

황(S)의 장거리 이동 및 침적량에 대한 계절별 특성 분석

Analysis of Seasonal Characteristics about Long-Range Transport and Deposition of Sulfur

홍성철* · 이재범 · 문경정 · 송창근 · 방철한 · 최진영 · 김정수¹⁾ · 홍유덕

국립환경과학원 기후변화연구과, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과

(2009년 8월 6일 접수, 2010년 1월 4일 수정, 2010년 2월 9일 채택)

Sung-Chul Hong*, Jae-Bum Lee, Kyung-Jung Moon, Chang-Keun Song, Cheol-Han Bang, Jin-Young Choi, Jeong-Soo Kim¹⁾ and You-Deog Hong
Climate Change Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*

(Received 6 August 2009, revised 4 January 2010, accepted 9 February 2010)

Abstract

Long-range transport of air pollutants was simulated using Comprehensive Acid Deposition Model (CADM) and Yonsei University-Sulfuric Acid Deposition Model (YU-SADM). For the simulation, weather patterns that represent the four seasons were derived through a clustering analysis with 5-years of meteorological data. The simulation result showed that in spring, influenced by strong low pressure from China, air pollutants of moved to the Korean Peninsula. In summer, humid air moved into the Korean Peninsula across the Yellow Sea while the north pacific high pressure extended, making the concentration of air pollutants lower than that in the other seasons. In autumn, air pollutants were transported by the northwest wind caused by the movement of high pressure over the Yellow Sea, while in winter air pollutants were influenced by northwest winds from continental highs.

The amount of air pollutants in each season showed that high amount of pollutants were transported in winter due to the strong northwest wind. The in-flows were 3 to 8 times higher than those of the other seasons, and out-flows were about as twice as high. The amount of wet deposition in summer and autumn increased significantly compared to the amount in the other seasons due to the increase of rainfall. Source-receptor relationship analysis for sulfur showed that 70 to 91 percent of the total deposition came from the self-contribution by the Korean Peninsula. In winter, contribution from China was about 25 percent of the total deposition which was higher amount than any other season.

Key words : Long-range transport, Weather pattern, Clustering analysis, Deposition, Source-receptor relationship

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7337, E-mail : schong@korea.kr

1. 서 론

환경문제는 지역적이거나 한 국가적인 문제를 떠나 이미 지구적인 수준으로 이슈화되었고 특히 국경을 초월하는 장거리 이동 대기오염 문제는 국가간의 피해 분쟁을 야기시킬 수 있는 중요한 문제로 부각되어 왔다(Macpherson *et al.*, 1995; Kato and Akimoto, 1992). 한·중·일을 포함하는 동북아시아 지역은 가장 많은 인구가 밀집하여 활발하게 경제활동이 이뤄지는 지역이다. 그 결과로 대기오염 문제의 심각성이 각 국가의 개별적 노력에 의해서 해결할 수 있는 정도를 넘어가고 있다. 또한, 대기오염 물질의 배출이 급격히 증가하고 있어 그 지역의 대기질도 악화되어 가고 있는 추세이다(Han *et al.*, 2006; Park and Jeong, 1997).

특히 동북아시아 지역의 최대 배출지역인 중국은 석탄 위주의 에너지 소비구조로 인하여 아황산가스 농도가 높은 매연형 오염 위주의 형태를 보이고 있다. 최근에는 자동차에서 배출되는 오염물의 증가로 인하여 대기오염은 매연형 오염과 광화학오염이 공존하는 복합형 오염상태로 변화해 가고 있다(Kim, 1999). 아시아 지역의 2000년 기준 SO₂ 총 배출량 중에 중국은 60%를 차지하고 있으며, 동북아시아 지역에서는 90%를 차지할 정도로 그 영향력은 크다(Carmichael, 2003).

중국의 풍하측에 위치한 한반도와 일본은 지리적으로 장거리 이동되는 대기오염물질로 인한 영향을 받고 있다. 따라서 한·중·일 3국은 자국의 대기질 관리를 위해서는 자국 내에서 발생하는 대기오염물질의 규제나 관리 뿐 아니라 대기오염물질의 장거리 이동과 침적에 대한 정확하고도 정량적인 자료의 확보가 필수적이다(Kim *et al.*, 2003). 대기오염물질의 이동 및 반응과 침적을 과학적으로 이해하고 산정하기 위해서는 대기화학모델링을 통한 연구가 필수적으로 수행되어야 하며(Kim *et al.*, 1999), 이의 일환으로 대기질에 대한 지속적인 관측과 더불어 대기오염물질과 그 반응들을 모사하는 모델링 연구가 진행되고 있다(NIER, 2000~2008).

본 연구에서는 계절별 주요 기상패턴을 도출하고 대기화학모델링을 통해 대기오염물질 장거리 수송 현상을 정량적으로 이해하고자 한다. 또한, 한·중·일 3국을 각 권역별로 구분하여 계절별 황(S)의 침

적량 및 이동특성을 분석하고 이에 대한 정량적인 결과를 도출하기 위하여 3국 간의 배출원-수용지 관계를 살펴보았다.

2. 연구 및 방법

2.1 모델의 개요

본 연구에서는 연세대학교에서 개발된 종합적 산성 침적 모델인 CADM(Park *et al.*, 2005; Kim and Lee, 1994)과 단순화된 YU-SADM(Lee and Lee, 2004; Kim and Lee, 2001)을 사용하였다. CADM은 국립환경과학원의 항공기 관측과 동아시아 장거리 대기오염물질 연구에서 한·중·일 3국의 관측 자료와 모델의 검증 연구에 활용되었다. YU-SADM은 장기 침적과 배출원-피해지 관계 도출을 위한 목적으로 개발된 것으로 CADM과 동일하나 화학 모형을 황화물만 다루도록 단순화된 모형이다. 또한 국제 모델 평가 사업인 Model Inter Comparison Study (MICS-Asia, Carmichael *et al.*, 2001)에 참여하여 타 모델들과 비교하여 합리적인 결과를 생산해 낸 것으로 평가되었다. 기상장 도출을 위하여 중규모 기상 모델인 Colorado State University Regional Atmospheric Modeling System (CSU RAMS)을 사용하였다(Pielke *et al.*, 1992). CADM과 RAMS 모두 수평 격자계는 Arakawa-Grid를, 연직 격자계는 sigma-z를 사용하며, 지도 도법은 Polar stereographic을 사용한다. 직교 좌표계에 대한 오염물질의 질량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot C_i \vec{V} + \nabla \cdot (K_{C_i} \nabla C_i) + R_i + E_i + \left[\frac{\partial C_i}{\partial t} \right]_{cloud} + \left[\frac{\partial C_i}{\partial t} \right]_{dry} \quad (1)$$

화학반응과 침적 계산은 Regional Acid Deposition Model (RADM II)의 방법을 따르며(Chang *et al.*, 1990), 총 73개의 물질(기체상 64개, 액상 9개), 21개의 기체상 화학 반응과 17개의 액상 화학 반응을 고려한다.

2.2 분석영역 및 자료

본 연구에서 사용된 모델링 영역은 그림 1에 제시된 바와 같이 90(동서)×60(남북)×28(연직)개의 격

자를 포함하며 수평격자의 크기는 60 km이다. 연직 격자는 최하층이 100 m, 신장율이 1.15, 최대 격자 크기가 1,000 m가 되도록 하는 신장형 격자계(stretching grid system)를 사용하였으며 모델의 최상단은 17 km에 이른다.

대기질 모델에 입력되는 기상 변수 도출을 위해 기상장의 초기자료는 NOAA에서 생산되는 전구 예보 자료(National Centers for Environmental Prediction; NCEP 083.2)를 이용하였으며 이 자료는 1° × 1°의 6시간 간격의 자료이다.

대기질 모델에 입력되는 기상변수로는 바람(u, v in m/s), 기압(hPa), 기온(K), 수증기 혼합비(kg/kg) 등의 기본적 변수들과 마찰속도 u^* (m/s), 마찰온도 T^* (deg), 모델초기 시각부터 적분된 아격자 규모 강수(subgridscale precipitation)(mm), 모델초기 시각부터 적분된 격자 규모 강수(grid-resolved precipitation)(mm), 지표온도(K), 구름 방울(cloud droplets)과 pre-istine ice의 함(kg/kg), 비(rain), 눈(snow), 얼음(ice), 썩락눈(graupel)의 함(kg/kg) 등 총 12가지이다.

한·중·일의 SO₂와 NO_x, NH₃, VOC 배출량 자료는 Long-range Transboundary Air Pollutants in North-east Asia (LTP) 전문가 회의에서 합의하에 3국에서 각각 산정한 배출량(1998년 기준 배출량)을 사용하였고 나머지 오염물질 배출량은 Carmichael 연구팀(2000년 기준 배출량)의 자료를 사용하였다(그림 1 참조). 지표 식생 자료는 10' × 10'의 Environmental Protection Agency/National Oceanic and Atmospheric Administration (EPA/NOAA) global ecosystems 자료를 이용하였고 지형고도 자료는 30" × 30"의 United States Geological Survey (USGS) 자료를 이용하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 5년('02~'06년)간 NCEP reanalysis 자료를 이용하여 주요 종관 기상장의 계절별 패턴을 구하고 이를 모델에 적용하고자 군집분석을 수행하였으며, 분석에 사용된 기상변수는 표 1에 제시하였다. 군집분석(cluster analysis)은 객체(object)간의 유사도에 기반하여 여러 데이터의 객체들을 조직화하는 것을 의미하며 효과적으로 대표 군집을 도출하기에 용이하다. 또한 데이터 집합의 크기와 유형에 따른 다양한 군집화 방법론이 있다. 본 연구에서는 계층적 군집 방법을 통하여 군집의 집합을 형성하였

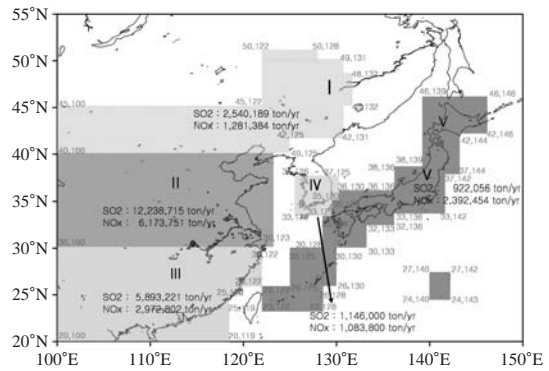


Fig. 1. Model domain, regions, and emissions for air quality modeling.

Table 1. Selected meteorological variables used for the cluster analysis.

Variables	Explanation
H ₅₀₀	500 hPa geopotential height (m)
T ₅₀₀	500 hPa temperature (K)
T _{SFC}	surface temperature (K)
V	surface wind speed (m/s)
RH	surface relative humidity (%)
P	surface pressure (hPa)

으며, 각 군집들 간에 가장 유사한 군집들을 그룹화하여 최종 군집 결과를 도출하는 병합방법(agglomerative method)을 통하여 접근하였다. 그리고 군집 간의 유사성 척도를 위하여 중심 연결법(centroid linkage method)을 사용하였다(Anderberg, 1973).

표 1에 제시한 데이터들의 표준화를 위하여 z-score를 사용하였고 대기오염 모델링 수행 시 스핀업 기간인 2일을 고려하기 위하여 각 최소 군집은 5일로 하였다. 또한 군집들의 중심값을 생산하고 군집과 유사도의 수준을 표현하여 분류하였다. 군집분석의 신뢰성을 높이기 위하여 군집 안에서의 분산이 최소가 되어야 하며, 사용된 거리의 척도를 이용하여 군집 내의 거리의 평균이 군집 간의 거리의 평균보다 작도록 하였다(Kim et al., 1997; Kim and Jhun, 1991).

황에 대한 유입·유출량을 계산하기 위해서 서해상과 동해상에 경계면을 설정하였다. 이 경계면의 위치는 서해의 동경 124° 30'선과 동해의 동경 131° 선이고, 남북으로는 북위 34° ~ 38° 까지 연장된 선이다.

각 경계면에서의 대기오염물질의 유입·유출량은

다음과 같이 구해진다.

$$\text{경계면 유입} \cdot \text{유출량} = \sum \sum u_{ib,j,k} C_{ib,j,k} (\Delta y)_j (\Delta z)_k \quad (2)$$

여기에서 u 는 동서 방향의 바람성분, C 는 대기오염 물질의 농도, $(\Delta y)_j$ 는 남북방향의 j 번째 격자의 크기, $(\Delta z)_k$ 는 k 번째 격자의 크기를 의미한다. 하침자 ib 는 동서 방향에서의 경계면 격자 번호를 의미한다. 이 적분의 연직 구간은 모델 최상단까지이나 대기오염 물질의 장거리 이동에 용이하다고 판단되는 850 hpa 까지를 분석 대상으로 하였다.

침적량은 각 경계 내부에 포함된 격자 전체에서의 평균 단위 침적량이 사례기간 동안의 매시간에 대해 구해지며, 이 값을 이용하여 평균을 구하고 남한면적과 모델링 시간을 곱하면 모델링 기간 동안의 침적량이 구해진다. 건성 침적량의 계산은 다음과 같이, 지표로의 오염물 속(pollutant flux), F 는 지표 부근의 오염물 농도에 비례한다고 가정한다.

$$F = V_d C_1 \quad (3)$$

여기서 V_d 는 건조 침적 속도이고 C_1 은 지표로부터 첫 번째 격자에서의 농도이다. 그러므로 건조 침적 과정에 의한 농도 변화율 $(\partial C / \partial t)_{dry}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{\partial C}{\partial t} \right]_{dry} = \frac{V_d C_1}{\Delta z} \quad (4)$$

여기서 Δz 는 지표로부터 첫번째 격자 사이의 연직 두께를 말한다. 건조 침적 속도 V_d 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_s} \quad (5)$$

여기서 R_a , R_b , R_s 는 각각 공기 역학적 저항, laminar-sublayer에서의 저항 그리고 지표 저항을 말한다. 즉 건조 침적 속도는 오염물질이 지표에 도달하기까지 통과해야 할 각 층에서 받게 될 저항의 합에 반비례함을 나타낸다.

습성 침적량의 계산은 강수율(P_r)과 농도의 곱(C_i)을 구름 지속시간(τ_{cid})까지 적분함으로써 계산된다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{습성 침적량(Wet Deposition)} = \int_{\tau_{cid}} C_i P_r dt \quad (6)$$

배출원-수용지 관계를 도출하기 위하여 동아시아 지역을 6개(중국 북부(I), 중국 중부(II), 중국 남부(III), 한국(IV), 일본(V), 그 외의 지역) 배출원 지역으로 구분하였다(그림 1 참조). 임의의 피해지에 대한 각 배출원의 황 오염물의 기여도를 계산하기 위하여 먼저 배출원 구역별로 황 배출량을 계산하여, 다음과 같은 식(7)을 이용하여 배출원-수용지 관계를 도출하였다. 이 방법은 일명 “tagged species method”라 불리어지는 방법이다(Lee and Lee, 2004).

$$R_{ij} = \frac{H_{ij}}{\sum_{i=1}^n H_{ij}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

여기서, R_{ij} 는 i 번째 배출원이 j 번째 수용지에 기여하는 기여율, H_{ij} 는 i 번째 배출원만 고려할 경우 j 번째 수용지의 오염물의 농도 또는 침적량을 나타낸다. 즉, 모든 배출원을 고려한 경우에 j 번째 수용지에서의 농도 또는 침적량에 대한 i 번째 배출원 지역만 고려한 경우에 j 번째 수용지에서의 농도 또는 침적량으로 나타내어진다. 따라서 i 번째 배출원에 의한 j 번째 지역에 대한 기여도가 계산되어진다.

3. 결과 및 분석

3.1 계절별 대표 기상장 도출

5년('02~'06년)동안의 NCEP reanalysis 6시간 자료 중에서 6개의 변수에 대한 z-score로 표준화하여 군집분석을 수행하였으며, 그 결과 계절별 빈도가 높은 군집을 선택하여 대표기상장을 도출하였다. 각 계

Table 2. Summary of modeling cases.

Season	Period
Spring	2005. 4. 30 00UTC ~ 5. 5 00UTC
Summer	2006. 7. 26 00UTC ~ 7. 31 00UTC
Autumn	2004. 9. 11 00UTC ~ 9. 16 00UTC
Winter	2005. 1. 30 00UTC ~ 2. 4 00UTC

Table 3. Percentage of accounting for weather patterns of each season by selected modeling cases.

Season	Spring	Summer	Autumn	Winter
Frequency (%)	60	41	48	43

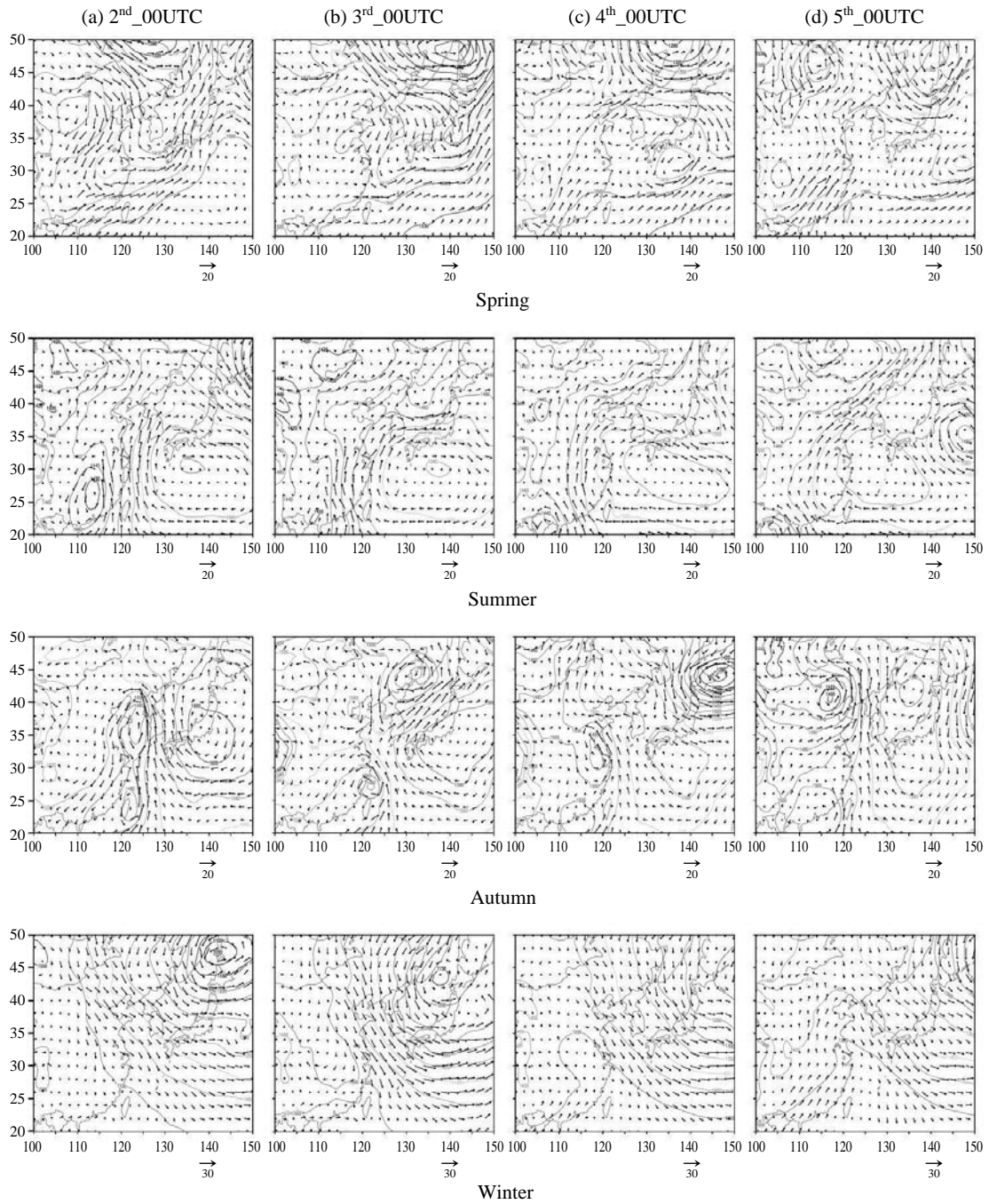


Fig. 2. Simulated 850 hPa geopotential height (solid line) and wind vectors (arrow) for four seasons.

절을 대표하는 모델링 사례를 표 2에 제시하였으며, 빈도수가 갖는 의미는 봄철의 경우, 군집분석에 의해

도출된 대표기상장은 봄철 기상패턴의 60%를 설명하는 것으로 해석할 수 있다(표 3).

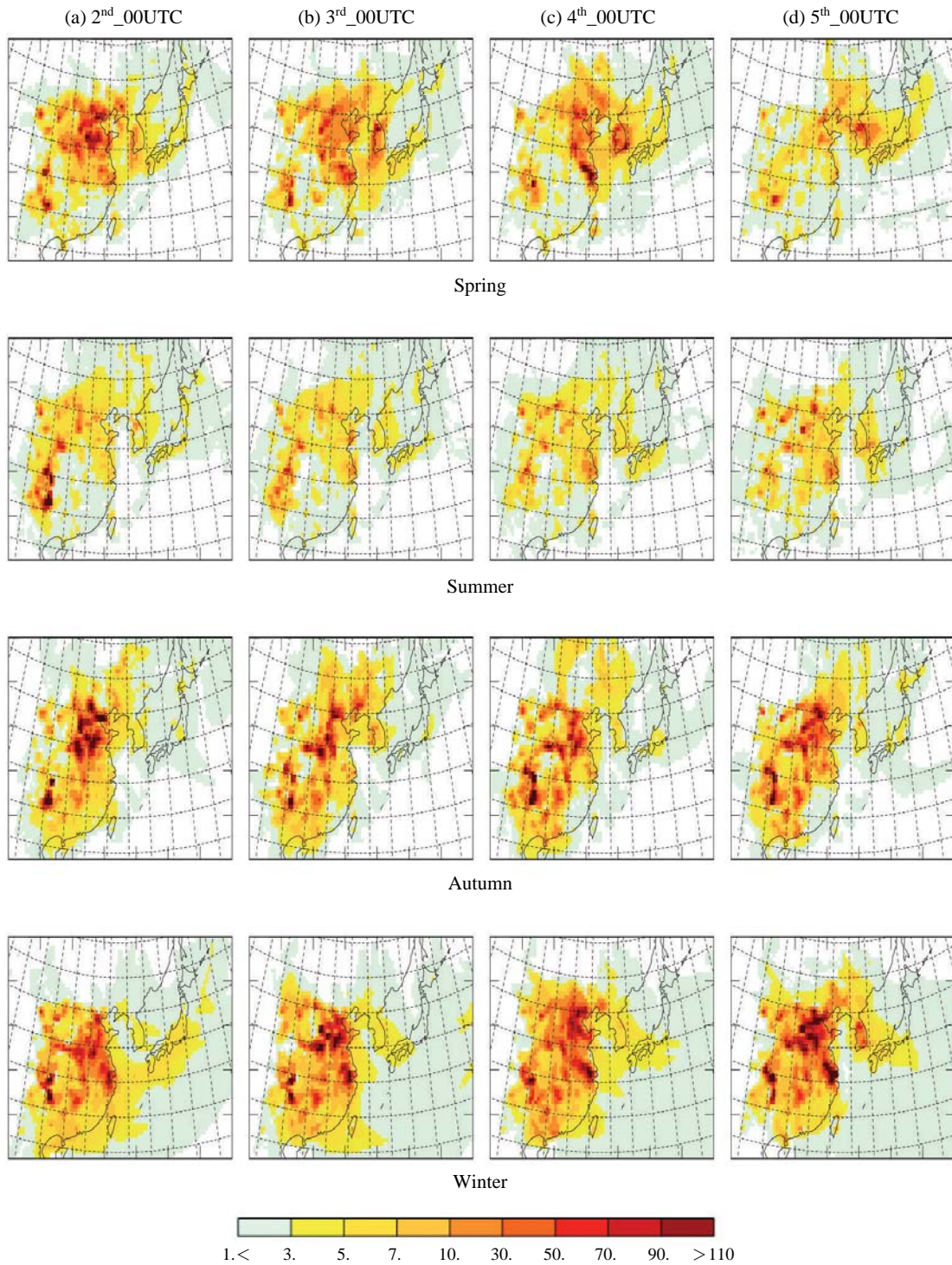


Fig. 3. Simulated surface SO₂ concentrations for four seasons (ppbv).

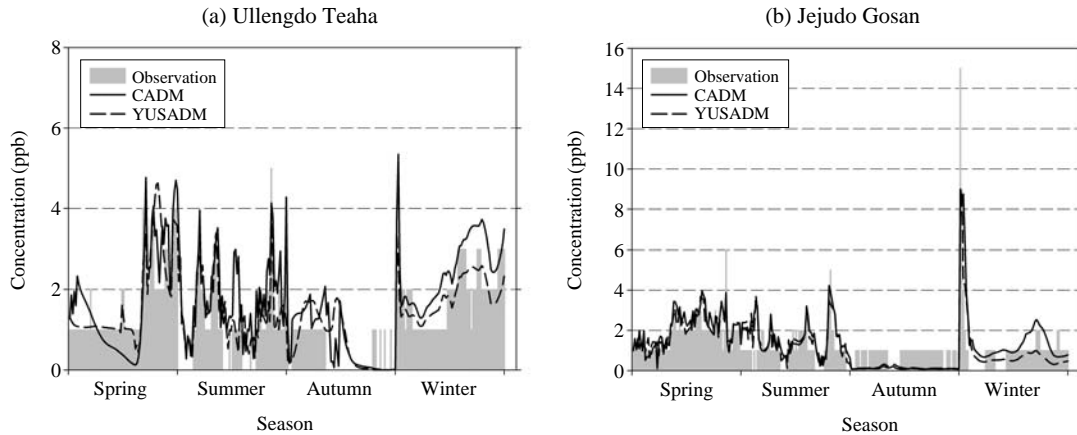


Fig. 4. Comparison of SO_2 concentrations between observation and model at (a) Ulleungdo and (b) Jeju for four seasons.

그림 2는 근접분석을 통한 각 계절별 대표기상장의 850 hPa 기압패턴을 나타낸 것이다. 계절별 특징을 살펴보면, 봄철의 경우 시베리아 고기압이 약해지면서 이동성 고기압과 저기압이 순차적으로 접근하여 한반도를 통과하는데, 강한 상승기류와 함께 발달한 저기압이 한반도로 이동하면서 중국에서 발생한 대기오염물질을 수송하는 기상패턴을 나타내고 있다. 여름철의 경우 북태평양 고기압의 세력이 강해지면서 남고북저형의 기압배치를 이루게 되는데, 중국 화남지역의 저기압대가 생기는 경우 태평양 지역의 고기압대와 동서로 대체되면서 고기압의 확장과 함께 습윤한 공기가 서해상을 거쳐 한반도로 유입되는 것을 알 수 있다. 가을철의 경우 이동성 고기압과 저기압이 순차적으로 접근하면서 온난 습윤한 고기압이 산둥반도를 거쳐 한반도로 이동하는 패턴을 보이고 있다. 겨울의 경우 시베리아 고기압이 강해지면서 화남지역의 고기압이 위치하고 한반도 동쪽으로 저기압이 위치하는 서고동저형의 기압패턴을 잘 보여주고 있다.

각 계절별 기압패턴을 살펴본 결과 한반도를 포함한 동아시아 지역은 봄철과 겨울철에 중국 중북부 공업지역을 통과하는 기압의 영향으로 대기오염물질의 장거리 이동이 활발히 있을 것을 예상할 수 있다.

3.2 계절별 지표 농도 분포

근접분석을 통하여 구축된 계절별 대표기상장으로

CADM을 수행하였으며, 그 결과 대기오염물질의 장거리 이동을 분석하였다. 그림 3은 계절별 SO_2 지표 농도 분포를 나타낸 것이다. 봄철의 경우 중국에서 발생하는 강한 저기압을 따라 대기오염물질이 이동해오는 전형적인 봄철 특징을 잘 반영하고 있으며, 중국 산둥반도에서 발생한 오염물이 한반도로 이동하는 것으로 나타났다. 그 영향으로 우리나라 평균농도는 약 20 ppbv로 매우 높은 수준을 나타냈다. 여름철의 경우 타 계절에 비해 비교적 낮은 농도 분포를 보이는 특징을 가진다. 우리나라의 평균농도는 약 5 ppbv 수준인 것으로 나타났으며, 이는 기압패턴 분석에서 알 수 있듯이 북태평양 고기압의 확장과 함께 습윤한 공기가 서해상을 거쳐 한반도로 유입되어 농도에 영향을 준 것으로 판단된다. 가을철의 경우 북서기류의 영향으로 산둥반도를 거쳐 한반도로 대기오염물질이 유입되고 있으며, 우리나라의 평균농도는 약 7 ppbv 수준인 것으로 나타났다. 겨울철의 경우 시베리아 고기압이 강해지면서 강한 북서 기류에 의해서 대기오염물질의 이동이 일어나는 사례로 우리나라의 평균농도는 약 10 ppbv 수준인 것으로 나타났다.

3.3 모델의 검증

모델의 신뢰도 검증을 위하여 예측농도와 관측농도와의 비교를 수행하였으며, 검증자료로는 국가 배경대기 측정망 자료를 이용하였다. 전국 6개 측정소

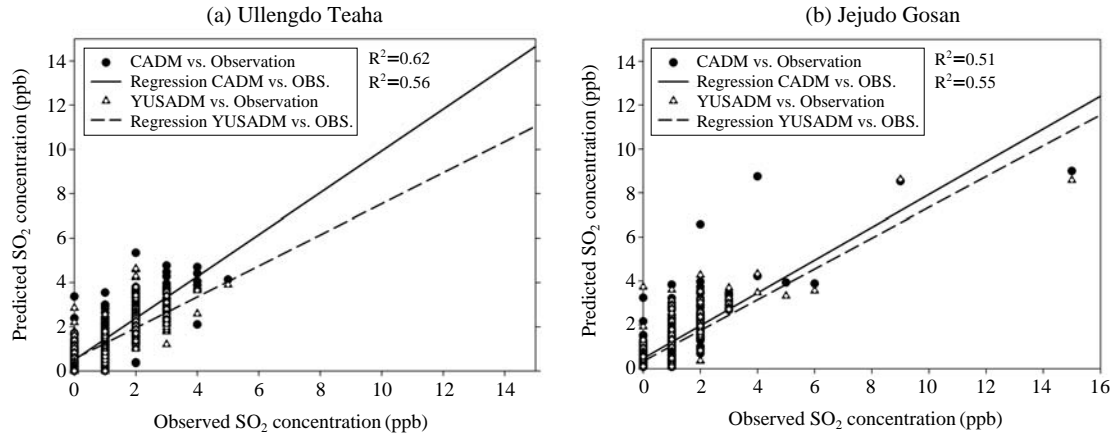


Fig. 5. Regression analysis of SO₂ concentrations of observation and model at (a) Ulleungdo and (b) Jeju for four seasons.

Table 4. Statistics of predicted SO₂ concentrations for four seasons.

Station	MODEL	AVG-MOD	AVG-OBS	STD-MOD	STD-OBS	RMSE	IOA	BIAS
Ulleungdo Teaha	CADM	1.68	1.25	1.18	0.98	0.85	0.83	0.43
	YUSADM	1.42	1.25	0.92	0.98	0.70	0.85	0.17
Jeju Gosan	CADM	1.36	1.19	1.29	1.24	0.97	0.84	0.17
	YUSADM	1.18	1.19	1.17	1.24	0.86	0.87	0.01

*AVG: Arithmetic average, MOD: Model Prediction, STD: Standard Deviation, OBS: Observation, RMSE: Root Mean Square Error, IOA: Index of Agreement (0=no agreement, 1=exact agreement)

중에서 사례기간 동안 결측이 비교적 없었던 울릉도 (태하동)와 제주도(고산리)의 1시간 자료를 이용하여 비교 분석을 하였다. 그림 4는 계절별 사례기간 동안의 시계열변화를 비교한 결과로, 전체적으로 고농도 관측결과를 제외하고는 두 모델이 관측결과와 유사하게 나타났다. 그림 5는 모델 결과와 관측 결과의 통계적 분석을 위하여 회귀분석 결과를 나타낸 것으로, 두 모델의 결정계수는 0.5 이상으로 높은 상관성을 보였다. 표 4는 두 모델 결과와 관측 자료와의 통계분석을 나타낸 것으로, 평균 농도 또한 시계열로 보인바와 같이 비교적 관측과 유사한 수준을 나타내고 있으며, IOA로 살펴본 상관성도 0.8 이상으로 높게 분석되었다. SO₂ 농도의 오차의 범위 (RSME) 및 편의 (BIAS)도 비교적 낮은 수준임을 알 수 있었다.

3. 4 계절별 유·출입량

도출된 대표기상장에 따른 계절별 장거리 이동 대기오염물질의 유입 또는 유출되는 양을 정량적으로

Table 5. Seasonal mean wind speed at 850 hPa.

Season	(unit: m/s)			
	West	East	South	North
Spring	-2.3	0.5	1.7	-0.2
Summer	5.9	7.3	3.1	-2.3
Autumn	-1.9	-1.5	1.5	6.1
Winter	9.2	14.0	-5.8	-3.8

파악하기 위하여 모델 결과를 이용하여 계산하였다.

표 5는 한반도 특징을 살펴보기 위하여 4권역에 해당하는 각 경계면에서의 계절별 평균풍속을 나타낸 것이다. (+)는 서풍 또는 남풍을 (-)는 동풍 또는 북풍을 의미하며 특히 겨울철이 타 계절보다 풍속이 강한 것을 알 수 있다.

표 6과 그림 6은 각 계절별 황(S)에 대한 CADM의 유입·유출량 결과를 제시한 것이다. 겨울철의 유입량은 8,106 ton/day로 타 계절에 비해 약 3~8배 많으며, 유출량은 11,346 ton/day로 타 계절에 비해

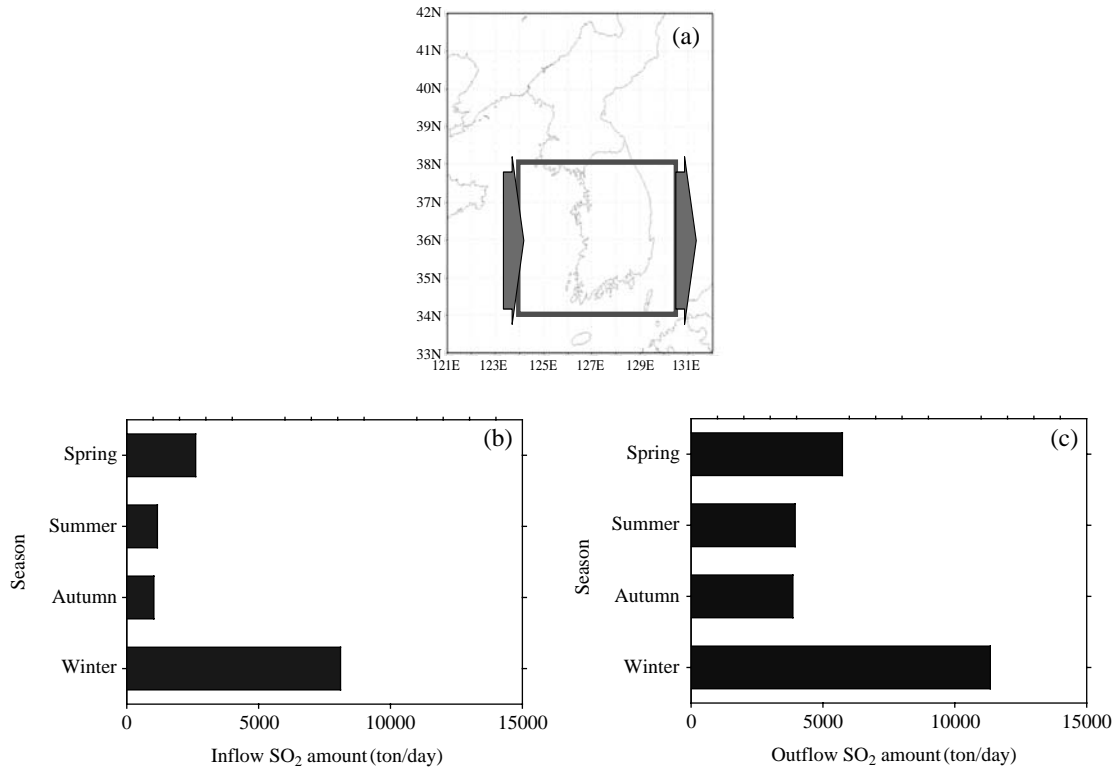


Fig. 6. Sulfur (a) domain considered for the calculation of (b) inflow and (c) outflow for four seasons.

Table 6. Inflow and outflow amount in each season.

Season	(unit: ton/day)	
	Inflow	Outflow
Spring	2,613	5,739
Summer	1,162	3,947
Autumn	1,029	3,860
Winter	8,106	11,346

Table 7. Total, wet, and dry deposition amount in each season.

Season	(unit: ton/day)		
	Total deposition	Wet deposition	Dry deposition
Spring	720	10	710
Summer	642	215	427
Autumn	871	477	394
Winter	184	5	179

약 2~3배 많은 양을 보이고 있다. 이는 풍속과 연관이 지어 설명될 수 있는데 비교적 북서기류의 강한 풍속이 나타나는 겨울철의 특징을 잘 반영하는 것으로 보인다. Han *et al.* (2006)에 의한 연구에서도 항공기를 이용한 서해상 관측결과 겨울철에 SO₂의 유·출입량이 가장 많은 것으로 설명하고 있다.

3.5 계절별 배출원-수용지 관계 도출

도출된 대표기상장을 이용한 각 계절별 사례기간 동안의 YU-SADM의 황(S)에 대한 결과로 배출원-

수용지 관계(S-RR) 도출을 위해 구분되어진 영역 중 우리나라에 해당하는 IV영역에 대한 침적량을 분석하였다. 각 계절별 침적량을 표 7에 제시하였고 누적 강수와 습성 침적량의 분포를 그림 7에 보였다. 총 침적량의 경우, 가을(871) > 봄(720) > 여름(642) > 겨울(184) 순으로 나타났으며, 이 중 건성 침적량은 김진영 등(2005)에 의한 결과와 같이 봄(710)과 여름(427)에 많은 것으로 나타났다. 또한, 여름(215)과 가을(477)은 강수의 증가로 인해 습성 침적량이 타 계절보다 크게 증가한 것을 알 수 있었다. Guttikunda

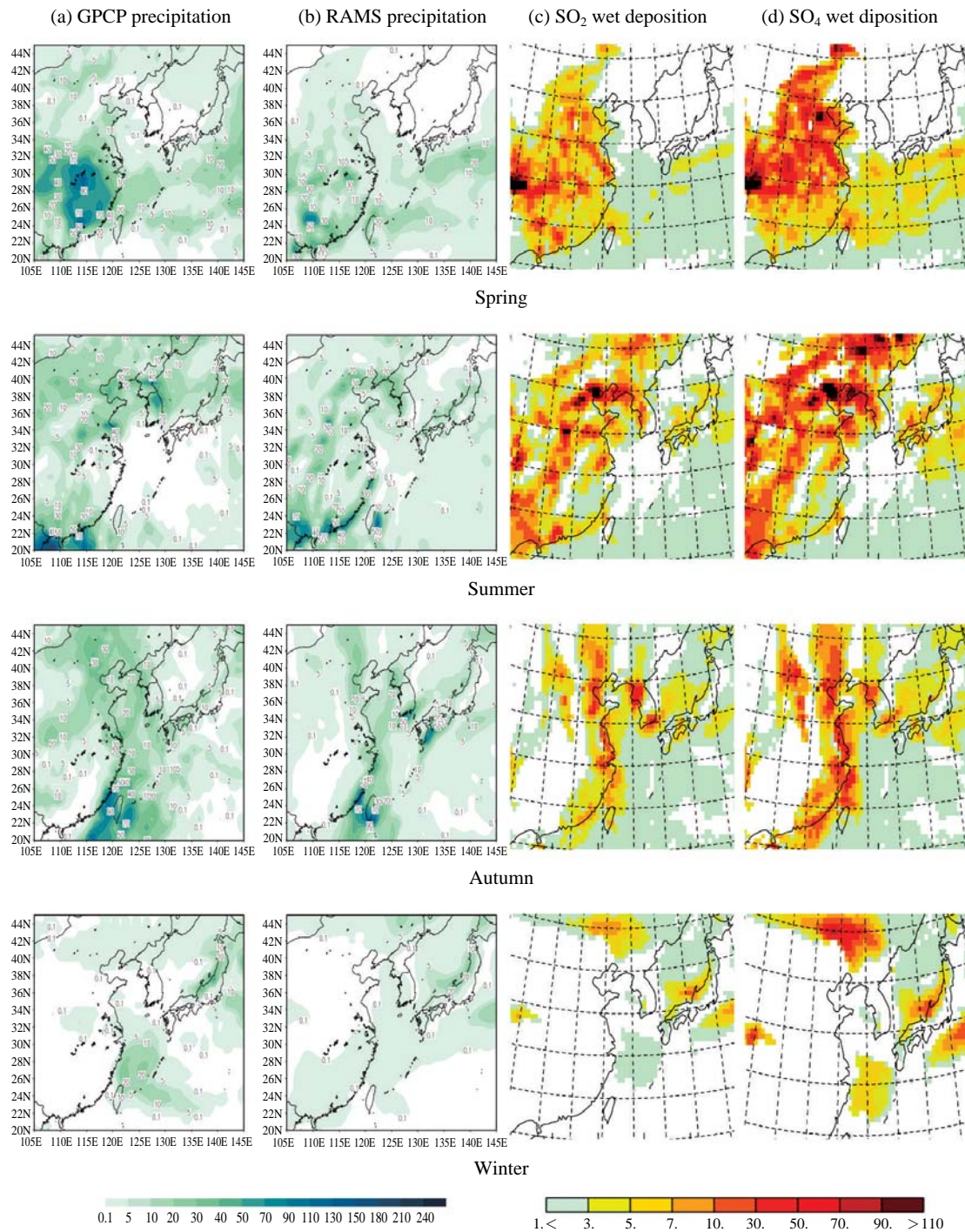


Fig. 7. Comparison of cumulative precipitation (mm) and wet deposition (kg/km²), (a) GPCP data, (b) RAMS data, (c) SO₂ and (d) SO₄ wet deposition for four seasons.

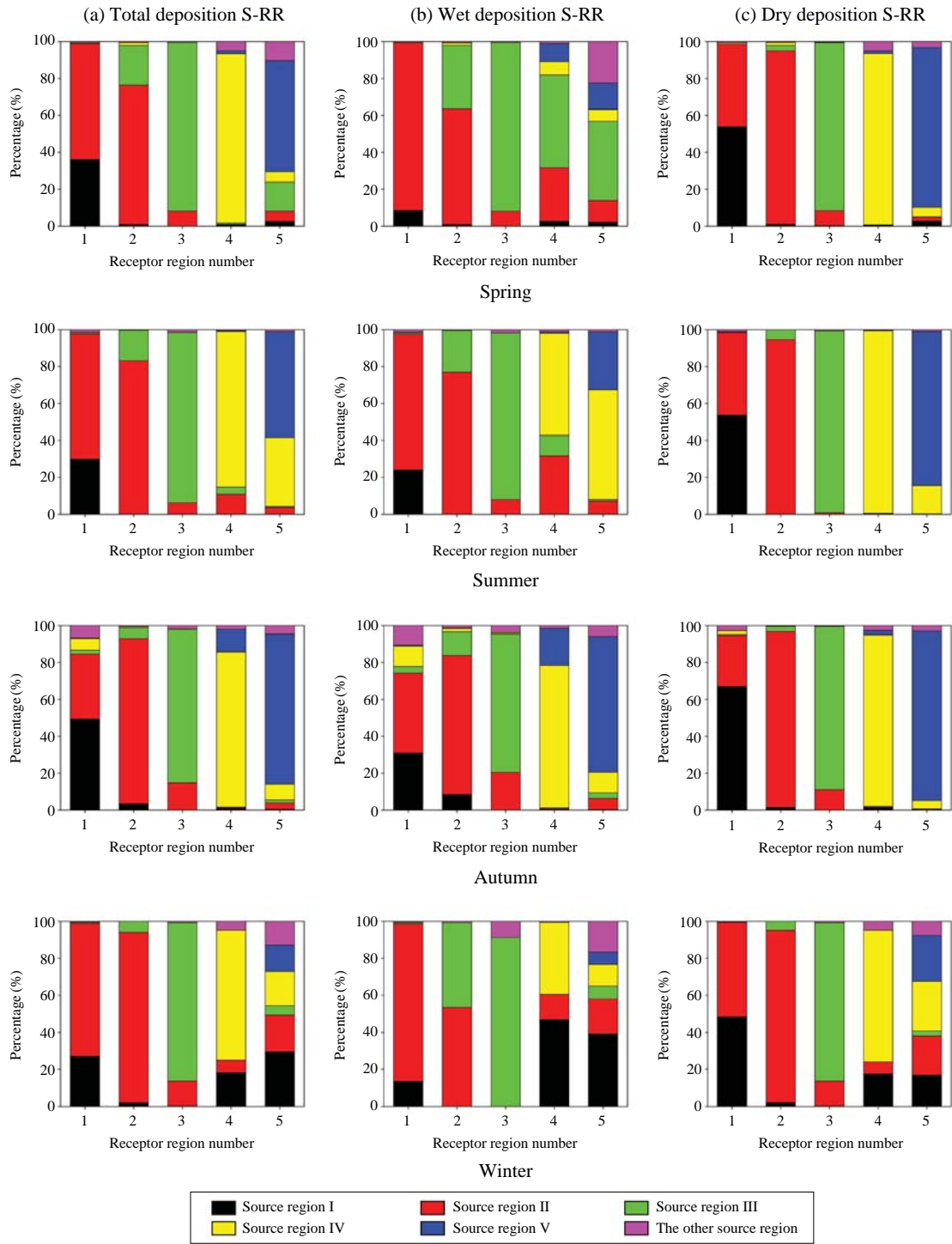


Fig. 8. Source-Receptor Relationship (S-RR) of (a) total deposition, (b) wet deposition and (c) dry deposition for four seasons.

et al. (2001)의 연구결과에 의하면 아시아 지역의 황에 대한 총 침적량은 일반적으로 여름에 가장 높고 겨울에 가장 낮은 것으로 설명하였으나, 본 연구에서는 여름보다 가을의 습성 침적량이 더 높게 나타났다. 이는 표 8에 보인 바와 같이 각 계절별 우리나라의 영역 평균된 강수량에 대해 RAMS의 결과와 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 관측 자료를 비교한 결과, 여름철을 제외한 타 계절에서는

7~14% 정도를 모델이 과대 모의 하는 것을 알 수 있었으며, 여름철은 8% 정도 과소 모의하는 것을 알 수 있었다. 이 문제는 RAMS 뿐만 아니라 다른 중규모 기상모델에서 물리과정과 초기조건에 기인한 모델의 한계로 밝힌 바 있다(Cha et al., 2007; Kim et al., 2003). 즉, 본 연구에서도 여름철 습성 침적량이 가을철 보다 작은 이유가 여름철 강수의 과소 모의와 가을철 강수의 과대 모의에 기인하는 것을 알 수 있었다.

Table 8. Comparison of area averaged precipitation between observation and model for four seasons in Korea. (unit: mm)

Season	Observation (GPCP, A)	Model (RAMS, B)	(B-A)/B × 100 (%)
Spring	0.27	0.29	7
Summer	12.59	11.70	-8
Autumn	11.91	13.53	12
Winter	0.69	0.80	14

또한, 겨울철의 경우에 많은 유입량에 의해 농도 분포는 높음에도 불구하고 총 침적량은 상대적으로 가장 낮게 나타났다. 이는 850 hPa까지 고도의 평균 풍속이 서쪽 경계에서는 9.2 m/s이고 동쪽 경계에서는 14 m/s의 강한 풍속에 의해 유입된 양과 자체 배출량의 상당부분이 강한 기류를 타고 동해로 빠져나갔을 것으로 추정된다. 즉 장거리 이동되는 황(S)은 대체적으로 상층대기를 통해 우리나라로 이동하는데,

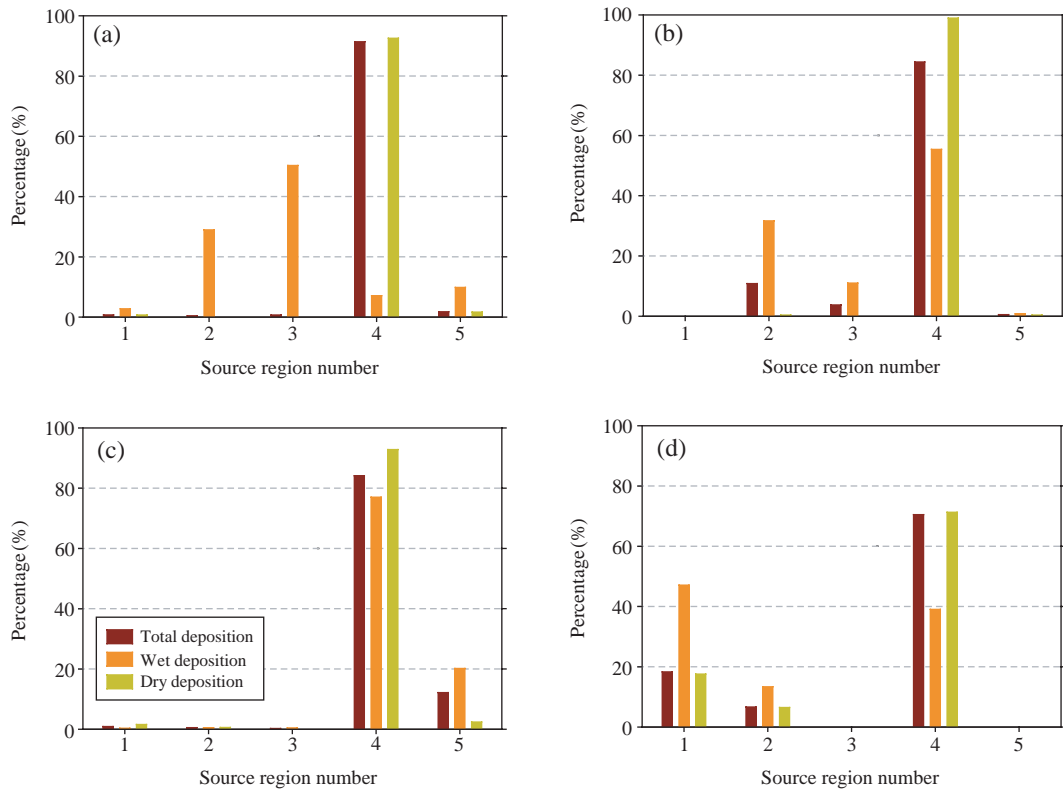


Fig. 9. Source-Receptor Relationship (S-RR) of total, wet and dry deposition at region IV for (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter.

이때 상층으로 이동한 많은 대기오염물질이 하층의 강한 풍속과 함께 이동한 것으로 사료된다(Kim *et al.*, 2007).

황산화물의 5개 권역에 대한 계절별 총 침적량, 습성과 건성 침적량의 배출원-수용지 관계를 그림 8과 그림 9에 제시하였다. 총 침적량의 경우, 계절별로 다소 차이는 있으나 우리나라의 자체 기여율은 70~91%로 높은 수준을 보였으나, 겨울철에는 중국의 영향이 약 25% 수준으로 타 계절에 비해 많이 받는 것으로 나타났다. 건성 침적의 경우의 기여율은 겨울철을 제외한 모든 계절들에서 약 90% 이상의 높은 자체 기여율을 보였다. 이는 계절별 황산화물의 장거리 이동에 있어서 기압골의 배치와 풍향 및 풍속 그리고 강수 등에 의해 수용지에 미치는 배출원의 기여율이 결정됨을 시사한다. 특히, 우리나라에서는 건성 침적보다는 습성 침적의 경우에 장거리 이동의 영향이 크며, 가을철을 제외하고는 중국의 영향이 큰 부분을 차지하는 것으로 나타났다.

봄철의 건성 침적의 경우에는 자체 기여율이 약 93%로 가장 높게 나타났으며, 습성 침적의 경우에는 강수량이 미미하여 습성 침적의 기여가 총 침적량의 기여율에 미치는 영향은 크지 않았다. 여름철의 경우는 II, III권역인 중국의 중부와 남부지방의 영향으로 인해 총 침적량에 미치는 영향이 약 15% 정도인 것으로 나타났다. 특히 습성 침적량 중 중국지역의 기여율은 약 43% 수준으로 높은 반면, 건성 침적량에 의한 중국지역의 기여는 미미한 수준인 것으로 산정되었다. 이는 중국으로부터 이동되어온 황산화물이 우리나라로 이동해 와 강수에 의해 우리나라에 침적되어짐에 따른 것으로 분석되었다. 가을철의 경우에는 습성 침적의 영향이 건성 침적보다 크게 나타난 것을 알 수 있으며 V권역인 일본의 영향을 약 12% 정도 받는 것으로 나타났다. 또한 겨울철의 경우 중국의 영향이 총 침적량에 약 25% 정도 미치는 것으로 나타났으며, 특히 I, II권역인 중국 중북부 지역의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 이는 강한 북서기류에 의한 오염물질의 유입으로 설명되어 질 수 있다.

4. 결 론

각 계절별 대표 기상을 선정하여 동북아시아 지역

의 황(S)의 이동 패턴, 공간 분포 등을 모델링을 수행하여 정량적으로 평가하였다.

우리나라의 지상의 SO₂ 평균농도는 봄, 겨울, 가을, 여름 순으로 높게 나타났으며, 특히 봄철의 농도는 약 20 ppbv 수준으로 타 계절보다 매우 높은 농도를 보였다. 계절별 황(S)의 유·출입량은 겨울, 봄, 여름, 가을 순으로 높게 나타났다. 이는 겨울철에 강한 북서 기류에 의한 것으로 타 계절에 비해 유입량이 약 3~8배 많았으며, 유출량 또한 많은 경향을 보였다. 우리나라에 계절별 침적되는 황(S)의 양은 가을, 봄, 여름, 겨울의 순으로 높게 나타났으며, 여름과 가을은 강수로 인한 습성 침적량이 타 계절에 비해 큰 비중을 차지하였다.

황(S)의 계절별 배출원-수용지 관계를 도출한 결과, 우리나라의 총 침적량 중 우리나라에 의한 자체 기여율은 약 70~91% 수준을 보였으며, 자체 기여율이 가장 낮았던 겨울철에는 중국으로부터의 영향이 약 25% 수준으로 타 계절에 비해 크게 나타났다. 우리나라의 외부권역으로부터의 영향의 경우, 여름철에는 중국의 II, III권역으로부터의 영향을 주로 받고 있으며, 겨울철에는 중국 중북부 지역인 I, II권역의 영향을 주로 받는 것으로 나타났다. 중국으로부터 장거리 이동시에는 건성 침적보다 습성 침적에 의한 기여가 더 민감한 것으로 나타나, 강수에 의한 습성 침적량이 증가할 경우에는 장거리 이동된 황(s)의 영향이 증가할 수 있음을 시사한다. 따라서 대기오염물질의 장거리 이동, 변환 및 침적에 있어서 강수량의 모의는 매우 중요한 문제이므로 강수량 예측도 항상 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 보이며, 중국이 자동차 증가 등으로 인한 광화학오염 위주로 변화해감에 따라 이에 대한 장거리 이동 영향 연구도 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Anderberg, M.R. (1973) Cluster analysis for applications, Academic Press, 353pp.
- Carmichael, G.R., H. Hayami, G. Calori, I. Uno, S.Y. Cho, M. Engardt, S.B. Kim, Y. Ichikawa, Y. Ikeda, H. Ueda, and M. Amann (2001) Model intercomparison study of long range transport and sulfur deposition in East Asia (MICS-ASIA), Water Air Soil Pollution, 130,

- 51-62.
- Carmichael, G.R. (2003) Emission data. http://www.cgrer.uiowa.edu/people/carmichael/ACCESS/Emission-data_main.html, University of Iowa.
- Cha, Y.M., H.S. Lee, W.T. Kwon, and K.O. Boo (2007) Improvement of precipitation forecast over East-Asia by ECHO-G/S land-cover change, Proceedings of the Spring Meeting of KMS, 272-273.
- Chang, J.S., R.A. Brost, I.S.A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W.R. Stockwell, and C.J. Walcek (1990) The regional acid deposition model and engineering model, NAPAP Report 4, 130pp.
- Guttikunda, S.K., N. Thongboonchoo, R.L. Arndt, G. Calori, G.R. Carmichael, and D.G. Streets (2001) Sulfur deposition in Asia: seasonal behavior and contributions from various energy sectors, Water, Air, and Soil Pollution 131, 383-406.
- Han, J.S., Y.M. Kim, J.Y. Ahn, B.J. Kong, J.S. Choi, S.U. Lee, and S.J. Lee (2006) Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997~2004, Korean J. of Atmos. Environ., 22(1), 99-106. (in Korean with English abstract)
- Kato, N. and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: emission inventories, Atmospheric Environment, 26A, 2997-3017.
- Kim, B.G., J.Y. Ahn, J.H. Kim, C.J. Park, J.S. Han, J.G. Na, and R.I. Choi (1999) A survey on the long-range transport of sulfur compounds by aircraft measurement over the yellow sea in 1998, Korean J. of Atmos. Environ., 15(6), 713-725. (in Korean with English abstract)
- Kim, C.H., J.G. Na, C.J. Park, J.H. Park, C.S. Im, E. Yoon, M.S. Kim, C.H. Park, and Y.J. Kim (2003) Application and first evaluation of the operational RAMS model for the dispersion forecast of hazardous chemicals-validation of the operational wind field generation system in CARIS, Korean J. of Atmos. Environ., 19(5), 595-610. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, S.B. Lee, and K.C. Moon (2003) Estimation of nitrogen and sulfur deposition over the yellow sea region, Korean J. of Atmos. Environ., 19(2), 217-229. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., Y.S. Kim, J.G. Won, S.C. Yoon, J.H. Woo, and K.T. Cho (2005) Estimation of nitrogen and sulfur dry deposition over the watershed of lake Paldang, Korean J. of Atmos. Environ., 21(1), 49-62. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.Y. and M.S. Jhun (1991) SAS cluster analysis, Freedom Academy, 37-61.
- Kim, S.B. and T.Y. Lee (1994) Numerical simulation of tracer distribution during CAPTEX, J. Korean Air Poll. Res. Assoc., 10E, 357-370.
- Kim, S.B. and T.Y. Lee (2001) Comprehensive acid deposition model and its application to episodic acid deposition in East Asia, Air Pollution Modeling and Its Application XIV, 721-722.
- Kim, S.K., J.B. Lee, W.J. Choi, Y.H. Lee, I.S. Park, J.S. Cha, J.S. Choi, and J.S. Kim (2007) Relationship between source-receptor relationship of vertical concentration and deposition, The 2007 Environmental Societies Joint Conference, 1564-1566.
- Kim, S.W., S.U. Park, and B.R. Lee (1997) Variations of SO₂, NO_x, CO and O₃ concentrations in association with synoptic meteorological conditions, Asia-Pacific J. of Atmos. Sciences, 33(2), 273-287. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.F. (1999) Air quality in northeast Asia with emphasis on China, Korean J. of Atmos. Environ., 15(2), 211-217. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.B. and T.Y. Lee (2004) Impacts of horizontal spatial resolution on the derivation of source-receptor relationship-An extratropical cyclone case, Tellus, 56B, 413-425.
- Macpherson, J.I., R.L. Desjardins, O.H. Schuepp, and R. Pearson (1995) Aircraft-measured ozone deposition in the San Joaquin Valley of California, Atmospheric Environment, 29(21), 3133-3145.
- NIER (2000~2008) Establishment of air pollutants monitoring system and cooperating program for environmental conservation in Northeast Asia, (I), (II), (III), (IV), (V), (VI), (VII), (VIII), (IX).
- Park, B.K. and S.T. Jeong (1997) A study of environmental problems in the Northeast Asia on air pollution from China, LG Economic Research Institute Report, 1-69.
- Park, I.S., W.J. Choi, T.Y. Lee, S.J. Han, and C.H. Kim (2005) Simulation of long-range transport air pollutants over Northeast Asia using a comprehensive acid deposition model. Atmospheric Environment, 39, 4075-4085.
- Pielke, R.A., W.R. Cotton, R.L. Walko, C.J. Tremback, M.E. Nicholls, M.D. Moran, D.A. Wesley, T.J. Lee, and J.H. Copeland (1992) A comprehensive meteorological modeling system RAMS. Meteorol. Atmos. Phys., 49, 69-91.