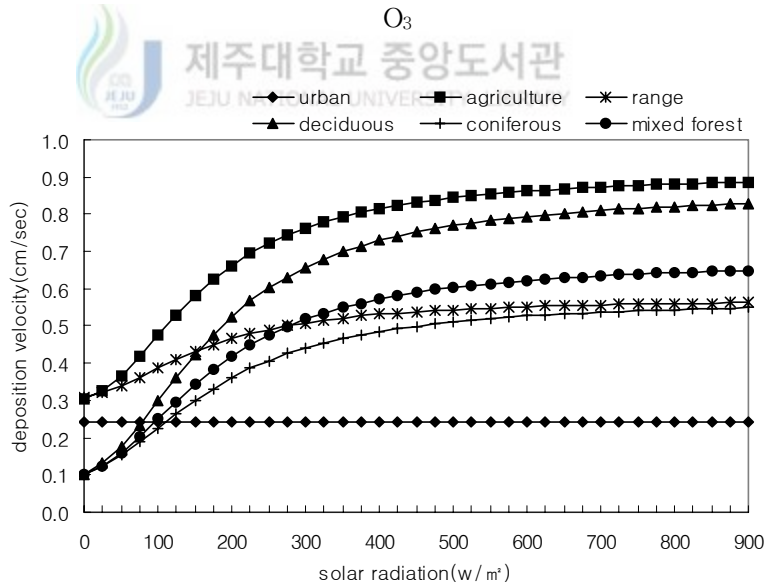
4.1.3. 기온과 지면온도의 차이($t_a - t_g$)

Fig. 6은 기온과 지면온도의 차이($t_a - t_g$)에 따른 건성침적속도의 변화를 나타낸 것이다. 지면온도가 기온보다 높게 나타나는 대기가 불안정한 조건에서는 건성침적속도의 변화가 거의 나타나지 않았으며 풍속의 변화에 따른 차이도 미비하게 나타났다. 그렇지만 대기가 안정한 상태로 갈수록 건성침적속도는 감소하였으며 풍속의 변화에 따른 차이도 크게 나타났다. 특히 풍속이 약하고 대기의 상태가 안정할수록 건성침적속도는 급격히 감소하며 대기가 불안정한 상태일 때는 난류가 발달하여 건성침적속도가 크게 나타남을 볼 수 있었다. 문(1996)도 대기안정도와 건성침적속도의 관계를 살펴 본 결과 풍속이 크고 대기와 지면의 온도차가 음수로 나타나는 불안정한 상태일 때 건성침적속도가 크게 나타남을 보인 바 있다. 이와 같은 변화는 SO_2 와 O_3 모두 동일한 경향을 보였을 뿐 아니라 토지이용형태에 따른 변화경향도 아주 유사한 형태를 보였다.

SO₂

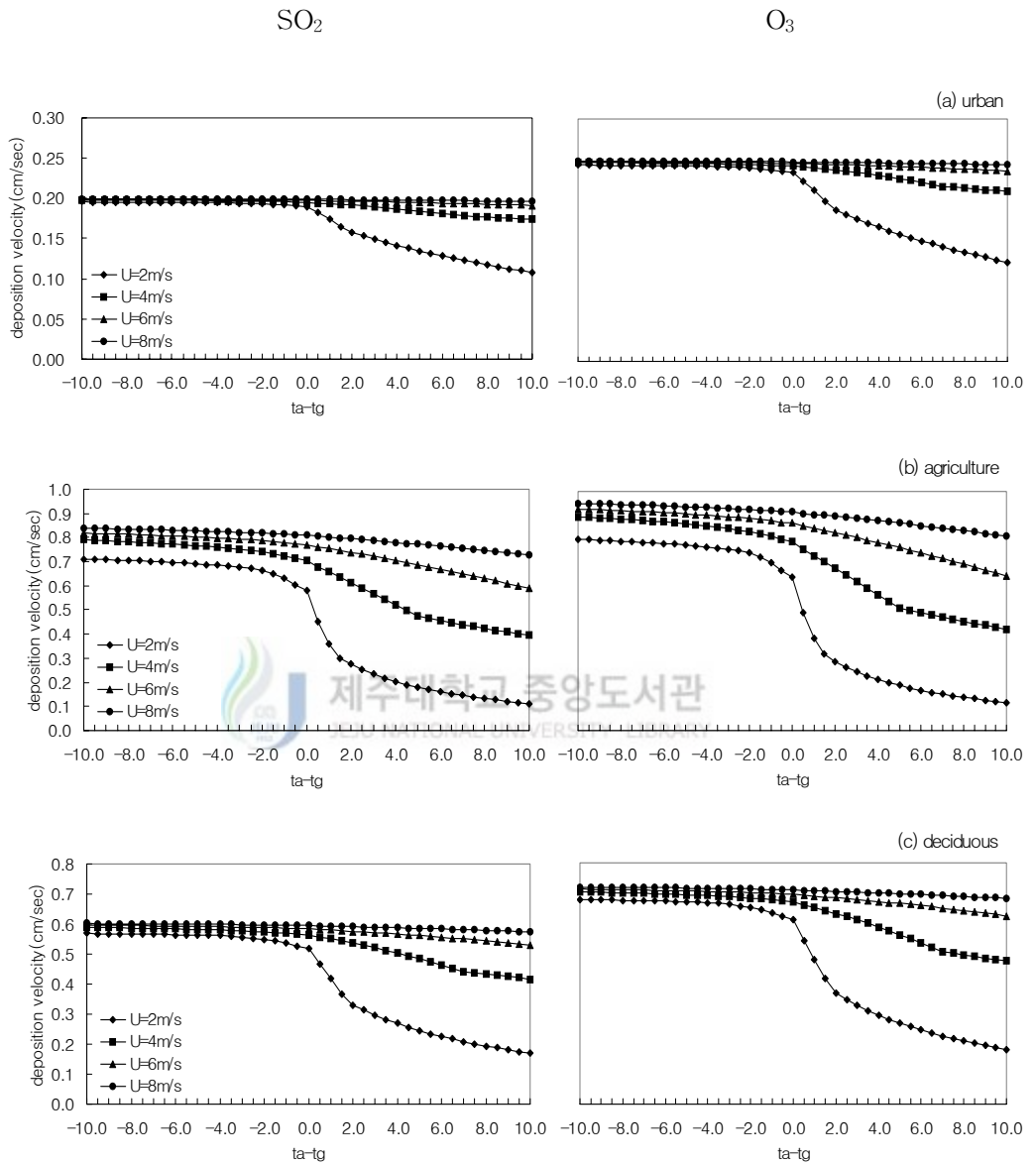


O₃



$u=3\text{m/s}$

Fig. 5. Effect of solar radiation on dry deposition velocity



$G=300\text{W/m}^2$

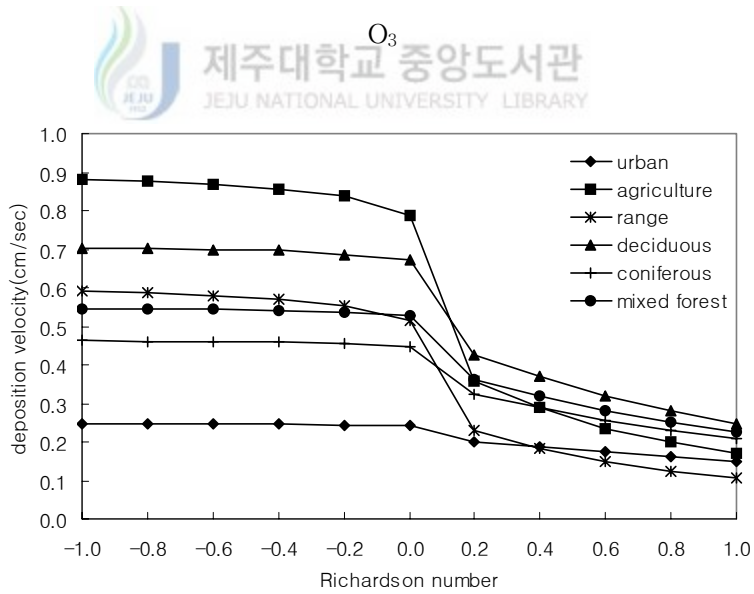
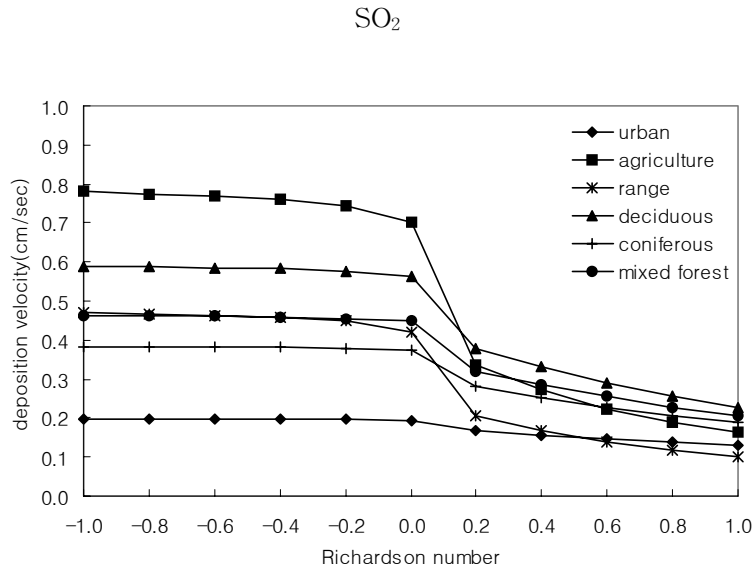
Fig. 6. Effect of $t_a - t_g$ on dry deposition velocity according to wind speed

4.1.4. 대기안정도

동적인 대기에서 대기 난류를 고려한 안정도 평가 지표로 Richardson number(R_{ib})가 널리 이용되며 이의 산정에는 풍속, 기온과 지면온도 등의 인자가 관여된다. Fig. 7은 이러한 대기안정도의 변화에 따른 SO_2 와 O_3 의 건성침적속도의 변동을 6개의 토지이용형태에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보면 대기가 불안정한 상태($R_{ib} \leq 0$)일 때는 건성침적속도가 크게 나타났고 대기가 안정한 상태($R_{ib} > 0$)일 때는 건성침적속도가 작은 값을 보였다. 대기의 불안정한 혼합경계층에서는 수직이동이 활발하여 낮은 저항을 나타내고 안정한 층을 형성하는 경계층에서는 수직이동이 억제되기 때문에 저항이 커지게 된다(Erisman 등, 1995).

각 토지이용형태별로 안정도에 따른 변화를 살펴보면 대기가 불안정한 상태일 때 농경지에서의 건성침적속도가 가장 크고 다음으로 활엽수림, 목초지, 혼합림, 침엽수림, 도시지역 순으로 나타났으며, 대기가 안정한 상태일 때는 침적속도가 작기는 하나 각 토지이용형태별로 큰 차이를 보이지 않았다. 특히 도시지역의 경우에는 다른 토지이용형태에 비해 건성침적속도가 작은 값을 보였고 안정도에 따른 건성침적속도의 변화도 작은 것으로 나타났다.

일반적으로 O_3 의 건성침적속도가 SO_2 보다 크게 나타났으나 그 변화 경향은 동일하였으며, 대기의 상태가 불안정한 경우에는 지표면 특성에 대한 의존도가 크지만 대기가 안정한 상태에서는 그 의존도가 적음을 알 수 있었다. 원과 이(1998)도 농경지와 활엽수림에서의 건성침적속도가 크고 다음으로 목초지, 물, 침엽수림 순으로 나타났으며, 대기가 불안정한 상태일 때는 지표면 특성과 고도에 대한 의존도가 큰 반면 안정한 상태일 때는 그 의존도가 적다고 하였다.



$u=3\text{m/s}, G=300\text{W/m}^2$

Fig. 7. Relationship with SO₂ and O₃ dry deposition velocity and Richardson number

4.2. 제주지역의 건성침적속도

4.2.1. 건성침적속도의 월별 변동

제주전역의 기상자료 및 토지이용형태를 고려하여 각 격자별로 산정한 SO₂와 O₃의 건성침적속도의 월별 변동특성을 살펴보았다.

가. SO₂

Fig. 8은 제주도 전역의 SO₂ 건성침적속도의 월평균 변화를 나타낸 것이다. 그래프를 보면 9~11월 즉 가을철에 건성침적속도는 가장 낮고 12월에 증가하면서 겨울철에는 가을철에 비해 다소 높은 값을 보이며, 봄철로 접어들면서 다시 증가하기 시작하여 6월에 최대값을 나타내었다. Sorteverg와 Hov(1996)가 사계절이 있고 제주도와 토지이용형태분포가 비슷한 불가리아 그리고 노르웨이지역에서 산정한 월평균 건성침적속도 역시 여름철에 높고 겨울철에 낮은 월변화를 보여 본 연구에서와 유사한 경향을 보였다.

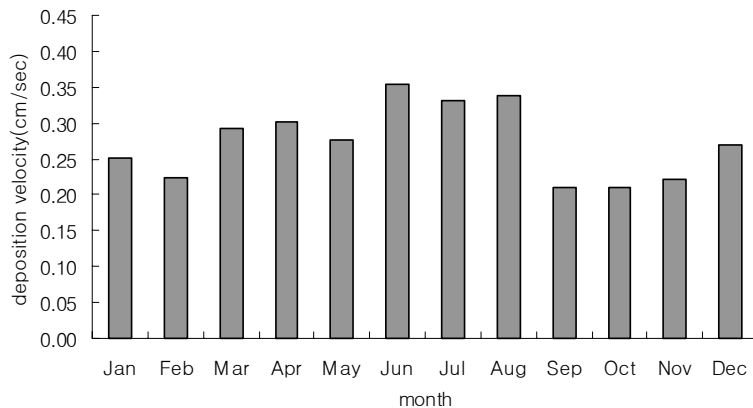


Fig. 8. Monthly variation of SO₂ dry deposition velocity in Jeju Island

본 연구에서 산정된 연간 SO₂의 건성침적속도의 범위는 0.14~0.44cm/sec 사이이며 평균 0.27cm/sec로 나타났다. SO₂의 연평균 건성침적속도는 이(2001)가 제주도 서부

지역에서 산정한 0.246cm/sec와 비슷한 수준이다. 이 등(1998)이 주로 평탄한 농경지를 이루고 있는 춘천지역에서 초음파 풍속온도계로 산정한 SO₂의 건성침적속도는 여름철이 0.65cm/sec로 가장 크고 봄, 가을 순으로 작아지며 겨울철에 0.43cm/sec로 가장 작게 나타났다. 그리고 Matt 등(1983)도 SO₂의 건성침적속도는 여름철(0.5cm/sec)에 가장 크고 다음으로 봄과 가을철 그리고 겨울철(0.2cm/sec)에 가장 낮은 것으로 제시한 바 있다.

나. O₃

Fig. 9에 나타난 O₃ 건성침적속도의 월변화 경향을 살펴보면 가을과 겨울철에 건성침적속도가 비교적 낮은 값에서 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 그리고 3월부터 증가하기 시작하여 6월에 최대값을 보였으며 전체적으로는 6~8월 즉 여름철에 가장 높게 나타났다. O₃의 건성침적속도의 월변화 경향은 SO₂와 비교적 비슷하고 SO₂에 비해 O₃의 건성침적속도가 큰 값을 보임을 알 수 있었다.

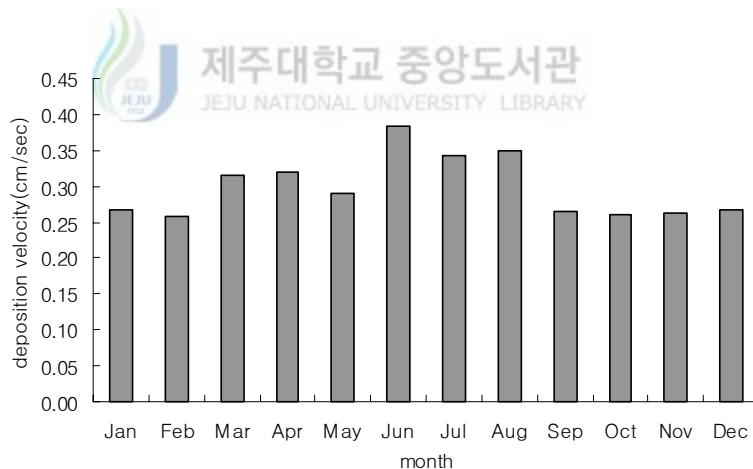


Fig. 9. Monthly variation of O₃ dry deposition velocity in Jeju Island

본 연구에서 제주전역에 대해 산정한 O₃의 연평균 건성침적속도는 0.30cm/sec이었으며 0.22~0.44cm/sec 사이의 분포를 나타냈다. O₃의 건성침적속도는 제주도 서부지역에서 산정한 0.097cm/sec(이, 2001)보다 높고 노(2000)가 부산 내륙지역에서 산정한 0.5cm/sec(0.32~0.90cm/sec)에 비해 낮은 수준을 보였다.

4.2.2. 시간적 변동특성

가. 주·야간 변동

Fig. 10은 강수의 유무에 관계없이 주간과 야간시간대에 건성침적속도의 월별 변동을 나타낸 것이다. SO_2 와 O_3 모두 야간에 비해 주간의 건성침적속도가 높게 나타났으며 계절별 변동도 비교적 크게 나타났다. 그리고 연중 일사량이 많고 식물활동이 가장 왕성한 6~8월의 주간에 건성침적속도가 큰 값을 보였다. 야간의 건성침적속도에 있어서는 월별 변동폭이 그다지 심하지 않음을 볼 수 있다. 많은 연구에서 주간에는 대기의 상태가 불안정해지면서 건성침적속도가 커지고, 대기가 안정한 새벽과 야간에는 작게 나타나는 건성침적속도의 일변화를 보이는 것으로 알려져 있다(Meyers와 Yuen, 1987; Matt, 1993; Padro, 1996; Zhang 등, 1996; 이 등, 1998).

이처럼 주간의 건성침적속도가 커지는 것은 주간시간대에 풍속, 기온, 일사량이 증가하면서 난류활동이 활발해지고 식물체의 기공과 대기와의 상호작용이 활발해지기 때문이며, 야간에는 대기가 안정한 상태를 보이고 대기와 지면 사이의 온도차가 주간에 비해 작을 뿐만 아니라 식물의 광합성 활동이 중단되기 때문에 침적속도가 작게 나타나는 것으로 판단된다.

나. 강수에 따른 건성침적속도의 변화

Fig. 11은 건조한 표면(dry surface)과 젖은 표면(wet surface)에서의 차이를 알아보기 위해 가정한 비강수일(non-rain day)과 강수일(rain day)의 월평균 건성침적속도의 변화를 나타낸 것이다. 6~8월을 제외하고 강수일의 건성침적속도가 비강수일에 비해 전반적으로 높게 나타나고 있다. 그리고 SO_2 의 경우 강수일과 비강수일의 침적속도의 크기에 차이가 비교적 큰 것으로 나타났으나 O_3 의 경우에는 그다지 크지 않았다. 또한 비강수일에는 월별 변동폭이 크지만 강수일에는 거의 일정한 월변화를 보였다. 일반적으로 표면이 젖어있을 때 SO_2 의 표면 저항이 매우 작기 때문에(Sheih 등, 1979; Walcek 등, 1986) 건성침적속도가 높게 나타났다. Matt 등(1993)은 젖은 표면에서 SO_2 에 대한 건성침적속도는 증가하고 O_3 의 건성침적속도는 감소하는 것으로 제시하였는데, 본 연구에서 O_3 의 경우 식물의 성장이 활발한 여름철을 제외하고는 강수일의 건성침적속도가 다소 높아지는 것으로 산출되었다. 본 연구에서 산정한 SO_2

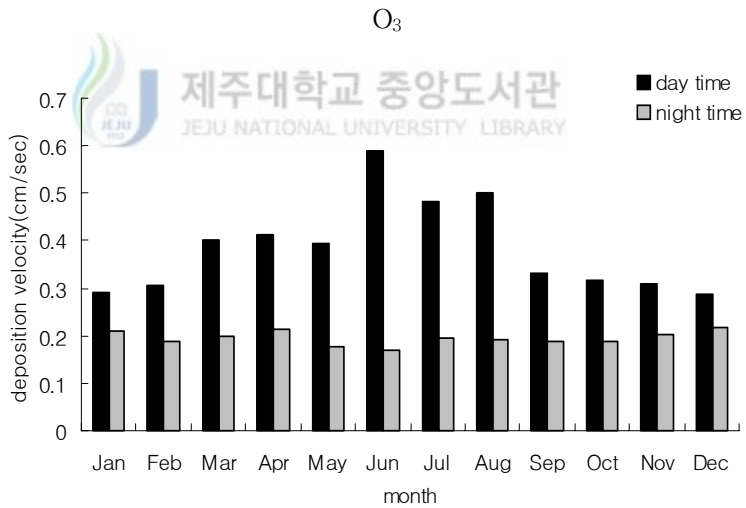
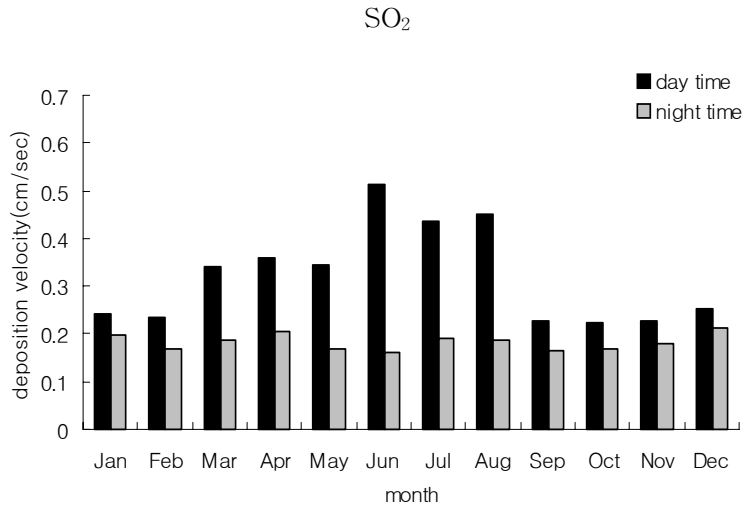


Fig. 10. Monthly variation of SO₂ and O₃ dry deposition velocity according to day and night time

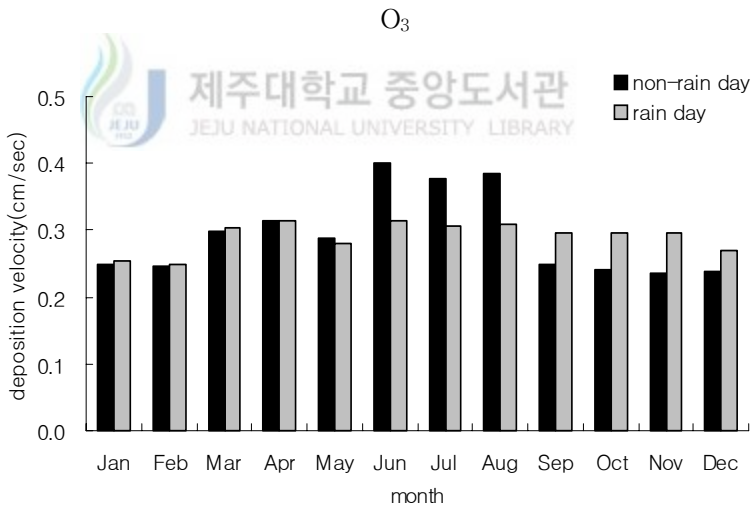
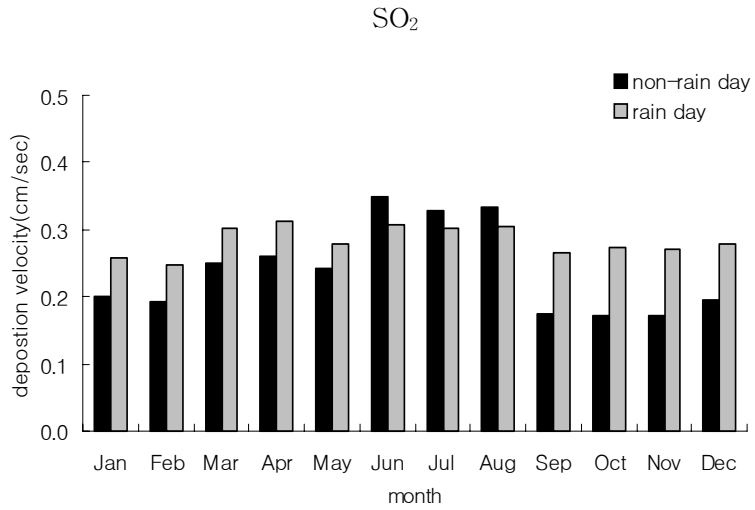


Fig. 11. Monthly variation of SO₂ and O₃ dry deposition velocity according to non-rain and rain day

의 연평균 건성침적속도는 젖은 표면에서의 침적속도가 건조한 표면에 비해 1.2배 정도 높게 나타나 젖은 표면에서의 건성침적속도는 2배가 된다고 평가한 Sheih 등 (1979)의 결과에 비해 다소 낮게 평가되었다.

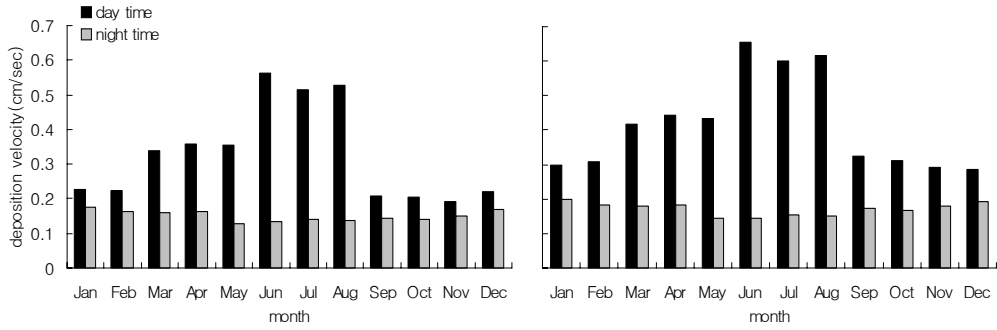
Fig. 12는 제주지역에서 산정한 비강수일과 강수일의 주·야간에 대한 건성침적속도의 월별 변동을 강수량과 비교하여 나타낸 것이다. SO_2 와 O_3 모두에서 비강수일과 강수일 모두 주간의 건성침적속도가 야간에 비해 큰 값을 나타내고 있다. 비강수일의 경우 주간에는 3월부터 건성침적속도가 증가하기 시작하여 6월에 최고값을 보이고 가을이 되면서 낮아지는 경향을 보여 월별 변동폭이 크게 나타나고 있으나 야간의 경우는 거의 일정한 수준을 보였다. 강수일의 변화를 보면 주·야간 모두 월별 변동에 큰 차이가 없을 뿐 아니라 주간이 야간에 비해 침적속도가 약간 높게 나타났다.

주간시간대에 비강수일과 강수일의 건성침적속도 값은 강수일수와 강수량이 많은 6~8월경 즉, 여름철의 경우 비강수일에 비해 강수일의 건성침적속도가 크게 감소하였다. 이것은 일사량이 강한 여름철의 경우 강수일에 일사량이 크게 감소하기 때문인 것으로 판단된다. SO_2 와 O_3 모두 주간에는 젖은 표면으로 가정한 강수일에 비해 비강수일의 건성침적속도가 대체적으로 크게 나타났다. 이는 식물이 존재하는 표면에서는 강우가 잎의 표면을 덮어 식물 잎의 활성이 저해되고 기공이 열려있을 때 잎 표면을 통한 직접적인 가스교환이 차단되기 때문이다. 또한 O_3 는 물에 대한 낮은 용해도 때문에 젖은 표면이나 수면에서는 느리게 제거된다(Erisman 등, 1994; Wesely, 1989). 한편 야간시간대에는 비강수일에 비해 강수일의 건성침적속도가 큰 값을 보이지만 큰 특징은 찾아볼 수 없었다. 문(1996)도 canopy wetness에 따른 건성침적속도를 관측결과와 비교한 결과 낮동안에는 건조한 canopy의 경우 습한 canopy에서 보다 침적속도가 크게 나타났으며 밤시간의 경우에는 습한 canopy에서의 침적속도가 크게 나타난 것을 보인 바 있다.

SO₂

O₃

(1) non-rain day



(2) rain day

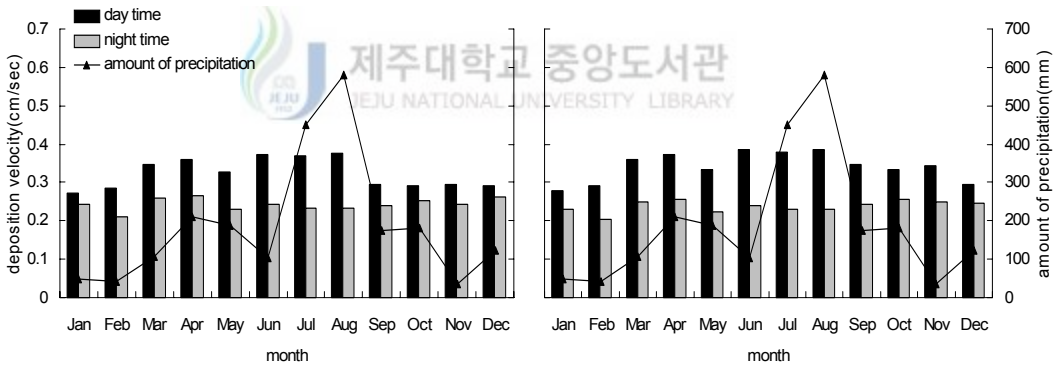


Fig. 12. Monthly variation of SO₂ and O₃ dry deposition velocity between day time and night time for non-rain day and rain day

다. 건성침적속도와 각 저항과의 관계

건성침적속도를 산정하는 데 중요한 공기역학적 저항(R_a), 점성층 저항(R_b), 표면 저항(R_c)과 산정된 건성침적속도와의 상관성을 알아보고자 Fig. 13에 각 저항과 침적속도를 월별로 함께 나타내었다. Fig. 13에는 각 저항과 건성침적속도의 월변화를 강수의 유무에 따라 비교하여 나타냈다. Fig. 13-1에서 SO_2 에 대해서 보면 주간에는 강수의 유무에 관계없이 총 저항의 월변화는 하절기에 낮고 동절기에 크게 증가함을 볼 수 있다. 그리고 총 저항에 대한 표면 저항의 기여가 아주 큰 것으로 나타났으며 그에 따라 표면 저항의 월변동이 총 저항과 동일하게 나타났다. 반면에 공기역학적 저항과 점성층 저항은 월변동이 거의 없고 그 값도 작은 것을 알 수 있다. 전반적으로 주간에는 강수가 있으면 각 저항 값은 증가함을 볼 수 있다. 야간에는 강수의 유무에 따라서 저항의 월별 변동이 다를 수 있다. 그리고 야간에는 주간에 비해 표면 저항의 월별 변동이 일정해지는 경향을 보였다. 또한 야간에 강수가 있으면 저항은 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 13-2에서 O_3 의 경우에도 Fig. 13-1의 SO_2 와 그 변동이 아주 흡사함을 알 수 있다.

이상의 결과를 토대로 주·야간을 비교하면 일사량이 강하고 대기가 불안정한 비강수일의 주간에는 표면 저항이 건성침적속도의 변동에 기여하게 되며 상대적으로 일사량이 약하고 대기가 안정한 야간과 강수일의 경우에는 표면 저항보다 공기역학적 저항이 건성침적속도에 지배적인 역할을 함을 알 수 있었다. 그리고 점성층 저항은 두 저항 성분에 비해 작은 값으로 산정되었고 주·야간의 월변화가 거의 없기 때문에 상대적으로 건성침적속도에 대한 기여도가 낮게 나타났다. Walcek 등(1986)은 점성층 저항이 일반적으로 공기역학적 저항보다 작고 건성침적속도는 점성층 저항에 사용된 파라미터에 비교적 영향을 받지 않는다고 하였다.

그리고 계절에 따른 식물의 생장활동이 크게 차이가 있으므로 표면 저항의 계절변동은 뚜렷하게 나타났다(이 등, 1998). 일반적으로 식물의 작용이 활발한 여름철에 표면 저항이 작고 식물의 활성이 약한 겨울철에 표면저항이 크게 나타났다. 또한 주간에는 공기역학적 저항과 점성층 저항이 매우 작고 표면 저항도 야간에 비해 작기 때문에 건성침적속도가 크게 산정되었고, 야간에는 표면 저항이 클 뿐만 아니라 대기의 상태가 안정해지면서 공기역학적 저항도 큰 값으로 나타나 낮은 건성침적속도 분포를 보였다. Sheih 등(1979)에 의한 연구 결과에서도 전반적으로 일사량이 강한 주간

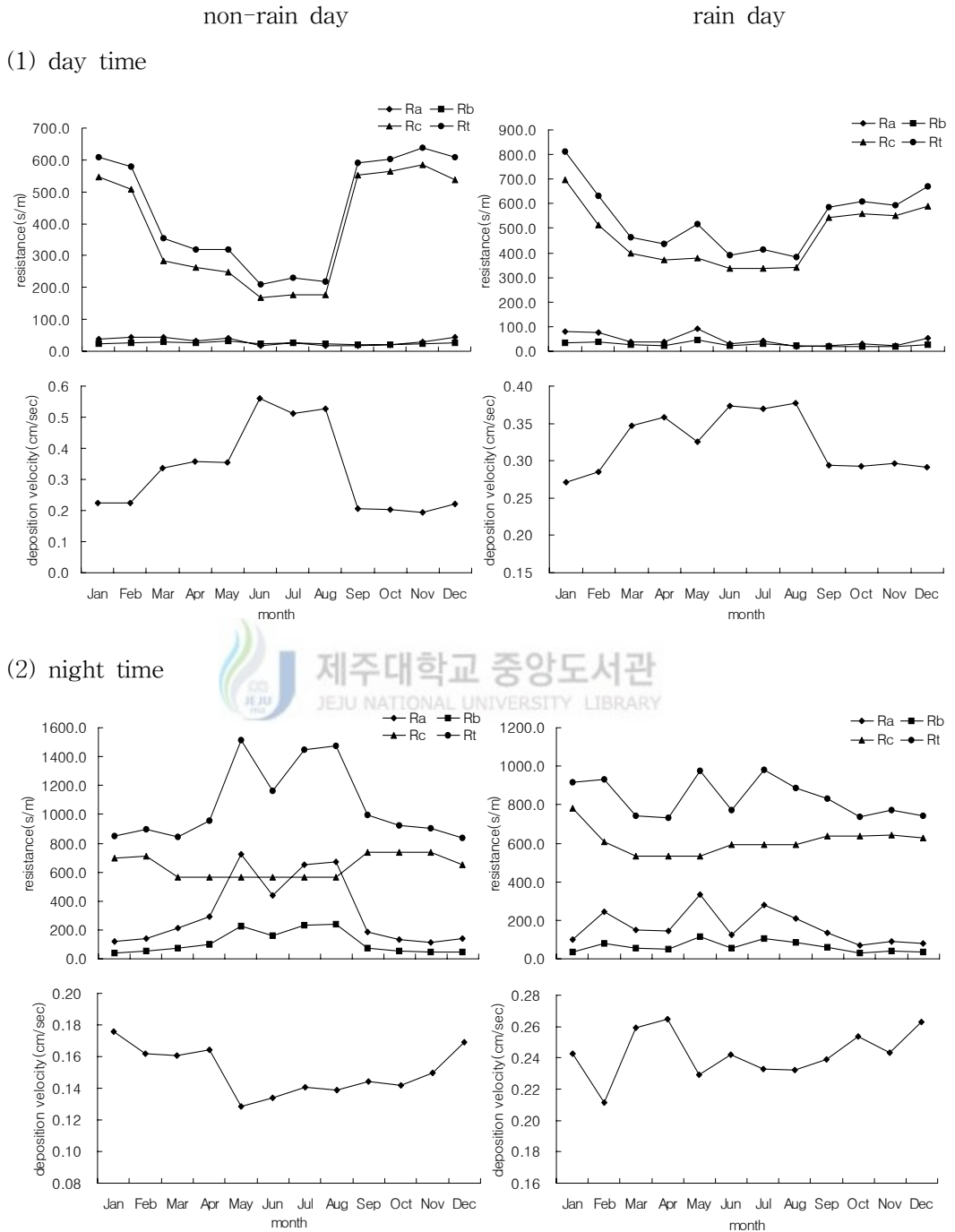


Fig. 13-1. Monthly variation of resistances and dry deposition velocity for SO₂

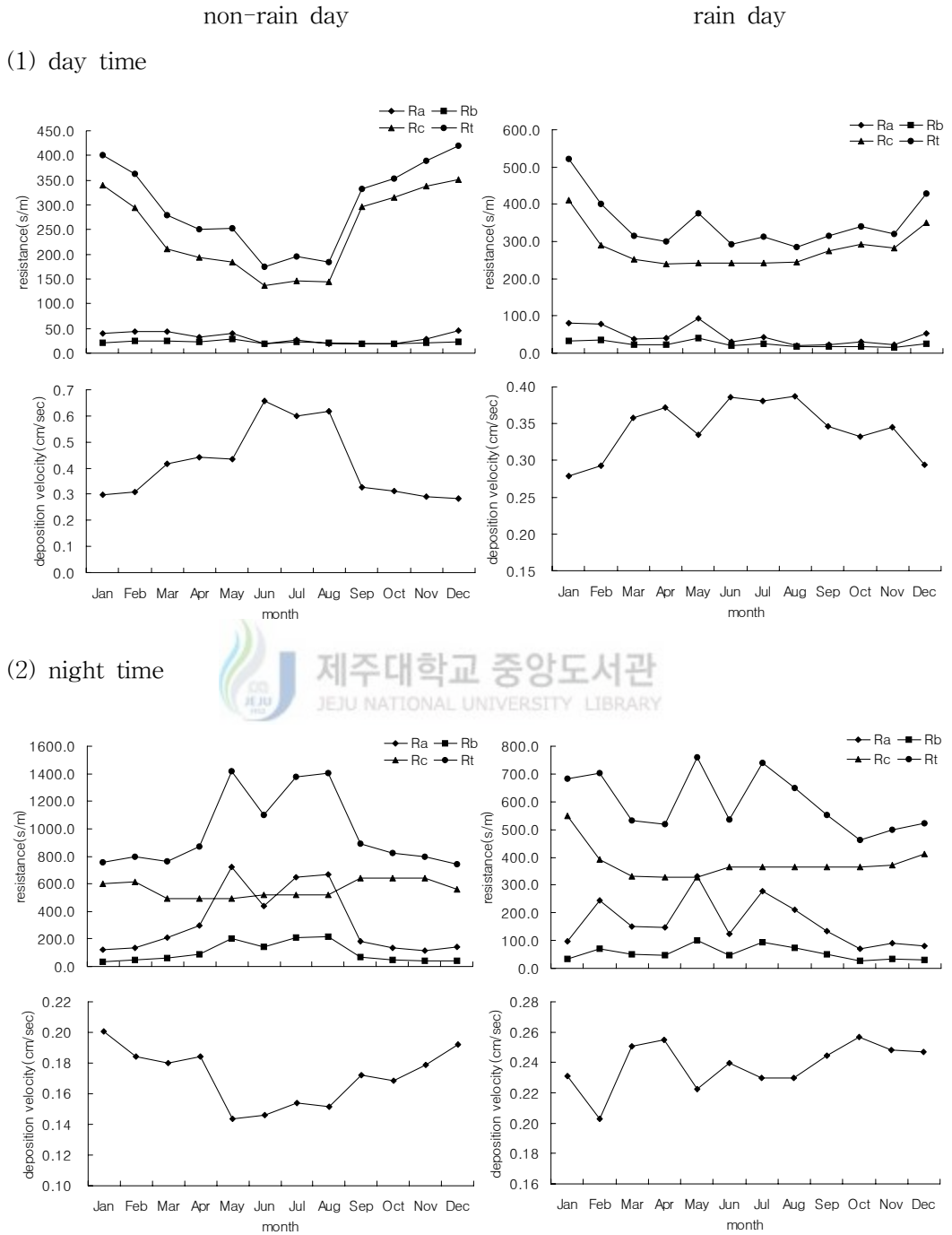


Fig. 13-2. Monthly variation of resistances and dry deposition velocity for O₃

에는 표면 저항이 작으나 일사량과 풍속이 약한 야간에는 표면 저항이 매우 크게 산정되고 있다.

Fig. 13에서 보듯이 주간에는 건성침적속도에 대한 표면 저항의 영향이 지배적이며 강수가 있으면 침적속도는 감소하였다. 그리고 야간에는 총 저항에 대한 표면 저항의 기여가 가장 큰 것으로 나타나지만 주간에 비해 공기역학적 저항과 점성층 저항의 상대적 기여도가 증가함을 알 수 있었다. Padro(1996)는 Wesely 방식으로 산정한 표면 저항은 다른 모델에 비해 큰 값으로 나타나기 때문에 다른 저항성분에 비해 표면 저항이 건성침적속도에 미치는 영향이 지배적이나 공기역학적 저항도 건성침적속도의 변동에 중요한 영향을 미친다는 것을 제시하였다.

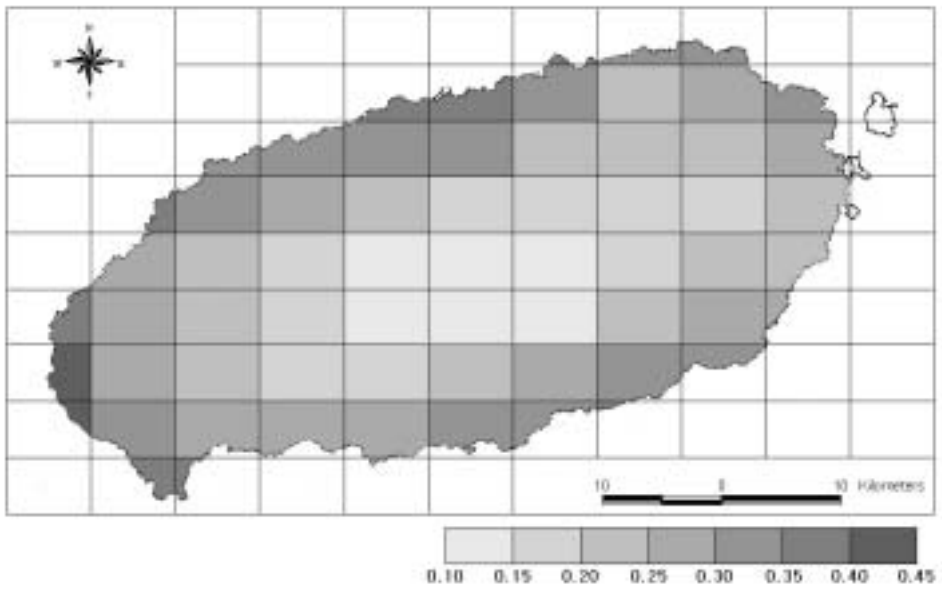
SO₂와 O₃ 모두 비강수일 주간에는 표면 저항(R_c)이 총 저항(R_t)과 가장 유사한 패턴을 보이고 야간에는 공기역학적 저항(R_a)이 총 저항과 비슷한 변동을 보이고 있다. 강수일의 경우 주간에는 월별 변동폭이 작기는 하나 대체적으로 표면 저항보다는 공기역학적 저항이 총 저항의 변화와 유사하고 야간에도 공기역학적 저항과 총 저항이 동일한 경향을 보이고 있다.

4.2.3. 건성침적속도의 공간적 분포특성

가. 분포도

제주도내 17군데의 기상관측소에서 측정된 기상자료와 토지이용형태를 이용하여 산정한 SO₂와 O₃의 건성침적속도를 각 격자점 내 토지이용형태별 면적비율을 적용하여 가중평균하고 각 격자점에서의 연평균 건성침적속도를 산출하여 그 분포도를 Fig. 14에 나타냈다. 그림을 보면 SO₂와 O₃ 모두 대부분 도시와 농경지가 분포되어 있는 해안지역에서 큰 값을 보였고 활엽수림 등 산림지로 이루어진 한라산 지역에서 낮게 나타났다. 또한 전반적으로 목초지가 대부분을 차지하고 있는 동부지역보다 주로 농경지로 이용되는 서부지역이 높은 분포를 보였다. 특히 제주도 서부지역의 고산 부근에서의 건성침적속도가 가장 높게 나타났는데 이것은 고산지역의 풍속이 다른 지역보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 제주전역에서의 건성침적속도 분포를 보면 해안 지역에서 산악지역으로 갈수록 즉, 고도가 높아질수록 낮은 건성침적속도를 보임을 알 수 있었다.

SO₂



 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

O₃

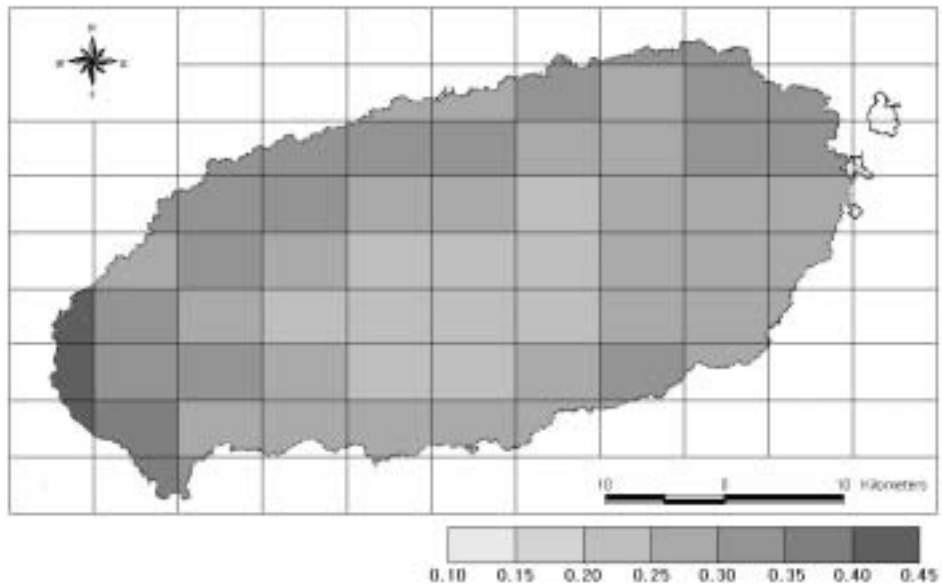


Fig. 14. Distribution of SO₂ and O₃ dry deposition velocity in Jeju Island

나. 고도별 분포

Table 6-1과 6-2는 제주도 전역을 주로 생활의 중심이 되는 거주지와 농경지가 분포하고 있는 200m 이하의 해안지대, 목장용지가 대부분을 차지하고 있으며 지하수자원보전지구로서 중요한 200~600m 사이의 중산간지역, 한라산국립공원으로 중요한 600m 이상의 산악지역으로 나누고 각각에 해당되는 지역의 건성침적속도 값을 계절별로 정리한 것이다.

주간시간대에는 강수의 유무에 관계없이 SO₂와 O₃의 건성침적속도는 식물의 활동이 왕성하고 일사량이 강한 봄과 여름철이 가을과 겨울철에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 봄과 여름철의 경우 일사량이 다른 계절에 비해 많고 대기와 지면 사이의 온도차이도 커지는 관계로 건성침적속도가 높게 되지만 가을과 겨울철에는 상대적으로 일사가 약해지고 식물의 잎이 전반적으로 감소하면서 식물의 활성이 떨어져 기공의 작용이 활발하지 못하기 때문에 작은 침적속도를 보이는 것으로 생각된다.

야간시간대에는 SO₂와 O₃ 모두 강수일의 건성침적속도가 비강수일보다 높게 나타났으며 식물이 무성한 600m 이상의 산악지역에서는 식물의 기공이 닫혀 있는 야간에 식물의 활성이 저하되기 때문에 낮은 값을 보이고 있다. 특히 여름철에 강우가 없는 날 주간의 경우 주로 농경지와 활엽수림이 많이 분포하고 있는 200m 이하의 해안지역과 600m 이상의 산악지역에서 가장 큰 값을 나타내었으며, 가을과 겨울철 야간시간대에 600m 이상의 한라산 지역에서 가장 낮은 분포를 보이고 있다.

특히 SO₂의 경우 도시지역과 농경지로 이루어진 200m 이하의 해안지역에서 비강수일에 비해 강수일의 주·야간 건성침적속도가 특히 높게 나타나고 있다. 이것은 석회석 등의 인공물질이 젖어 있을 때 빠르게 SO₂를 흡수하기 때문에 건물이 많은 도시지역에서 매우 높게 산정된 건성침적속도의 영향에 의한 것으로 생각된다(Wesely, 1989).

SO₂와 O₃의 건성침적속도는 전반적으로 강수와 계절에 상관없이 고도가 낮은 해안지역에서 높은 값을 보였으며 고도가 높은 산악지역으로 갈수록 낮은 분포를 나타내었다.

Table 6-1. The value of SO₂ dry deposition velocity in Jeju Island

season	elevation	non-rain day		rain day	
		day time	night time	day time	night time
spring	below 200m	0.39 (0.33~0.54)	0.18 (0.11~0.35)	0.50 (0.28~0.90)	0.35 (0.17~0.67)
	200~600m	0.31 (0.27~0.36)	0.13 (0.09~0.18)	0.24 (0.15~0.34)	0.18 (0.10~0.29)
	above 600m	0.28 (0.27~0.29)	0.10 (0.09~0.11)	0.15 (0.14~0.18)	0.10 (0.09~0.12)
summer	below 200m	0.57 (0.48~0.74)	0.15 (0.09~0.27)	0.51 (0.32~0.88)	0.33 (0.17~0.61)
	200~600m	0.50 (0.43~0.57)	0.13 (0.09~0.20)	0.28 (0.22~0.37)	0.16 (0.10~0.27)
	above 600m	0.56 (0.50~0.59)	0.10 (0.10~0.12)	0.22 (0.22~0.23)	0.10 (0.09~0.12)
autumn	below 200m	0.23 (0.20~0.27)	0.17 (0.12~0.25)	0.44 (0.25~0.85)	0.35 (0.17~0.68)
	200~600m	0.18 (0.11~0.22)	0.12 (0.08~0.17)	0.21 (0.11~0.28)	0.17 (0.09~0.26)
	above 600m	0.12 (0.10~0.16)	0.08 (0.07~0.10)	0.11 (0.09~0.14)	0.09 (0.08~0.12)
winter	below 200m	0.29 (0.21~0.43)	0.22 (0.14~0.41)	0.45 (0.24~0.82)	0.37 (0.18~0.67)
	200~600m	0.18 (0.10~0.25)	0.14 (0.07~0.20)	0.20 (0.09~0.29)	0.18 (0.08~0.27)
	above 600m	0.10 (0.09~0.14)	0.08 (0.07~0.11)	0.10 (0.08~0.13)	0.09 (0.08~0.12)

unit : cm/sec

() : range

Table 6-2. The value of O₃ dry deposition velocity in Jeju Island

season	elevation	non-rain day		rain day	
		day time	night time	day time	night time
spring	below 200m	0.45 (0.40~0.60)	0.19 (0.12~0.36)	0.39 (0.30~0.51)	0.26 (0.19~0.43)
	200~600m	0.40 (0.37~0.44)	0.15 (0.11~0.20)	0.33 (0.28~0.40)	0.23 (0.18~0.30)
	above 600m	0.39 (0.38~0.39)	0.11 (0.10~0.13)	0.29 (0.28~0.30)	0.18 (0.17~0.20)
summer	below 200m	0.65 (0.55~0.84)	0.16 (0.09~0.28)	0.41 (0.32~0.48)	0.25 (0.18~0.35)
	200~600m	0.60 (0.52~0.68)	0.14 (0.10~0.23)	0.36 (0.33~0.42)	0.21 (0.17~0.30)
	above 600m	0.67 (0.60~0.70)	0.11 (0.10~0.14)	0.34 (0.33~0.34)	0.18 (0.17~0.20)
autumn	below 200m	0.34 (0.31~0.39)	0.20 (0.14~0.29)	0.37 (0.32~0.43)	0.27 (0.20~0.37)
	200~600m	0.30 (0.21~0.35)	0.15 (0.09~0.21)	0.33 (0.26~0.38)	0.24 (0.17~0.29)
	above 600m	0.22 (0.20~0.26)	0.09 (0.08~0.12)	0.26 (0.25~0.29)	0.18 (0.16~0.20)
winter	below 200m	0.34 (0.30~0.47)	0.23 (0.15~0.42)	0.32 (0.27~0.42)	0.26 (0.16~0.41)
	200~600m	0.28 (0.19~0.34)	0.17 (0.09~0.25)	0.28 (0.18~0.34)	0.23 (0.14~0.29)
	above 600m	0.20 (0.18~0.24)	0.10 (0.08~0.13)	0.19 (0.17~0.25)	0.15 (0.13~0.20)

unit : cm/sec

() : range

4.3. 제주지역의 건성침적플럭스

대기 중 오염물질이 지표로 침적되는 양을 평가하기 위해 제주전역에서 각 격자별로 산정한 건성침적속도(V_d)와 오염물질 농도(C)의 곱으로서 식 (1)을 이용하여 제주지역의 건성침적플럭스를 산정하였다. 이를 위해 본 연구에서는 제주지역의 토지이용형태와 기상자료를 이용하여 각 격자별로 산출한 건성침적속도와 제주도내 대기오염자동측정망에서 관측된 SO_2 와 O_3 의 농도자료를 사용하였으며 결과적으로 제주전역에 걸쳐 침적되는 SO_2 와 O_3 의 계절별 건성침적량을 평가하였다.

4.3.1. 오염물질 농도

가. SO_2

Fig. 15에 제주도내 4군데의 대기오염측정망에서 관측된 SO_2 의 월평균 농도변화를 나타내었다. SO_2 의 농도는 연평균 2.39ppb 수준이며 계절별로는 봄철에 2.65ppb, 여름철에 1.92ppb, 가을철 2.09ppb, 겨울철에는 2.91ppb로 나타나 가정 난방으로 배출량이 많은 겨울철에 높고 여름철에 다소 낮은 계절적 차이를 보였다. 지역적으로는 인

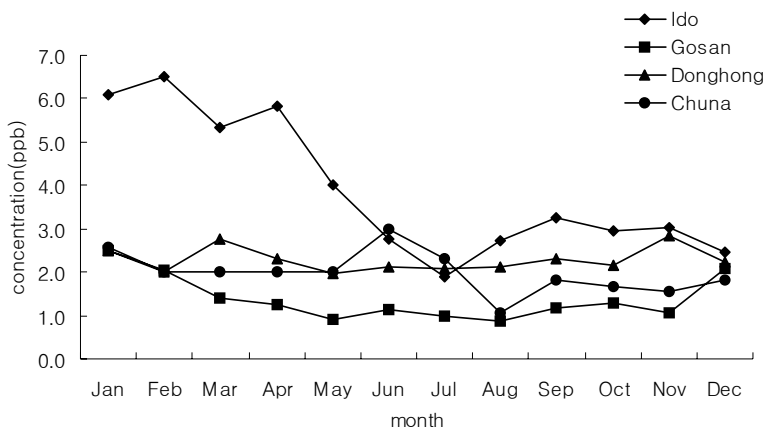


Fig. 15. Monthly variation of SO_2 concentration

위적 오염원에 의한 배출량이 많은 제주시(이도동) 지역에서 가장 높은 농도를 보이

며 서부(고산) 지역에서는 연중 큰 변화 폭 없이 가장 낮은 농도로 나타났다. 제주도의 SO₂ 오염도는 기준치보다 1/10 정도 낮은 수준으로 아주 청정한 대기질을 보이고 있다.

나. O₃

Fig. 16은 대기 중 O₃ 농도의 월변화를 나타낸 것이다. O₃의 농도는 연평균 34.02ppb이며 가을철에 37.02ppb로 가장 높게 나타났고 여름철에 30.02ppb로 가장 낮은 농도를 보였다. 월별 변동은 3~6월에 비교적 높게 나타나고 있는 반면 7~8월은 다소 낮은 분포를 보이고 있으며 계절별로는 대부분 풍속, 자외선 등 오존 생성조건이 충분한 봄과 여름철에 오존 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 봄철 장거리 이동에 의한 오염물질의 유입이나 이동성 고기압에 의한 성층권의 오존 유입, 기상학적 생성요인 증가 등이 원인으로 추정되고 있으며 여름철 특히 7~8월경에는 잦은 비의 영향으로 판단된다. 지역적으로는 제주시 지역보다 오염원이 없는 교외지역에서 농도

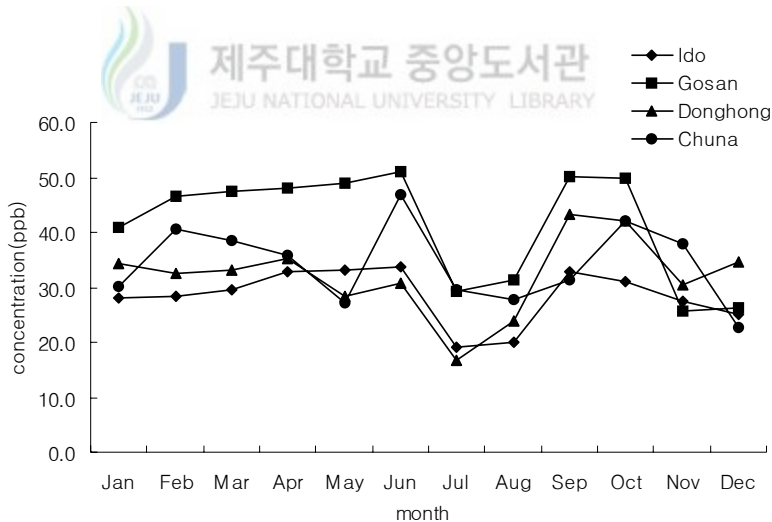


Fig. 16. Monthly variation of O₃ concentration

가 낮게 나타났다. 대기 중 O₃ 농도는 대도시 지역과 비교하면 높은 수준이지만 오존은 생성과 소멸인자에 의해 농도가 증감하기 때문에 오존의 생성과 소멸인자가 거의 없는 청정지역에서의 평균농도는 대도시의 평균농도보다 높게 측정되고 있는 실정이

다(제주도, 2002).

4.3.2. 건성침적플럭스 평가

가. 월별 변동

Fig. 17은 제주지역에서 SO₂의 월별 건성침적플럭스와 제주지역 전체 월평균 SO₂ 농도와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 17을 보면 SO₂의 건성침적플럭스는 겨울철에 가장 높고 봄, 여름 순으로 감소하며 가을철에 가장 낮은 경향을 보이고 있다. 겨울철 특히 12~2월의 경우 건성침적속도는 낮으나 SO₂의 농도가 가장 높기 때문에 건성침적플럭스가 큰 값을 보이고 있다. 그리고 6~8월 즉, 여름철에는 농도가 낮은 수준을 보임에도 불구하고 식생 상태 및 표면의 젖음 효과 등에 의해 건성침적속도가 가장 크기 때문에 침적플럭스가 비교적 높게 나타났다. 그러나 전체적인 월별 변화를

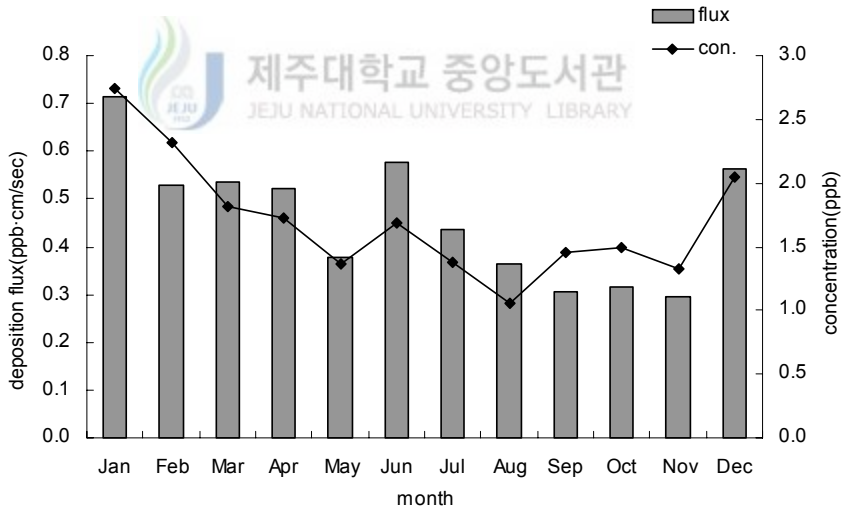


Fig. 17. Monthly variation of SO₂ dry deposition flux and concentration

보면 건성침적플럭스는 SO₂의 농도변화를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 이 등(1998)이 춘천지역에서 산출한 SO₂의 건성침적플럭스는 오염농도가 높은 11월에서 2월까지 높고 봄, 여름으로 가면서 점차 작아지는 것으로 나타나 오염농도의 계절적 변화와

잘 일치하고 있음을 보였다.

Fig. 18은 제주지역에 대한 O₃의 건성침적플럭스를 월별로 나타낸 것이다. O₃의 건성침적플럭스는 1월부터 서서히 증가하기 시작하여 6월에 최고값을 보이고 7월에 급격히 감소한 후 다시 증가하다가 11월부터 감소하는 변화를 보여 오염농도의 월변화 변동과 아주 흡사하게 나타나고 있다. 노(2000)가 부산지역에서 오존의 건성침적플럭스를 산출한 결과에서도 오존의 건성침적플럭스는 오존 농도의 변동과 유사하게 나타났다. 특히 7, 8월에는 건성침적속도가 높으나 O₃의 농도가 급격히 낮아지기 때문에 침적플럭스는 낮은 분포를 보이고 있다. 그리고 제주지역에서는 월중 일사량이 가장 강한 6월에 건성침적속도와 오염농도 역시 최대값을 보여 건성침적플럭스가 현저하게 큰 값으로 나타났다.

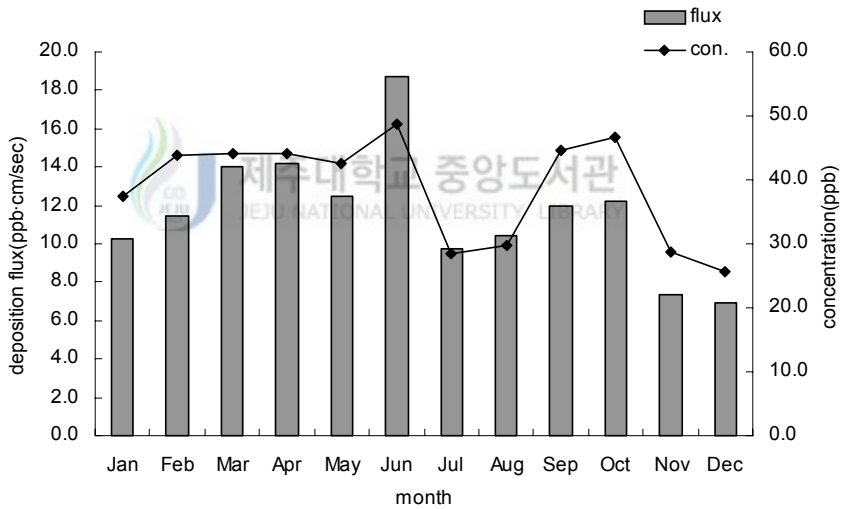
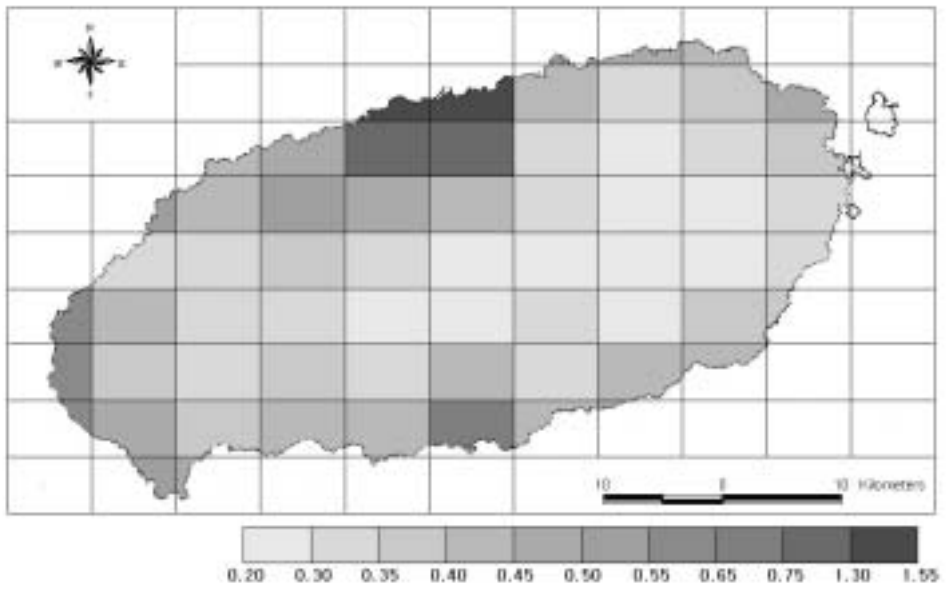


Fig. 18. Monthly variation of O₃ dry deposition flux and concentration

나. 공간적 분포도

제주지역에서 각 격자별로 산출한 SO₂와 O₃의 건성침적플럭스 분포는 Fig. 19와 같다. 제주지역에서의 연간 건성침적플럭스는 SO₂의 경우 0.46ppb·cm/sec의 평균값과 0.25~1.53ppb·cm/sec의 분포를 나타내었고, O₃의 경우에는 연평균 11.74ppb·cm/sec이고 7.47~18.37ppb·cm/sec 사이의 분포를 보였다.

SO₂



 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

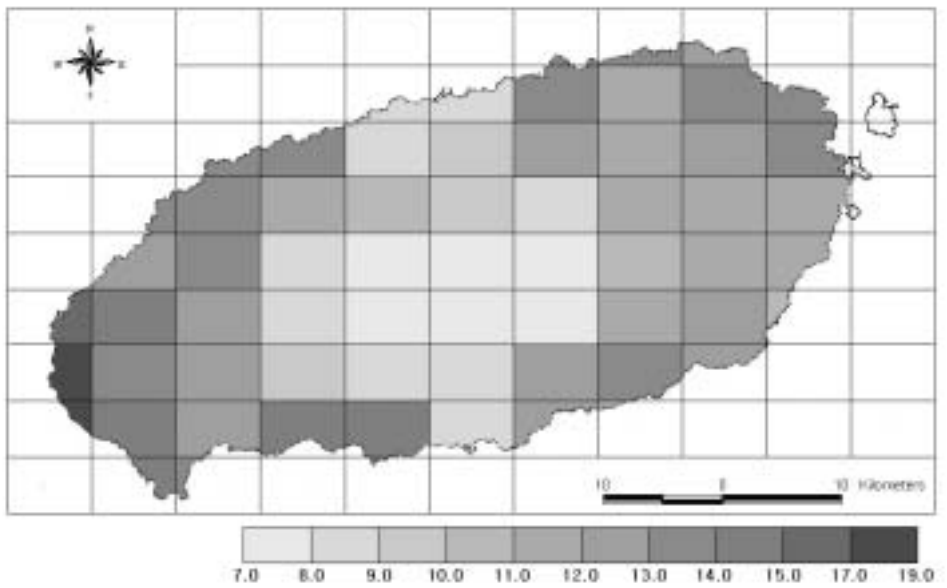


Fig. 19. Distribution of SO₂ and O₃ dry deposition flux in Jeju Island

SO₂의 건성침적플럭스 분포를 보면 대기 중 SO₂ 농도가 높고 건성침적속도가 높게 산출된 제주시와 서귀포시 지역에서 높은 분포를 보였다. 그리고 전체적으로 해안 지역에서 건성침적플럭스가 높게 나타났으며, 동부지역에 비해 건성침적속도가 높은 서부지역에서 높은 침적플럭스 분포를 볼 수 있었다. 특히 제주도 서부의 고산지역의 경우 매우 청정한 대기질을 지니고 있으나 건성침적속도가 크기 때문에 침적플럭스가 높게 나타났다.

SO₂와 달리 O₃의 경우에는 오염물질의 농도가 낮은 제주시, 서귀포시 그리고 산악 지역에서 낮은 건성침적플럭스 분포를 나타내고 있다. 그리고 주로 농경지와 목초지로 이루어진 동부와 서부지역에서 침적플럭스가 높게 나타났다. 특히 고산지역은 O₃의 농도가 높을 뿐만 아니라 건성침적속도가 큰 지역이므로 침적플럭스가 가장 높은 분포를 보였다.

다. 건성침적량 평가

다음은 제주전역에 침적되는 건성침적플럭스를 계절별로 비교해 보았다. Table 7에 제주지역에서 1시간 동안에 침적되는 양을 제시하였다. SO₂의 연평균 건성침적플럭스는 166.0g/km² · hr이며 O₃에 대해서는 4,192.8g/km² · hr로 나타났다. SO₂의 경우 이등(1998)이 춘천지역에서 측정된 467.10g/km² · hr의 약 1/3 수준을 보이고 있다.

Table 7. Dry deposition fluxes(g/km² · hr) in Jeju Island

pollutant species	season			
	spring	summer	autumn	winter
SO ₂	172.2	165.2	109.9	216.7
O ₃	4,878.7	4,670.6	3,793.6	3,428.5

제주도 전역에서 하루 동안의 건성침적량을 Table 8에 나타내었다. SO₂의 건성침적량은 겨울철에 9,617kg/day로 가장 많고 가을철에 가장 적은 4,875kg/day가 침적되고 있다. 그리고 O₃의 경우에는 봄철이 가장 많은 216,526kg/day가 침적되고 있으며 침적속도와 오염농도가 낮은 겨울철이 152,163kg/day로 가장 적게 나타나고 있다. 평균적으로 제주도 전역에 걸쳐 SO₂는 7,367kg/day, O₃는 186,088kg/day 정도가 지표면

에 침적된다.

Table 8. Dry deposition amount(kg/day) in Jeju Island

pollutant species	season			
	spring	summer	autumn	winter
SO ₂	7,645	7,332	4,875	9,617
O ₃	216,526	207,291	168,370	152,163

Table 9를 보면 계절별로 건성침적에 의해 침적되는 총 침적량은 SO₂의 경우 봄과 여름철에 약 700ton, 가을철 약 400ton, 겨울철에 약 900ton으로 연간 2,700ton 가량이 침적되고 있다. SO₂의 연간 침적되는 총 침적량은 서울시에 침적되는 11,200ton (김과 박, 1996)의 1/4 정도에 해당된다. 한편 O₃는 봄철에 가장 많은 약 19,900ton, 여름철에 약 19,100ton, 가을철에 약 15,300ton 그리고 겨울철에 가장 적은 13,700ton 이 침적되고 있으며, 제주지역에 연간 침적되는 총 침적량은 67,900ton 정도이다.

Table 9. Total dry deposition amount(ton) in Jeju Island

pollutant species	season			
	spring	summer	autumn	winter
SO ₂	703	674	444	866
O ₃	19,920	19,071	15,322	13,695

인위적인 배출원의 직접적인 영향이 거의 없으며 청정한 대기질을 지닌 제주지역의 건성침적량은 다른 지역에 비해 상당히 낮은 수준으로 제주지역에서의 침적량을 평가하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 제주도 지역의 지표면 특성을 고려한 오염물질의 건성침적현상을 평가하기 위해 Wesely 모델을 적용하여 SO_2 와 O_3 의 건성침적속도 및 침적량을 산출하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 건성침적속도에 영향을 주는 인자에 대한 영향을 보면 풍속과 일사량이 크고 대기가 불안정한 상태일 때 건성침적속도는 증가하며 풍속이 낮고 대기가 안정할수록 건성침적속도는 급격히 감소함을 보였다. 토지이용형태에 따라 건성침적속도는 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

2. 제주지역을 대상으로 건성침적속도를 산출해 보면 SO_2 와 O_3 의 건성침적속도는 여름철이 가장 크고 겨울철이 작게 나타났으며 야간보다 주간시간대에 높은 분포를 보였다. 제주전역의 공간적 분포를 보면 대체로 해안지역에서 높은 건성침적속도 분포를 보였으며, 목초지가 대부분을 차지하고 있는 동부지역보다 주로 농경지로 이용되고 다른 지역에 비해 풍속이 큰 서부지역이 높게 나타났다.

3. SO_2 와 O_3 의 건성침적플럭스의 시·공간적 변동을 보면 각 오염물질에 대한 건성침적플럭스는 침적속도보다는 오염물질의 농도에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

4. 우리 나라의 배경농도를 관측하고 평가할 수 있는 최적의 조건을 지닌 제주지역에서 연간 SO_2 의 침적량은 약 2,700ton, O_3 은 약 67,900ton 정도로 타 지역에 비해 상당히 낮은 수준을 보였다.

본 연구에 사용한 건성침적모델에서 고려하지 못한 다음과 같은 몇 가지 요소를 고려한다면 더욱 정확하고 신빙성 있는 자료를 얻을 수 있을 것이다. 현재 각 기상측정점에서 관측되지 않는 지면온도, 습도 및 일사량 등에 대한 관측자료를 확보할 필요가 있다. 그리고 일부 지역에서만 측정되는 대기오염관측망을 보다 확대시킬 필요가 있으며, 특히 토지이용형태별로 오염농도를 측정할 필요가 있다.

NOMENCLATURE

Symbols used in model are listed here.

Symbols

C	Pollutant concentration(ppb), Equation (1)
D_{H_2O}	Molecular diffusivity for water vapour, Equation (16)
D_x	Molecular diffusivity for a trace gas in air, Equation (13)
F_d	Dry deposition flux(ppb · cm/sec), Equation (1)
g	Acceleration of gravity(m/s^2), Equation (4)
G	Solar radiation(W/m^2), Equation (15)
H	Sensible heat flux(W/m^2), Equation (8)
k	von Karman constant(=0.4), Equation (3)
L	Monin Obukhov length(m), Equation (8)
r_{ac}	Resistance for transfer that depends on canopy height and density(s/m), Equation (14)
r_{cl}	Resistance for leaves, twig, bark or other exposed surfaces in the lower canopy(s/m), Equation (14)
r_{dc}	Resistance for gas-phase transfer affected by buoyant convection in canopy(s/m), Equation (14)
r_{gs}	Resistance for soil, leaf litter, etc., at the ground surface(s/m), Equation (14)
r_i	Minimum canopy stomatal resistance(s/m), Equation (15)
r_{lu}	Resistance for leaf cuticles in vegetation and otherwise the outer surfaces in the upper canopy(s/m), Equation (14)
r_m	Leaf mesophyll resistance(s/m), Equation (14)
r_s	Leaf stomatal resistance(s/m), Equation (14)
R_a	Aerodynamic resistance(s/m), Equation (2)
R_b	Quasi-laminar boundary layer resistance(s/m), Equation (2)

R_c	Surface or canopy resistance(s/m), Equation (2)
R_{ib}	Richardson number, Equation (4)
R_t	Total resistance(s/m), Equation (2)
T_s	Surface air temperature(°C), Equation (15)
u	Wind speed(m/s), Equation (4)
u_*	Friction velocity(m/s), Equation (3)
V_d	Dry deposition velocity(cm/sec), Equation (1)
z	Height at which deposition velocities are being calculated(m), Equation (3)
z_o	Roughness length(m), Equation (3)
θ_{va}	Virtual potential temperature at height z , Equation (4)
θ_{vg}	Virtual potential temperature at the ground, Equation (4)
κ	Thermal diffusivity in air, Equation (13)
ϕ	The slope in radians of the local terrain, Equation (20)
Ψ_h	Stability correction function : heat, Equation (3)



6. 참 고 문 헌

- 김시완, 박순웅, 1996, 서울 지방의 산성 오염 물질의 건성침착량 추정, 한국기상학회지, 32(2), 325-338.
- 노순아, 2000, 오존의 건성침적 특성에 관한 수치모의, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문, 84pp.
- 문난경, 1996, 중규모에서의 대기 오염 물질 침적 모델에 관한 연구, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문, 90pp.
- 원경미, 이화운, 1998, 부산의 지형적 특성을 고려한 O₃의 건성침적속도 시뮬레이션, 한국대기보전학회지, 14(5), 421-431.
- 이정미, 2001, 제주도 서부지역에서의 SO₂ 및 O₃ 건성침적플럭스 추정에 관한 연구, 제주대학교 일반대학원 석사학위논문, 50pp.
- 이종범, 박세형, 김용국, 조창래, 1998, 초음파 풍속온도계를 이용한 SO₂ 건성침착속도의 계절변화 특징, 한국대기보전학회지, 14(5), 465-478.
- 이화운, 박종길, 장은숙, 문난경, 1994, 지표부근에서의 대기오염물질 건성침적속도에 관한 모수화, 한국환경과학회지, 3(4), 367-371.
- 제주도, 2002, 환경백서, 608pp.
- Baldocchi, D. D., B. B. Hicks and P. Camara, 1987, A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces, *Atmos. Environ.*, 21, 91-101.
- Davidson, C. I., S. E. Lindberg, J. A. Schmidt, L. G. Cartwright and L. R. Landis, 1985, Dry deposition of sulphate onto surrogate surfaces, *J. Geophys. Res.*, 90, 2121-2130.
- Erismann, J. W., A. V. Pul and P. Wyers, 1994, Parametrization of surface resistance for the quantification of atmospheric deposition of acidifying pollutants and ozone, *Atmos. Environ.*, 28, 2595-2607.
- Erismann, J. W., G. P. J. Draaijers, 1995, Atmospheric deposition in relation to acidification and eutrophication, *Studies in Environmental Science*, 63, 405pp.

- Hicks, B. B., D. D. Baldocchi, T. P. Meyer, R. P. Hosker Jr., and D. R. Matt, 1987, A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities, *Water, Air, and Soil Pollution*, 36, 311-330.
- Louis, J. F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary Layer Meteorology*, 17, 187-202.
- Matt, D. R. and T. P. Meyers, 1993, On the use of the inferential technique to estimate dry deposition of SO₂, *Atmos. Environ.*, 27, 493-501.
- Meyers, T. P. and T. S. Yuen, 1987, An assessment of averaging strategies associated with day/night sampling of dry-deposition fluxes of SO₂ and O₃, *J. Geophys. Res.*, 92, 6705-6712.
- 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.
- Sehmel, G. A., 1980, Particle and gas dry deposition : A review, *Atmos. Environ.*, 14, 983-1011.
- Sheih, C. M., M. L. Wesely, and B. B. Hicks, 1979, Estimated dry deposition velocities of sulfur over the eastern United States and surrounding regions, *Atmos. Environ.*, 13, 1361-1368.
- Sorteberg, A. and O. Hov, 1996, Two parametrizations of the dry deposition exchange for SO₂ and NH₃ in a numerical model, *Atmos. Environ.*, 30, 1823-1840.
- Voldner, E. C., L. A. Barrie and A. Sirois, A literature review of dry deposition of oxides of sulphur and nitrogen with emphasis on long-range transport modelling in north america, *Atmos. Environ.*, 20, 2101-2123.
- Walcek, C. J., R. A. Brost, J. 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.
- Walmsley, J. L. and M. L. Wesely, 1996, Modification of coded

- parametrizations of surface resistances to gaseous dry deposition, *Atmos. Environ.*, 30, 1181-1188.
- Wesely, 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. Control Ass.*, 27, 1110-1116.
- Wesely, M. L., 1988, Improved parameterization for surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale, numerical models, EPA/600/3-88/025.
- Wesely, M. L., 1989, Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, *Atmos. Environ.*, 23, 1293-1304.
- Zhang, L., J. Padro and J. L. Walmsley, 1996, A multi-layer model vs single-layer models and observed O₃ dry deposition velocities, *Atmos. Environ.*, 30, 339-345.



감사의 글

대학원에 입학한 후 지난 2년간의 시간이 너무도 빨리 지나갔습니다. 돌이켜 생각해 보면 일과 공부 모두를 잘 해내려는 마음이 지나쳐서인지 오히려 둘 사이에서 너무나 많이 해매었던 것 같습니다. 그래서 더욱 대학원 생활에 아쉬움이 많이 남지만 저에게 너무나 소중한 시간이었습니다. 지금까지 옆에서 많은 조언을 주시고 격려해 주신 많은 분들이 있었기에 이렇게 논문을 완성하게 되지 않았나 생각합니다.

아직 부족함이 많은 저에게 바쁘신 와중에도 저녁 늦게까지 함께 하며 많은 지도를 해주시고 아낌없는 관심과 사랑으로 격려해 주신 이기호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 2년간의 대학원 생활을 잘 마무리 할 수 있도록 이끌어 주시고 늘 깊은 배려와 관심으로 보살펴 주신 허철구 교수님, 감상규 교수님 감사합니다. 항상 따뜻하게 지켜봐 주시고 많은 가르침을 주신 오윤근 교수님, 허목 교수님, 이용두 교수님, 조은일 교수님께도 감사드립니다.

그동안 바쁜 업무중에도 논문을 무사히 마칠 수 있도록 깊이 배려해 주시고 많은 자료와 도움을 주신 강봉래 선배님, 이정미 선배님, 홍근도 선배님, 강춘희 선배님, 김동진 선배님 감사합니다. 그 외에도 많은 관심을 가져주시고 격려해 주신 박용이 선배님, 김형철 선배님, 류성필 선배님, 고병철 선배님, 김병현 선배님, 김대경 선배님, 강진영 선배님, 양수미, 2년 동안 대학원 생활을 함께 하며 힘이 되어준 김대준, 오테권, 송정화, 김성수, 현경자, 강경호, 고기석 학형님과 그 외 대기실협실 가족들 정말 고맙습니다.

제가 학업에 임할 수 있도록 격려해 주시고 깊은 배려와 관심을 주신 과장님, 계장님과 직원여러분 그리고 환경공학과동우회 선배님들께 이 글을 빌어 깊은 감사를 드립니다. 그리고 바쁘다는 핑계로 만나지 못했지만 오랜 시간을 함께 해온 소중한 벗 년화, 민정, 지영, 은정, 지향, 신경, 훈자, 현주 그리고 우리 97학번 동기와 졸업동기들에게 기쁜 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 든든한 울타리가 되어준 나의 가족들 엄마, 아빠, 오빠와 군대에서 열심히 복무중인 동생 그리고 항상 옆에서 힘이 되어준 경석아 사랑해요!

2003년 12월