

동북아시아 대기오염물질의 이동 패턴에 따른 장거리 수송 특성 연구

Characteristics of Long-Range Transport of Air Pollutants due to Different Transport Patterns over Northeast Asia

박 신 영 · 김 연 중 · 김 철 희*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공

(2011년 11월 4일 접수, 2012년 2월 28일 수정, 2012년 3월 9일 채택)

Sin-Young Park, Yun-Jong Kim and Cheol-Hee Kim*

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 4 November 2011, revised 28 February 2012, accepted 9 March 2012)

Abstract

This paper investigates the physical and chemical characteristics of long-range transport (LRT) process of air pollutants by employing the MM5-CMAQ and its comparison with local emission dominant (LED) case over northeast Asia. We first classified high air pollution days into LRT and LED cases based on the synoptic meteorological variables of vorticity and geostrophic wind speed/direction at a geopotential level of over 850hPa. LRT cases are further categorized into three types of transport patterns (LRT-I~III) according to the air mass pathways from source regions. LRT-I~III are originated from northern, central, and southern China, respectively, identified by back trajectory analysis.

Three LRT-I~III groups have different and unique locations of high pressure and transport pathways. The chemical characteristics showed that the simulated spatial distributions varied in terms of locations of maximum concentrations and the temporal variation of surface concentrations. The primary air pollutants such as NO_x , PM_{10} and SO_2 of all of three LRT cases are well transported into Korea peninsula with different concentration levels. Of LRT cases, LRT-II has the greatest effect on air quality of Korea peninsula, followed by LRT-I and LRT-III. In comparison with LRT, the LED case shows relatively higher air pollution concentrations in general, but showed a variety of different air quality levels following the emission strength pattern. These widely varying patterns are implying the case dependent multi-directional approach for the development of indicators of long-range transport process over northeast Asia.

Key words : Long-range transport, Transport patterns, Northeast Asia, Air quality

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-510-3687, E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

1. 서 론

한 지역의 대기오염물질은 자체 오염원에서 배출되는 오염물질에 의해 결정될 뿐만 아니라 외부에서 배출된 오염물질의 장거리 이동 및 확산에 의해서도 영향을 받는다. 특히 우리나라는 지리적 특성상 동북아시아 및 중국의 풍하측에 위치하여, 중국을 포함한 풍상측 지역에서 과다 배출된 인위적인 오염물질과 몽골 등 황사 발원지에서 수송된 자연적인 오염물질의 영향을 직·간접적으로 받고 있다. 결국 두 메카니즘, 즉 자체 배출량이 우세한 경우와 장거리 이동의 기여도가 많은 경우는 각각 우리나라 배출 저감 정책이 다르게 다루어져야 하는 만큼, 각 메카니즘의 기여도 분석 등의 연구가 체계적으로 이루어져야 한다. 지금까지의 대기오염 장거리 이동에 관한 국내 연구들은 대부분 장기간의 자료에 바탕을 둔 연속적인 연구가 아닌 특정 사례에 대한 분석적 연구가 주로 이루어진 경우가 많았다. 예컨대 Kang *et al.* (1993)의 경우 유적계산을 통한 장거리 이동 시간 연구, Kim *et al.* (1999), Han *et al.* (2006, 2004), Song *et al.* (2009)의 서해 상공 항공관측 및 분석, Park (2003)의 군집 분석을 통한 대기오염물질의 이동 및 침적에 대한 모델링 연구 등 다양한 방법으로 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 대부분 수용지 관점에서 볼 때, 장기간의 측정 자료 분석과 모델링 연구를 병행한 통계적인 배출원-수용지 관계 (source-receptor relationship)를 규명하기보다는 특정 사례의 화학성분 분석 혹은 분석 당시의 물리적 특성 분석 결과이므로 장기간의 평균적 영향이 반영된 연구가 필요하다. 따라서 이러한 연구 결과들을 포함하면서 여러 연구 결과 및 자료의 추적 및 요약, 통계적인 장거리 이동 정량적 기여도 산출 연구 등의 연구가 필요하며, 나아가 이러한 장기간의 자료 분석을 통해 우리나라에서 활용할 수 있는 배출원-수용지 관계, 혹은 장거리 수송 지시자(indicator) 산출 등의 연구가 가능하다.

본 연구는 동아시아에서 보다 보편적으로 발생할 수 있는 사례 중심의 장거리 수송현상을 분류하여 그 특징을 파악함으로써 장거리 이동 지시자 발굴 연구를 위한 기초 자료를 제공할 목적으로 수행되었다. 우리나라에 적용 가능한 장거리 이동 지시자를 발굴하기 위해서는 동북아시아 도메인에서 장거리 이동

이 우세한 사례와 자체 대기오염 배출량이 우세한 사례를 구분하고 두 사례간 대기오염물질의 비(ratio)가 상대적으로 높은 파라미터를 후보군으로 선정하는 것이 유리하다. 결국 장거리 이동 지시자 연구는 필연적으로 장거리 수송 우세 사례와 그렇지 않은 사례로 분류한 결과에 따라 지시자 발굴 연구의 승패가 좌우된다고 볼 수 있어서, 장거리 수송 우세 사례를 선정하는 방법과 선정된 사례의 특성을 연구하는 것은 대단히 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 장거리 수송 우세 사례와 정체성 우세 사례로 구분하는 방법을 기술하고, 구분된 사례별로 MM5-CMAQ 모델링을 수행하여 대기오염물질의 물리·화학적 이동 특성과 대기오염물질의 공간 분포를 파악하고자 한다. 따라서 본 연구를 통해, 상시 관측이 불가능한 중국과 아울러 한반도 서해상에서 대기오염물질의 공간분포 특성을 이해할 수 있을 뿐만 아니라, 풍상측 대기오염 배출지역별 대기오염물질의 화학적 특성, 이동 경로에 따른 대기오염물질의 물리적 특성을 정량적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 향후 동북아시아에서 적용할 수 있는 장거리 이동 지시자 발굴을 위한 적용 가능한 방법 또한 고찰하였다.

2. 연구방법 및 자료

2.1 대기오염 사례일 선정

본 연구는 대기오염이 심한 사례일을 선정하기 위해 2000~2010년 동안 서울과 인천의 통합대기환경지수를 사용하였다. 통합대기환경지수(Comprehensive Air-quality Index, CAI)는 대기오염도 측정치를 대중들이 알기 쉽게 하고 대기오염의 피해 예방 및 행동지침을 전달하기 위해 인체의 유해성 및 피해 정도를 고려하여 개발된 대기오염도 표현방식이다(손정석 등, 2008). 이 때 통합 지수 값이 높을수록 대기오염이 심하고 통합 지수 값이 낮을수록 대기오염으로 인한 피해의 정도가 낮음을 나타낸다. 표 1은 통합 지수 계산에 필요한 변수를 나타낸 것으로 통합대기환경지수를 계산하기 위해 각 오염물질의 지역별 일 평균값으로 다음의 식(1)과 표 1을 이용하여 대기 지수 점수를 계산하였다(<http://www.airkorea.or.kr/>). 이 때 각 오염물질의 지수 중 가장 점수가 높은 점수를

Table 1. CAI of several standard air pollutant concentrations.

CAI	Pollutant concentration			
	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (ppm)	PM ₁₀ (μg/m ³)
50	0.020	0.030	0.040	30
100	0.050	0.060	0.080	80
150	0.100	0.150	0.120	120
250	0.150	0.200	0.300	200
350	0.400	0.600	0.500	300
500	1.00	2.000	0.600	600

통합 지수 값으로 사용하였으며 서울과 인천의 통합 지수 값이 공통으로 100 이상이 되는 날을 대기오염 사례일로 선정하여 본 연구 대상으로 설정하였다.

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + I_{LO} \quad (1)$$

여기서 I_p 는 대상 오염물질의 대기 지수 점수를, C_p 는 대상 오염물질의 대기 중 농도를, BP_{HI} 와 BP_{LO} 는 대상 오염 물질의 오염도 해당 구간에 대한 최대·최소 오염도를, I_{HI} 와 I_{LO} 는 BP_{HI} 와 BP_{LO} 에 해당하는 지수값(구간 최대·최소 지수값)을 나타낸다.

2.2 이동 경로에 따른 장거리 수송사례 분류

선정된 대기 오염이 심한 날은 Jo and Kim (2010)의 방법에 따라 먼저 LED 사례와 LRT 사례로 분류하였다. 이 방법은 사례 분류시 30여개의 중관 기상 변수 중에서 한반도 상공 850 hPa 와도 (vorticity, $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$)와 지균풍속이 사례 분류에 중요한 변수임을 준경험적으로 제시한 바 있으며, 그 결과 850 hPa 와도가 (+)이면서 지균풍속이 강한 날(예: 지균풍속이 4m/s 이상인 날)은 LRT 사례로, 그리고 850 hPa 와도가 (-)이면서 지균풍속이 약한 날(예: 지균풍속이 4m/s 이하인 날)은 LED 사례로 분류한 방법을 이용하였다. 이 때 와도의 부호가 (-)인 것은 한반도 상공 고기압이 존재한다는 것을, 그리고 지균풍속이 적다는 것은 결국 한반도 상공의 기압 시스템의 이동 속도가 느리다는 것을 의미한다. 와도와 지균풍속은 우리나라 중부지역인 37.5°N, 127.5°E에 중앙 격자점을 잡고 주변 4개 격자점을 이용하여 와도 및 지균풍의 동서(u_g) 및 남북(v_g) 성분을 구하여 지균풍속 ($|V_g| = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$)을 구하였다.

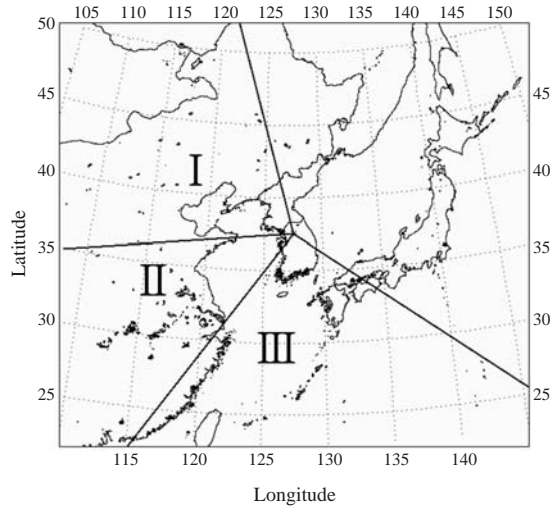


Fig. 1. Sub-divided regions for the classification of the air mass pathways.

LRT 사례는 배출원의 특성에 따라 장거리 수송된 대기오염물질의 농도 분포와 그 영향이 확연히 구분된다는 항공 관측 결과(Song *et al.*, 2009)에 근거하여, 본 연구에서는 LRT 사례를 Kim (2010)의 방법으로 기류의 이동 패턴에 따라 크게 3 경우로 재분류하였다. Kim (2010)은 수용지인 한반도에서 중국 오염원, 우리나라, 그리고 그 외 지역의 영향을 구분하기 위하여 공기 궤의 이동패턴을 사용하였으며, Moon *et al.* (2005), Kim *et al.* (2007) 등이 사용한 방법도 이와 유사하다. 본 연구에서도 LRT 사례를 공기의 역궤적 추적을 통해 그림 1에서 구분된 3개의 배출원 별로 구분하였다. 역궤적 추적은 HYSPLIT-4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하여 우리나라 중부지역인 37.5°N, 127.5°E에서 사례일의 12UTC를 기준으로 이전 4시간씩 6개의 48시간 공기의 이동패턴을 추적한 결과를 이용하였다. 즉 6개의 궤적 중 4개 이상의 궤적이 하나의 구분 지역에 해당하는 경우 해당 지역을 주요 배출원으로 보았다. 배출원의 위치에 따라 중국 북부, 북동부 또는 러시아에서 기원하여 발해만 연안을 거치는 지역을 I지역(이하 ‘LRT-I 사례’), 중국 중·남부 지역의 공업단지를 거치는 지역을 II지역(이하 ‘LRT-II 사례’), 중국과 일본 사이의 해양에서 기원하여 한반도의 남해상을 거치는 지역을 III지역(이하 ‘LRT-III

사례’)으로 나누었다(그림 1). I지역은 베이징과 요녕성 지역을 포함한 대도시 및 공업도시가 위치하여 비교적 큰 오염원을 가지고 있고 몽골과 고비사막이 있어 자연적 배출원에 의한 오염원을 동반한다. II지역의 경우 산동성 지역과 상해지역을 포함한 중국의 최대 공업지역으로서 급속한 경제 성장으로 인해 인위적인 대기오염원의 주요 배출원이라 할 수 있다. III지역은 대부분 해양으로 오염원이 크지 않지만 중국 남부지역의 공업단지과 인접하여 해양에서 기원하는 기류라도 오염원을 완전히 배제하지 않은 지역으로 볼 수 있다.

결론적으로 각 4사례; LED, LRT-I, LRT-II, LRT-III에 나타난 물리·화학적 특성을 개략적으로 분석하고, 몇 가지 오염물질의 공간분포, 시계열 변화 등을 논하여 동북아시아 장거리 수송 지시자를 개발하는데 기초 자료로 사용하고자 한다.

2.3 사용된 자료

본 연구에서는 대기오염이 심한 날에 국한하여 자체 오염 배출량이 우세한 사례(이하 ‘LED; Local Emission Dominant 사례’)와 장거리 수송의 기여도가 우세한 사례(이하 ‘LRT; Long-range Transport 사례’)로 구분하고, 사례별 모델링 연구를 통해 그 특성을 파악하는 것을 주요 내용으로 한다. 이 때 대기오염이 심한 사례일을 선정하기 위해 환경부에서 운영 중인 서울(27개 측정소)과 인천(15개 측정소)에 소재한 도시 대기 측정망 자료 중 2000년부터 2010년의 시간별 PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ 농도 자료를 사용하였다. 또한 장거리 이동과 연관된 지수를 추정하고 이를 검증하기 위한 자료로 고산과 태안에 소재한 국가 배경농도 측정망의 시간별 NO₂, CO 농도 자료를 동일한 기간에 대하여 사용하였다. 이동 경로 및 종관 기상 패턴을 비교 연구하기 위해 기상청에서 제공하는 지상 및 850 hPa 일기도를 사용하였고 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료로부터 대상 지역의 지상 및 상층 기상요소를 추출하였다.

장거리 대기오염물질의 이동경로에 따른 물리·화학적 특성을 살펴보기 위하여 미국 환경보호국의 Community Multi-Scale Air Quality (CMAQ ver. 4.6)를 사용하였고, 기상장 입력 자료는 중규모 모델인

MM5 (The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model, ver. 3.7)를 사용하였다. 기상장의 초기자료는 NCEP의 FNL (Final operational global analysis data) 재분석 자료를 사용하였다. 대기오염물질의 주 발생원을 장거리 수송과 연관시키는 관점에서 동북아시아 지역(위도 15~52°N, 경도 82~160°E)을 대상으로, 모델링 도메인 격자수는 90×60개이고 격자간격은 60 km로 하였으며 연직으로 23개 층의 격자를 설정하였다. CMAQ 모델 수행의 기체상 화학 메커니즘은 CB-IV/Aero3 mechanism이 사용되었으며 모델 수행을 위해 사용한 배출량 자료는 INTEX-B (Zhang *et al.*, 2009) 자료를 사용하였다. 모델 수행 시간은 각 사례일에 해당하는 날짜의 3일 전부터 수행하여 총 96시간씩을 수행하였고 모델 수행 결과는 spin-up time 1일을 제외한 3일에 대하여 분석하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 사례일 선정 및 기상 분석

본 연구기간 동안 통합대기환경지수에 의해 구분된 대기오염 사례일은 황사일을 제외 하면 모두 513일로서 LED 사례 330일, LRT 사례 170일로 나타났고, 기타 분류되지 않은 날은 13일로 나타났다. 사례별 와도의 평균과 표준편차를 구해본 결과, LRT 사례는 평균 $7.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 표준편차 $6.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 로 저기압성 와도를 주로 나타내었고 LED 사례는 평균 $-7.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 표준편차 $5.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 의 강한 고기압성 와도를 나타내었다. 모델링 수행을 위한 사례일 분류는 LED 사례와 LRT 사례 간의 극단적 차이를 나타내기 위하여 그 기준을 LED 사례의 경우 와도 평균 ($-7.82 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) 이하, 지균폭속 2 m/s 이하로, 그리고 LRT 사례의 경우 와도 평균 ($7.01 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) 이상, 지균폭속 5.5 m/s 이상이 나타난 날을 대표일로 선정하였다.

그림 2는 대표일로 선정된 LRT-I~III 및 LED 사례의 850 hPa 일기도를 나타낸 것이다. 그림 2의 (a), (b), (c)는 LRT-I~III 사례, 그리고 (d)는 LED 사례일의 일기도이다. 그림 2의 (a)와 (b)의 LRT-I~II 사례에서는 공통적으로 티베트고원 지역과 한반도의 남쪽 해상지역에 고기압 중심이, 그리고 러시아 동부 지역 및 오호츠크해 지역에 저기압 중심이 위치하고

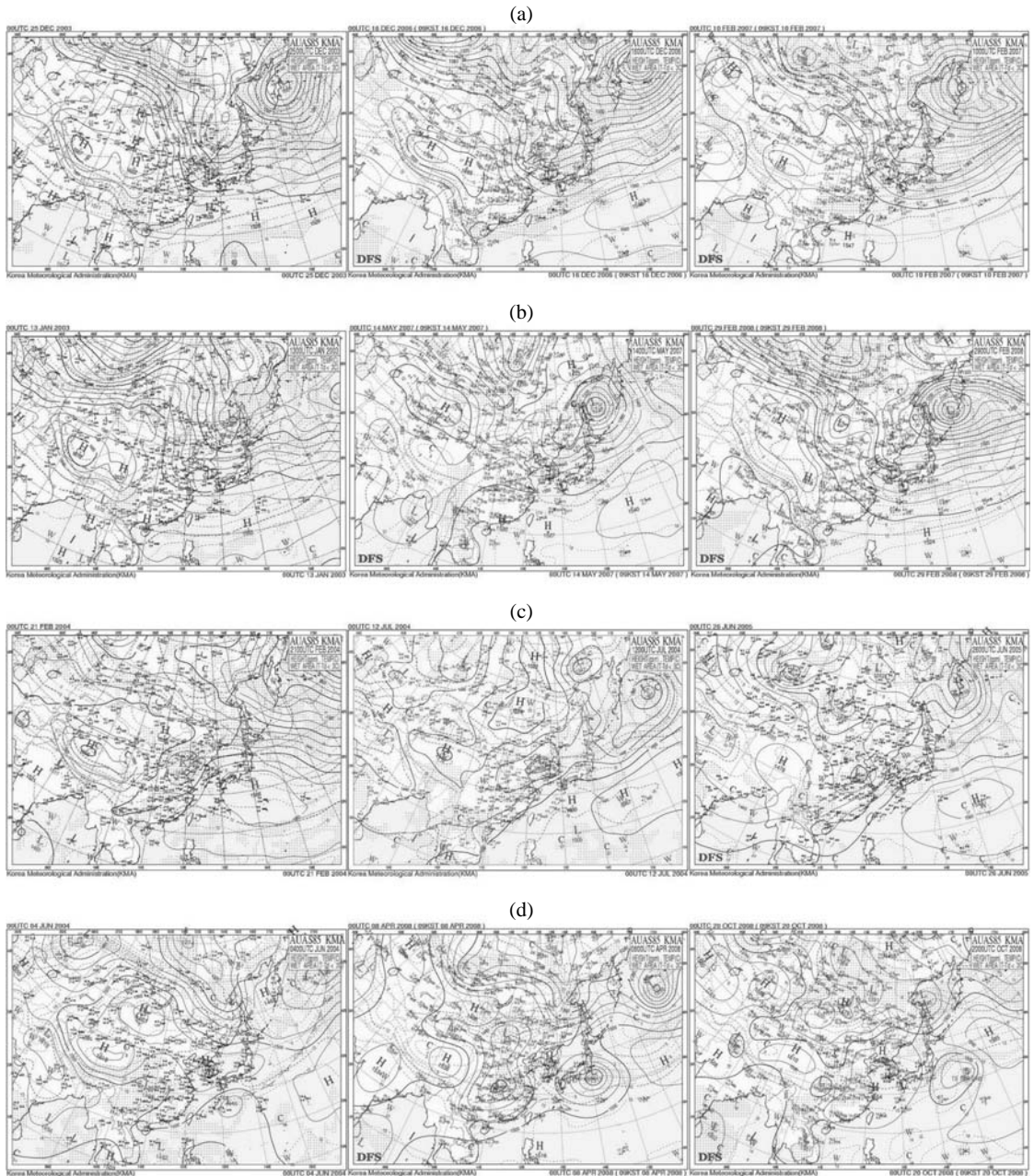


Fig. 2. Typical Synoptic weather charts on 850 hPa 00UTC for high air pollution days for (a) LRT-I, (b) LRT-II, (c) LRT-III, and (d) LED case.

있어 한반도 지역에 등압선 간격이 좁게 형성되어 풍상측에서 이동성 기류를 타고 한반도로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그림 2(c)의 LRT-III 사례에서는 티

베트고원 지역과 일본 남쪽 북태평양 지역에 고기압이, 그리고 그 사이 중국 남동부 지역과 한반도 서해상에 강한 저기압이 위치해 한반도의 남쪽 해상에서

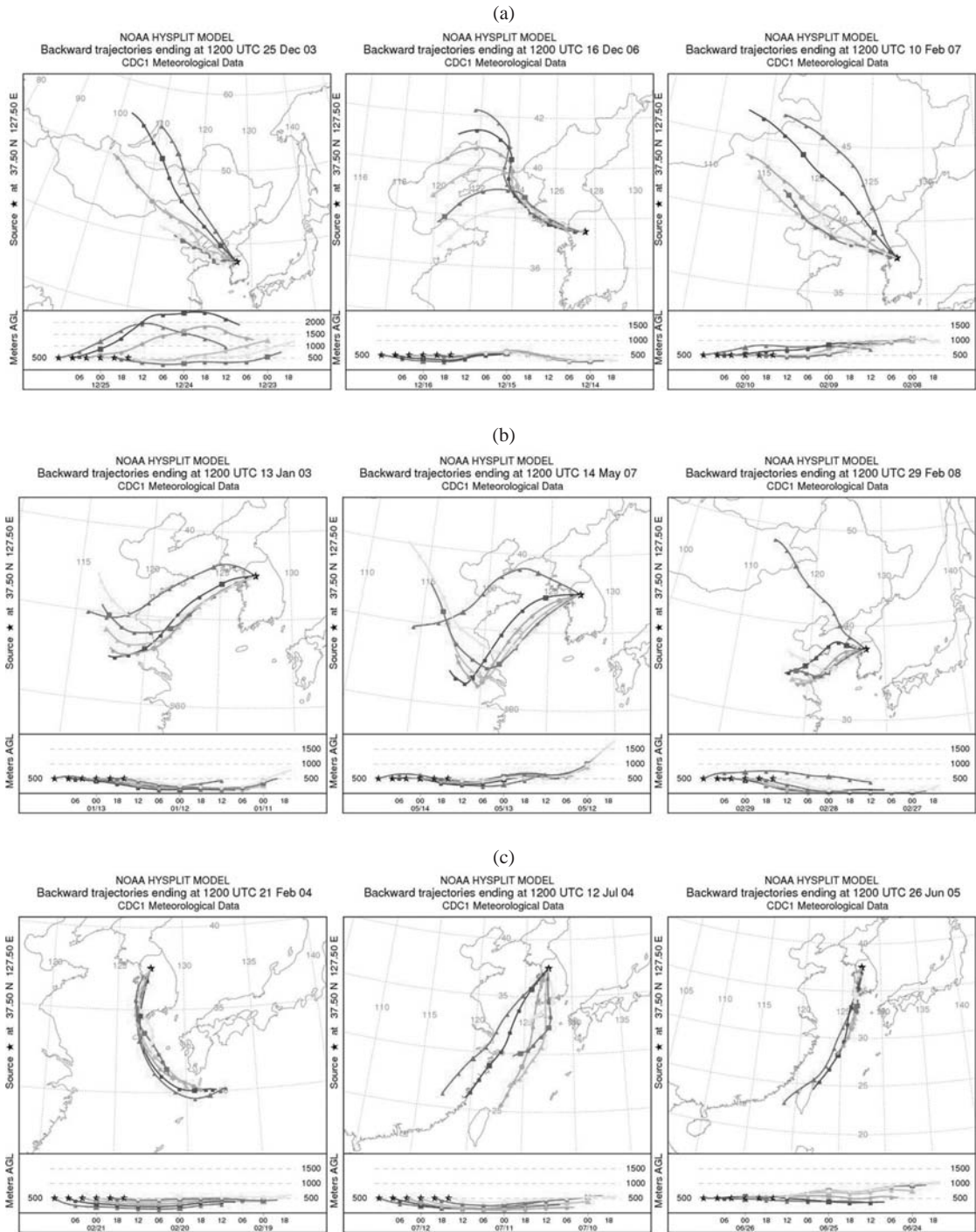


Fig. 3. Backward trajectories for three groups of long-range transport starting from 37.5° N, 127.5° E. (a), (b) and (c) are classified according to the transport patterns originated from Region I (a), Region II (b) and Region III (c), respectively.

Table 2. Summary of meteorological variables and CAI for the classified cases.

	Vorticity ($\times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)	Geostrophic wind speed (m/s)	Geostrophic wind direction	CAI for Seoul	CAI for Incheon
LRT-I case					
2003.12.25	11.7	8.82	292°	221.1	166.1
2006.12.16	12.3	5.63	268°	102.8	115.9
2007.02.10	18.6	6.49	305°	128.5	116.9
LRT-II case					
2003.01.13	22.6	6.14	308°	219.7	119.6
2007.05.14	9.3	5.92	284°	173.6	154.0
2008.02.29	14.9	6.78	286°	115.7	110.3
LRT-III case					
2004.02.21	30.5	8.95	252°	131.8	132.0
2004.07.12	23.3	6.56	234°	109.2	118.4
2005.06.26	19.9	7.65	217°	124.9	112.6
LED case					
2004.06.04	-16.1	1.54	249°	109.4	126.6
2008.04.08	-16.7	1.26	38°	101.4	104.0
2008.10.20	-14.6	0.22	180°	163.9	160.8

강한 이동성 기류를 타고 우리나라에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그림 2(d)의 LED 사례에서는 한반도 지역에 강한 고기압이 자리 잡고 있으며, 이러한 고기압의 영향으로 안정적인 기류가 정체되어 있음을 확인 할 수 있다.

그림 3은 선정된 대표일의 LRT 사례의 역궤적 분석을 나타낸 그림이다. 그림 3의 (a)는 LRT-I 사례로서, 2003년 12월 25일과 2007년 2월 10일은 모두 몽골에서 기원하여 발해만 연안을 지나 한반도에 영향을 미치는 유사한 역궤적을 보였고, 2006년 12월 16일은 중국 북동부 지역에서 기원하여 발해만 연안을 지나 한반도 서해상을 따라 이동하는 역궤적을 보였다. 그림 3(b)는 LRT-II 사례로서, 중국에서 기원하여 고 배출 지역인 중국의 동해안 공업지대로부터 기류가 유입되었음을 알 수 있다. 그림 3의 (c)는 LRT-III 사례로서 2004년 2월 21일은 일본 규슈지방 해상으로부터 한반도의 남해상을 거쳐 기류가 유입되었고, 2004년 7월 12일과 2005년 6월 26일에는 중국 대륙을 거의 거치지 않고 중국 동쪽 해상을 따라 기원하여 한반도의 남해상을 지나 영향을 미치는 궤적을 보였다.

아울러, 그림으로 제시하지는 않았으나, 지균폭속이 2 m/s 이하이고 음의 와도를 보이며 한반도 전역이 안정한 고기압권의 영향을 받은 날들인 2004년 6

월 4일, 2008년 4월 8일, 2008년 10월 20일을 LED 사례의 대표일로 선정하여 각 사례별로 모델링을 수행하였다. 최종적으로 모델링 연구를 위한 사례의 대표일을 LED 사례 3일, LRT 사례는 각각 3일씩 총 9일로 선정하여 모델링을 수행하였으며, 각 선정된 대표일의 특성은 표 2에 요약하였다.

3. 2 대기오염물질 농도의 공간분포

3. 2. 1 일평균 공간분포

각 사례의 대표일에 동북아시아 지역에 대한 대기오염물질의 공간분포를 살펴보기 위하여 MM5-CMAQ 모델링 수행 결과를 공간 분포로 나타내었다. 그림 4는 각 사례별 특징이 가장 뚜렷한 날의 NO_x , PM_{10} , SO_2 , O_3 , SO_4^{2-} 의 일평균 지상 농도 분포를 나타낸 그림이다. 그림 4의 (a)와 (b)는 각각 LRT-I 사례인 2007년 2월 10일과 LRT-II 사례인 2008년 2월 29일의 지상 농도 분포이다. 두 사례에서 공통적으로 대기오염물질이 중국 대륙과 황해상을 거쳐 한반도로 유입되는 현상을 보였고 1차 오염물질이라 할 수 있는 NO_x 와 SO_2 는 집중 배출 지역의 고농도 현상과 장거리 수송으로 인한 확산 효과를 뚜렷이 확인 할 수 있었다. 2차 오염물질인 O_3 와 SO_4^{2-} 의 농도는 두 사례에서 비슷한 분포를 보이며

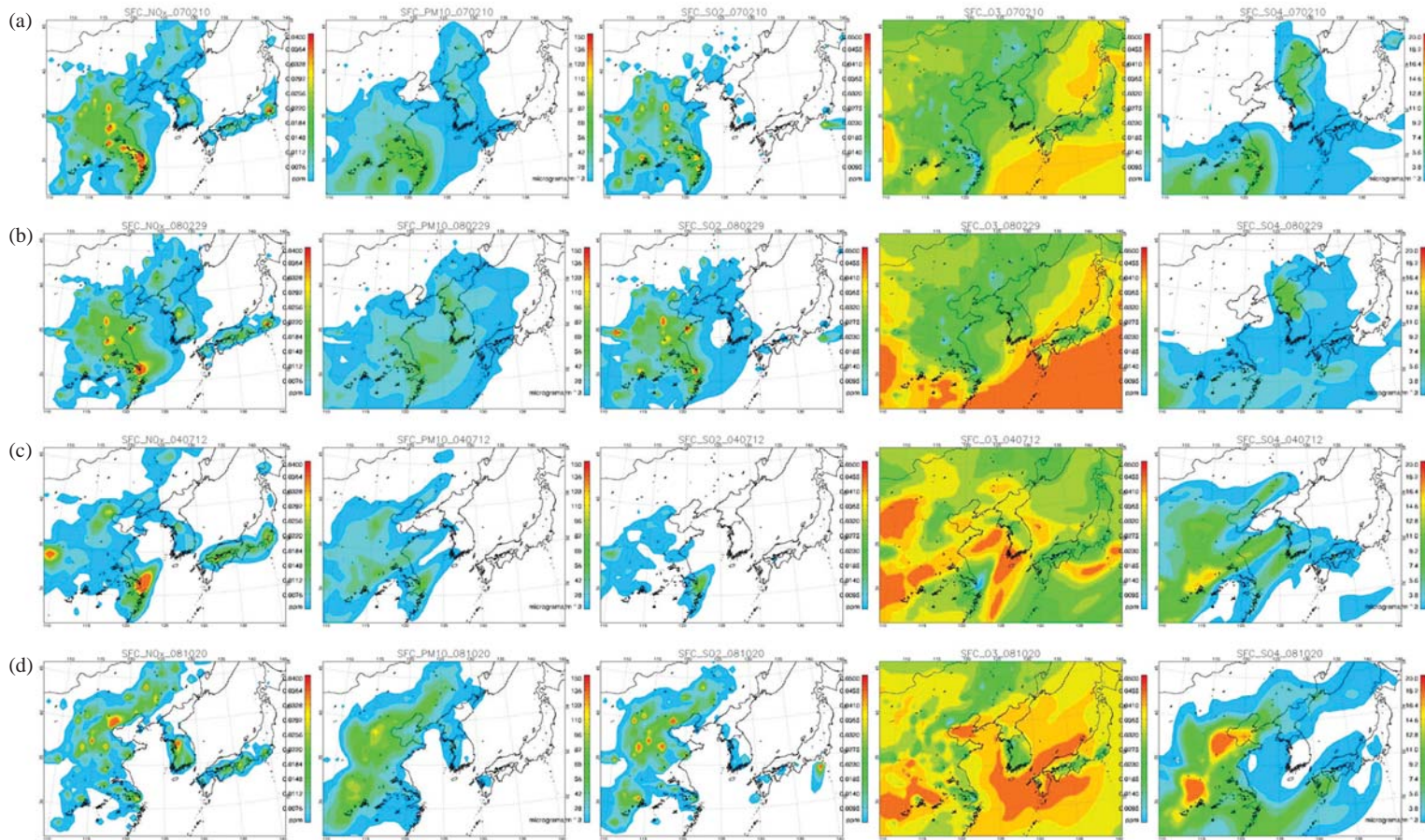


Fig. 4. Horizontal distributions of several surface daily mean concentrations for NO_x (1st column), PM_{10} (2nd column), SO_2 (3rd column), O_3 (4th column), and SO_4^{2-} (5th column) for typical LRT (I ~ III), and LED cases. The 1st, 2nd, and 3rd rows indicate (a) 10 Feb. 2007 (as a LRT-I case) (b) 29 Feb. 2008 (as a LRT-II case), (c) 12 Jul. 2004 (as a LRT-III case, and (d) 20 Oct. 2008 (as a LED case).

그 분포가 중국 남동부 지역과 한반도의 남해상에 걸쳐 넓게 연결되어 나타났다. 이는 1차 오염물질의 장거리 수송과정에서 광화학반응에 의해 주로 생성된 것으로 판단된다. PM₁₀ 또한 LRT-I~II 사례 모두 대기오염물질의 장거리 수송 효과를 확인 할 수 있으나 한반도 내륙과 중국 남동부 지역을 중심으로 고농도가 넓게 분포하는 유사한 패턴을 보여 장거리 이동경로에 따른 두 사례간의 비교는 일평균 지상 농도 분포로 그 차이를 확인하기는 어려웠다(그림 4a~b). LRT-III 사례(그림 4c)에서는 중국 남동쪽 해안에 위치한 공업지대에서 배출된 오염물질이 한반도의 서해상이 아닌 중국 남동해안 지역을 따라 한반도의 남해상으로 장거리 수송되는 특징을 보여, LRT-I~II에서 모의된 서해상을 중심으로 넓게 모의된 대기오염물질의 공간분포 특징(그림 4a 및 4b)과는 뚜렷하게 다른 양상을 보였다. LED 사례일인 2008년 10월 20일의 경우(그림 4d) LRT 사례와 달리 고농도가 나타나는 지역이 고 배출원 지역인 중국 내륙 및 주요 산업도시에 위치하였고, NO_x와 SO₂는 중국 발해만, 산둥성, 한반도 수도권을 중심으로 고농도가 분포하였다. PM₁₀는 발해만 연안을 중심으로 국지적인 고농도 현상을 보이며 장거리 수송의 효과를 확인 할 수 없었고 O₃는 주요 대도시 지역에서 농도가 비교적 낮고 한반도를 둘러싼 해상을 따라 고농도를 나타내었다(그림 4d).

이상의 결과로 볼 때 LRT 사례와 LED 사례에서 대기오염물질의 공간 분포와 그 농도 차이가 뚜렷하게 구분됨을 확인하였고 이동경로에 따른 대기오염물질의 장거리 수송 특성도 구분 할 수 있었다. 이는 장거리 수송되는 오염물질들의 대기화학 반응과 대도시 중심의 정체된 공기에서 일어나는 반응의 결과가 다르다는 것을 뜻하며, 장거리 수송되어 한반도로 유입하는 대기오염물질 또한 기류의 이동, 즉 배출원의 특성에 따라 뚜렷하게 구분된다는 것을 모델링 결과를 통해 확인하였다.

3.2.2 시간별 공간분포

각 사례별 대기오염물질의 이동과 확산 경로를 더 자세히 비교하기 위해 각 사례별 6시간 간격 지상 농도 분포를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 5에 각 사례의 대표일(2007년 2월 10일, 2008년 2월 29일, 2004년 7월 12일, 2008년 10월 20일)의 3, 9, 15,

21KST에 대한 NO_x의 지상 농도 분포를 나타내었다. 공통적으로 고 배출원인 중국공업단지를 중심으로 NO_x의 농도가 높게 나타났고 각 사례에서 기류의 이동에 따라 농도 분포가 이동하였음을 확인할 수 있고, 일변화 또한 공통적으로 15KST에 농도가 감소함을 보였다. 그림 5(a)는 LRT-I 사례로서 몽골 및 중국 북동쪽으로부터 발해만 연안을 거쳐 오는 기류에 따라 NO_x가 장거리 수송 되어 한반도의 서해상에서 그 농도 분포가 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)의 LRT-II 사례는 높은 배출지역으로부터 NO_x가 한반도의 서해상을 통해 유입되어 한반도를 거치는 농도 분포가 확인되었고 이는 역계적 분석으로 살펴본 기류의 이동경로에 따라 NO_x가 이동하고 있다는 것과는 일치하였다. 그림 5(c)는 LRT-III 사례로서 중국의 동쪽 해안을 따라 한반도의 남해상을 거쳐 NO_x가 이동하는 분포를 보였고, LRT-I~II와 정성적으로 비교해 볼 때 장거리 수송 효과가 상대적으로 적은 것으로 사료된다. 그림 5(d)는 LED 사례로서 시간에 따른 분포의 변화는 거의 없음을 확인 하였고 LRT 사례와 비교해 볼 때 한반도 수도권지역에서의 고농도 특성이 외부 지역보다 더 상대적으로 두드러진 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 각 사례별 PM₁₀의 지상 농도 분포의 변화를 나타낸 것이다. 대부분 그 결과가 그림 5의 NO_x의 농도 분포 변화와 유사하게 나타났고 다만 NO_x에 비해 장거리 수송의 효과를 더욱 뚜렷하게 확인할 수 있다. LRT-I 사례(그림 6a)는 시간에 따라 PM₁₀의 농도 분포가 한반도의 서해상과 한반도를 거쳐 한반도의 남동쪽으로 이동하는 것을 보이며 한반도의 서해상에 농도 분포가 감소함을 확인하였다. LRT-II 사례(그림 6b)에서는 PM₁₀의 농도가 중국대륙과 한반도 전반에 걸쳐 넓게 고농도로 분포하며 한반도의 동해상으로 지나감을 보였고 그림 6(a)와 (c)에 비해 풍상측으로부터 이동하는 대기오염물질의 영향을 가장 지속적으로 받고 있음을 나타냈다. LRT-III 사례(그림 6c)는 시간이 지남에 따라 PM₁₀의 농도가 한반도로 유입되는 것으로 나타났고 LRT-I~II(그림 6a 및 6b)에서 나타난 고농도 분포에 비해 배출원 지역의 상대적으로 낮은 배출량으로 인하여 장거리 수송 효과 또한 적게 모의되었다. LED 사례(그림 6d)는 PM₁₀의 농도가 국지적인 영향에 의해 분포하고 있음을 보이며 고농도의 분포가 중국의 남동부

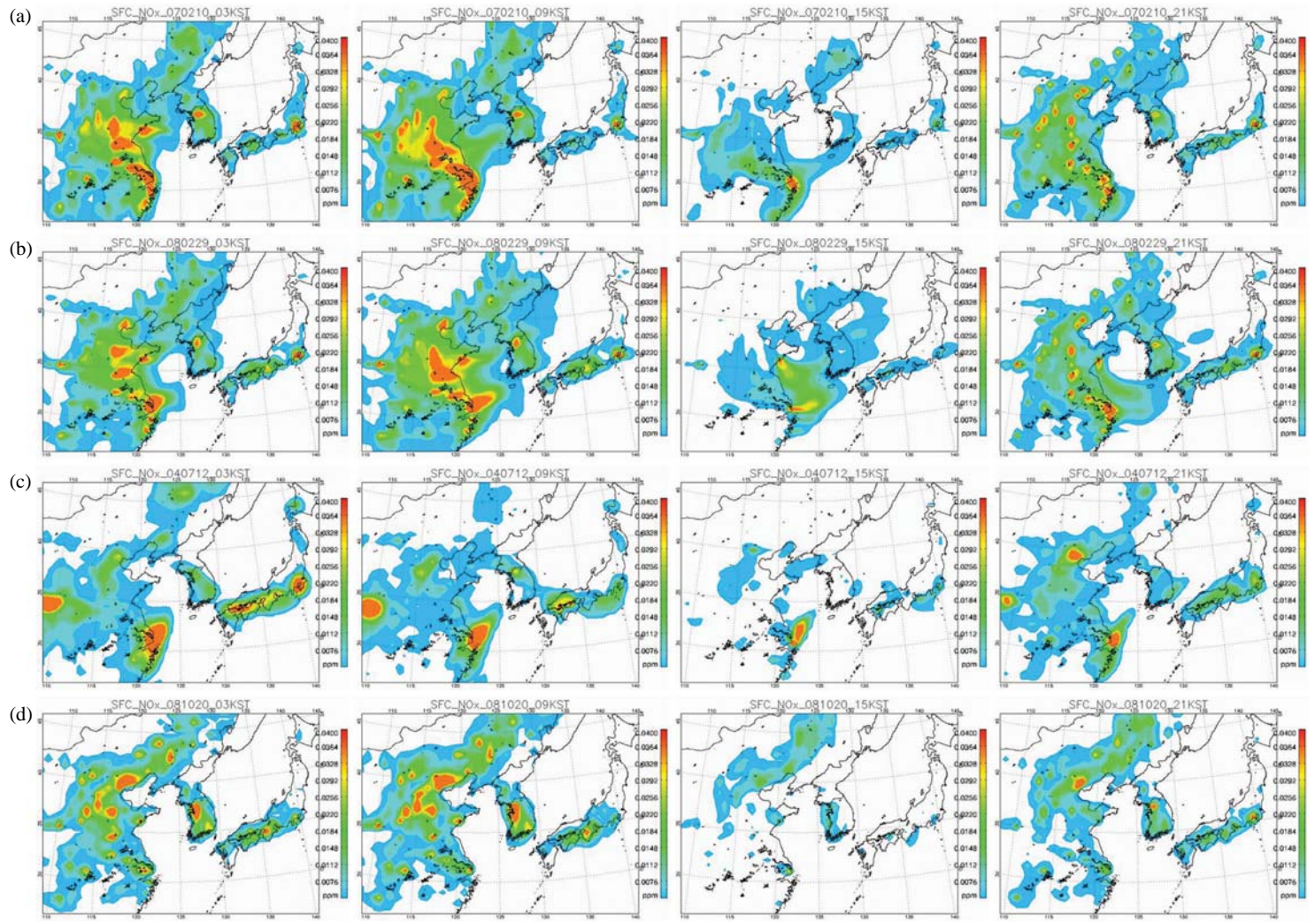


Fig. 5. The spatial distributions of surface NO_x concentrations at 03, 09, 15, 21KST on (a) 10 Feb. 2007 (LRT-I case), (b) 29 Feb. 2008 (LRT-II case), (c) 12 Jul. 2004 (LRT-III case), and (d) 20 Oct. 2008 (LED case).

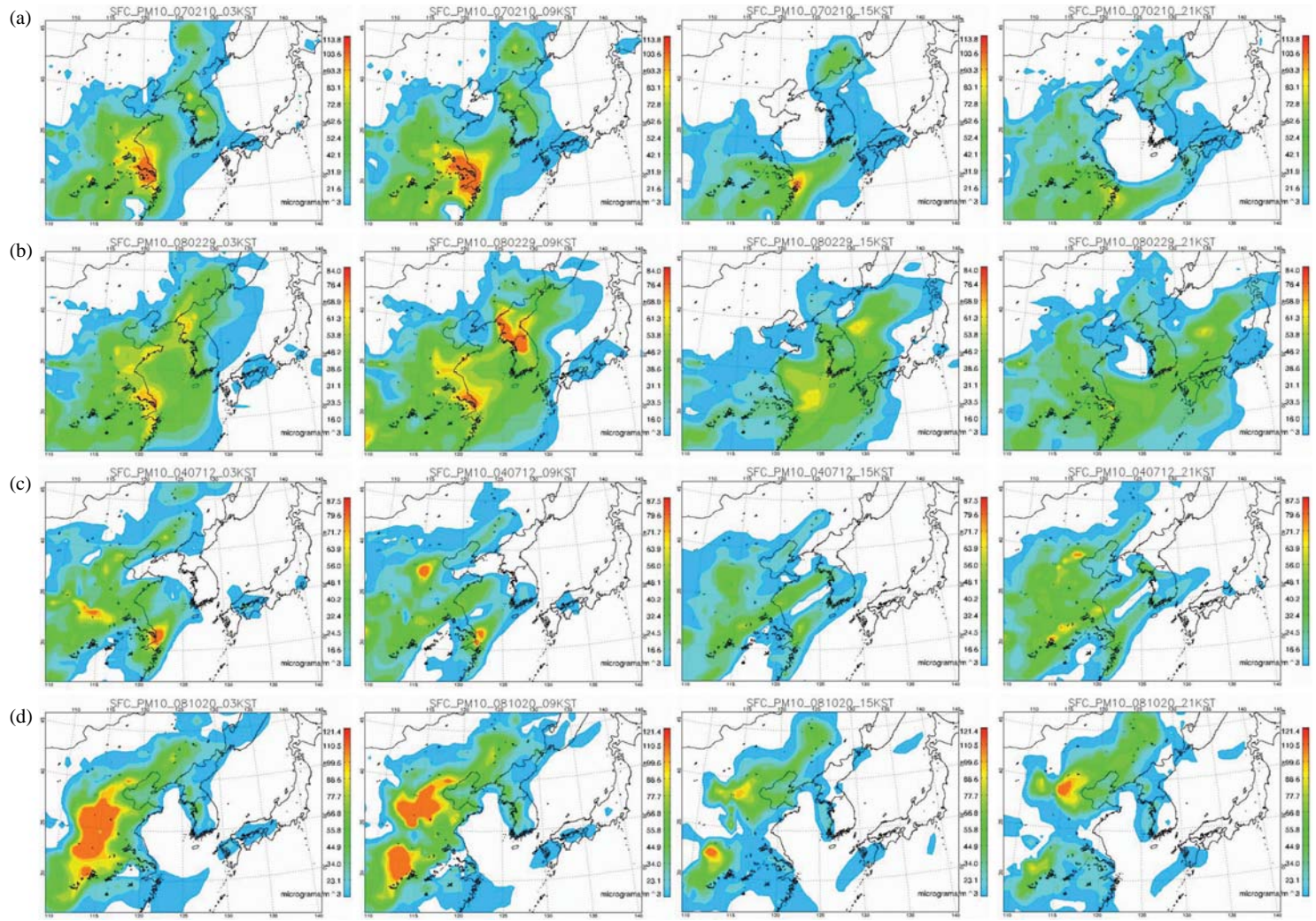


Fig. 6. The spatial distributions of surface PM₁₀ concentrations at 03, 09, 15, 21KST on (a) 10 Feb. 2007 (LRT-I case), (b) 29 Feb. 2008 (LRT-II case), (c) 12 Jul. 2004 (LRT-III case), and (d) 20 Oct. 2008 (LED case).

지역이 아닌 베이징을 주변으로 한 산동성 내륙 지방에서 나타났다.

그림으로 나타내지는 않았으나 SO₂는 각 사례에 대하여 NO_x와 유사한 농도 분포와 이동 경로를 확인하였고, 2차 오염물질인 O₃, SO₄²⁻의 농도 분포는 LRT-I과 II 사례에서 중국 남동부 지역과 한반도의 남해상에 걸쳐 넓게 농도가 모의되었으며 각 사례의 풍하측에 고농도가 나타남을 알 수 있었다. LRT-III 사례의 O₃, SO₄²⁻농도는 중국 중부지역과 동해상으로부터 고농도가 점차 유입되는 분포를 보였으며, LED 사례의 O₃의 농도는 한반도 내륙을 제외한 해상에 집중되어있던 고농도 현상이 점차 중국대륙과 한반도로 확대되다가 급격히 감소하는 분포를 보였고 SO₄²⁻의 농도는 중국 대륙의 내륙을 중심으로 고농도 현상을 보이다 감소하는 분포를 나타냈다.

앞선 결과에 따라 LED 사례에 비해 LRT 사례는 중국으로부터 유입되는 1차 오염물질과 추가로 생성되는 2차 오염물질의 수송량이 뚜렷이 많고, 또한 이동 경로에 따라 한반도로 이동되는 패턴이 확연히 다르게 나타남을 확인하였다. LED 사례의 경우 그 특성이 사례일 별로 매우 다양할 뿐만 아니라 그 공간 분포를 일반화하기 힘들 정도로 대기오염물질의 특성이 매우 다양하게 나타났다.

3.3 사례별 오염물질의 농도 비교

대기오염 사례일에 LED 및 LRT 사례별 한반도의 영향을 더 자세히 알아보기 위하여 모델 수행 결과로 각 사례에 대한 오염물질의 농도를 정량적으로 비교하였다. LRT 사례의 경우 특히 한반도의 서해안 지역이 풍상측으로부터 유입되는 오염물질의 차이를 뚜렷하게 나타낼 수 있을 것이라 판단되어 비교 대상 지역으로 한정하였다. 그림 7은 각 사례별 한반도 서해안 지역(위도 34~38°N, 경도 126~127°E)의 CMAQ의 14개의 격자에 대한 대기오염물질(NO_x, SO₂, PM₁₀, O₃, SO₄²⁻, CO)의 일평균 농도를 비교하여 나타낸 것이다.

LRT-I~III 사례에서 O₃를 제외한 오염물질(NO_x, SO₂, PM₁₀, SO₄²⁻, CO)은 공통적으로 중국 남동부 지역의 최대 공업단지로부터 한반도의 서해상을 거쳐 오염물질이 유입하는 LRT-II 사례에서 농도가 가장 높고 LRT-I, III 사례의 순서대로 오염물질의 농도가 높게 나타났다(그림 7). LRT-II는 중국의 배출원으로부터 이동하는 오염물질의 영향을 지속적으로 받아 가장 농도가 높은 것으로 판단되고 이는 앞선 공간 분포를 통하여 살펴본 결과와 상응하는 것으로 볼 수 있다. 발해만 지역에서 기류가 유입되는 LRT-I 사례는 LRT-II 사례에 비해 유입되는 오염물질의 농도는 적으나 그 농도 차이가 크지 않고 LRT-III 사례

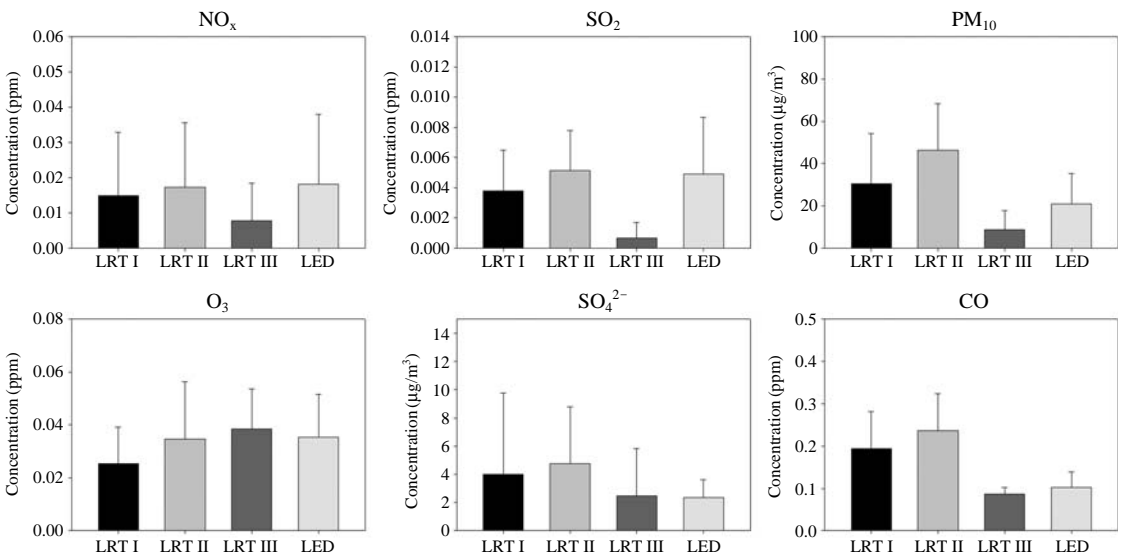


Fig. 7. Ensemble mean concentrations of NO_x, SO₂, PM₁₀, O₃, SO₄²⁻, and CO for LRT (I~III cases) and LED case.

는 중국의 동쪽 해안을 따라 오염물질이 이동되어 오는 패턴으로 장거리 수송을 나타내지만 중국 공업 지역으로부터 유입되는 오염물질에 의한 영향은 가장 작은 것으로 보인다.

그림 7에서 NO_x 의 일평균 농도는 LED 사례 ($1.82 \times 10^{-2} \pm 0.0195$ ppm)와 LRT-II 사례 ($1.72 \times 10^{-2} \pm 0.0183$ ppm)가 매우 유사한 수준을 보였으나 LED 사례가 소폭 높게 나타났고 LRT-I 사례 ($1.49 \times 10^{-2} \pm 0.0180$ ppm), III 사례 ($7.8 \times 10^{-3} \pm 0.0106$ ppm) 순으로 농도가 높게 나타났다. LED 사례에서 농도가 가장 높게 나타난 것은 한반도의 자체적인 배출원과 안정한 기류에 의해 NO_x 가 정체되어 있어 그 농도가 높은 것으로 판단된다. SO_2 는 자체적인 배출원이 한반도에 크게 분포하고 있지 않음에도 LRT-II 사례 ($5.15 \pm 2.7 \times 10^{-3}$ ppm)와 LED 사례 ($4.90 \pm 3.8 \times 10^{-3}$ ppm)의 농도 차이가 매우 유사하게 나타났다. 이는 SO_2 가 SO_4^{2-} 로 전환되어 분포하고 있음을 고려하여 SO_4^{2-} 의 일평균 농도를 함께 살펴보면, LRT-II 사례 ($4.77 \pm 4.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 LED 사례 ($2.36 \pm 1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 SO_4^{2-} 의 농도가 약 2배 높게 나타나고 있음에 따라 LED 사례에 비해 LRT 사례에서 SO_4^{2-} 의 전구 물질인 SO_2 가 전환되는 농도가 비교적 높아 자체적인 배출원이 한반도에 높은 농도로 분포하고 있지 않음에도 SO_2 의 일평균 농도가 LRT-II 사례와 LED 사례에서 비슷하게 나타난 것으로 사료된다. PM_{10} 과 CO의 농도는 LRT-II, I 사례, LED 사례, LRT-III 사례 순으로 농도가 높음을 보이며 풍상측이 중국 대륙인 LRT 사례가 국지적인 영향에 의한 대기오염에 비해 한반도에 미치는 영향이 크다고 판단할 수 있다. PM_{10} 의 경우 LRT-I 사례 ($30.6 \pm 23.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 II 사례 ($46.4 \pm 21.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 농도 차이는 각 사례의 배출원에 따라 한반도로 유입되어 오는 과정 중에 나타나는 이동 및 확산 효과의 차이에 의한 것이라 판단된다. 뿐만 아니라 LRT-I 사례는 지역적인 특성상 인위적인 배출원과 자연적 배출원을 모두 포함하여 장거리 수송이 되는 것에 반해 본 연구에서 LRT-I 사례는 자연적 배출원이 포함되지 않은 모델 수행으로 LRT-I, II 사례의 농도 차이가 있는 것으로 사료된다. O_3 의 일평균 농도는 다른 오염물질의 농도 경향과는 다르게 LRT-III 사례 (0.0385 ± 0.0151 ppm)에서 가장 높게 나타났다. 앞서 살펴본 공간분포 결과와 연관 지어 보면 LRT-I 사례 (0.0254 ± 0.0137 ppm),

II 사례 (0.0346 ± 0.0217 ppm)에서 생성된 고농도 O_3 는 기류의 이동에 따라 한반도 서해안 지역을 거쳐 타 지역으로 이동되는 반면 LRT-III 사례는 한반도의 남쪽 해상으로부터 유입되는 O_3 의 고농도가 한반도의 서해안 지역에 자리하고 있어 나타난 결과라 생각된다.

이상의 LED 사례와 이동 경로별 LRT 사례에 대한 한반도 서해안지역의 농도 비교 결과는 앞선 기상 분석과 지상 농도 분포를 통하여 살펴본 결과와 상응하여 중국으로부터 장거리 수송된 오염물질이 국지적인 오염원에 의해 발생한 오염물질보다 한반도의 대기오염에 미치는 영향이 크다고 판단되고 LRT 사례의 경우 중국 공업지역을 거쳐 서해안을 통해 오염물질이 유입되는 사례(LRT-II), 중국 대도시 및 발해만 연안 지역을 거치는 사례(LRT-I), 해양으로부터 기류가 유입되어 중국 동해안 지역을 따라 오염물질이 이동되는 사례(LRT-III) 순서대로 장거리 수송에 의한 오염물질의 이동 영향이 큰 것으로 확인되었다. 이는 장거리 수송되는 기류의 이동 경로에 따라 발생하는 광화학·화학 반응의 결과가 각 경로에 따라 한반도에 미치는 영향이 다르고 정체된 기류에서 발생하는 반응의 결과는 장거리 수송되는 기류에서의 결과와는 다소 다르다는 것으로 사료된다.

4. 동북아시아 장거리 이동 지시자 선정을 위한 고찰

장거리 수송 지시자란 수용지에서의 대기 오염 농도를 해석함에 있어 장거리 이동 기작의 영향을 설명할 수 있는 지수를 의미하는 것으로서, 주로 우리나라를 포함한 동아시아 주변에서 활발히 진행되는 측정 분석 자료를 장기간 분석하여 장거리 이동의 영향을 추정할 수 있는 단서를 제공할 수 있는 파라미터라 할 수 있다. 현재까지 국내의 장거리 수송 지시자에 관한 연구는 거의 전무하다. Seo (2008)는 배경 대기 지역인 덕적도와 고산에서 측정된 대기오염물질간 비(ratio)를 이용하여 대기오염물질의 장거리와 근거리 이동의 영향을 평가하였다. 그러나 이러한 연구는 장거리 수송과 관련된 지시자 선정을 위한 연구라기보다 장거리 이동 유무와 이동에 의한 영향 평가 연구에 가까워서 그 연구 결과를 지시자 선정

과 연관시켜 일반화시키기엔 무리가 있다. Kim (2011)은 연무 발생일에 대하여 모델링 수행 결과를 연구 분석하여 동북아 대기오염물질의 대기오염물질간 비(ratio) 비교 등 정체성 및 장거리 수송에 관한 지시자 선정의 활용 가능성을 제시하였으나, 중국의 산둥성 지방으로부터 유입되는 기류를 중심으로 제한된 연구 기간에서의 수치모의 결과를 이용하였기 때문에 동북아시아에서 광역적으로 적용할 수 있는 지시자를 개발할 필요가 있다. 이는 한반도를 수송지로 볼 때, 풍상측 위치에 따른 대기오염 배출 특성; 예를 들면 고비사막을 포함한 몽골지역, 북경과 동중국 지대의 공업지역 등의 배출 특성이 매우 상이하고, 이에 따른 장거리 이동 지시자 특성 또한 세분하여 구체화 할 필요가 있다. 그런 측면에서 본 연구에서 밝힌 바와 같이 각 사례(LED 및 LRT-I~III)에 따른 물리·화학적 특성의 구별이 뚜렷한 만큼, 각 사례별 대기 화학적 특성을 구별할 수 있는 일반화된 파라미터를 발굴하는 것은 중요한 의미가 있다고 판단된다.

장거리 수송과 연관된 지시자 발굴 연구는 수송지인 우리나라에서 풍상측으로부터 확인되는 장거리 수송된 오염물질을 각 사례 결과로부터 일반화하기 위한 방법으로 대기화학물질별 lifetime과 광화학 반응 기작에 의한 산화물의 농도 등을 통합적으로 분석하고 그 농도의 차이를 사례별로 고찰하여 이를 일반화하여 제시하는 것을 모두 포함한다. 가장 간단한 방법론은 대기오염물질이 장거리 이동하는 동안 산화된 비율을 파악하여 이를 수치화 하는 것으로서, 대표적으로 황의 산화 비율이 가장 좋은 예이다. 그림 8은 한국, 중국, 일본의 지상 배경 농도 측정소에서 2000년부터 2007년까지 합의한 기간 동안 측정된 각 나라별 SO₂와 SO₄²⁻의 평균농도와 황(S) 수치 분석을 위한 두 물질의 농도 비(SO₄²⁻/SO₂)를 나타낸 것이다. 각 나라별 SO₂의 농도는 중국의 경우 25.96 μg/m³이고 한국과 일본의 경우 각 7.98 μg/m³과 1.09 μg/m³로, 한국은 중국의 약 1/4 수준을 보였다. 반면에 SO₄²⁻의 경우 중국(8.51 μg/m³)에 비하여 한국(4.24 μg/m³)과 일본(3.6 μg/m³)은 약 1/2 이하 수준을 나타내어 SO₄²⁻와 SO₂의 농도의 비(S ratio)가 중국, 한국, 일본 순인 서에서 동으로 증가하는 것으로 나타남을 확인하였다. 이는 결국 중국에서 배출된 SO₂가 장거리 수송하는 동안 상당한 양이 SO₄²⁻

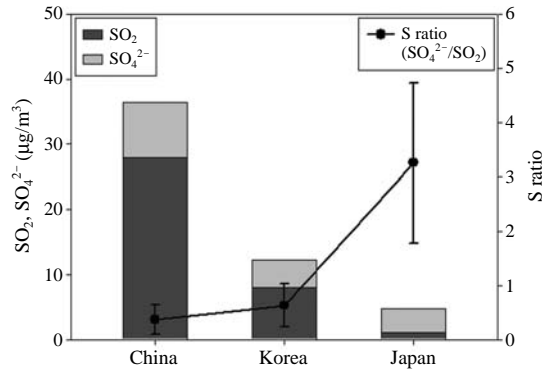


Fig. 8. Station-average mean of SO₂, SO₄²⁻ and S ratio (SO₄²⁻/SO₂) of three countries (China, Korea, Japan).

로 변환하였음을 설명할 수 있고, 결국 황의 산화 비율이 장거리 이동의 기여도를 설명하는 충분한 지시자가 될 수 있음을 시사한다.

이상과 같이 장거리 수송과정에서 광화학 반응과 구름에 의한 액상 반응 등에 의한 광산화물의 모델링 결과들과 여러 형태의 원인 물질별 비(ratio)를 장거리 수송이 우세한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 조사하여 그 특성을 파악하는 것을 기본적인 연구 방법론으로 생각해 볼 수 있다. 본 연구에서 구분된 각 사례(LED 및 LRT-I~III)에서 비교 할 수 있는 적절한 산화물을 선정하고 이들 농도와 기준 농도와의 비를 구하여 사례별 그 경향을 파악하는 것으로 출발할 수 있다. 예를 들어 대기오염 농도를 C라 하면 각 사례일에 대한 기준 오염물질 농도와의 비(ratio), 즉 $[C_{LRT}/C_{LRT-ST}, C_{LED}/C_{LED-ST}]$ 를 각각 설정함으로써 무차원비(dimensionless ratio)를 각 사례별로 계산하여, 장거리 이동 지시자(Indicator)의 후보군으로 결정한다. 여기서 첨자 LRT, LED는 각각 장거리 수송 우세 사례일과 정체성 우세 사례일의 농도를, ST는 기준 오염물질 농도를 나타낸다. 이 때 기준 오염물질 농도의 좋은 예로 배출량의 trace gas 역할을 하는 CO 농도를 들 수 있다. 사례별 대기오염 농도 후보군 개수를 n, 기준 농도 후보군 개수를 N이라 하면 장거리 수송 우세 사례 중에서 n×N개의 $[C_{LRT}^{1,2,...,n}/C_{LRT-ST}^{1,2,...,N}]$, 그리고 정체성 우세 사례 중에서 $[C_{LED}^{1,2,...,n}/C_{LED-ST}^{1,2,...,N}]$ 의 무차원 산포도를 모두 작성한다. 무차원 비로 나타낸 산포도에서 회귀선 또는 상관계수 분석을 통하여 지시자 후보군 중에서 장거리 수

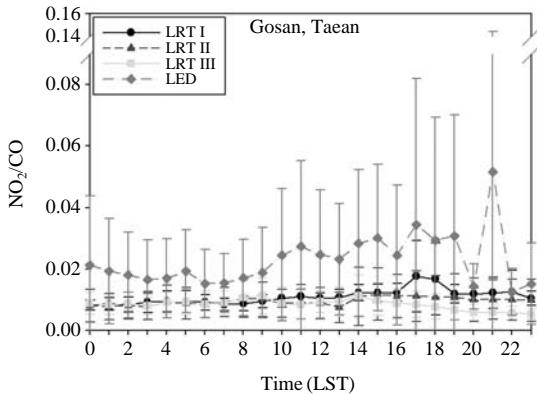


Fig. 9. Hourly averaged variation of observed NO₂/CO at Gosan and Taean for LRT (I~III cases) and LED case.

송 사례와 정체성 우세 사례가 가장 뚜렷이 구분되는 파라미터를 장거리 이동 지시자로 최종 선정할 수 있다. 만약 장거리 수송 사례를 다시 세분한 경우 분류된 사례의 수만큼 지시자 후보군의 회귀선의 개수가 늘어나게 된다.

지시자의 활용 가능성을 검증하기 위해 앞서 3.1절에서 선정된 각 사례별 대표일을 대상으로 국가 배경농도 측정망(고산, 태안)의 자료를 이용하여 위의 방법을 적용하였다. NO₂의 경우 lifetime이 짧아 장거리 이동의 영향보다 국지적인 영향을 더 많이 받는다는 선행 연구(Shin *et al.*, 2002)에 따라 각 사례에 대한 지시자의 오염물질로 NO₂를 선정하고, trace gas인 CO를 기준 오염물질로 하여 두 오염물질간 농도의 비를 시간평균의 일변화로 나타내었다(그림 9). 두 농도의 비(NO₂/CO)는 모든 시간대에서 LRT 사례보다 LED 사례에서 그 비가 높게 나타나며 LRT 사례와 LED 사례간의 차이가 뚜렷하게 구분됨을 확인할 수 있고, 이에 따라 두 농도의 비는 LRT 사례와 LED 사례를 구별할 수 있는 좋은 지시자 후보군으로 설정할 수 있다. 이는 선행연구를 통하여 유추할 수 있는 결과와도 일치하는데, 국지 영향을 받는 NO₂와 CO의 광역적인 배출량 및 그 장거리 이동을 잘 나타내는 연구 결과(Kim and Chung, 2006; Pochanart *et al.*, 2004)에 비추어 볼 때, 두 농도의 비가 LRT 사례보다 LED 사례에서 훨씬 더 높게 나타나, 두 사례의 차이를 뚜렷이 구별할 수 있으며,

또 모델결과에서도 각 사례별 NO_x와 CO의 일평균 농도로 나타낸 두 오염물질간 농도의 비는 그림 9의 관측 결과와 유사하게, LED 사례에서 두 농도의 비(1.79 × 10⁻¹)가 가장 높다는 것을 확인할 수 있다(그림 7). 이러한 방법론으로 동아시아에서 적용 가능한 장거리 이동 지시자를 발굴할 수 있으며, 이러한 연구는 향후 본격적인 모델링 및 측정 자료 분석을 통한 검증 작업을 통해 구체화할 예정이다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 2000~2010년 동안 대기오염이 심한 날을 선정하고 오염물질의 장거리 수송이 우세한 경우와 자체 배출되는 오염물질의 영향이 우세한 경우로 구분하여 그 물리적 특성을 살펴보았고, 아울러 구분된 사례별로 모델링을 수행하여 대기오염물질의 농도를 비교 분석 함으로써 대기오염물질의 화학적 특성을 비교·연구하였다. 대기오염이 심한 날을 선정하기 위하여 환경부가 운영하는 도시 대기 측정망 자료에서 얻은 시간별 PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ 농도 자료로 통합대기환경지수(CAI)를 계산한 후, 그 값이 높은 날을 우선 선정하고, 선정된 날을 몇 가지 종관기상 변수(850 hPa 와도와 지균풍속, 850 hPa 종관 일기도)를 이용하여 LED 사례와 LRT 사례로 분류하였다. 이 때 LRT 사례는 풍상측 중국 지역을 3개 지역의 배출원별 특성에 따라 구분하기 위하여 3가지(LRT-I~III)로 다시 세분하였다. 배출원 추적은 HYSPLIT-4 모델의 역궤적 추적 결과를 수행하여 그 배출원을 정성적으로 구분하였다. 최종 분류된 각 사례의 대표일을 3일씩 선정하고 MMS-CMAQ 모델링을 수행하여 그 특성을 비교 분석하였다.

그 결과 종관 기상 패턴은 한반도 상공의 기압 배치 등 사례별 뚜렷한 차이를 보였고, 풍상측으로부터의 이동성 기류의 방향 등이 확연히 다르게 나타났다. 모의된 대기오염물질의 공간 분포는 세 가지 LRT 사례의 경우 공통적으로 대기오염물질의 농도가 풍상측으로부터 한반도와 한반도 해상에 걸쳐 분포함을 보이고 LED 사례는 고 배출원 지역을 중심으로 중국과 한반도내에서 국지적인 고농도 현상을 보이는 등 LED 사례와 LRT 사례의 뚜렷한 차이를 확인하였다. 각 사례별 대기오염 농도의 일변화는

NO_x와 PM₁₀ 농도의 경우 장거리 수송 효과가 더 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 사례별 서해안지역의 대기질은 LRT 사례의 O₃를 제외한 대기오염물질(NO_x, SO₂, PM₁₀, O₃, SO₄²⁻)이 LRT-II, I, III 사례 순으로 한반도에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. LRT 사례와 비교하여 LED 사례는 배출량이 높은 지역을 중심으로 고농도가 나타나 장거리 수송 사례보다 이동되어온 오염물질의 영향이 적은 것이 확연히 구분되어 나타났고 한반도의 대기질에 미치는 영향 및 특성 또한 뚜렷히 구분되었음을 확인하였다.

이상의 결과를 정리해 보면 대기오염 농도가 심한 날의 LED 사례와 LRT 사례의 대기오염물질의 농도 분포는 뚜렷한 차이를 보이고 기류의 이동에 따라 장거리 수송 되어 오는 대기오염물질의 물리적·화학적 조성 및 특징이 확연히 다름을 확인하였다. 즉, 본 연구는 LED 및 LRT 사례별 물리적 및 화학적 특징이 구분되는 만큼 유입되는 지역 및 장거리 이동되는 시간과 경로에 따라 대기오염물질의 특성이 다르다는 것을 확인할 수 있고, 이를 구분하여 추정할 수 있는 지수를 선정할 가능성을 제시할 수 있는 연구이다. 그러므로 본 연구는 동아시아 장거리 수송과 연관된 지시자 선정과 그 연구에 있어 매우 중요한 단서와 기초가 될 것이며, 따라서 이를 토대로 각 사례의 특성을 더욱 명확히 밝혀서 배출원-수용지 관계를 정량적으로 계산할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 모델링을 중심으로 대기오염물질의 장거리 수송을 비교 분석 한 것이므로 이와 병행하여 측정 자료로부터 모델링 결과를 검증하는 후속 연구를 진행하여 본격적인 동북아시아 장거리 이동 지시자 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(2010-0022134) 지원과, 부산대학교 교수국외장기과견지원비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

손정석, 신혜정, 노순아, 박지훈, 홍유덕, 한진석 (2008) 2007

년 국내 대도시 통합대기환경지수 분석, 한국대기환경학회 2008 추계학술대회 논문집, 371-372.

Han, J.S., J.Y. Ahn, Y.D. Hong, B.J. Kong, S.J. Lee, and Y. Sunwoo (2004) The vertical distribution patterns of long range transported SO₂ in Korea peninsula, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 20(5), 671-683. (in Korean with English abstract)

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, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22(1), 99-106. (in Korean with English abstract)

Jo, H.-Y. and C.-H. Kim (2010) Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena, Atmosphere, 20(2), 161-172. (in Korean with English abstract)

Kang, D.-K., S.-T. Kim, and J.-W. Kim (1993) A study on the long-range transport of air pollutants in the North East Asia, J. Korea Air Pollut. Res. Assoc., 9(4), 329-339. (in Korean with English abstract)

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, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 15(6), 713-725. (in Korean with English abstract)

Kim, H.-S., J.-B. Huh, P.K. Hopke, T.M. Holsen, and S.M. Yi (2007) Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004, Atmos. Environ., 41, 6762-6770.

Kim, H.-S. and Y.-S. Chung (2006) Regional background levels of carbon monoxide observed in East Asia during 1991~2004, J. Korean Earth Sci. Soc., 27(6), 643-652. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.J. (2010) A study on characteristics of long-range transport aerosol by transport patterns in Northeast Asia, Doctor's thesis of Konkuk University. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.-J. (2011) Study on air pollution indicator in association with long-range transport over Northeast Asia, Master's thesis of Pusan National University. (in Korean with English abstract)

Moon, K.J., J.S. Han, B.J. Kong, M.D. Lee, and I.R. Jung (2005) Characteristics of chemical species in gaseous and aerosol phase measured at Gosan, Korea during ABC-EAREX 2005, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 21(6), 675-687. (in Korean with English abstract)

- Park, J.-Y. (2003) Long range transport of air pollutant in typical meteorological conditions for each season in East Asia, Master's thesis of Yonsei University. (in Korean with English abstract)
- Pochanart, P., S. Kato, T. Katsuno, and H. Akimoto (2004) Eurasian continental background and regionally polluted levels of ozone and CO observed in northeast Asia, *Atmos. Environ.*, 38, 1325-1336.
- Seo, B.K. (2008) Simulation of long-range transboundary air pollutants in Northeastern Asia using CAMx, Master's thesis of Hankuk University of Foreign Studies.
- Shin, H.J., J.Y. Kim, B.C. Choi, S.N. Oh, J. Yu, and K. Bower (2002) Concentrations of air pollutants measured at Kosan during ACE-Asia intensive observation period, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 18(6), 487-501. (in Korean with English abstract)
- Song, H.-D., J.-S. Choi, I.-S. Jang, J.-S. Kim, and S.-J. Lee (2009) Studies on the behavior of SO₂ and NO_x over Yellow Sea area during long term aircraft measurements (1997 ~ 2007), *J. Environ. Sci.*, 18(5), 567-578. (in Korean with English abstract)
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153.