



대기오염물질의 이동경로상 물리화학적 변화 추적을 위한 Backward-tracking Model Analyzer 방법론 마련

Development and Application of the Backward-tracking Model Analyzer to Track Physical and Chemical Processes of Air Parcels during the Transport

배민아 · 김현철^{1,2)} · 김병욱³⁾ · 김순태*

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾미국국립해양대기청,

²⁾메릴랜드대학 기후 · 위성 연구소, ³⁾미국조지아주환경청

(2017년 2월 13일 접수, 2017년 3월 21일 수정, 2017년 4월 7일 채택)

Minah Bae, Hyun Cheol Kim^{1,2)}, Byeong-Uk Kim³⁾ and Soontae Kim*

Ajou University, Department of Environmental Engineering, Suwon, Korea

¹⁾*Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD*

²⁾*Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland, College Park, MD*

³⁾*Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA*

(Received 13 February 2017, revised 21 March 2017, accepted 7 April 2017)

Abstract

An Eulerian-Lagrangian hybrid modeling system to analyze physical and chemical processes during the transport of air parcels was developed. The Backward-tracking Model Analyzer (BMA) was designed to take advantages of both Eulerian and Lagrangian modeling approaches. Simulated trajectories from the National Oceanic and Atmospheric Administration HYSPLIT model were combined with the US Environmental Protection Agency Community Multi-scale Air Quality (CMAQ)-simulated concentrations and additional diagnostic analyses. In this study, we first introduced a generalized methodology to seamlessly match polylines (HYSPLIT) and three-dimensional polygons (CMAQ), which enables *mass-conservative* analyses of physio-chemical processes of transporting air parcels. Two applications of the BMA were conducted: (1) a long-range transport case of pollutant plume across the Yellow Sea using CMAQ Integrated Process Rate analyses, and (2) a domestic circulation of pollutants within (and near) the South Korea based on the sulfate tracking analyzer. The first episode demonstrated a secondary formation of nitrate and ammonium during the transport over the Yellow Sea while sulfate is mostly transported after being formed over the China, and the second episode demonstrated a dominant impact of boundary condition with active sulfate formation from gas-phase oxidation near the Seoul Metropolitan Area.

Key words : Eulerian model, Trajectory analysis, Hybrid approach, CMAQ, HYSPLIT

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-219-2511, E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

1. 서 론

고농도 미세먼지는 인체에 해로운 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Leem *et al.*, 2015). 지난 몇 년간 미세먼지 농도 저감을 위한 정부 및 지자체의 많은 노력에도 불구하고(Kim, 2014; MOE, 2013), 수도권을 비롯한 국내외 미세먼지 농도는 크게 변하지 않거나 다소 증가하는 추세이다(Kim *et al.*, 2016a; Zhang *et al.*, 2016; Park and Kim, 2014).

고농도 미세먼지 현상은 국내 배출원의 영향이 대기 정체 조건에서 확산되지 못하고 누적되거나, 중국 등 국외로부터 장거리 이동 영향을 받는 경우 발생할 수 있다(Kim *et al.*, 2016c; Jo and Kim, 2010). 특히, 미세먼지의 많은 부분을 차지하는 2차 생성의 경우 비선형적인 변화 특성을 보이며, 이러한 과정을 이해하기 위해서는 오염물질이 대기 중으로 배출되어 소멸될 때까지의 물리·화학적 거동을 살펴보는 것이 중요하다.

대기질 모델을 이용할 경우 대기오염물질의 이동 및 물리·화학적 농도 변화를 살펴볼 수 있다. 대기질 모델은 특성에 따라 오일러리안 타입(type)의 모델과 라그랑지안 타입의 모델로 구분할 수 있다. 오일러리안 타입의 모델은 고정된 격자별 농도를 시공간 변화에 따라 살펴볼 수 있는 장점이 있으나(Byun and Schere, 2013), 특정 공기괴의 이동과 대기오염물질의 물리·화학 변화를 살펴보기에는 어려움이 있다. 라그랑지안 타입 모델의 경우 공기괴의 이동을 추적하도록 설계되어 있어 개별 공기괴의 이동을 추적하기에는 적합하지만(Draxler *et al.*, 1999), 이동 과정 중 대기오염물질의 화학반응 및 소멸과정 분석에는 제한이 있다.

공기괴 이동에 따른 대기오염물질 및 전구물질의 농도 변화를 효과적으로 분석하기 위해 오일러리안 모델과 라그랑지안 모델을 병행 활용할 수 있다. Yu *et al.* (2009)은 북동미 지역에 대해 오일러리안 모델인 CMAQ(Community Multi-Scale Air Quality)과 라그랑지안 모델인 HYSPLIT을 이용하여 공기괴의 이동에 따른 농도를 모의하고, PA(Process Analysis; Byun and Schere, 2013)를 바탕으로 오존 농도의 IPR(Integrated Process Rate) 분석을 수행하였다. Godowitch and Draxler(2006)는 HYSPLIT과 CMAQ을 이용하여 배출량 저감 시나리오를 바탕으로 궤적을 따라 이동하는 공기괴의 오존 농도가 달라질 수 있음을 보였다.

국내 HYSPLIT 적용 연구는 공기괴의 이동 궤적 및 기원 분석에 주로 이용되고 있으며, 대기오염물질의 이동 및 변화 과정에 대한 종합적인 해석 연구는 부족한 실정이다. 대부분의 선행연구를 보면 HYSPLIT 기본 출력 시간별(통상 1시간) 공기괴의 위치를 확인하고, 이에 해당하는 오일러리안 모델 격자 값을 읽어 비교하는 방법을 이용하였다. 이러한 단순 매칭(matching) 방법은 사용하는 오일러리안 모델 격자체계가 고해상도로 갈수록 라그랑지안 모델의 공기괴가 단위 시간 동안 지나가는 모든 격자들에 대한 정보를 확보하지 못하므로, 공기괴가 이동하면서 경험하는 물리·화학적 변화에 대한 정량적 분석이 제한된다.

따라서 본 연구에서는 공기괴의 이동경로에 위치하는 모든 격자정보를 추출하기 위한 방법으로 BMA(Backward-tracking Model Analyzer)를 구축하고, 오일러리안 타입의 모델인 CMAQ과 라그랑지안 타입의 모델인 HYSPLIT 결과를 이용하여 공기괴 이동과정 중 대상 대기오염물질의 농도 변화 및 배출원 영향 등에 대한 해석을 시도하였다. 이러한 방법론을 적용함으로써, 이동경로에 따른 격자별 체류시간이 고려된 분석이 가능하며 공기괴가 연속적으로 이동하는 동안 대기오염물질의 물리·화학적 변화를 분석할 수 있다. 추후 진단모델에도 이러한 방법론을 적용하여, 미세먼지를 비롯한 대기오염물질의 이동과 농도 변화 특성을 분석하는데 활용하고자 한다.

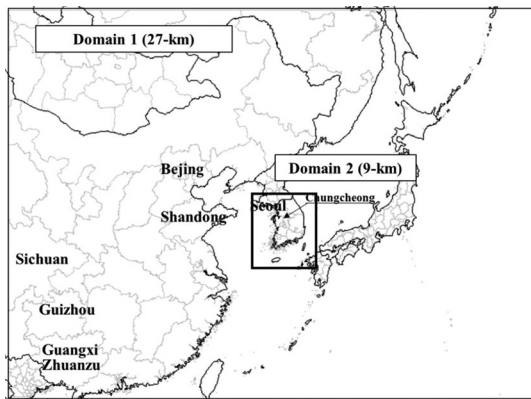
2. 실험 방법

2.1 대기질 모사

대기질 모사는 WRF(Weather Research and Forecasting; Skamarock *et al.*, 2008)-SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions; Benjey *et al.*, 2001)-CMAQ 체계를 이용하였다. 대기질 모사에 앞서 기상 입력자료 마련을 위하여 WRF version 3.3을 수행하였으며, 자세한 물리옵션은 표 1에 나타내었다. 기상 초기장은 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 예보장인 GFS(Global Forecasting System)를 이용하였다. 자연배출량 마련을 위하여 MEGAN(The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006)을 수행하였으

Table 1. WRF configurations for CMAQ and HYSPLIT operations.

Module	Configuration
Landuse	SRTM
Micro physics	WSM3 (Hong <i>et al.</i> , 2004)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch (Kain, 2004, JAM)
Longwave radiation	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Shortwave radiation	Goddard (Chou and Suarez, 1994)
PBL scheme	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)
LSM scheme	NOAH (Mitchell <i>et al.</i> , 2001)

**Fig. 1. Geographical coverage of modeling domains at the horizontal grid resolution of 27 km (outer), and 9km (inner), respectively.**

며, 인위적 배출량에 대하여 SMOKE version 3.6을 통해 배출량 목록을 화학종 분류, 공간할당 및 시간할당 처리하여 마련하였다. 국내 배출량 목록은 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2010, 국외 배출량 목록은 MICS-Asia (Work Plans for Model Inter-Comparison Study - Asia Phase III; Li *et al.*, 2015) 2010을 이용하였다. 대기질 모사는 CMAQ version 4.7.1을 수행하였으며, 화학메커니즘은 SAPRC99, 이류 옵션으로는 Yamo, 수직확산은 Multiscale, 수직확산은 Eddy를 이용하였다. 모사영역은 중국으로부터의 장거리이동 영향을 효과적으로 살펴보기 위하여 동북아시아 지역을 포함하는 27 km 수평해상도 격자와 국내를 포함하는 9 km 수평해상도 격자에 대하여 그림 1과 같이 설정하였다.

대기질 모사 시 물리·화학 과정(예, 확산, 이류, 침적, 화학반응 등)에 따른 농도 변화를 검토하기 위한

예시로 CMAQ 기본모사 외에 CMAQ에 내장된 과정 분석 방법인 PA와 sulfate tracking을 수행하였다(Byun and Schere, 2013). PA 중 IPR은 대상 오염물질의 생성 및 소멸을 수직 및 수평 수직과 확산, 배출량에 의한 영향, 에어로졸 반응, 구름 모듈 등에 대해 고려하여 매 시간 변수로서 각 과정의 기여도를 정량적으로 보여준다. Sulfate tracking은 sulfate의 생성 원인을 배출원, 초기 및 경계장, 가스상 생성 및 5개의 개별 액상 화학 반응의 구분으로 나누어 추적할 수 있다.

2.2 HYSPLIT 수행

HYSPLIT 입력자료를 마련하기 위하여 “arw2arl” 프로그램을 이용하여 WRF 출력자료를 전처리하였다. “arw2arl”은 NetCDF 형태의 WRF 출력자료를 “arl” 형태의 HYSPLIT 입력자료로 변환한다. 이는 입력자료의 정보 구조를 단순화 시키고 필요한 변수만을 포함하여 계산 시간을 절약하기 위함이다(Draxler *et al.*, 1999). HYSPLIT의 출력자료는 수행기간 동안 매시간별 공기괴가 위치한 위경도 및 고도 자료를 포함하며, 이로부터 궤적이 이동하는 위치를 1시간 단위로 파악할 수 있다. 출발 지점의 고도 설정을 위하여 본 연구에서는 국지 영향을 살펴보기 위해 지표와 가까운 100 m 고도를 선택하였으며, 500 m의 경우 서해상을 통과할 때 marine boundary layer 내의 높이를 고려하였다(Kim *et al.*, 2001). 1000 m는 일반적인 내륙의 혼합고 내에서 오염물질 장거리 이동을 살펴보기 위하여 선택하였다. 이러한 높이는 사용자의 목적에 따라 달라질 수 있다.

2.3 Backward-tracking Model Analyzer (BMA) 구축

그림 2는 BMA의 기본 구성을 보이는 것으로 오일러안 모델 결과와 라그랑지안 모델 결과 사이에 인터페이스(interface)를 제공하여 병행된 결과 해석을 가능하게 한다. 기상자료 마련을 위한 WRF, 배출량 자료를 위한 SMOKE와 MEGAN, 대기질 모델 CMAQ, 그리고 HYSPLIT으로 이루어져 있다. HYSPLIT을 이용한 공기괴의 이동궤적 추적과 궤적에 따른 대기질 변화 추적을 위하여 IDL(Interactive Data Language)을 이용한 인터페이스를 마련하였으며 2.3.2에 자세히 설명하였다. BMA를 통한 분석은 CMAQ 모사 결과 이

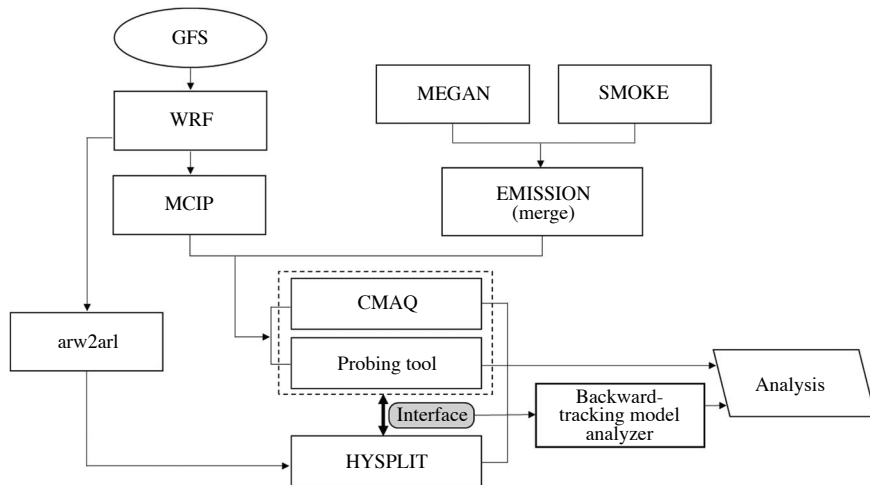


Fig. 2. A schematic plot of modeling procedures of air quality modeling with the Backward-tracking Model Analyzer (BMA).

외에 본 연구에서 사용한 PA와 sulfate tracking를 비롯하여, Brute Force Method(Bartnicki, 1999), Direct Decoupled Method(Hakami *et al.*, 2003), Particle/Ozone Source Apportionment Technique (ENVIRON International Corporation, 2014) 등 다양한 진단모델 결과와 같이 Models-3 I/O 형식 파일에 적용될 수 있다. 본 연구에서 개발된 BMA 방식을 적용할 경우, 농도장 분석과 아울러 진단모델 결과를 활용할 수 있어 공기괴의 이동과정 중 농도 변화과정을 이해하는 데 도움이 된다.

2.3.1 Hybrid approach 배경

오일러리안 모델과 라그랑지안 모델을 병행하여 이용한 대부분의 선행연구에서는 서론에서 설명한 것과 같이 HYSPLIT의 기본 출력 단위인 1시간 간격으로, 각 시점마다 공기괴가 위치한 오일러리안 격자의 정보를 이용한 분석이 이루어졌다. 그러나 이는 궤적상의 모든 격자 정보를 분석에 이용할 수 없다는 제한점이 존재한다. 문제점의 가장 근본적인 이유는 오일러리안 모델과 라그랑지안 모델을 상호 비교함에 있어서, 다른 두 모델 결과 자료의 차원적 특성을 제대로 파악하지 못함에 있다. 즉, 기존 연구에서 사용되어온 단순 자료 매칭 방식은 라그랑지안과 오일러리안 모델의 결과물들을 0차원(점)으로 파악하여, 가장 가까운 거리에

있는 두 점을 매칭하는 방식이다. 하지만 엄밀하게 말하자면 라그랑지안 모델의 결과물은 2차원을 가지는 polyline이며, 오일러리안 모델의 경우 3차원의 특성을 가지는 cubic형의 polygon의 형태를 가지고 있다. 따라서 이러한 다른 차원의 두 결과물을 비교함에 있어서, 각 polyline들이 3차원 polygon의 각 면을 통과하는 지점을 파악함으로써 각 라그랑지안의 궤적이 각 오일러리안 3차원 격자들을 통과하는 거리를 정확하게 계산할 필요가 있다. 또한 계산된 거리로부터 각 공기괴가 각 오일러리안 격자들의 내부에 머무르는 시간(residential time)을 산정하여, 각 공기괴가 경험하게 되는 물리화학적 변화를 정량적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 다른 차원의 자료를 상호 비교하는 근본적인 접근 방식을 제시함으로써 향후 지속적으로 요구되는 고해상도 모델링의 분석에 활용하였다.

2.3.2 Hybrid approach 방법론

앞 절에서 설명한 제한점을 해결하고, HYSPLIT 궤적상의 오일러리안 격자 정보를 추출하기 위하여 hybrid approach를 적용하였다. 해당 방법론을 설명하기 위하여 공기괴의 3차원적 이동을 수평 및 수직 이동으로 구분하여 그림 3에 보였다. 바둑판 모양으로 그려진 그림은 수직 수평에 대한 CMAQ 격자를 의미하며, 점 $P_0 \sim P_2$ 는 HYSPLIT으로부터 얻은 00시, 01시,

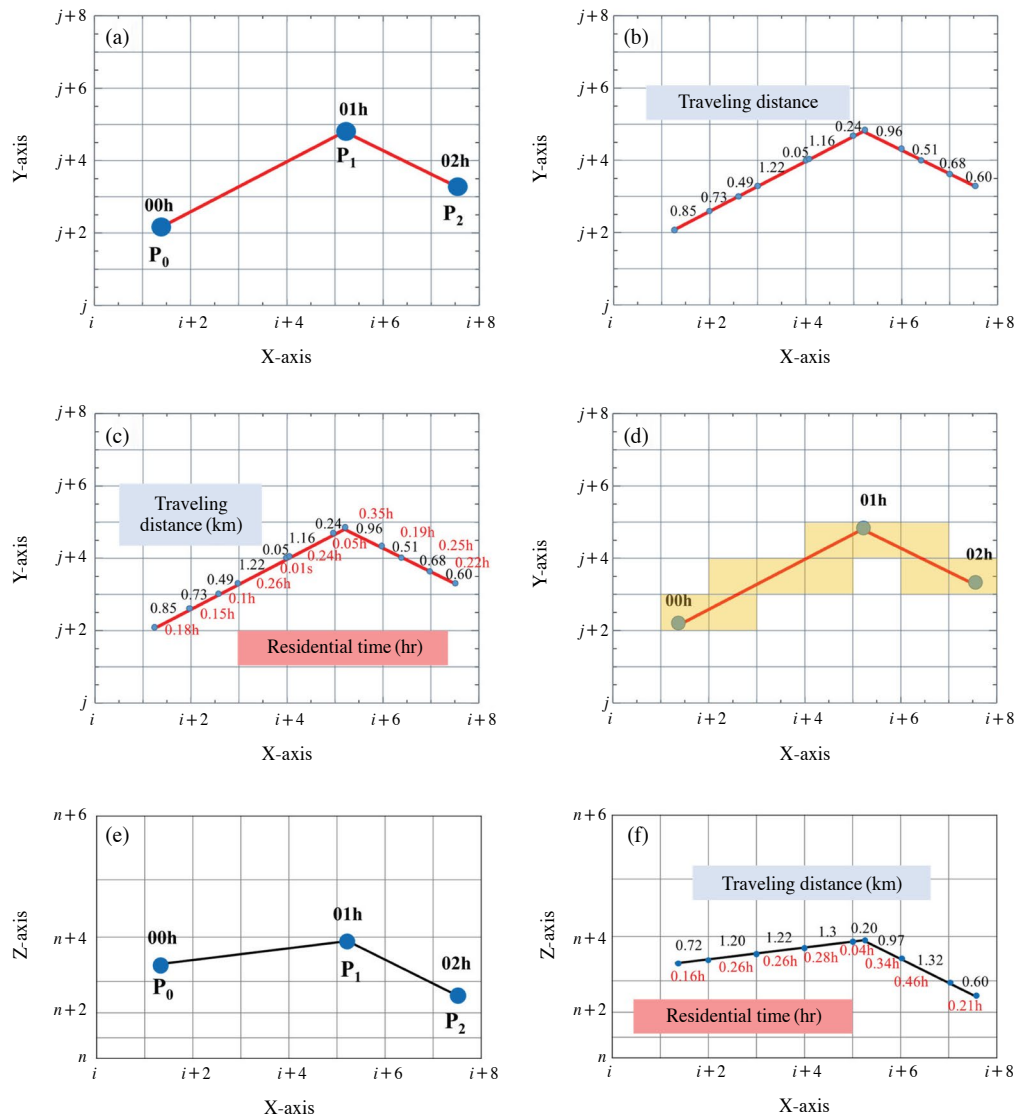


Fig. 3. Conceptual diagrams of multi-dimensional polyline clipping algorithm; (a) Red line represents a trajectory path and blue dots indicate locations of an air parcel at 00 h, 01 h and 02 h, (b) Calculation of traveling distance of the trajectory in each grid cell, (c) Calculation of residential time of the trajectory in each cell, (d) Grid cells that the air parcel has experienced through the trajectory path (during 00 h ~ 02 h), (e) Black line indicates a trajectory movement between vertical layers, (f) Calculations of traveling distance and residential time.

02시 각각의 공기괴 위치를 의미한다. 그리고 매시간 공기괴 위치를 이어 실선으로 궤적을 표시하였다. 그림 3(a)~(d)는 x축과 y축으로의 수평적 움직임, 그림 3(e)~(f)는 x축과 z축상 수직층 간의 이동을 나타내었다. 단, 본 연구에서는 매 1시간 동안은 HYSPLIT에서의 공기괴 이동과 오일러리안 모델에서의 격자별 오염

물질 이동에 영향을 주는 풍향, 풍속 등 기상조건이 동일하다고 가정하였다.

CMAQ 격자와 HYSPLIT 궤적을 공간적으로 포개어 CMAQ 격자상에서의 유적선 궤도의 각 위치를 파악한다(그림 3(a)). 그림 3(a)에서 P_0 는 00시에 유적선의 시작점이며, 공기괴는 00시~01시 1시간 동안 P_0 에

서 P_1 로, 01시~02시 동안 P_1 에서 P_2 로 이동하였다. 앞선 가정에 따라 1시간 동안 공기괴는 유적선을 따라 선형적으로 이동하며 시간 내 속도의 변화 없이 일정하다. 다음 단계로 매시간별 유적선 궤적이 가로지르는 격자들을 파악한다. 그림 3(b)에서는 00시~02시 사이 공기괴가 P_0 에서 P_2 로 이동하는 동안 유적선 상의 어떤 격자를 통과하는지, 시점과 종점 위치 및 개별 격자 내 이동거리를 표시하였다. 이때 이동거리의 단위는 km로 격자 크기에 따라 달라진다.

처음 1시간(00시~01시) 동안 유적선을 따라 움직인 공기괴의 전체 이동거리($P_0 - P_1$)와 개별 격자 내에서의 이동거리를 이용하여 각 격자에서의 체류시간을 산정한다(그림 3(c)). 1시간 내 속도 변화가 없다는 가정을 적용할 경우 격자별 체류시간은 공기괴가 해당 격자를 통과하는 거리에 비례하게 된다. 결과적으로 그림 3(d)와 같이 궤적상의 모든 격자에 대한 정보를 파악하여, 유적선을 따라 이동하는 공기괴를 1시간 단위보다 더 조밀한 시간 해상도에서 분석할 수 있다. 그림 3(e)와 그림 3(f)는 수직으로의 이동을 개념적으로 나타내었으며, 이는 수평적 움직임에 대해 설명한 바와 같은 방식으로 이루어진다. Hybrid approach는 수평 및 수직 이동을 포함하는 3차원 단위에서 이루어지며 시간을 포함하는 multi-dimensional polyline clipping 기법이다(Kim *et al.*, 2016b).

Clipping 기법 기반의 hybrid approach를 이용하면 궤적상의 모든 격자 정보를 파악하고, 이동거리 및 체류시간을 바탕으로 격자 체계의 CMAQ 및 진단모델 결과를 분석할 수 있다. 이 시스템을 이용하면 분석 대상 공기괴 이동경로 상의 CMAQ 격자에 대해 원하는 변수와 진단모델 등의 결과를 적절히 조합하여 이동하는 공기괴를 다양한 시각에서 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 결 과

BMA의 활용성을 검토하기 위하여 중국 산둥지역으로부터 서울로의 장거리 이동 사례와 서해에서 시작되어 충청도 지역을 거쳐 서울로 유입되는 사례에 대하여 BMA를 적용하였다. 분석에 앞서 대상기간 수행한 CMAQ 결과의 신뢰성 확보를 위하여 모사 농도와 관측치 비교를 통한 모델 수행 결과를 평가하였다. 평가 기간은 본 연구의 사례 기간을 포함하고 있는 2015년 2월 1일~2월 15일로 설정하였다. 관측치는 수도권 지역의 81개 측정소 자료를 이용하였으며, $PM_{2.5}$ 의 경우 수도권 지역의 35개 측정소의 자료를 활용하였다. O_3 은 일최대 농도, 그 외 물질은 일평균 농도를 평가하였다. 오염물질별 통계치는 표 2를 참고할 수 있다.

3.1 장거리 이동 사례

3.1.1 장거리 이동 CMAQ 모사

장거리 이동 사례는 수도권 지역에 미세먼지 고농도 현상이 발생한 2015년 2월 10일로, 당일 미세먼지에 대한 국외 기여도가 다소 높게 나타났다. 2월 9일 12시부터 24시간 동안의 PM_{10} , SO_2 , NO_x , NH_3 배출량의 공간 분포를 그림 4에 보였다. 모든 물질에 대하여 중국의 산둥과 북경 지역에 배출량이 높으며, 국내에 대하여 수도권 지역에서 높게 나타났다. 2015년 2월 9일 12시~2월 10일 12시까지 PBL(Planetary boundary layer) 내 PM_{10} , sulfate, nitrate, ammonium의 평균농도를 그림 5에 보였다. 배출량의 분포가 비교적 낮은 그림 5의 A 지역에서 오염물질의 농도가 높게 나타나는 이유는 본문에 나타내지는 않았으나, 2월 9일 전으로 북동풍의 영향을 받아 C 지역에 위치하던 오염물질이 A 지역으로 이동하였기 때문으로 사료된다.

2월 9일 이후 고농도 플룸(plume)은 그림 5(a)에 표

Table 2. Statistics of modeled performance for 27 km modeling results (The number of measuring sites is 81 over Seoul Metropolitan Area except $PM_{2.5}$. The number of $PM_{2.5}$ sites is 35).

	Mean observed concentration ($\mu g/m^3$)	Mean modeled concentration ($\mu g/m^3$)	BIAS ($\mu g/m^3$)	NMB (%)	ERROR ($\mu g/m^3$)	R	IOA
$PM_{2.5}$	30.86	35.08	4.22	13.67	9.66	0.80	0.85
O_3	30.80	32.85	2.05	6.66	6.03	0.31	0.54
NO_2	39.30	22.23	-17.07	-43.44	17.07	0.85	0.62
SO_2	7.33	5.25	-2.08	-28.38	2.09	0.84	0.73

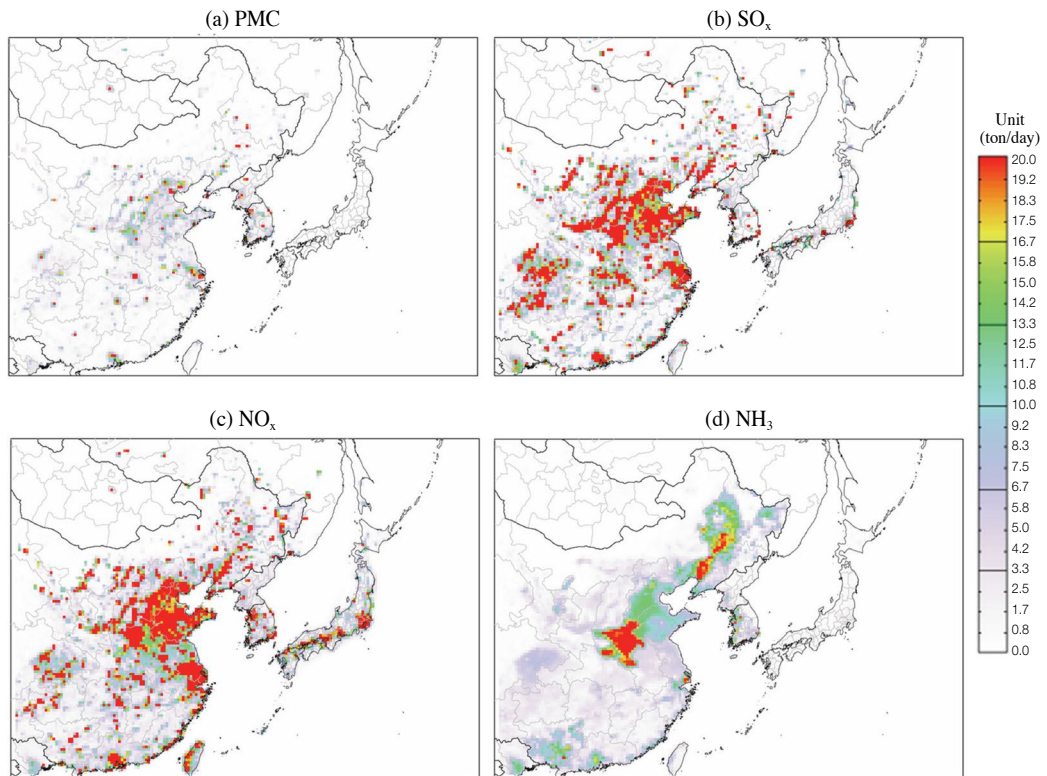


Fig. 4. Spatial distributions of (a) NO_x , (b) SO_2 , (c) NH_3 , and (d) PM_{10} emissions during 12 KST at February 9 to 12 KST at February 10, 2015.

시된 A-B-C 지역을 거쳐 이동하였으며, C 지역에서 서해를 거쳐 국내로 유입되었다. PM_{10} 은 최대 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도를 보였으며, PM_{10} 의 구성성분인 nitrate와 ammonium은 PM_{10} 과 마찬가지로 국내와 인접한 C 지역에서 고농도가 나타났다. 이로 미뤄볼 때 대상기간 초기에 국내로 유입되는 PM_{10} 의 대부분은 nitrate와 ammonium 성분임을 추정할 수 있다. 해당 모델링 사례(2015년 2월 9일~10일)의 경우 nitrate, ammonium의 농도가 sulfate에 비해 상대적으로 높기 때문에 PM_{10} 의 농도 분포가 nitrate, ammonium의 분포를 상당 부분 따르는 것으로 판단된다. Itahashi *et al.* (2016)은 중국으로부터 규슈 지역으로 이동되는 고농도 미세먼지 플룸을 대기 중 습도 조건에 따라 sulfate-rich 사례와 nitrate-rich 사례를 구분하였다. 본 사례는 nitrate-rich 경우로 이해되나, 해당 기간 서해상 NO_2 농도의 과대모사 또는 SO_2 농도의 과소모사 경향 가능성

이 있다. 이는 추후 서해상의 항공관측 및 중국의 관측치 확보를 통해 결과의 신뢰성을 제고할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 5(b)의 sulfate는 플룸 이동방향의 후단에 위치한 A 지역에서 비교적 높은 농도를 보였다. 이를 통해 고농도 공기괴가 계속해서 유입되는 경우, 국내 sulfate 성분의 농도가 점차 증가할 것으로 사료된다.

3.1.2 장거리 이동 사례 HYSPLIT 수행

2015년 2월 10일 12시 서울의 100 m, 500 m, 1000 m 높이의 고도로부터 각 24시간 역궤적을 수행하였다. 각 궤적을 구분하기 위하여 출발 고도로 궤적을 명명하였다. HYSPLIT 수행 결과를 그림 6에 나타내었으며, 이동경로를 6시간 간격으로 A~E로 표시하였다. 세 궤적 모두 중국의 산둥지역에서 서해를 거쳐 국내로 유입되어 유사한 경로를 보이나, 동일 지역을 지

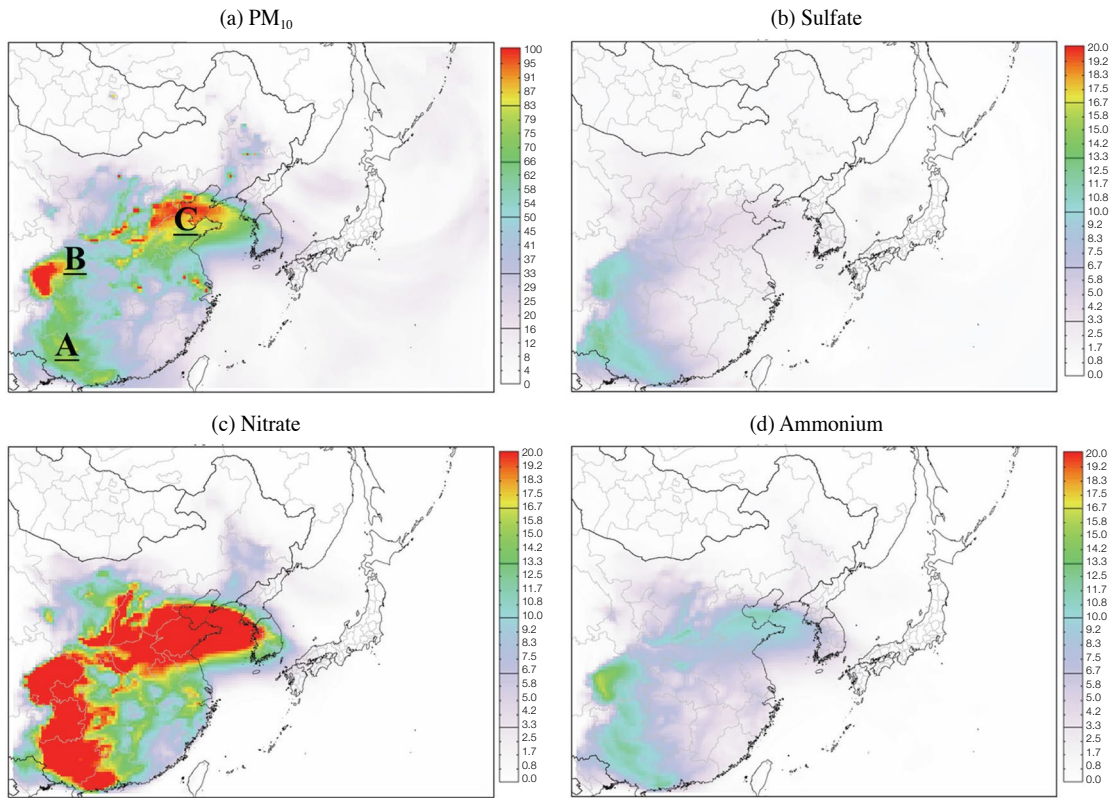


Fig. 5. Spatial distributions of simulated (a) PM_{10} , (b) Sulfate, (c) Nitrate, and (d) Ammonium below PBL height averaged over 12 KST at February 9 to 12 KST at February 10, 2015.



Fig. 6. Backward trajectories arriving in Seoul, Korea at 100 m (red), 500 m (blue), and 1000 m (green) altitudes at 12 KST on February 10, 2015.

나타라도 통과 시점은 서로 차이가 있다. 100 m 궤적은 500 m와 1000 m 궤적보다 동쪽에서 시작되었으나 서해상으로 공기괴가 유입된 시간은 유사했으며, 서해를 거쳐 한반도 내륙으로 진입하는 시간은 약 2시간 빠르게 나타났다.

3.1.3 장거리 이동 경로상 농도분석

그림 6의 궤적에 대해 BMA를 적용하였다. 각 궤적의 유적선상의 모든 격자를 파악하고, 매시간 동안 통과한 모든 격자의 오염물질 농도를 추출하여 1시간 평균하여 그림 7에 나타내었다. 모든 구성성분의 합은

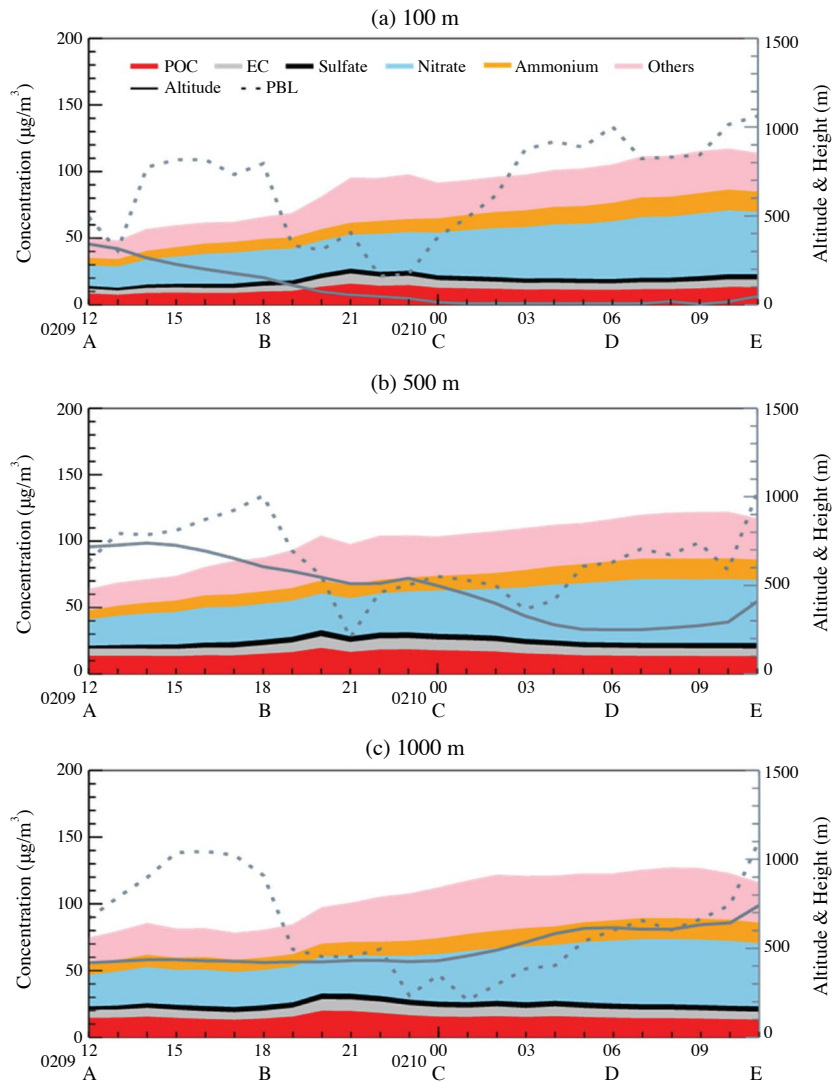


Fig. 7. Time series of PM components (i.e. POC, EC, sulfate, nitrate, ammonium and other components) of the air parcels arriving in Seoul at 100 m (upper), 500 m (middle), and 1000 m (lower) for CASE 1. Gray line indicates altitude change during air parcel moving. Gray dotted line is for PBL height at the cell on which an air parcel is located.

PM₁₀으로, 개별 오염물질은 POC (Primary Organic Carbon), EC (Elemental Carbon), sulfate, nitrate, ammonium 및 그 외 물질(others)에 대해 분석하였다. 그림 7에서 실선은 유적선 이동과정에서의 고도 변화를, 점선은 PBL 높이를 나타낸다. 시간에 따른 위치를 A~E로 표시하였으며, 지도상 위치는 그림 6에서 확인할 수 있다.

중국 내륙의 A~B 지점을 지나는 동안 모든 궤적은

PBL 이하의 높이에서 이동하였으므로 공기괴는 지상에서 직접 배출되거나 대기 중에서 생성된 대기오염물질과 함께 이동한 것으로 추정할 수 있다. C~E 지점은 모든 궤적이 서해상으로부터 국내로 유입되며 밤 시간을 제외하고는 PBL 내에서 이동하고, 이로 인해 활발한 수직이류가 나타났을 것으로 추측된다.

세 궤적은 국내로 유입되는 과정에서 PM₁₀ 농도가 증가하였다. 공기괴가 산동반도에 위치하는 2월 9일

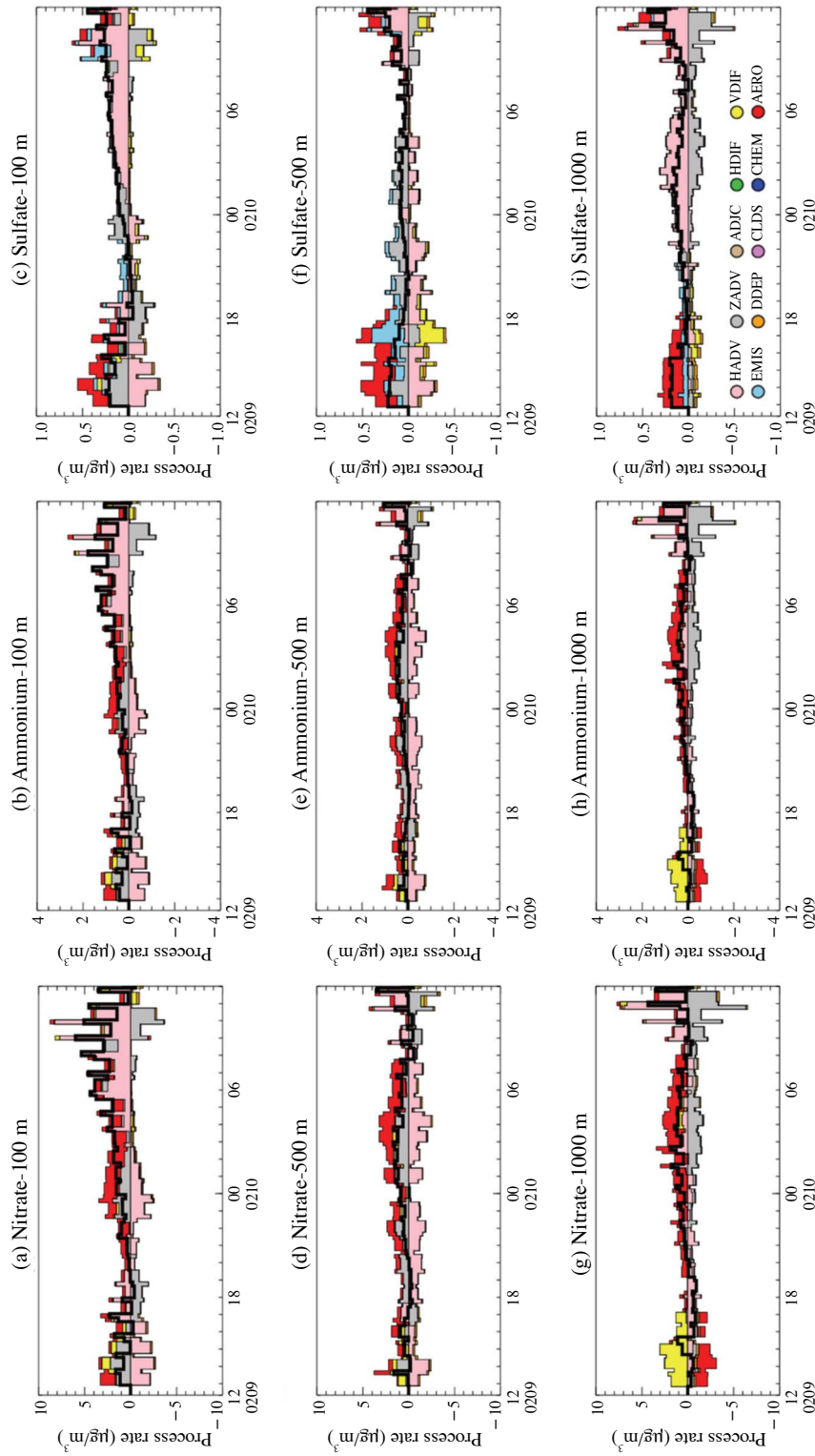


Fig. 8. Time series of physical and chemical processes in the formation (and removal) of sulfate (upper), ammonium (middle), and nitrate (lower) during the pathways arriving in Seoul at 100 m (left), 500 m (middle), and 1000 m (right). HADV (Horizontal advection, gray), ZADV (Vertical advection, pink), HDIF (Horizontal Diffusion, green), VDIF (Vertical Diffusion, yellow), EMIS (Emission, sky blue), CLDS (Cloud process, purple), CHEM (Chemical process, blue) and AERO (Aerosol formation, red) are shown.

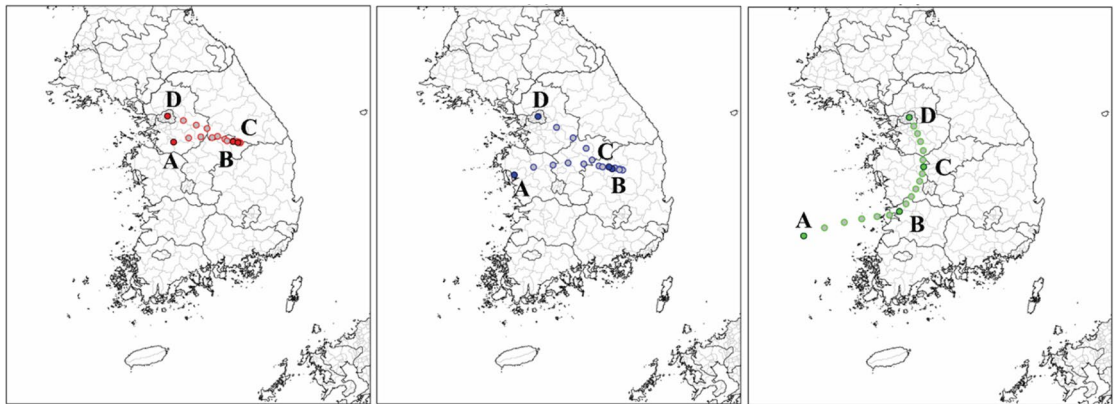


Fig. 9. Backward trajectories arriving in Seoul at 100 m (left), 500 m (middle) and 1000 m (right) altitudes at 21 KST on February 15, 2015.

12시 100 m, 500 m, 1000 m 각 궤적에 대하여 PM_{10} 농도는 $50.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $63.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $74.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 100 m, 500 m 궤적의 경우 궤적이 중국에서 출발한 직후부터 서울에 도착하기까지 농도가 점차 증가하여 서울에 도달하였을 때 $114.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $117.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높아졌다. 1000 m 궤적은 2월 9일 18시 B 지점 이후 PM_{10} 농도가 증가하기 시작해 서울에 도착하였을 때 $116.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 세 궤적은 서울로 이동하는 동안 PM_{10} 농도가 약 $31 \sim 64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였다. 이러한 농도 증가는 특히 nitrate, ammonium, 그리고 others 성분에 대하여 뚜렷하게 나타났으며, 서로의 증감 경향이 유사하였다.

이처럼 본 연구에서 개발된 시스템을 이용할 경우, 통상의 공간분포 분석으로부터 미세먼지 고농도 공기괴가 이동하여 국내에 영향을 주는 것으로 유추할 수 있는 것과는 달리 중국으로부터 공기괴가 이동 중 농도가 점차 증가한 과정을 확인할 수 있다.

3.1.4 장거리 이동경로상 물리·화학 과정분석 적용

PM_{10} 성분 중 2차 오염물질인 nitrate, ammonium, sulfate에 대하여 어떤 물리·화학 과정이 농도 변화에 영향을 주는지 살펴보기 위하여 IPR 결과에 BMA를 적용하였다. 다만, 본 결과는 일정한 수직층 평균 농도를 확인하기 위한 예시로 CMAQ의 1층부터 10층까지의 고도별 IPR 변수를 평균하였다.

그림 8은 각 오염물질에 대한 IPR 결과로 공기괴가 각 격자에 머무는 시간 동안 물리·화학 과정에 의한

농도 변화를 나타내었으며, 개별 오염물질 농도가 어떤 과정에 의해 변화했는지 확인할 수 있다. 물리·화학 과정 변수는 수평이류(HADV), 수직이류(ZADV), 이류과정을 위한 질량 보존 보정(ADJC), 수평확산(HDIF), 수직확산(VDIF), 배출량(EMIS), 건식침적(DDEP), 구름과정(CLDS), 가스상 화학반응(CHEM) 그리고 에어로졸 과정(AERO)를 포함한다. 그림 8에서 검정색 굵은 실선은 모든 물리·화학 과정의 합으로 이동과정 중의 농도 변화로 설명될 수 있다.

그림 8(a)~(b), 그림 8(d)~(e), 그림 8(g)~(h)에 나타난 100 m, 500 m, 1000 m 궤적의 nitrate와 ammonium의 농도 변화는 궤적을 따라 이동하는 동안 에어로졸 과정에 의한 양의 기여가 지속적으로 나타났다. 이는 중국으로부터 국내로 유입되는 공기괴가 서해상을 지나는 도중 NO_2 가 nitrate로 전환되는 동시에 가스상 NH_3 또한 입자상으로 흡수되기 때문으로 예상된다. 다만 앞서 언급하였듯, 보다 정확한 분석을 위해서는 서해상 관측치 확보를 통한 비교가 이루어져야 할 것이다. 그림 8(c)에 100 m 궤적에 대한 sulfate의 경우 궤적이 서해상을 이동하는 동안 수평이류에 의한 양의 기여가 주요하게 나타났다. 또한 배출량에 의한 영향이 나타나는 것을 보아 sulfate의 경우 중국의 오염원을 지나면서 배출원에 의한 기여가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

500 m 궤적의 결과(그림 8(d)~(f)), IPR의 각 변수의 기여 패턴은 100 m 궤적과 유사하게 나타났다. 이는

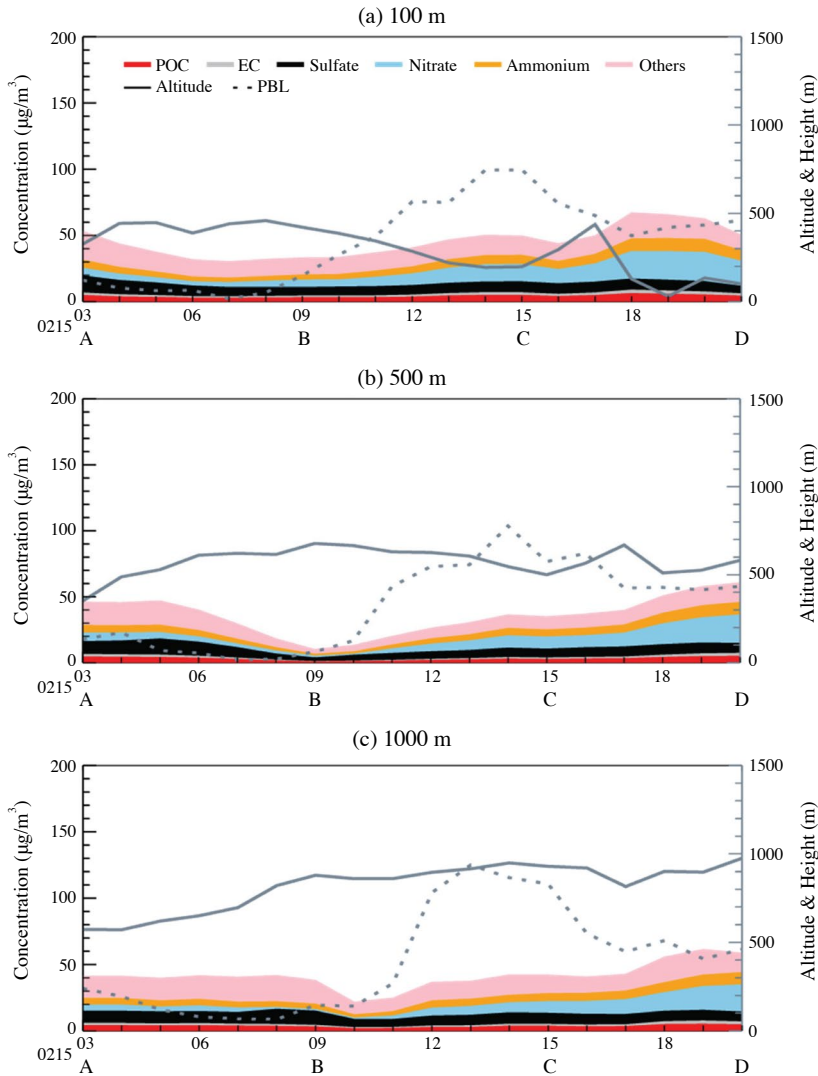


Fig. 10. Time series of PM components (i.e. POC, EC, sulfate, nitrate, ammonium and other components) of the air parcels arriving in Seoul at 100 m (upper), 500 m (middle) and 1000 m (lower) for CASE 2. Gray line indicates altitude change during air parcel moving. Gray dotted line is for PBL height at the cell on which an air parcel is located.

100 m 궤적과 500 m 궤적이 비교적 유사한 지역을 지나며, 시간대가 1~2시간 차이로 큰 차이가 없기 때문에 사료된다. 100 m 궤적에 비하여 중국의 오염원에 비교적 오래 머물기 때문에 sulfate에 대하여 배출량에 의한 직접적인 영향이 보이며(그림 8(f)), 에어로졸 과정에 의한 농도 증가가 비교적 크게 나타났다.

그림 8(g)~(i)의 1000 m 궤적은 100 m, 500 m와 서해를 지나오는 동안 변수들의 기여도 패턴은 유사하

지만 공기가 중국에 위치하는 동안 nitrate와 ammonium에 대한 에어로졸 과정 및 수평이류의 음의 기여와 수직확산에 의한 양의 기여가 나타났다. 해당 위치에서는 에어로졸 과정 및 수평 이류에 의한 nitrate와 ammonium의 농도 감소가 나타남에 따라 분석층(1~10층) 내외에서 농도차에 의해 상층으로부터 수직 유입이 발생하는 것으로 사료된다.

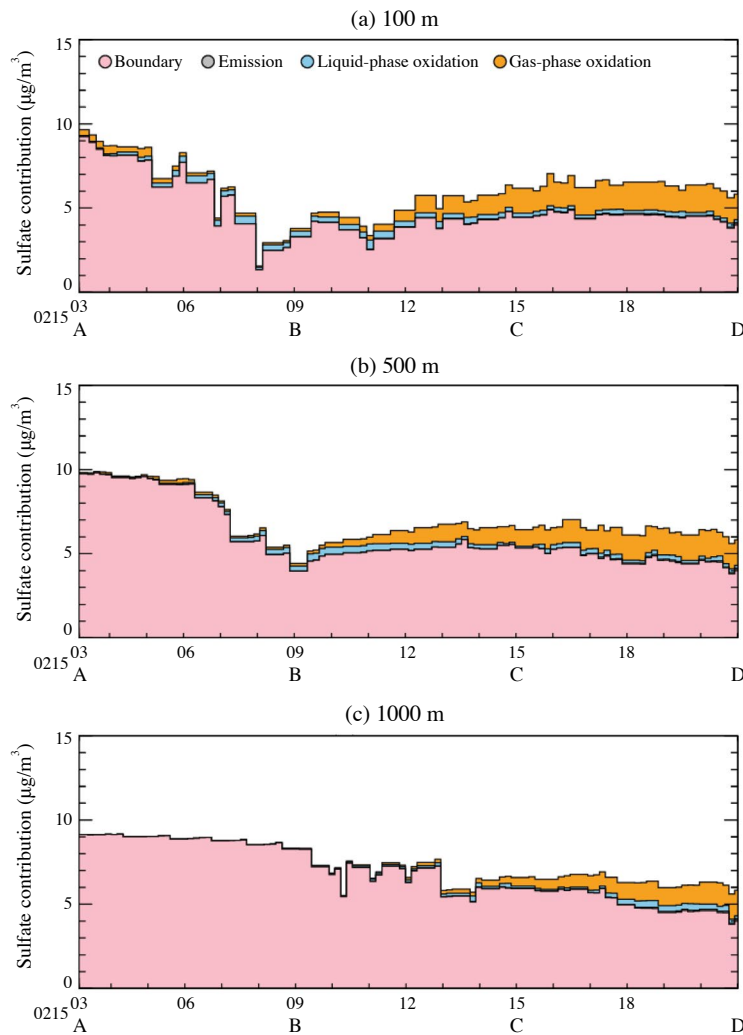


Fig. 11. Time series of sulfate tracking analyses for CASE 2.

3.2 국내 순환 사례

3.2.1 국내 순환사례 HYSPLIT 수행

대상기간은 2015년 2월 15일 03시~21시로 서해로부터 유입된 공기괴가 국내 지역을 일정 거리 이상 이동한 후 서울로 유입되는 사례에 대해 분석하였다. 2015년 2월 15일 21시 서울의 100 m, 500 m, 1000 m 고도로부터 18시간 후방으로 HYSPLIT을 수행하였으며, 각 궤적은 그림 9에 나타내었다. 100 m와 500 m의 경우 유사한 모양으로 서해상에서 시작하여 충청지역과 경기도 일대를 지나 서울로 유입되었다. 반면 1000

m 궤적의 경우 서해상에서 시작되어 충남지역을 거쳐 서울로 유입되었다. 본 기간 동안 오전에는 바람이 정체하였고 서해상에서 불어오는 남서풍의 영향을 받았다. 2월 15일 12시 이후 우리나라 동쪽부터 점차 바람의 세기가 강해져 밤 시간에는 대부분의 지역에서 5 m/s 이상의 풍속을 보이며, 동풍의 영향으로 대기가 서해상으로 이동하였다.

3.2.2 국내 이동경로상 농도분석

100 m, 500 m, 1000 m 세 고도에 대해 BMA를 적용하였다. 세 궤적이 서울로 유입되는 동안의 공기괴 농

도 변화를 그림 10에 나타내었다. 시간에 따라 6시간 간격으로 A~D로 표시하였으며, 그림 9의 A~D와 같은 위치상에 있다. 공기괴가 이동하기 시작하는 A~B 지점, 03시~09시에는 PBL 높이가 매우 낮았다. 09시 이후 기온이 점차 높아짐에 따라 PBL 높이가 높아져 100 m 궤적의 경우 PBL 내에서 이동하였다.

100 m, 500 m, 1000 m 공기괴가 서해상에서 국내로 유입되었을 때 PM_{10} 의 초기 농도는 약 $40 \sim 55 \mu g/m^3$ 사이의 농도를 보였으며 이후 서울로 이동하는 과정에서 nitrate 농도 증가가 뚜렷하게 나타났다. 이는 수도권 지역의 높은 NO_x 배출량으로 인한 HNO_3 가 증가와 내륙의 암모니아 농도 등의 영향으로 인한 HNO_3 의 nitrate로의 빠른 전환이 영향을 주는 것으로 사료되며 (Kim *et al.*, 2017), 추후 관측자료 확보 시 정확한 원인 파악이 가능할 것이다. 그림 10에 나타난 sulfate 농도는 궤적 내 농도가 $10 \mu g/m^3$ 이상이었으며, 세 궤적에 대하여 B 지점 전후로 nitrate와 ammonium보다 높은 농도를 보였다.

3.2.3 국내 이동경로상 sulfate tracking 분석 적용

그림 10에서 나타난 sulfate 농도 변화 원인을 분석하고자 sulfate tracking 결과를 BMA에 적용하였다. 초기 및 경계장, 직접 배출, 액상 산화, 가스상 산화로 sulfate의 생성 과정을 구분하여 그림 11에 궤적에 따른 sulfate tracking 결과를 보였다.

세 궤적을 살펴보면 A 지점은 서해상 또는 서해와 인접하여 모사영역의 경계 격자와 가깝게 위치한다. 이로 미뤄볼 때 모사영역의 서쪽 경계조건 영향을 크게 받는 것으로 판단되며, 중국 등 국외로부터의 sulfate 유입 가능성을 고려할 수 있다. 특히 그림 11(c)의 1000 m 궤에서 공기괴가 서해상에 위치하여 국내로 유입되는 B 지점 이전까지는 국내에서 생성된 sulfate가 매우 적음을 확인할 수 있다.

그림 11의 100 m, 500 m, 1000 m 모든 결과로부터 경계장에 의한 sulfate를 제외한 모사영역 내에서 생성된 sulfate는 액상산화에 의한 생성이 최대 $0.5 \mu g/m^3$, 가스상 산화에 의한 생성은 최대 $2 \mu g/m^3$ 를 보였다. 또한 배출량에 의한 직접적 영향은 매우 작게 나타났다. 이로부터 모사영역 내에서 생성된 sulfate는 대부분 가스상 산화과정에 의해 생성된 것임을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 공기괴의 이동과정 중 대기오염물질의 농도변화 과정을 분석하기 위하여 라그랑지안 모델과 오일러리안 모델을 병합하여 분석할 수 있는 BMA를 구축하였다. BMA는 hybrid approach를 활용하여 공기괴의 수직과 수평이동 및 시간을 포함하는 4차원 단위에서 궤적상의 모든 격자정보를 이용한 분석이 가능하다. BMA를 이용한 활용방안을 모색하기 위하여 수도권에 도달하는 중국으로부터의 장거리 이동 사례와 국내 순환 사례를 분석하였다. 3차원 CMAQ 모델 결과를 이용한 HYSPLIT의 유적선에 따른 시간별, 위치별 농도를 추출하였으며, 유적선의 출발 높이에 따른 공기괴의 이동 및 농도 변화의 차이를 확인하였다. 특히 장거리 이동 사례의 IPR 분석 결과를 통해 공간 분포만으로는 확인할 수 없는 공기괴의 이동에 따른 대상 물질의 생성과 소멸에 대한 자세한 정보를 살펴 보았다. IPR 결과를 BMA에 적용하여 nitrate와 ammonium에 대하여 공기괴가 이동하는 과정에서 서해상에 위치하는 동안 에어로졸 반응에 의한 생성을 통해 PM_{10} 농도 증가에 기여함을 확인하였다. 이에 반하여 sulfate의 경우 중국 또는 국내 육상에서의 에어로졸 반응에 의한 생성이 특징적으로 나타남을 보였다. 서해로부터 충청도를 거쳐 서울로의 공기괴 유입 사례에 대하여 sulfate tracking 결과를 적용하였다. 본 사례 동안 궤적상에 나타나는 sulfate 농도는 액상산화에 의한 생성보다는 가스상 산화에 의한 결과로 생성된 농도가 주요함을 확인하여 국내 sulfate 생성의 중요한 기작을 구분할 수 있었다.

본 시스템은 대기질 모사 결과를 활용하여 유적선 궤적을 따라 이동하는 공기괴에서의 대기오염물질의 농도 변화를 분석할 수 있으며, 농도 변화를 해석함에 있어서 다양한 진단모델 결과를 활용하여 상세한 정보를 보다 다양한 시각에서 검토할 수 있는 토대를 마련하였다. 본 연구에 사용된 PA, sulfate tracking 외에 다양한 진단모델 결과를 활용한 분석이 가능하며, 이는 궤적이 위치한 지역의 농도 형성 및 변화과정을 이해하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

향후 연구로 유적선 분석 시 입력되는 출발 지점의 위경도, 고도, 모델 옵션, 기상장 입력자료 등에 따라 궤적이 상당히 달라질 수 있으므로 보편화된 분석 결

과를 도출할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 보다 다양한 농도 및 진단 모사결과를 병합하여 적용하면 대기 질 모사 및 과정분석, 예보 등 여러 측면에서 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 미래창조과학부/한국연구재단 지원 초미세먼지 피해저감 사업단(NRF-2014M3C8A5030624)의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Bartnicki, J. (1999). Computing source-receptor matrices with the EMEP Eulerian Acid Deposition Model. EMEP MSC-W Note, 5, 99.
- Benjey, W., M. Houyoux, and J. Susick (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3, US EPA.
- Byun, D.W. and K.L. Schere (2013) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System, Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689-1699.
- Chou, M.D. and M.J. Suarez (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. Memo, 104606(3), 85.
- Draxler, R.R., B. Stunder, G. Rolph, and A. Taylor (1999) HYSPLIT4 user's guide, NOAA Technical Memorandum ERL ARL, 230, 35.
- ENVIRON International Corporation (2014) User's guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions Version 6.1. http://www.camx.com/files/camxusersguide_v6-10.pdf (accessed 2016.12.13.)
- Godowitch, J.M. and R.R. Draxler (2006) Linking the CMAQ and HYSPLIT Modeling Systems: Interface Program and Example Application, In 5th Annual CMAS Conference, Chapel Hill, NC.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 6(1), 107-173.
- Hakami, A., M.T. Odman, and A.G. Russell (2003). High-order, direct sensitivity analysis of multidimensional air quality models. Environmental Science & Technology, 37(11), 2442-2452.
- Hong, S.Y., J. Dudhia, and S.H. Chen (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Monthly Weather Review, 132(1), 103-120.
- Hong, S.Y., Y. Noh, and J. Dudhia (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review, 134(9), 2318-2341.
- Itahashi, S., I. Uno, K. Osada, Y. Kamiguchi, S. Yamamoto, K. Tamura, Z. Wang, Y. Kurosaki, and Y. Kanaya (2016) Nitrate transboundary heavy pollution over East Asia in winter, Atmospheric Chemistry And Physics Discuss, doi:10.5194/acp-2016-879.
- Jo, H.Y. and C.H. Kim (2010) Characteristics of East Asia Synoptic Meteorological Conditions in Association with Haze phenomena, Korean Meteorological Society, 20(2), 161-172. (in Korean with English abstract)
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, Journal of Applied Meteorology 43, 1170-1181.
- Kim, B.G., J.S. Han, and S.U. Park (2001) Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea, Atmospheric Environment, 35(4), 727-737.
- Kim, H.C., P. Lee, L. Judd, L. Pan, and B. Lefer (2016b) OMI NO₂ column densities over North American urban cities: the effect of satellite footprint resolution, Geoscientific Model Development, 9(3), 1111-1123.
- Kim, H.C., S. Kim, S.W. Son, P. Lee, C.S. Jin, E. Kim, B.U. Kim, F. Ngan, C. Bae, C.K. Song, and A. Stein (2016c) Synoptic perspectives on pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model, Atmospheric Chemistry And Physics Discuss, doi:10.5194/acp-2016-673.
- Kim, S., C. Bae, B.U. Kim, and H.C. Kim (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(2), 139-158. (in Korean with English abstract)

- Kim, S., H.C. Kim, B.U. Kim, C. Bae, E. Kim, S. You, M. Bae, O. Kim, and C. Park (2016a) CMAQ Simulation Study to Analyze the Long-term Variations of Criteria Air Pollutants in the Seoul Metropolitan Area during 2004~2015, 17th IUAPPA World Clean Air Congress and 9th CAA Better Air Quality Conference Clean Air for Cities Perspectives and Solutions.
- Kim, W.S. (2014) Management Plan of Fine Dust ($PM_{2.5}$) in Seoul, Policy Report, (182): The Seoul Institute, 1-19. (in Korean)
- Leem, J.H., S. Kim, and H.C. Kim (2015) Public-health impact of outdoor air pollution for 2 nd air pollution management policy in Seoul metropolitan area, Korea, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27(1), 7.
- Li, M., Q. Zhang, J. Kurokawa, J.H. Woo, K.B. He, Z. Lu, T. Ohara, Y. Song, D.G. Streets, G.R. Carmichael, Y.F. Cheng, C.P. Hong, H. Huo, X.J. Jiang, S.C. Kang, F. Liu, H. Su, and B. Zheng (2015). MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects, *Atmospheric Chemistry And Physics Discuss*, 15, 34813-34869, doi:10.5194/acpd-15-34813-2015.
- Mitchell, K., M. Ek, D. Lohmann, F. Chen, G. Gayno, B. Moore, and Y. Lin (2002) The community Noah land surface model (LSM)-User's guide. In *Proceedings of 15th AMS conference on hydrology*. American Meteorological Society, 180-183.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- MOE (2013) The 2nd stage of air quality management plan over the Seoul Metropolitan Area.
- Park, R.J. and S. Kim (2014) Air Quality Modeling in East Asia?: Present Issues and Future Directions, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 105-120.
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X. Huang, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125.
- Yu, S., R. Mathur, D. Kang, K. Schere, and D. Tong (2009) A study of the ozone formation by ensemble back trajectory-process analysis using the Eta-CMAQ forecast model over the northeastern U. S. during the 2004 ICARTT period, *Atmospheric Environment*, 43(2), 355-363.
- Zhang, Z., X. Zhang, D. Gong, S.J. Kim, R. Mao, and X. Zhao (2016) Possible influence of atmospheric circulations on winter haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, northern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(2), 561-571.