creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

이학석사학위논문

동아시아 건식 침적이 지표 오존 농도에 미치는 영향

Impacts of dry deposition on ozone concentration in surface air over East Asia

2013 년 2 월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

홍 승 규

동아시아 건식 침적이 지표 오존 농도에 미치는 영향

Impacts of dry deposition on ozone concentration in surface air over East Asia

지도교수 박 록 진

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함

2012 년 10 월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

홍 승 규

홍승규의 이학석사 학위논문을 인준함

2012 년 12 월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

인간 건강에 영향을 줄 뿐만 아니라 식생의 성장에도 영향을 주는 대기 오염 물질 중 하나인 오존은 지표에서 복잡한 NOx-VOC 광화학 반응과 소멸 과정들에 의해서 그 농도가 결정된다. 불충분한 관측과 수치 모의 연구로 아직 그 불확실성이 큰 건식 침적 과정에 대해서 초점을 맞추어 동아시아 지역에서 오존 결정 과정을 이해하기 위해 3 차원 지역 규모 대기 화학 수송 모형인 WRF-Chem 을 이용하였다. 여기서 널리 쓰이는 두 건식 침적 모수화 방안인 WRF-Chem 에 쓰이는 Wesely 방안과 CMAQ 에 쓰이는 M3DRY 두 방안을 비교하였다. 똑같은 기상장 조건에서 앞서 언급한 다른 두 건식 침적 모수화 방안을 이용한 건식 침적 속도를 비교한 결과, M3DRY 방안이 Wesely 방안을 사용하였을 때 보다 건식 침적 속도를 낮게 모의해 상당히 다른 양상을 보여 주었다. 이 차이는 지면 유형에 의존적인 지표면 저항의 차이에 의한 것으로 나타났다. 모의된 건식 침적 속도를 미국 BEACHON-ROCS 관측 캠페인에서의 건식 침적 속도와 비교하였을때 Wesely 방안을 사용한 모의 결과가 일변화를 잘 모의하는 점에서 관측과 더 잘

일치하는 것을 확인하였다. 우리는 지면 조건에 따라 오존 모의의 민감도를 이해하기 위해서 기본 지면 사용 정보인 USGS 지면 사용 정보에서 MODIS 지면 사용 정보로 바꾸어 민감도 분석을 수행하였다. 잎 면적 지수의 변화와 도시 및 건물 사용 정보의 할당으로 기공 저항이 증가하게 되어 건식 침적 속도가 내려가 풍하측 지역에서 오존 농도가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이렇게 지면 사용 정보를 바꾸었을때 특히 일본에서 관측과 지표 오존 농도가 더 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 하지만 전구 물질의 배출과 화학반응, 수송 과정 등과 같은 다른 요소들이 오존에 큰 영향을 줄 수 있고 동아시아에서 오존에 대한 우리의 이해를 높이기 위해서 화학 물질 관측과 수치 모의가 결합된 통합적인 연구가 앞으로도 필요할 것이다.

주요어: 오존, 건식 침적, WRF-Chem, M3DRY, BEACHON-ROCS, MODIS

학 번: 2011-20385

TABLE OF CONTENTS

초 록 i

TABLE OF CONTENTS iii

LIST OF TABLES AND FIGURES v

1. 서론 1

2. 모형 설명 4

2.1 사용한 모형 4

2.2 배출량 5

2.3 화학장의 초기값과 경계값 8

2.4 모형 모수화 방법 10

2.5 기상장 13

3. 건식 침적 과정 14

3.1 건식 침적 14

3.2 사용한 건식 침적 모수화 방법 15

3.3 공기 역학적 저항 15

3.4 준층류 저항 16

3.5 지표면 저항 17

3.5.1 식생에 의한 지표면 저항 기여 18

3.5.2 기공 저항과 엽육 저항 19

3.5.3 각피 저항 21

3.5.4 식생층 내 저항 23

3.5.5 표면 노출에 의한 저항 24

4. 건식 침적 모수화 방법에 따른 동아시아 지역의 지표 오존 농도 26

5. 지면 사용 정보가 동아시아 오존 건식 침적 속도에 미치는 영향 37

6. 건식 침적 속도와 관측과의 비교 42

7. 관측과 모의된 지표 오존 농도의 비교 46

8. 결론 49

References 52

Abstract 55

감사의 글 59

LIST OF TABLES AND FIGURES

TABLE 1. MAPPING TABLE OF EMISSION SPECIES BETWEEN SMOKE-ASIA AND WRF-CHEM. NASN, TERP, E_KET, E_ORA2, E_CLS HAVE NO CORRESPONDING PAIR. . 7
TABLE 2. MAPPING TABLE OF CHEMICAL SPECIES BETWEEN IC/BC_PROFILE_V7 (CMAQ DEFAULT INITIAL AND BOUNDARY CONDITION PROFILE) AND WRF-CHEM. PACD, TERP, PANX HAVE NO CORRESPONDING PAIR. 9
TABLE 3. WRF-CHEM SIMULATION CONFIGURATION. 12
TABLE 4. USGS 24-CATEGORY LAND USE CATEGORIES. 28
TABLE 5. MAPPING TABLE OF LAND USE CATEGORIES BETWEEN USGS 24-CATEGORY LAND USE CATEGORIES AND IGBP-MODIFIED MODIS 20-CATEGORY LAND USE CATEGORIES. 38

FIGURE 1. (A) USGS 24-CATEGORY LAND USE DATA IN WRF-CHEM DOMAIN. (B) IGBP-MODIFIED MODIS 20-CATEGORY LAND USE DATA CONVERTED TO USGS 24-CATEGORY LAND USE CATEGORIES IN WRF-CHEM DOMAIN. 27
FIGURE 2. (A) AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE IN MAY 2004 WITH WESELY. AVERAGE VALUE IS 0.24 CM S^{-1}. (B) AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE WITH WESELY. AVERAGE VALUE IS 36.0 PPBV. (C) AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE WITH M3DRY. AVERAGE VALUE IS 0.10 CM S^{-1}. (D) AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE WITH M3DRY. AVERAGE VALUE IS 41.6 PPBV. (E) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE WITH M3DRY AND THAT WITH WESELY. AVERAGE VALUE IS 0.14 CM S^{-1}. (F) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE CONCENTRATION OF OZONE WITH M3DRY AND THAT WITH WESELY. AVERAGE VALUE IS 5.6 PPBV. 33
FIGURE 3. (A) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE IN MAY 2004 WITH M3DRY CHANGING SEA SURFACE RESISTANCE OF WESELY AND THAT WITH M3DRY. (B) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE WITH M3DRY CHANGING SEA SURFACE RESISTANCE OF WESELY AND THAT WITH M3DRY SCHEME 36

FIGURE 4. (A) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE IN MAY 2004 WITH WESELY USING MODIS LAND USE DATA AND THAT WITH WESELY USING USGS LAND USED DATA. (B) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE WITH WESELY USING MODIS LAND USE DATA AND THAT WITH WESELY USING USGS LAND USED DATA. (C) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE DRY DEPOSITION VELOCITY OF OZONE WITH M3DRY USING MODIS LAND USE DATA AND THAT WITH M3DRY USING USGS LAND USED DATA. (D) DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE WITH M3DRY USING MODIS LAND USE DATA AND THAT WITH M3DRY USING USGS LAND USED DATA.41

FIGURE 5. COMPARISON BETWEEN MODEL SIMULATION AND OBSERVATION OF DRY DEPOSITION VELOCITY. BLACK CROSS LINE IS OBSERVATION WHEN ZERO DISPLACEMENT HEIGHT EQUALS 0.55H, BLACK DIAMOND LINE IS OBSERVATION WHEN ZERO DISPLACEMENT HEIGHT EQUALS 0.66H, BLACK ASTERISK LINE IS OBSERVATION WHEN ZERO DISPLACEMENT HEIGHT EQUALS 0.78H, RED TRIANGLE LINE IS MODEL VALUE WITH WESELY, AND GREEN RECTANGLE IS MODEL VALUE WITH M3DRY. ...45

FIGURE 6. (A) DIURNAL VARIATIONS OF HOURLY AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE ON NATIONAL INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL RESEARCH (NIER) KOREAN OBSERVATION SITES. BLACK CIRCLE INDICATES OBSERVATION ON NIER OBSERVATION SITES, GREEN CROSS INDICATES SIMULATION WITH WESELY SCHEME USING USGS LAND USE DATA ON NIER OBSERVATION SITES, BLUE DIAMOND INDICATES SIMULATION WITH WESELY SCHEME USING MODIS LAND USE DATA ON NIER OBSERVATION SITES, ORANGE TRIANGLE SIMULATION WITH M3DRY SCHEME USING USGS LAND USE DATA ON NIER OBSERVATION SITES AND RED SCISSORS SHAPE SIMULATION WITH M3DRY SCHEME USING MODIS LAND USE DATA ON NIER OBSERVATION SITES. (B) DIURNAL VARIATIONS OF HOURLY AVERAGE CONCENTRATION OF SURFACE OZONE ON EANET JAPANESE OBSERVATION SITES. CATEGORIES ARE SAME WITH THE CASE OF NIER SITES.....48

1. 서론

지역 규모 대기화학 모형에서 지표 오존 농도를 결정하는 요소는 배출량, 화학 메커니즘, 기상장, 화학장의 초기값과 경계값 그리고 건식 침적 과정과 습식 침적 과정이 있다(Jacob, 1999). 오존은 물에 잘 녹지 않는 성질을 가지고 있으므로(Battino et al., 1983), 침적 과정 중 건식 침적 과정이 습식 침적 과정에 비해 오존 농도에 많은 영향을 미치게 된다. 대류권 오존 소멸에서 건식 침적 과정이 차지하는 비율은 약 25%정도 되는 것으로 추정된다(Lelieveld and Dentener, 2000).

이러한 침적 과정은 미기상학적인 현상과 미시 물리적인 과정이 수반되어 지역규모 모형에서는 분해할 수 없는 작은 규모에서 일어나기 때문에 모형에서 침적과정은 모수화 되어 표현된다(Seinfeld and Pandis, 1998). 이 모수화 과정에서 침적과정의 불확실성이 발생하게 되는데, Ganzeveld and Lelieveld (1995)은 모수화 방법을 이용한 건식 침적 속도를 사용한 지표 오존 농도 모의 결과와 일정한

값의 건식 침적 속도를 사용한 결과를 비교하여 지역에 따라 차이가 35%에 이를 정도로 변동성이 큰 것을 보였다.

모형에서 오존의 건식 침적 과정에 영향을 미치는 요소로는 크게 공기역학적 저항, 준층류 저항 그리고 지표면 저항이 있으며 이들 중 지표면 저항의 영향은 매우 중요하다. 이들 중에서도 기공 저항은 건식 침적 속도를 결정하는 가장 중요한 요소이다(Padro, 1996). 하지만 모형에서의 기공저항 계산은 관측과 비교하였을때 불확실성이 크다. 서로 다른 두 건식 침적 모수화 방법에서 관측과 차이를 가장 많이 일으킨 요소는 기공 저항 부분이었다(Wu et al., 2011).

한편, Herwehe et al. (2011)은 미국 지역을 대상으로 두 지역 규모 모형에서 동일한 배출량, 화학 메커니즘, 기상장 그리고 화학장의 경계장과 초기장을 사용하여 지표 오존을 모의하였다. 두 모형의 지표 오존 농도는 최대 10ppbv 이상으로 차이가 크게 나타났다. 주요한 원인은 건식 침적 속도의 차이에 의한 것이었다. 이는 지표면 저항에 기인한 것으로 보이나 이에 대한 심도있는 연구가 진행되지는 않았다.

동아시아 지역에서도 마찬가지로 건식 침적 모수화 방법에 따른 지표 오존의 변동성이 클 것으로 생각되나, 아직 동아시아에서는 이에 대한 연구가 수행되지 않았다. 그래서 본 연구에서는 지역 규모 대기화학 모형을 이용하여 건식 침적 모수화 방안과 지면 사용 정보에 따른 동아시아 지역에서의 지표 오존 농도와 오존 건식 침적 속도를 모의하고 관측 자료를 이용해 적합한 건식 침적 모수화 방안을 검증하였다.

모의를 수행하기 위해 필요한 지역 규모 모형과 배출량, 화학장의 초기장과 경계장, 모형 모수화 방법과 기상장을 2 장에 설명하였고 3 장에서는 선택한 건식 침적 모수화 방안에 대해서 설명하였다. 4 장에서는 건식 침적 모수화 방안에 따른 지표 오존 농도 모의 결과를 나타내고, 5 장에서는 지면 사용 정보에 따른 건식 침적 속도의 변화와 지표 오존 농도의 변화에 대해서 설명하였다. 6 장과 7 장에서는 모의된 건식 침적 속도와 지표 오존 농도를 관측 결과와 비교하였다.

2. 모형 설명

2.1 사용한 모형

동아시아 지역에서 대류권 오존 농도 모의를 위해서 사용한 모형은 Weather Research and Forecast - Chem (WRF-Chem) version 3.3 으로써 미국 국립기상연구소 National Center Atmospheric Research (NCAR) 에서 개발된 모형이다(Grell et al., 2005). 이 모형은 기상 모형인 Weather Research and Forecast (WRF)모형에 화학물질을 모의할 수 있는 모듈을 추가하여 만든 모형이다. 기상 모형에 화학 모듈을 첨가한 형태이기 때문에 기상장을 WRF-Chem 모형 내에서 실시간으로 모의 할 수 있다. 이를 통해 기상장과 화학장의 상호작용을 on-line 으로 보는 것이 가능하다(Chapman et al., 2009).

화학 모형에 들어갈 배출량을 생성하는 모형으로는 건국대학교에서 개발한 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions-ASIA (SMOKE-ASIA)를 사용하였다(Woo et al., 2011). 이 배출량 모형은 Community Modeling & Analysis System 에서 개발한 대기화학수송 모형인 Community Multiscale Air

Quality (CMAQ)모형(Byun and Ching, 1999)을 위해 개발한 배출량 모형 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions 를 동아시아 지역에 맞게 개량한 모형이다.

2.2 배출량

SMOKE-ASIA 모형은 점, 선 그리고 면 배출원을 고려할 수 있고, 배출원의 공간적 시간적 분포를 반영한 배출량을 생산할 수 있다. 이번 연구에 사용한 배출량은 Intercontinental Chemical Transport Experiment Phase-B 인벤토리 자료에 기초하여 만들어졌다(Singh et al., 2006). SMOKE-ASIA 에서 배출량을 만들때 화학 분화 메커니즘은 Carbon Bond 05 (CB05)을 토대로 하게 되었다(Appel et al., 2007). WRF-Chem 에서 화학 분화 메커니즘으로 선택할 수 있는 메커니즘들은 한정되어 있기 때문에 SMOKE-ASIA 와 똑같이 CB05 를 선택하지 못하고 가장 유사한 메커니즘인 Carbon Bond Mechanism version Z 을 사용하였다(Zaveri and Peters, 1999).

SMOKE-ASIA 배출량을 WRF-Chem 배출량으로 사용하기 위해 단위 변환을 포함한 배출 화학종의 변환을 시행하였다. 표 1 에 배출 화학종 변환표를 나타낸다. 그러나 WRF-Chem 과 SMOKE-ASIA 의 화학 메커니즘이 서로 다르기 때문에 배출 화학종도 서로 완벽히 일치하지 않았다. SMOKE-ASIA 에서는 할당되지 않은 휘발성유기화합물(NASN) 과 테르핀(TERP)이, WRF-Chem 에서는 케톤(E_KET), 카르복실산(E_ORA2), 크레졸(E_CLS)이 서로 대응하는 배출 화학종이 없는 것으로 나타났다. 하지만 이들은 주요 배출 물질이 아니기 때문에 모의 결과에는 큰 영향을 끼치지 않는다.

Table 1. Mapping table of emission species between SMOKE-ASIA and WRF-Chem. NASN, TERP, E_KET, E_ORA2, E_CLS have no corresponding pair.

SMOKE-ASIA	WRF-Chem	SMOKE-ASIA	WRF-Chem
ALD2+ALDX	E_ALD	TOL	E_TOL
CO	E_CO	XYL	E_XYL
ETH	E_OL2	ETHA	E_ETH
FORM	E_HCHO	ETOH	E_C2H5OH
ISOP	E_ISOP	IOLE	E_OLI
NH3	E_NH3	MEOH	E_CH3OH
NO	E_NO	NASN	
NO2	E_NO2	TERP	
OLE	E_OLE		E_KET
PAR	E_PAR		E_ORA2
SO2	E_SO2		E_CLS

2.3 화학장의 초기값과 경계값

지역 규모 모형은 초기값과 경계값에 민감하다(Tang et al., 2009). 이번 모의에서는 CMAQ 모형에서 사용하는 초기 조건과 경계 조건을 사용하였다(ic/bc_profile_v7). CMAQ 의 초기값, 경계값 생성 모듈은 위 두 프로파일(ic/bc_profile_v7)의 값을 토대로 설정된 격자와 수직 층에 맞게 내삽하여 초기값과 경계값을 생성한다. CMAQ 에서 초기값, 경계값을 생성할 때 사용한 화학 분화 메커니즘으로 SMOKE-ASIA 배출량 변환 때와 마찬가지로 CB05 를 사용했기 때문에 WRF-Chem 에 이 값들을 처방하기 위해서는 화학종이 변환이 필수적이다. 표 2 에 화학종 변환을 나타내었다. CMAQ 화학종 중에 과산화아세틱산(PACD), TERP 그리고 질산과산화아세틸(PANX)는 대응되는 적당한 WRF-Chem 화학종을 찾기 어려웠다.

Table 2. Mapping table of chemical species between ic/bc_profile_v7 (CMAQ default initial and boundary condition profile) and WRF-Chem. PACD, TERP, PANX have no corresponding pair.

ic/bc_profile_v7	WRF-chem	ic/bc_profile_v7	WRF-Chem
NO2	NO2	MGLY	MGLY
NO	NO2	OPEN	OPEN
O3	O3	CRES	CSL
NO3	NO3	FORM	HCHO
OH	HO	ALD2	ALD
HO2	HO2	PAR	PAR
N2O5	N2O5	OLE	OLT
HNO3	HNO3	TOL	TOL
HONO	HONO	ISOP	ISO
PNA	HNO4	ETH	OL2
H2O2	H2O2	XYL	XYL
CO	CO	TERP	
SO2	SO2	ETHA	ETH
SULF	SULF	IOLE	OLI
PAN	PAN	ROOH	OP2
FACD	ORA1	NTR	ONIT
AACD	ORA2	C2O3	C2O3
PACD		PANX	
MEPX	OP1	NH3	NH3

2.4 모형 모수화 방법

WRF-Chem 모의에 사용된 모형 모수화 방법을 표 3 에 나타내었다. 중심위치를 북위 37.5 도 동경 120 도로 하여 람베르트 원뿔 도법을 이용해 수평으로 45km 간격으로 가로 130 개, 세로 95 개의 격자로 이루어진 동아시아 영역을 설정했다. 최고층의 기압을 50hPa 로 하여 에타 좌표계를 따르는 14 층의 수직층을 만들었다.

장파 복사과정에는 Rapid radiative transfer model (Mlawer et al., 1997), 단파 복사과정에는 Goddard 모수화 방법(Chou and Suarez, 1994)을 사용했다. 적운 대류 모수화와 구름미세물리 모수화 방법으로는 각각 Grell-Dèvènyi (Grell and Dèvènyi, 2002) 와 Lin (Lin et al., 1983)을 사용했다. 또한 수직방향 혼합, 분산 모수화 방법으로는 Eddy 분산 모수화 방법을 이용했다. 위 모수화 방법들은 WRF 가 제공하는 많은 모수화 방안들 중에서 WRF-Chem 과 안정성있게 실행되는 방안들이다. 그 외에 지표층 모수화와 지표면 모수화 그리고 행성경계층 모수화 방법들은 WRF-Chem 에서는 제한된 모수화 방법만 사용 가능하다. 본 모의에서는 각각 Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954), Unified National Centers for Envrionmental Prediction (NCEP) /NCAR/Air Force

weather agency scheme (Chen and Dudhia, 2001), Yonsei University Planetary boundary layer scheme (Hong et al., 2006)방법을 사용하였다.

Table 3. WRF-Chem simulation configuration.

Feature	Selected configuration
Domain	East Asia on 45 km grid with 14 layers
Domain top	50hPa
Initial and boundary conditions	ic/bc_profile_v7
Emission	SMOKE-ASA (Only anthropogenic)
Longwave radiation	RRTM
Shortwave radiation	Goddard
Microphysics	Lin (Purdue)
Cumulus parametrization	Grell-Devenyi
Vertical diffusion	Eddy
Chemical mechanism	CBMZ
Surface layer physics	Monin-Obukhov
Land surface model	Noah
Planetary boundary layer	YSU
Photolysis	Fast-J

2.5 기상장

기상장을 모의하기 위한 초기값과 경계값을 얻기 위해서는 먼저 WRF Preprocessing System (WPS)에서 Gridded binary 형식으로 된 자료동화 재분석 기상장을 설정한 모의 영역에 맞게 수평, 수직 내삽해 주어야한다. 이 모의에서는 NCAR 에서 제공하는 NCEP Final Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999 (ds083.2)자료를 사용하였다.

3. 건식 침적 과정

3.1 건식 침적

건식 침적 과정이란 난류에 의해서 화학 물질이 지표면에 부딪혀 지표에 흡착되는 현상을 의미한다. 대기 화학 수송 모형에서 화학 물질에 대한 건식 침적율은 건식 침적 속도를 도입하여 농도와의 곱으로 표현 할 수 있다.

$$F = v_d C \quad (1)$$

식 (1)에서 v_d는 화학물질의 건식 침적 속도를 의미하고 C는 농도를 의미한다. 대기화학 수송 모형에서는 건식 침적 속도를 공기역학적저항(R_a), 준층류저항(R_b) 그리고 지표면 저항(R_c)의 합의 역수로 계산하는 저항 유사법을 사용하고 있다.

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

식 (2)에서 건식 침적 속도는 세 저항의 합의 역수로 표현되기 때문에 세 저항중 가장 큰 값을 가지는 저항에 의해서 값이 결정된다.

3.2 사용한 건식 침적 모수화 방법

본 연구에서는 WRF-Chem 의 기본 설정인 Wesely (1989)가 제안한건식 침적 모수화 방안(앞으로 Wesely 방안이라 칭한다) 과 CMAQ 의 기본 설정(CMAQ 기상장 변환 모듈인 Meteorology-Chemistry Interface Processor version 3.3 (Otte and Pleim, 2010)사용)인 Pleim et al. (2001)이 제안한 M3DRY 건식 침적 모수화 방안(앞으로 M3DRY 방안이라고 칭한다)을 WRF-Chem 에 적용해 그 결과를 비교하였다(Allen et al., 2009). 각각의 모수화 방법에서 공기역학적 저항, 준층류 저항 그리고 지표면 저항을 모수화 하는 방식이 달라 건식 침적 속도에 차이를 일으킨다.

3.3 공기 역학적 저항

공기 역학적 저항은 Monin-Obukhov 의 상사 이론에 따라 만들어진 안정도 보편 함수를 이용해서 표현될 수 있다. 이 안정도 보편 함수는 모든 화학종에 대해 동일하게 적용되며 대기 상태의 안정도 유무에 따라 그 식이 바뀔 수 있다.

$$R_a = \frac{1}{ku_*}\int_{z_0}^{z_1}\frac{\phi_h(\zeta)}{z}dz \quad (3)$$

식 (3)에서 k는 Von-Karman constant 로 보통 0.35 에서 0.4 사이의 값을 가지며, u_*는 마찰 속도, z_1는 건성침적속도 계산 고도, z_0는 지표 거칠기 길이로 지면 상태에 따라 결정된다. z 는 지면으로부터의 높이이고, $\phi_h(\zeta)$ 는 안정도 보편함수 그리고 ζ는 부력 파라미터로 z 를 Monin-Obukhov 길이로 나눈 값이다. Wesely 방안과 M3DRY 방안 모두 이 공기 역학적 저항값은 M3DRY 방안이 대기가 매우 안정한 상태일때 z-less scale 방안을 적용하는 것 빼고는 안정도 보편함수에서 미세한 계수 차이 말고는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.4 준층류 저항

준층류 저항은 분자 확산에 의해서 발생하는 저항값을 의미하며 Wesely 방안과 M3DRY 방안 모두 동일한 수식을 따른다.

$$R_b = \frac{2(Sc/\mathrm{Pr})^{2/3}}{ku_*} \quad (4)$$

식 (4)에서 Sc 는 Schmidt number 로 점성(운동량) 분산율을 질량 분산율로 나눈 값이다. Pr 는 Prandtl number 로 점성(운동량) 분산율을 열 분산율로 나눈 값을 의미한다. Wesely 방안과 M3DRY 방안은 Sc, Pr 값에서 미세한 차이를 나타낼 뿐 그 값은 거의 같은 것으로 조사되었다.₩

3.5 지표면 저항

Wesely 방안과 M3DRY 방안 차이의 대부분은 지표면 저항 차이에 기인한다. 지표면 저항은 지표면의 고유한 상태를 의미하는 저항으로 화학 물질이 지표면에 부딪히는 순간 흡착되거나 다시 튕겨져나갈 수 있는데, 지표면이 화학 물질을 잘 흡수할 수록 지표 저항의 값은 작게 할당될 것이다. 지표면 저항값은 지표면의 여러 상태에 의존한다. 지표면 습도나 비와 눈의 유무, 온도와 같은 기상 변수에 결정되거나 지표면 식생의 종류와 잎면적지수 그리고 엽육, 기공, 잎의 특성과 같은 식생의 특성에 따라 결정되는 요소도 있다. 만일 지표면위에 식생이나 특별한

기상요소(습도, 이슬, 눈, 비)가 없이 표면이 노출되면 지표면 자체의 특성이 지표면 저항값을 결정할 것이다.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{sm}} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{dc} + R_{cl}} + \frac{1}{R_{ac} + R_{gs}} \quad (5)$$

$$\frac{1}{R_c} = f_{veg}\left(\frac{1}{R_s \frac{D_{H_2O}}{D_x} + R_m \frac{1}{LAI}} + (1-\Delta)\frac{LAI}{R_{cut}} + \Delta\frac{LAI}{R_{wetcut}} + \frac{1}{\left[\frac{(1-\Delta)}{R_{gnd}} + \frac{\Delta}{R_{gw}}\right] + R_{inc}}\right)$$

$$+ (1-f_{snow})(1-f_{veg})\left(\frac{(1-\Delta)}{R_{gnd}} + \frac{\Delta}{R_{gw}}\right) + f_{snow}\left(\frac{(1-\Delta_s)}{R_{snow}} + \frac{\Delta_s}{R_{sndiff} + R_{gw}}\right) \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 각각 Wesely 와 M3DRY 방안에서 지표면 저항이 계산되는 방법이다. 각 항에 대해서 뒤에서 설명한다.

3.5.1 식생에 의한 지표면 저항 기여

식생에 의한 지표면 저항은 잎 표면을 덮고 있는 cuticle (각피)에 의한 저항과 잎의 stomata (기공)와 mesophyll (엽육)에 의해 결정된다. 각피에 이슬이나 물의

유무에 따라 저항값이 달라지며 지표온도와 습도 그리고 태양 복사에 의해서 기공의 열리고 닫힘이 조절되어 저항값이 결정된다.

3.5.2 기공 저항과 엽육 저항

$$R_s = R_i\{1+[200(G+0.1)^{-1}]^2\}\{400[T_s(40-T_s)]^{-1}\} \quad (7)$$

$$R_m = (H^*/3000+100f_0)^{-1} \quad (8)$$

$$R_{sm} = R_s\frac{D_{H_2O}}{D_x}+R_m \quad (9)$$

식 (7), (8), (9)는 Wesely 방안에서 기공저항(R_s), 엽육 저항(R_m)을 구하는 방법이다. 식 (7)에서 R_i는 지면 상태에 따라 결정되는 계수, G는 태양 복사(단위: W m^{-2})이고 T_s는 지표 온도(단위: 섭씨)이다. 식 (8)에서 H^*는 유효 헨리 법칙 상수(오존의 경우 H^*은 0.01 이다)이고 f_0는 생명 물질 산화 반응 계수이다(오존의 경우 f_0은 1 이다). 식 (9)로 기공 저항과 엽육 저항이 계산된다. D_{H_2O}, D_x는 각각 물과 x 물질의 분자 확산도이다(오존의 경우 두 확산도 비율값 (D_{H_2O}/D_x)은 1.6 정도이다) .

M3DRY 방법에서 기공 저항과 엽육 저항에 관련된 부분은 다음과 같다.

$$R_{sm} = R_s \frac{D_{H_2O}}{D_x} + R_m \frac{1}{LAI} \quad (10)$$

식 (10)은 식 (9)와 거의 같다. LAI 는 leaf area index 로 잎 면적 지수이다. 기공저항을 구하는 R_s 모수화 방법에서 복잡한 식을 따르게 된다(Noilhan and Planton, 1989).

오존에 대해서 M3DRY 경우에 엽육 저항은 0 s m^{-1} 으로 주어지고 Wesely 의 경우에도 엽육 저항값은 0.01 s m^{-1} 정도로 매우 작게 주어진다. D_{H_2O}/D_x 인 분자 확산도 비율값도 두 모수화 방법이 거의 같기 때문에 기공 저항을 구하는 식의 차이가 두 모수화 방법의 큰 차이를 불러오게 된다. 기공 저항을 구하는 방법에서 두 모수화 방법이 고려하는 요소가 다르나 M3DRY 방안에서는 LAI 로 나누는 과정이 있기 때문에 일반적으로 낮은 값을 나타낸다. 하지만 식 (6)에서 보듯이 1 보다 작은 식생 분율(σ_{veg})이 곱해지면 지표면 저항의 기여도가 줄어들어 오히려 Wesely 방안이 더 낮은 기공 저항을 만들어내는 것으로 확인되었다. 작은 값을 가지는 기공 저항은 낮 동안에 지표면 저항을 구성하는데 가장 중요한 요소이다.

3.5.3 각피 저항

$$R_{cut} = R_{lu}(H^* / 100000 + f_0)^{-1} + R_{ice} \quad (11)$$

$$R_{ice} = 1000 \exp[-T_s - 4] \quad (12)$$

$$R_{cut} = [\frac{1}{3R_{lu}} + 10^{-7} H^* + \frac{f_0}{R_{cutO_3}}]^{-1} \quad (13)$$

$$R_{cutO_3} = [\frac{1}{3000} + \frac{1}{3R_{lu}}]^{-1} \quad (14)$$

$$R_{cutO_3} = [\frac{1}{1000} + \frac{1}{3R_{lu}}]^{-1} \quad (15)$$

식 (11)부터 식 (15)는 Wesely 방안에서 각피 저항을 나타낸다. R_{ice}은 얼음이 있을 때의 표면 저항값을 의미한다. 식 (11)은 이산화질소와 오존에 대한 기준값을 R_{lu}으로 상정하고 이를 기준으로 유효 헨리 법칙 상수와 생명 물질 산화 반응 계수를 토대로 각 화학물의 대한 각피 저항을 계산하게 된다. 각피에 이슬이 있거나 빗방울이 있다면 식 (13) 을 사용하고, 오존의 경우는 각피에 이슬이 있을 때는 식 (14), 빗방울이 있을 때는 식 (15)를 적용한다.

$$(1-\Delta)\frac{LAI}{R_{cut}} + \Delta\frac{LAI}{R_{wetcut}} \quad (16)$$

$$R_{cut} = 3000\frac{a}{a_0} \quad (17)$$

$$R_{wetcut} = \frac{125000}{H^* R T_w} \quad (18)$$

$$R_{wetcut} = 1250 \quad (19)$$

$$R_{wetcut} = 1000\frac{a}{a_0} = R_{snow} \quad (20)$$

식 (16)부터 식 (20)까지는 M3DRY 방법일때 각피 저항이다. Δ는 각피의 습한 정도를 나타낸다. 각피가 건조할때는 식 (17)를 사용하고 습할 때는 식 (18)를 사용하며(R는 이상기체 상수, T_w는 이슬점 온도이다), 오존의 경우 습할 때는 식 (19)을 사용한다. 표면 온도가 섭씨 0 도 이하이면 식 (20)로 모수화된 식을 사용한다. 이 값은 R_{snow}로 표면이 눈으로 덮혀 있을 때의 저항값과 같다. □는 반응성, a_0는 기준 반응성으로 8 이란 값을 가진다.

오존의 경우 Wesely 와 M3DRY 방안 모두 각피 저항을 구하는 식은 다르나 가장 작은 저항값이 지표면 저항을 결정하는 병렬연결의 특성상, 큰 값을 가지는 각피 저항은 지표면 저항값 결정에 기여가 크지 않다.

3.5.4 식생층 내 저항

$$R_{dc} = 100[1+1000(G+10)^{-1}](1+1000\theta)^{-1} \quad (21)$$

$$R_{cl} = [\frac{H^*}{10^5 R_{cls}} + \frac{f_0}{R_{clo}}] + r_{ice} \quad (22)$$

Wesely 방안에서 식생층 내 저항은 식 (21)과 식 (22)로 표현된다. 식 (21) 은 지면이나 식생에 태양광으로 부력이 존재하거나 경사진 언덕의 식생층을 바람이 통과할때 생기는 저항이다. θ는 지면이 기울어진 정도를 호도로 표현한 것인데 현재 WRF-Chem 안에는 0 으로 주어져 있다. 식 (22)는 잎, 가지, 나무의 줄기 등에 의해 생기는 저항이다. R_{cls}, R_{clo} 는 각각 이산화황과 오존의 경우에 관측된 기준 저항값이다.

$$R_{inc} = \frac{14LAI10z_0}{u_*} \quad (23)$$

M3DRY 방안에서는 식 (23)으로 주어진다. 캐노피층내에서 공기역학적 저항을 모수화한 식이다. $10z_0$ 은 식생층의 높이로 간주할 수 있다. 식생층 내 저항은 식생의 의한 저항과 표면 노출의 의한 저항값을 보완해 주는 역할이 있다.

3.5.5 표면 노출에 의한 저항

$$R_{gs} = [\frac{H^*}{10^5 R_{gss}} + \frac{f_0}{R_{gso}}] + r_{ice} \quad (24)$$

식 (24)는 표면이 노출되었을때 Wesely 방안에서의 저항값이다. 이 식의 형태는 식 (22)와 유사하다. R_{gss}, R_{gso}는 각각 이산화황과 오존의 경우에 관측된 기준 저항값이다. $\square_{ac}$는 식생 높이와 밀도에 관련된 항으로 지면 종류에 따라 할당된다.

$$R_{gnd} = 1000\frac{a}{a_0} \quad (25)$$

$$R_{gw} = \frac{25000}{H^*} \quad (26)$$

식 (25)는 M3DRY 방안에서 수체를 제외한 표면이 노출되었 경우의 저항값을 모수화한 식이다. 식 (26)은 표면이 물로 덮혀 있을때 적용할 수 있는 식이라고 볼 수 있다.

$$R_c = R_{water} = \frac{(\frac{Sc}{\Pr})^{2/3}}{k(\rho_{air}/\rho_{water})^{1/2} H^* R T_w u_*} \quad (27)$$

표면이 바다나 호수와 같이 완전한 수체라면 식 (27)과 같은 식을 적용하게 된다. 여기에서 ρ_{air}/ρ_{water}는 공기와 물의 밀도의 비이다. 표면 노출에 의한 저항의 경우

기공 저항의 영향이 없는 밤동안에 지표면 저항값을 결정하는데 영향을 많이 미친다.

4. 건식 침적 모수화 방법에 따른 동아시아 지역의 지표 오존 농도

WRF-Chem 을 이용해 2004 년 3 월 31 일 부터 5 월 31 일까지 모의를 수행하였다. 4 월 한달간을 Spin up time 이라고 상정하고 실제 5 월 한달간 자료를 분석에 사용하였다. 5 월을 선택한 이유는 일반적으로 한반도에서 5 월경에 지표 오존이 가장 높게 나타나기 때문이다. WRF-Chem version 3.3 을 기준으로 Wesely 건식 침적 모수화 방안 중 각피 저항 부분의 공식 오류를 바로잡고 식생이 없는 곳에서 식생 저항값이 반영되는 모순적인 부분과 $\square_{ac}$의 상한 제한을 수정한 뒤 모형을 돌렸다.

그림 1a 는 United States Geological Survey (USGS)지면 사용 정보이다. 표 4 에서 각 분류표가 무엇을 의미하는지 도시하였다. USGS 지면 사용 정보에 따르면 한국에는 사바나형태의 식생이 대부분을 뒤덮고 있는 것으로 나타난다.

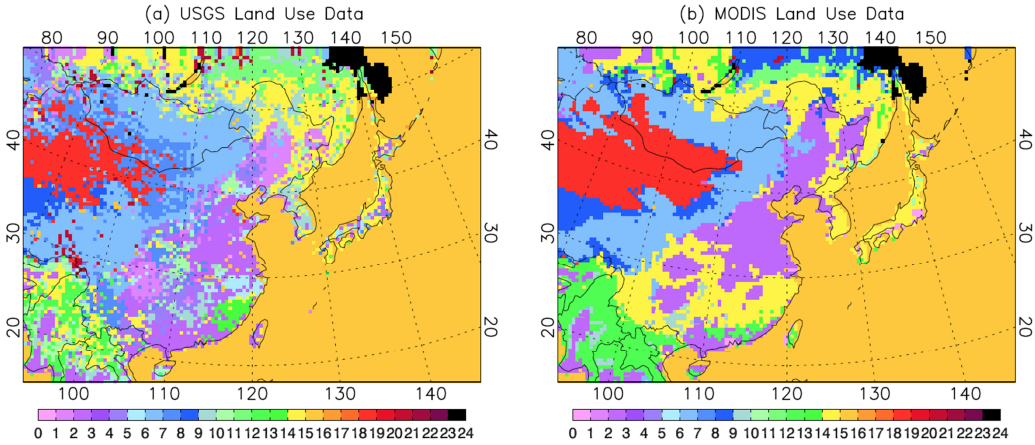

Figure 1. (a) USGS 24-category land use data in WRF-Chem domain. (b) IGBP-Modified MODIS 20-category land use data converted to USGS 24-category land use categories in WRF-Chem domain.

Table 4. USGS 24-category land use categories.

Land Use Category	Land Use Description
1	Urban and Built-up Land
2	Dryland Cropland and Pasture
3	Irrigated Cropland and Pasture
4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
5	Cropland/Grassland Mosaic
6	Cropland/Woodland Mosaic
7	Grassland
8	Shrubland
9	Mixed Shrubland/Grassland
10	Savanna
11	Deciduous Broadleaf Forest
12	Deciduous Needleleaf Forest
13	Evergreen Broadleaf
14	Evergreen Needleleaf
15	Mixed Forest
16	Water Bodies
17	Herbaceous Wetland
18	Wooden Wetland
19	Barren or Sparsely Vegetated
20	Herbaceous Tundra
21	Wooded Tundra
22	Mixed Tundra
23	Bare Ground Tundra
24	Snow or Ice

2a 는 Wesely 방안을 적용한 오존의 건식침적속도의 5 월 평균값을 나타낸다. 오존의 건식 침적 속도는 해양에서 낮고 육지에서는 상대적으로 높은 값을 나타낸다. 또한 중국 북동부에서 중국 내륙지역으로 이어지면서 오존 건식 침적 속도가 강하게 나타난 것을 볼 수 있다. 오존 건식침적 속도의 육지간 차이와 지역마다의 차이는 그림 1a 에서의 지면 사용 정보의 형상과 매우 흡사하다 이는 건식 침적에 가장 큰 영향을 주는 저항값은 지표면 저항인 것을 보여준다. 해양에서 건식 침적 속도가 낮은 이유는 식생이 없기 때문으로 기공과 엽육, 각피에 의한 저항값이 존재하지 않아 해면 노출에 의한 큰 저항값이 건식 침적 속도 계산에 반영된다. 육지에서 건식 침적 속도의 차이는 지면 사용 정보에 따른 식생의 종의 차이에 기인한 것으로 Wesely 방안에서는 24 종의 USGS 분류를 다시 11 가지 항목으로 나누어 다루고 있다. 각 항목마다 서로 다른 저항 계수가 할당되고, 지표면 저항의 값이 변해 건식 침적 속도가 달라지게 된다.

그림 2b 는 Wesely 방안을 적용하였을 때, 지면 오존 농도의 5 월 평균값이다. 오존 농도의 분포를 살펴보면, 고도가 높은 중국 서부 지역을 제외하면 중국의 풍하측 지역인 황해, 남해를 포함해서 한국과 일본 서남부에서 높은 값을 나타내는

걸 볼 수 있다. 이것은 동아시아 주 배출원인 중국 동부에서 생성된 오존이 황해와 남해를 거쳐 한국과 일본으로 수송되는 것을 의미한다. 봄철은 계절풍의 영향이 약하기 때문에 서쪽에 있는 중국의 오존이 한국과 일본으로 잘 수송될 수 있다. 특히 이동성 고저기압이 있을때 이런 현상은 더 강하게 일어날 수 있다 (Oh et al., 2010). 중국 해안가의 홍콩, 상해와 한국의 서울, 일본의 오사카 같은 대도시에서는 오존의 전구 물질인 휘발성 유기 화합물이 많이 배출되지만 질소 산화물인 일산화질소와 이산화 질소 ($NO + NO_2 = NO_x$) 가 많이 배출되어 NO_x에 의한 적정반응으로 오존이 지역적으로 감소하였다.

그림 2c 는 M3DRY 방안을 적용한 오존의 건식침적속도의 5 월 평균값이다. Wesely 방안과 마찬가지로 해양에서 낮고 육지에서는 상대적으로 높은 값을 보인다. Wesely 방안보다 오존의 건식침적 속도의 차이가 크게 보이지 않는데 이것은 M3DRY 방안에서 오존의 건식침적 속도를 더 낮게 모의하기 때문이다. 평균 건식침적 속도의 차이는 그림 2e 에서 0.14 cm s^{-1} 로 매우 큰 차이를 보인다. M3DRY 방안의 평균값 0.10 cm s^{-1} 의 1.4 배에 이르는 차이로, Wesely 방안을 채택했을 때 모의에서 건식 침적 과정에 의해 오존이 2.4 배 많이 소멸하는 것을

의미한다. 대부분의 지역에서 Wesely 방안의 건식 침적 속도가 높지만 앞서 그림 2a 에서 본 것과 유사하게 중국 북동부에서 중국 내륙으로 이어지면서 그 차이가 뚜렷하게 큰 것을 확인할 수 있다. 이 양상은 지면 사용 정보의 양상과도 유사하다. 두 건식침적 모수화 방안의 차이는 지면 사용 정보와 관련한 지표면 저항의 차이인 것을 보여준다.

그림 2d 는 M3DRY 방안을 사용하였을때 지면 오존 농도의 5 월 평균값이고, 그림 2f 은 M3DRY 방안과 Wesely 방안을 채택했을때 지면 오존 농도의 5 월 평균값의 차이이다. M3DRY 방안의 평균 지면 오존 농도값은 Wesely 방안 모의보다 큰 값을 보인다. 모의된 오존의 극값은 황해에서 나타나고 그 값은 거의 70ppbv 에 이른다. 육지의 건식침적 속도의 값이 크지 않기 때문에 소멸하는 오존의 양이 적어서 Wesely 모의와 다르게 육지에서도 상당히 높은 지면 오존 농도를 보여준다. 평균적으로 높은 지면 오존 농도로 인해서 NO_x 의 배출이 많은 도시지역에서의 NO_x 적정이 이루어지는 양상을 보인다.

그림 2f 의 두 건식 침적 모수화 방안에 따른 지표 오존 농도의 차이에서는 황해와 동해 그리고 북해도까지 지표 오존이 많이 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

이는 주요 배출원이 해안가에 있어 생성된 오존이 풍하측으로 전달되기 때문이다. 해양에서의 건식 침적 속도는 육지에 비해 상대적으로 작지만 해양 위에서는 건식 침적 외의 특별한 오존 소멸 과정이 없어 풍하측에서 오존은 크게 나타난다.

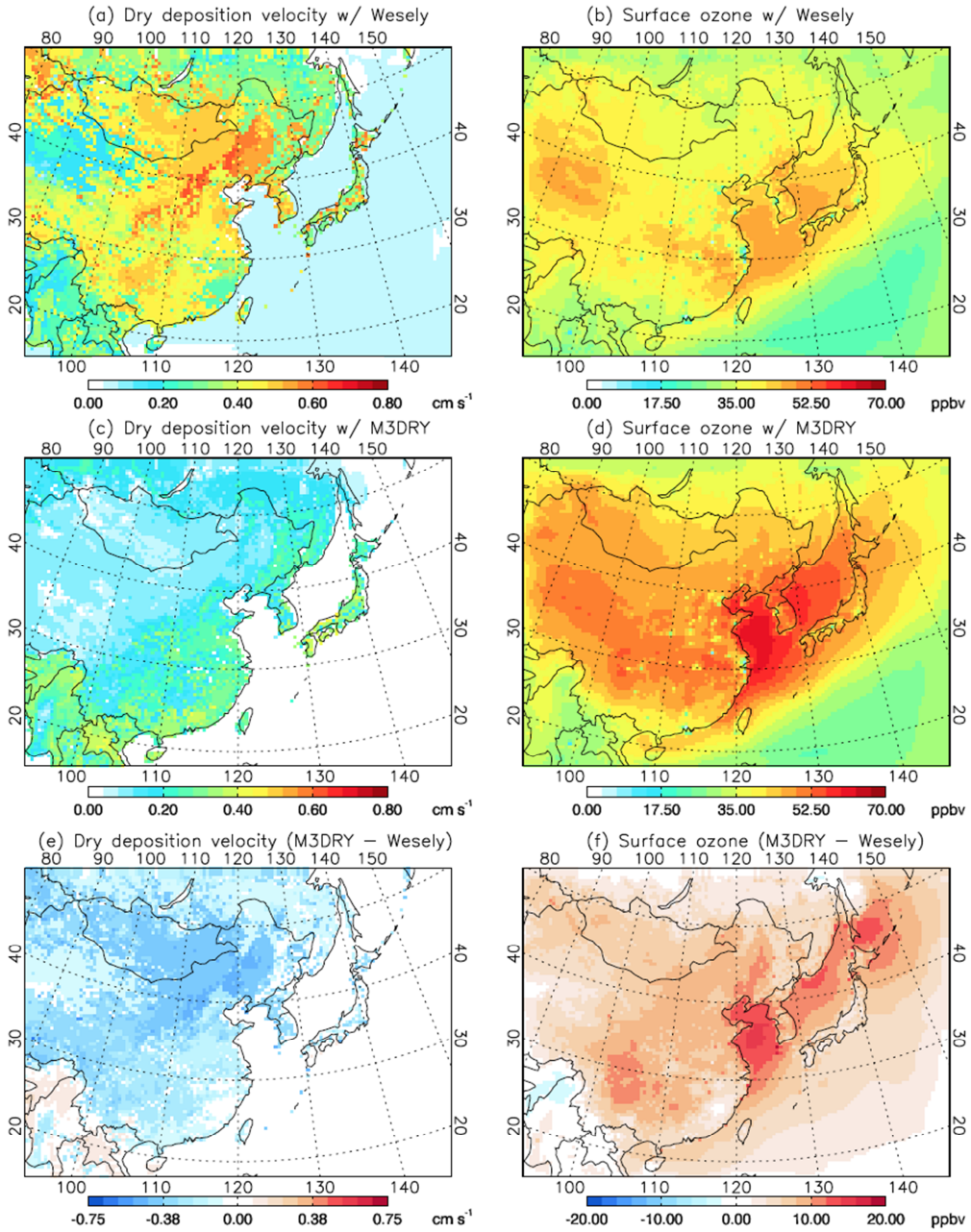

Figure 2. (a) Average dry deposition velocity of ozone in May 2004 with Wesely. Average value is 0.24 cm s^{-1}. (b) Average concentration of surface ozone with Wesely. Average value is 36.0 ppbv. (c) Average dry

deposition velocity of ozone with M3DRY. Average value is 0.10 cm s^{-1}. (d) Average concentration of surface ozone with M3DRY. Average value is 41.6 ppbv. (e) Difference between average dry deposition velocity of ozone with M3DRY and that with Wesely. Average value is 0.14 cm s^{-1}. (f) Difference between average concentration of ozone with M3DRY and that with Wesely. Average value is 5.6 ppbv.

Wesely 와 M3DRY 방안은 건식침적양으로는 해양에서 차이가 크다. Wesely 의 해양에서의 지표면 저항값 (2000 s m^{-1})을 M3DRY 에 이식하고 모형을 같은기간 돌린 결과 그림 3b 에서 보듯이 규준 실험에 비해 해양에서 평균 오존 농도가 매우 많이 감소한 것을 볼 수 있다. 육지에서 오존 농도의 차이는 육지의 건식 침적 속도 차이와 공간상 분포에 변이가 존재한다. 바람에 의한 오존의 수송 및 배출원의 의한 적정효과가 복합적으로 작용한 것으로 보인다. 높은 배출원이 있는 대도시에서는 적정 효과로 오존 농도의 차이가 거의 없어지는 것을 확인할 수 있다.

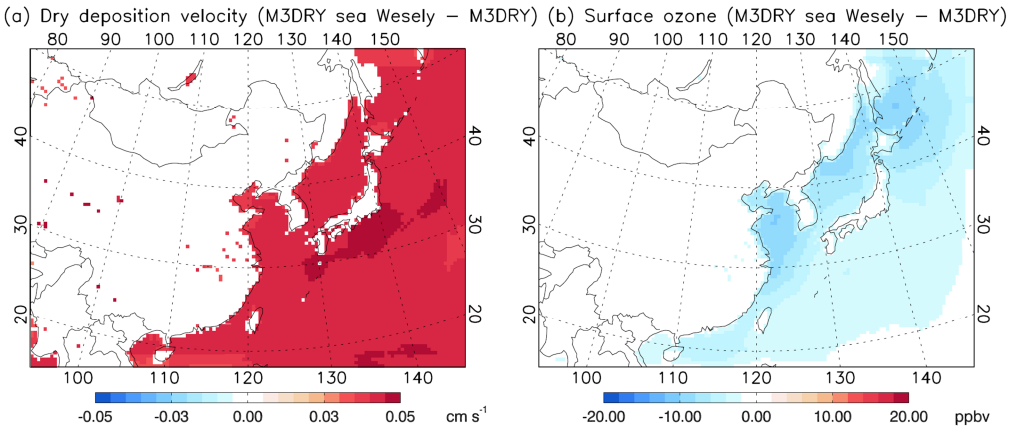

Figure 3. (a) Difference between average dry deposition velocity of ozone in May 2004 with M3DRY changing sea surface resistance of Wesely and that with M3DRY. (b) Difference between average concentration of surface ozone with M3DRY changing sea surface resistance of Wesely and that with M3DRY scheme.

5. 지면 사용 정보가 동아시아 오존 건식 침적 속도에 미치는 영향

WPS 에서 지면 사용 정보로 USGS 자료 뿐만 아니라 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)자료도 사용할 수 있다. 건식 침적 과정 모수화 방안은 USGS 24 개 항목에 맞추어 작성되었기 때문에 MODIS 자료를 USGS 형식에 맞게 변환이 필요하다. MODIS 자료는 20 개의 항목을 가지고 있어 관련도에 따라 MODIS 자료를 USGS 항목에 대응시켰다. 이는 표 5 에 정리하였다.

Table 5. Mapping table of land use categories between USGS 24-category land use categories and IGBP-Modified MODIS 20-category land use categories.

MODIS	USGS	MODIS	USGS
Evergreen Needeleleaf Forest	Evergreen Needleleaf	1	14
Evergreen Broadleaf Forest	Evergreen Broadleaf	2	13
Deciduous Needleleaf Forest	Deciduous Needleleaf Forest	3	12
Deciduous broadleaf Forest	Deciduous Broadleaf Forest	4	11
Mixed Forest	Mixed Forest	5	15
Closed Shrubland	Shrubland	6	8
Open Shrubland	Mixed Shrubland/Grassland	7	9
Woody Savanna	Savanna	8	10
Savanna	Savanna	9	10
Grassland	Grassland	10	7
Permanents Wetland	Herbaceous Wetland	11	17
Cropland	Irrigated Cropland and Pasture	12	3
Urban and Built-up	Urban and Built-up Land	13	1
Cropland /Natural Mosaic	Cropland/Grassland Mosaic	14	5
Snow and Ice	Snow or Ice	15	24
Barren or Sparsely Vegetated	Barren or Sparsely Vegetated	16	19
Water	Water Bodies	17	16
Wooded Tundra	Wooded Tundra	18	21
Mixed Tundra	Mixed Tundra	19	22
Barren Tundra	Bare Ground Tundra	20	23

그림 1b 는 USGS 항목으로 변환시킨 MODIS 지면 사용 정보이다. USGS 자료 정보와 큰 차이가 있는 부분은 중국 내륙 북부에 혼합 툰드라 지역이 관목 지역으로 변한것과 중국 남부의 작물, 풀, 관목, 사바나, 낙엽 활엽수림과 한국의 사바나가 혼합림으로 된 것과 홍콩, 상해, 서울, 도쿄 등 대도시에 도시 및 빌딩 지면 사용 정보가 할당되었다는 점이다.

그림 4a 과 4c 은 각각 Wesely 방안과 M3DRY 방안에서 USGS 지면 사용 정보 대신 MODIS 지면 사용 정보를 사용했을 때 오존 건식 침적 속도와 기존의 USGS 지면 정보를 사용했을 때의 오존 건식 침적 속도의 5 월 월평균 차이를 본 것이다. 그림 4a 에서 오존 건식 침적 속도는 중국 내륙 북부와 중국 남부에서 MODIS 자료를 사용할 때 감소하는데 이는 Wesely 방안 내의 지면 사용 정보(11 가지로 나뉜다) 가 유형 6 에서 유형 3 으로 바뀌면서 기본 입력되는 기공 저항 계수가 커졌기 때문이다. 반대로 그림 4c 에서는 M3DRY 방안의 경우 혼합림으로 바뀐 중국 남부 지역과 한반도에서는 건식 침적 속도가 증가하는데 이것은 각 USGS 지면 사용 정보 항목마다 지정된 잎 면적 지수가 혼합림인 경우는 높아서 기공 저항이 감소했기 때문인 것으로 나타났다.

MODIS 지면 사용 정보에 따른 지표 오존 농도의 변화를 Wesely 방안과 M3DRY 방안인 경우를 그림 4b 와 그림 4d 에 도시하였다. 건식 침적 속도 변화도와 유사한 공간 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. Wesely 방안의 경우 중국 내륙 북부와 남부에서 오존이 증가하고, M3DRY 방안은 중국 내륙 남부에서 오존이 감소한다. 두 건식 침적 모수화 방법 모두 홍콩, 상해, 서울 도쿄 등 대도시에서 오존 농도가 증가한다. 그 이유는 MODIS 지면 사용 정보에서 이들 지역을 도시 및 건물 지면 사용 정보로 지정했기 때문이다. 지면 사용 정보가 도시 및 건물이 되면 작은 잎 면적 지수와 큰 기공 저항 계수가 할당되어 기공 저항이 올라가 건식 침적 속도가 낮아진다. 면적은 크지 않으나 오존의 전구 물질 배출원 지역이기 때문에 이곳의 오존 농도는 풍하측 오존 농도에도 영향을 준다.

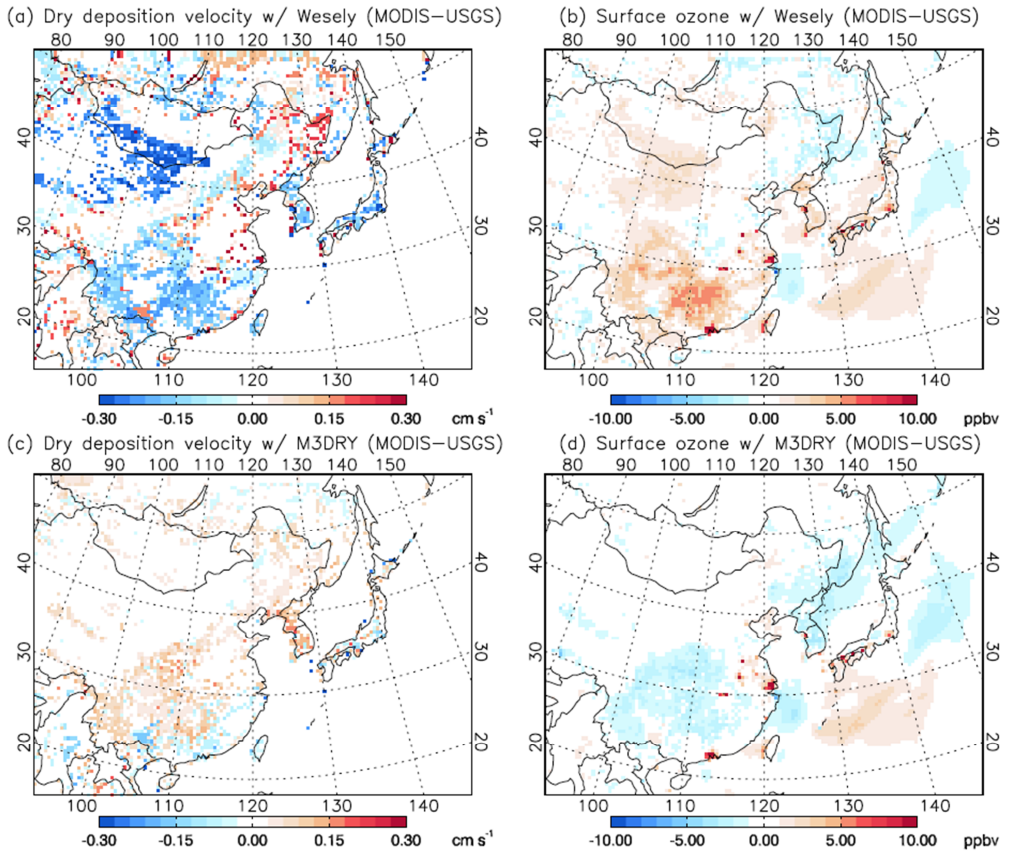

Figure 4. (a) Difference between average dry deposition velocity of ozone in May 2004 with Wesely using MODIS land use data and that with Wesely using USGS land used data. (b) Difference between average concentration of surface ozone with Wesely using MODIS land use data and that with Wesely using USGS land used data. (c) Difference between average dry deposition velocity of ozone with M3DRY using MODIS land use data and that with M3DRY using USGS land used data. (d) Difference between average concentration of surface ozone with M3DRY using MODIS land use data and that with M3DRY using USGS land used data.

6. 건식 침적 속도와 관측과의 비교

NCAR 의 Atmospheric Chemistry Division 에서 Manitou Forest Observatory (MFO)에서 관측된 Bio-hydro-atmosphere interactions of Energy, Aerosols, Carbon, H2O,Organics & Nigrogen-Rocky Mountain Organic Carbon Study (BEACHON-ROCS)자료를 이용하여 건식 침적 속도를 산출하였다. 관측 지점은 서경 105.10250°, 북위 39.10065°에 있으며 2010 년 8 월 7 일 부터 31 일까지의 자료를 분석 대상으로 설정하였다. 건식 침적 속도를 구하는 방법은 Tsai et al. (2010)의 방법을 참고하였다. 상사 이론에 가정하여 경도 방법을 사용하면 건식 침적 속도는 다음과 같이 주어진다(Baldocchi et al., 1988).

$$F = u_* c^* \quad (28)$$

$$c^* = k\Delta c / [\ln((z_2 - d_0)/(z_1 - d_0)) - \Psi_h((z_2 - d_0)/L)$$

$$+\Psi_h((z_1 - d_0)/L)] \quad (29)$$

$$v_d = F / c \quad (30)$$

식 (28) 에서 u_*는 마찰속도이고(m s^{-1}), 식 (29)에서 c^*는 에디 밀도(μg m^{-3})이다. k 는 폰 카르만 상수(0.4)이고, z_2, z_1 는 관측된 높이로 각각 25m, 12m 이다. Δc는 z_2, z_1에서 관측된 농도의 차이, d_0는 영면 변위이고, L 은 Monin-obukhov 길이이다. 적분된 안정도 함수인 Ψ_h는 Businger et al. (1971)의 수식을 도입하였다. 오존 속 값(F)을 구하여 z_2에서 관측된 오존 농도로 나누면 건식 침적 속도를 구할 수 있다.

오존 건식 침적 속도 관측값을 구할때 가정은 각각의 층에서 오존 농도를 구할때 필요한 기상변수가 12m (z_1), 25m (z_2)가 아닌 14.1m 27.8m 의 자료를 사용하였고, 마찰속도와 Monin-Obukhov 길이는 25.3m 에서 구해진 값을 사용하였다. 신뢰성 있는 건식 침적 속도의 값을 구하기 위해서 일반적으로 관측되는 오존의 건식 침적 속도(0.0 ~ 2.0 cm s^{-1})외의 구간에 속하는 건식 침적 속도의 값은 제외하였다. 관측 지점에서의 식생 높이(h)의 값은 15m 이지만 식생 높이에 선형적인(d_0=a*h)영면 변위의 선형계수(a)의 변동성은 0.55 ~ 0.78 정도로 매우 큰 편이기 때문에(Garratt, 1994; Lovett and Reiners, 1986; Perrier, 1982), 이에 대한 민감도 분석도 같이 수행하였다.

모형에서 오존의 건식 침적 속도를 구하기 위해서 람베르트 원뿔 도법으로중심 위치가 서경 105.074°, 북위 39.072°의 30km 간격인 가로 18 개 세로 15 개의 격자를 만들어 건식 침적 속도를 구하였다. 비교 결과를 그림 5 에 나타내었다. 검은 선으로 표현된 관측 값과 비교해 볼때, 빨간색 선으로 표현된 Wesely 방안이 관측의 변동성을 잘 모의하고 있는 것으로 판단된다. 그에 비해서 M3DRY 방안은 건식 침적 속도를 낮게 모의하고 있는 것으로 판단된다. 아침에 오후에 건식 침적 속도의 높은 관측값도 Wesely 방안은 잘 따라가고 있는 것으로 보인다. 이것은 낮 동안의 건식 침적속도에 큰 영향을 미치는 기공 저항값이 Wesely 방안인 경우에 더 적합한 값이 산출되기 때문인 것이다. 다만 밤시간의 매우 낮은 건식 침적 속도는 상대적으로 작은 지표면 저항을 가지는 Wesely 방안에서는 모의하지 못하는 것으로 판단된다.

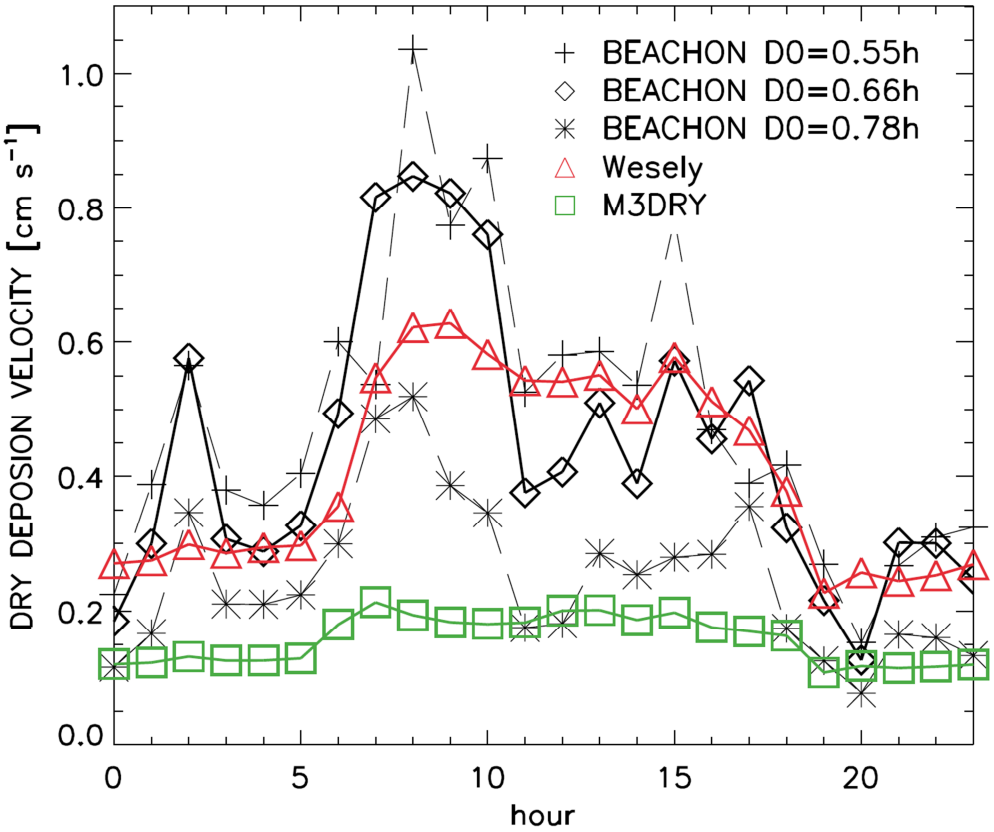

Figure 5. Comparison between model simulation and observation of dry deposition velocity. Black cross line is observation when zero displacement height equals 0.55h, black diamond line is observation when zero displacement height equals 0.66h, black asterisk line is observation when zero displacement height equals 0.78h, red triangle line is model value with Wesely, and green rectangle is model value with M3DRY.

7. 관측과 모의된 지표 오존 농도의 비교

한국 국립환경과학원 한반도 지표 오존 관측자료와 일본 지역의 Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) 지표 오존 관측자료를 각각 한국과 일본을 대표하는 지표 오존 관측 자료 간주하였다. 사용한 데이터의 기간은 2004 년 5 월 한달로 모형의 모의기간과 일치한다. 국립환경과학원 자료는 신뢰도를 높이기 위해 하루 동안 기기의 결함으로 결측되거나 농도가 낮아 0 으로 관측된 횟수가 25% 이하인 자료만 사용하였다. 또한 200 여개에 이르는 관측 지점중 지표 오존을 잘 보여줄 것으로 기대되는 7 개의 특별,광역시(서울, 대전, 대구, 부산, 광주, 인천, 울산)를 선정하였다. EANET 자료는 동아시아 지역에 여러 관측 지점이 있지만 시간마다 오존 농도 관측을 하는 9 개 지역(Banryu, Happo, Hedo, Ogasawara, Oki, Rishiri, Sadoseki, Tappi, Yusuhara)에 대해서 모형과 비교를 수행하였다.

그림 6a 는 한국에서의 시간 평균 지표오존 농도 일변화를 본 것이고 그림 6b 는 EANET 시간 평균 지료오존 농도 일변화를 그린 그래프이다. 붉은 가위 모양 선이

MODIS 지면 정보 자료와 M3DRY 모의이고, 주황 세모 모양 선이 USGS 지면 정보 자료와 M3DRY, 하늘색 마름모양 선은 MODIS 지면 정보 자료와 Wesely 모의를 의미하고 초록색 십자가 선은 USGS 지면 정보 자료와 Wesely 모의를 의미한다. 한국에서는 모형이 관측값(검은 동그라미)보다 높게 모의하는 것을 알 수 있고 EANET 에서는 모형이 관측값보다 낮게 모의하는 경향이 있는 것을 볼 수 있었다. MODIS 지면 사용 자료를 사용한 모의가 USGS 지면 사용 정보를 사용한 모의보다 오존을 조금 더 많이 모의하는 것을 알 수 있었고, 그 결과 한국 관측 비교에서는 과대 모의가 나타나고 EANET 관측과 비교에서는 관측값에 좀 더 가까워 지는 것을 확인 할 수 있었다. 오존의 건식 침적의 효과는 전반적으로 모형 모의 영역내 지표 오존 농도를 평행이동 하는 효과를 지닌 것으로 보인다.

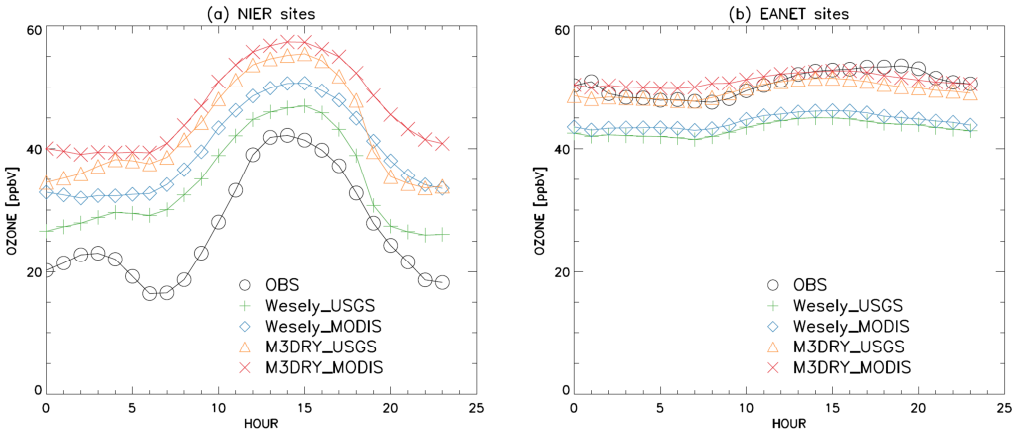

Figure 6. (a) Diurnal variations of hourly average concentration of surface ozone on National Institute of Environmental Research (NIER) Korean observation sites. Black circle indicates observation on NIER observation sites, green cross indicates simulation with Wesely scheme using USGS land use data on NIER observation sites, blue diamond indicates simulation with Wesely scheme using MODIS land use data on NIER observation sites, orange triangle simulation with M3DRY scheme using USGS land use data on NIER observation sites and red scissors shape simulation with M3DRY scheme using MODIS land use data on NIER observation sites. (b) Diurnal variations of hourly average concentration of surface ozone on EANET Japanese observation sites. Categories are same with the case of NIER sites.

8. 결론

WRF-Chem 을 이용해 서로 다른 두 건식 침적 모수화 방법인 Wesely 와 M3DRY 를 사용하여 지면 오존을 모의하였다. 두 모수화 방안이 오존 건식 침적 속도를 다르게 모의해 지표 오존 농도를 달리 모의하게 된다. 두 건식 침적 모수화 방법 모두 저항 유사법을 이용해서 건식 침적 속도를 구하게 되는데, 공기 역학적 저항과 준층류 저항은 그 값의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 주요 차이의 원인은 지면 저항값에 있으며 지면 저항 구성 요소 중에 낮 시간동안의 모의에서는 기공 저항이 큰 영향을 차지하고 밤 시간동안에서의 모의에서는 지표면 노출에 의한 저항이 큰 영향을 차지하는 것으로 나타났다. Wesely 방안이 모의 격자 대부분 지역에서 M3DRY 방안보다 높은 건식 침적 속도를 보인다. 이는 낮 시간동안의 경우에 Wesely 방안이 상대적으로 낮은 기공 저항을 보이기 때문이다. M3DRY 방안의 기공 저항값도 Wesely 방안보다 크지는 않지만 지표에서 식생 분율의 값이 상당히 낮아 기공 저항이 지면 저항에 기여하는 비율이 줄어들기 때문에 지면 저항이 Wesely 보다 상대적으로 큰 값을 나타나게 한다. 밤 시간의

경우 기공 저항에 의한 부분은 줄어들고 지표면 노출에 의한 저항값이 주를 이루게 되는데, Wesely 방안의 경우 이 값이 M3DRY 방안 보다 상대적으로 작기 때문에 밤 시간에도 건식 침적 속도가 M3DRY 방안 값 보다 크게 나타난다. 식생이 없는 바다 표면에 경우 오존은 수체에 잘 녹지 않지만 바다 위에서 오존의 소멸 과정은 대부분 건식 침적에 의해 일어나기 때문에 저항값을 크게 모의하고 있는 M3DRY 방안을 채용한 모의가 낮은 건식 침적 속도로 인하여 높은 지표 오존을 나타내는 것을 확인 할 수 있었고, 수체 위의 오존에 대한 지표 저항을 Wesely 방안으로 바꾼 민감도 분석을 통해서 지표 오존이 Wesely 방안 정도로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 지면 사용 정보를 USGS 에서 MODIS 으로 바꾼 민감도 분석에서는 지면 사용 정보 변화와 잎 면적 지수의 변화로 지표면 저항이 변하게 되어 건식 침적 속도가 변하게 되었다. 특이할 사항은 MODIS 자료를 이용한 경우 건물 및 도시 정보 유형의 지면이 늘어나게 되어 도심 지역에서 건식 침적 속도가 급감해 풍하측에 오존농도를 높이는 결과를 보여준다. MFO 에서 관측한 오존의 연직 분포를 통해서 오존의 건식 침적 속도를 구할 수 있었다. 영면 변위의 변동폭이 큰 것을 고려해 민감도 분석을 시행하여 나온 오존의 건식 침적 속도와 모형의 값을

비교한 결과 Wesely 결과가 관측 결과과 더 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 지표면 오존 농도를 국립환경부 자료와 EANET 자료와 비교한 결과 한국 관측 지점에서는 Wesely 방안과 유사하고 일본의 경우에는 M3DRY 방안과 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 지표 오존 농도 결정에는 건식 침적 말고도 배출량, 기상장, 화학 메커니즘등이 영향을 미치기 때문에 이에 대한 영향을 평가할 수 있는 관측과 모형의 모의가 필요하다고 생각된다.

References

Allen, D. J., C. P. Loughner, E. A. Yegorova, R. R. Dickerson, M. Martini, K. E. Pickering (2009) Analysis of a summertime air pollution episode with a new dry deposition velocity scheme, 10th WRF Users' Workshop.

Appel, K. W., A. B. Gilliland, G. Sarwar, R. C. Gilliam (2007) Evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 4.5: Sensitivities impacting model performance: Part I—Ozone, Atmospheric Environment, 41, 9603-9615.

Baldocchi, D. D., B. B. Hincks, T. P. Meyers (1988) Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods, Ecology, 69, 1331-1340.

Battino, R., T. R. Rettich, T. Tominaga (1983) THE SOLUBILITY OF OXYGEN AND OZONE IN LIQUIDS, Journal of Physical and Chemical Reference Data, 12, 163-178.

Businger, J. A., J. C. Wyngaard, I. Izumi, E. F. Bradley (1971) Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.

Byun, D. W., J. K. S. Ching (1999) Science algorithms of the EPA Models3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA600/R99/030, U.S.EPA.

Chapman, E. G., W. I. Gustafson, R. C. Easter, J. C. Barnard, S. J. Ghan, M. S. Pekour, J. D. Fast (2009) Coupling Aerosol-Cloud-Radiative Processes in the WRF-Chem Model: Investigating the Radiative Impact of Elevated Point Sources, Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 945-964.

Chen, F., J. Dudhia (2001) Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, Monthly Weather Review, 129, 569-585.

Chou, M., M. Suarez (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, Laboratory for atmospheres NASA/Goddard Space Flight Center.

Ganzeveld, L., J. Lelieveld (1995) Dry Deposition Parameterization In A Chemistry General-Circulation Model And Its Influence On The Distribution Of Reactive Trace Gases, J. Geophys. Res.-Atmospheres, 100, 20999-21012.

Garratt, J. R. (1994) The atmospheric boundary layer. Cambridge university press.

Grell, G. A., D. Dèvènyi (2002) A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques, Geophys. Res. Lett., 29, 1693.
Grell, G. A., S. E. Peckham, R. Schmitz, S. A. McKeen, G. Frost, W. C. Skamarock, B. Eder (2005) Fully coupled "online" chemistry within the WRF model, Atmospheric Environment, 39, 6957-6975.
Herwehe, J. A., T. L. Otte, R. Mathur, S. T. Rao (2011) Diagnostic analysis of ozone concentrations simulated by two regional-scale air quality models, Atmospheric Environment, 45, 5957-5969.
Hong, S.-Y., Y. Noh, J. Dudhia (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, Monthly Weather Review, 134, 2318-2341.
Jacob, D. (1999) Introduction to atmospheric chemistry. Princeton University Press.
Lelieveld, J., F. J. Dentener (2000) What controls tropospheric ozone?, Journal of Geophysical Research, 105, 3531-3551.
Lin, Y.-L., R. D. Farley, H. D. Orville (1983) Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model, Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 1065-1092.
Lovett, G. M., W. A. Reiners (1986) Canopy structure and cloud water deposition in subalpine coniferous forests, Tellus B, 38, 319-327.
Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, S. A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, J. Geophys. Res., 102, 16663-16682.
Monin, A. S., A. M. Obukhov (1954) 'Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivanija v prizemnom sloe atmosfery (Basic Laws of Turbulent Mixing in the Atmosphere Near the Ground)', Trudy Akad. Nauk SSSR geofiz. inst., 24, 163-187.
Noilhan, J., S. Planton (1989) A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models, Monthly Weather Review, 117, 536-549.
Oh, I. B., Y. K. Kim, M. K. Hwang, C. H. Kim, S. Kim, S. K. Song (2010) Elevated Ozone Layers over the Seoul Metropolitan Region in Korea: Evidence for Long-Range Ozone Transport from Eastern China and Its Contribution to Surface Concentrations, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49, 203-220.
Otte, T. L., J. E. Pleim (2010) The Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) for the CMAQ modeling system: updates through MCIPv3.4.1, Geosci. Model Dev., 3, 243-256.

Padro, J. (1996) Summary of ozone dry deposition velocity measurements and model estimates over vineyard, cotton, grass and deciduous forest in summer, Atmospheric Environment, 30, 2363-2369.
Perrier, A. (1982) Land surface processes: vegetation, Land surface processes in atmospheric general circulation models, 395-448.
Pleim, J. E., A. Xiu, P. L. Finkelstein, T. L. Otte (2001) A Coupled Land-Surface and Dry Deposition Model and Comparison to Field Measurements of Surface Heat, Moisture, and Ozone Fluxes, Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 1, 243-252.
Seinfeld, J. H., S. N. Pandis (1998) Atmospheric Chemistry and Physics From air pollution to climate change, John Wiley & Sons, New York, 1326.
Singh, H. B., W. H. Brune, J. H. Crawford, H. Fuelberg, D. J. Jacob (2006) The Intercontinental Chemical Transport Experiment - Phase B (INTEX-B): An update. NASA Earth Science Project Office, USA.
Tang, Y., P. Lee, M. Tsidulko, H.-C. Huang, J. McQueen, G. DiMego, L. Emmons, R. Pierce, A. Thompson, H.-M. Lin, D. Kang, D. Tong, S. Yu, R. Mathur, J. Pleim, T. Otte, G. Pouliot, J. Young, K. Schere, P. Davidson, I. Stajner (2009) The impact of chemical lateral boundary conditions on CMAQ predictions of tropospheric ozone over the continental United States, Environmental Fluid Mechanics, 9, 43-58.
Tsai, J. L., C. L. Chen, B. J. Tsuang, P. H. Kuo, K. H. Tseng, T. F. Hsu, B. H. Sheu, C. P. Liu, M. T. Hsueh (2010) Observation of SO2 dry deposition velocity at a high elevation flux tower over an evergreen broadleaf forest in Central Taiwan, Atmospheric Environment, 44, 1011-1019.
Wesely, M. L. (1989) Parameterization of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models, Atmospheric Environment, 23, 1293-1304.
Woo, J.-H., K.-C. Choi, H. K. Kim, B. H. Baek, M. Jang, J.-H. Eum, C. H. Song, Y.-I. Ma, Y. Sunwoo, L.-S. Chang, S. H. Yoo (2011) Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE, Atmospheric Environment, 58, 5-13.
Wu, Z., X. Wang, F. Chen, A. A. Turnipseed, A. B. Guenther, D. Niyogi, U. Charusombat, B. Xia, J. William Munger, K. Alapaty (2011) Evaluating the calculated dry deposition velocities of reactive nitrogen oxides and ozone from two community models over a temperate deciduous forest, Atmospheric Environment, 45, 2663-2674.
Zaveri, R. A., L. K. Peters (1999) A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications, J. Geophys. Res., 104, 30387-30415.

Abstract

Impacts of dry deposition on ozone cocentration in surface air over East Asia

Seungkyu Hong

School of Earth and Environmental Science

Seoul National University

Ozone, one of key air pollutants, affects human health and vegetation growth in surface air where its concentrations are determined by complex NOx-VOC photochemistry and loss processes. We use a 3-D regional atmospheric chemistry transport model (WRF-Chem) to understand processes determining

ozone in East Asia, in particular, focusing on the dry deposition process that has a large uncertainty because of insufficient observational and numerical studies in East Asia. Here we compare two widely used dry deposition parameterization schemes: Wesley versus M3DRY schemes used in WRF-Chem and CMAQ models, respectively. Simulated dry deposition velocities with those two schemes under the identical meteorological conditions show considerable differences such that the M3DRY computes lower dry deposition velocity than that of the Wesely scheme. This discrepancy is due to the parameterization of surface resistance dependent on surface types. A comparison of the simulated versus observed dry deposition velocity at a BEACHON-ROCS site in the United States shows that simulated values with the Wesley scheme are relatively in good agreement with observations in reproducing diurnal variation. We conduct sensitivity simulations by changing from USGS land use information to MODIS land use information to understand the sensitivity of ozone simulations to the surface condition. Changes in leaf

area index and areas of urban and building type result in increases in stomata resistance that causes a decrease in dry deposition velocity resulting ozone increases in downwind regions. Ozone simulations with the improved dry deposition scheme are in better agreement with observations especially in Japan. However, other factors including emission of precursors, chemistry, and transport affect ozone significantly and an integrated analysis with both a suit of chemical observations and numerical studies is required to enhance our understanding on ozone in East Asia.

Keyword: Ozone, Dry deposition, WRF-Chem, M3DRY, BEACHON-ROCS, MODIS

Student number: 2011-20385

감사의 글

석사과정 2 년의 시간을 거쳐서 이렇게 석사 졸업 논문이 나왔습니다. 그 동안 제 곁에서 응원해 주신 모든 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

먼저 2 년동안 제 연구를 지도해 주시고 또한 제가 힘들어 할 때마다 격려해 주신 박록진 교수님께 감사드립니다. 교수님의 애정어린 가르침이 있었기에 주어진 시간내에 석사과정을 무사히 끝마칠 수 있었습니다. 제가 부족한 점이 많아 교수님께 많은 심려를 끼친 적도 있었습니다. 하지만 그 때마다 교수님께서 저를 격려해 주신 덕분에 이를 극복할 수 있었습니다. 저의 지도 교수님이신 박록진 교수님께 다시 한번 감사드립니다.

석사 졸업 심사 위원장을 맡아 주신 윤순창 교수님과 위원을 맡아 주신 임규호 교수님께 감사드립니다. 학부때부터 많은 가르침을 주신 대기과학과 교수님들께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

대기화학 모델링 연구실의 구본양 박사님, 정재인 박사님, 배수야 박사님, 지영 누나, 민중형, 두성 형, 형안이, 그리고 승언이까지 제 곁에서 물심양면으로 지원을 아끼지 않은 박사님들과 선후배님들께 감사드립니다.

같이 공부하면서 동고동락한 대학원 동기들과 선후배님들, 그리고 이제는 여러 분야로 뻗어 나가고 있는 제 대학 동기와 선후배님들, 친구들까지 모두 고맙습니다.

감사의 글로는 다 전할 수 없는 마음을 전할 수 없어서 아쉽습니다. 하나 말씀드릴 수 있는 건 제가 배우고 느끼고 받은 만큼 앞으로 그보다 더 실천하고 배풀면서 겸손한 자세로 살아가겠습니다.

저의 곁에서 언제나 저를 믿어주고 지켜주는 가족들에게 감사합니다. 아버지, 어머니, 동생 모두 제 곁에 있었기에 오늘의 제가 있을 수 있었습니다. 늘 고맙고 또 한편으로는 미안한 감정이 듭니다. 좋은 모습의 아들, 형이 될 수 있도록 최선을 다하겠습니다. 우리 가족들 모두 사랑합니다.

끝으로 이 감사의 글을 읽어주신 당신께 감사드립니다. 언제나 당신이 하는 일에 행운이 깃들기를 바라겠습니다. 고맙습니다. 늘 행복하세요.