

장거리 수송 연무 발생과 연관된 우리나라 대도시 대기질 특성

Characteristics of Air Quality over Korean Urban Area due to the Long-range Transport Haze Events

조 현 영 · 김 철 희*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공

(2010년 8월 15일 접수, 2010년 10월 11일 수정, 2010년 12월 14일 채택)

Hyun-Young Jo and Cheol-Hee Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National university

(Received 15 August 2010, revised 11 October 2010, accepted 14 December 2010)

Abstract

Haze phenomena were analyzed to assess the impact of long range transport process on the air quality of Seoul and Busan. We statistically classified haze days observed in both Seoul and Busan into two types of haze cases: stagnant case and long-range transport case, and analyzed the air pollutant levels comparatively for each of the two cases for the period of 2000~2007. The results showed that the long-range transport haze case occurs less frequently with the occurrence frequency of 35.5% than stagnant case with the occurrence frequency of 64.5%. During the observed all haze days, all pollutants have high concentration in comparison with those under other meteorological conditions (Rain, Mist, Dust, Clear, Rain+Mist) except for only PM₁₀ of Dust case where its level shows highest among total 6 categorized conditions. The long range transport haze case shows similar levels of PM₁₀ and NO₂, but higher SO₂ and lower O₃ compared with stagnant haze cases, suggesting the importance of sulfur chemistry for long range transport haze case and local photochemistry for stagnant haze case. In addition, by employing the NOAA/HYSPLIT-4 backward trajectory model, we subdivided the long range transport haze cases into two different sources: urban anthropogenic high emission areas of central China, and natural emission sources over north China and/or Mongolia. The former long range transport haze case shows higher occurrence (with Seoul 70% and Busan 85%) than the latter haze case (with Seoul 30% and Busan < 10%). This is also implying that the long haze phenomena occurred over Korea have been influenced by not only the anthropogenic emissions but also the natural dust emissions. These both emission sources can be good contributors in calculating the source-receptor relationship over Korean atmospheric environment.

Key words : Meteorological conditions, Air quality, Haze, Stagnant case, Long-range transport case, Back trajectory

*Corresponding author.

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

1. 서 론

1988년 서울 올림픽을 전후한 국내 대기질 개선정책이 큰 성과를 거둔 이후에 외국으로부터 이동되어 오는 오염물질에 대한 연구가 활발히 진행되었고, 수도권 대기환경개선에 관한 특별법이 시행됨에 따라 미세먼지의 장거리이동에 관한 연구가 중요시되고 있다(Kim, 2006; Han *et al.*, 2006). 특히 연무(haze) 현상은 황사와 달리 주로 도시나 공업지대로부터 연기, 자동차 배기가스 등 인위적 오염물질에 의해 발생하는 먼지까지 포함하는 개념으로, 우리나라의 경우 장거리 수송에 따른 직·간접적인 영향을 모두 받는 등 그 현상을 설명하기 힘든 경우가 많다. 연무현상은 특정 지역 내 자체 배출 혹은 오염물질의 광화학 반응 등에 의한 발생뿐만 아니라 풍상측에서 장거리 이동하여 발생하기도 하는데, 기록상 동아시아에서 발생한 연무가 심지어 서태평양까지 장거리 수송되기도 하였다(UNEP, 2002). 한반도에 보고되는 연무 역시 자체배출량에 의한 발생뿐만 아니라 중국대륙 기원의 장거리 수송 영향 또한 함께 받는다. 최근의 인공위성자료를 통하여 관측된 중국 동부지역은 이미 짙은 연무 현상이 자주 발생하고 있으며 위성연구 통한 장거리 수송의 징후는 빈번히 지적되고 있는 시점에서 연무현상이 장거리 이동에 의해 한반도 대기질에 대한 기여도는 앞으로 더욱 클 것으로 예상된다(노영민 등, 2006; 이권호 등, 2005).

사건적으로 연무란 시정이 1 km 이상이고 습도가 75% 이하로 낮을 때 대기 중에 연기, 먼지 등 미세하고 건조한 고체입자로 인해 공기의 색이 우윳빛으로 흐려 가시거리가 짧아지는 현상을 말하며(기상청, 2002), 연무와 연관된 자연적 및 인위적 에어로졸이 한반도 대기질에 미치는 영향 연구는 지금도 다양한 관측적 연구가 활발하게 진행되었다. 예를 들어 현재 발생되는 연무에 대한 단기 사례 분석(Lim *et al.*, 2004; Chun *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2003), 대기화학적 차원의 측정 분석적 연구(Wang *et al.*, 2006; Kang *et al.*, 2004) 등 다양하다. 반면 배출원(Source area)에서 발생한 중장거리 이동물질 혹은 수용지(Receptor area)의 자체배출물질이 대기질에 기여하는 기여도와 연무현상 시 장거리 이동에 관한 물리기상학적 특성을 이해하는 연구는 드물지만 대단히 중요한 이슈

이다. 또한 연무는 봄철에 가장 빈번히 관측되는 황사 등의 중·장거리 수송과 달리 계절적 차이가 거의 없이 모든 계절에 걸쳐 고루 발생하므로 연무 현상 그 자체뿐만 아니라 연무 발생이 우리나라 대도시 대기질에 미치는 영향에 관한 심도 있는 이해와 체계적인 연구가 필요하다.

현 시점에서 우리나라 대도시에서 발생하는 연무 현상은 자체 오염물질의 반응에 의해 발생하기도 하지만 장거리 이동의 영향을 배제할 수 없다. 따라서 한반도 내 주요 대도시지역들에서 발생한 연무현상을 발생 원인별로 분류하고 이에 따른 통계적 발생 빈도 조사와 이와 연관된 대기질 수준을 체계적으로 파악하는 것은 대기오염 정량 연구에 있어서 기초적이면서 매우 중요하다고 판단된다. 이러한 기초 연구가 진행되면 이를 토대로 연무의 발생 메커니즘별 대도시 농도 특성 경향을 모델링하는 연구에 있어 매우 의미 있고 중요한 기초 자료가 될 것이다.

본 연구는 우리나라 대도시인 서울과 부산에서 연무가 발생한 날들을 중관기상학적 분석기법으로 장거리 수송에 의한 연무 발생일을 골라내고 그 때의 대기질 농도 경향을 분석하였다. 즉 대도시 연무 발생 메커니즘을 자체 기여도가 우세한 사례(이하 정체성 사례)와 장거리 수송이 우세한 사례(이하 장거리수송 사례)로 정량 분류하고 연무발생 사례별 서울과 부산의 대기오염물질농도(PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃) 수준 및 변화양상을 분석하였다. 이는 연무에 대한 기상상태별 장거리 수송 등과 같은 외부요인을 유추할 수 있는 중요한 단서를 찾을 수 있을 뿐만 아니라 이와 연관된 대기질 수준 및 농도 특성 경향에 대한 지역적 차이까지 밝혀줄 것으로 판단된다. 마지막으로 연무의 장거리 수송 사례 시 기류의 발원지 및 이동경로를 파악하여 연무의 주요 발생지를 정성적으로 다시 세분하여 파악하였고 이는 다양한 장거리 이동 연구 중 연무와 연관된 배출원-수용지(Source-Receptor Relationship) 관계 규명에 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 연무 사례분류 방법

본 연구는 연무 발생 메커니즘을 정체성 및 장거리

수송 사례로 분류하고 분류된 사례별 대기질 특성 규명을 목표로 하므로, 연무일을 사례별(정체성 혹은 장거리이동성)로 구분하는 환경 과학적 기준이 가장 기초적이면서 중요한 작업이 될 것이다. 이후 구분된 사례별 연무일의 대도시 측정망 특성을 분석하면 자연스럽게 연무 발생 메커니즘별 우리나라 대도시 대기오염물질 특성이 규명될 것이다.

본 연구에서는 2000~2007년 동안의 8년간의 서울과 부산의 지상기상 관측 자료로부터 두 지역에서 동시에 연무가 발생한 날을 추출하였다. 이 때 연무일 기준은 일평균 상대습도 75% 미만, 시정 1km 이상 10km 미만(기상청, 2002)으로 사용하였다. 아울러 박무(상대습도 75% 이상, 시정 1km 이상 10km 미만) 및 주요한 4가지 사례(강수, 황사, 청명, 강수+박무)를 동시에 분류하여 모든 기상 사례별 대기오염물질 농도의 일별, 시간별 대기질 수준을 한꺼번에 분석하였다.

선정된 연무일을 장거리 수송 및 정체성 사례로 분류하기 위하여 몇 가지 단계로 나누어 분석을 수행하였다. 먼저 정체성 사례의 기준을 정하기 위하여 종관 기상 일기도에서 한반도 상공 850 hPa 와도(vorticity, $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$), 와도의 이동 속도(여기서는 850 hPa 지균폭속으로 계산), 그리고 하층(지표-850 hPa) 대기안정도(EDI, Kim *et al.*, 2005)로부터 연무일을 분류하였다(Jo and Kim, 2010). 와도와 지균폭속은 우리나라 중부지역인 37.5°N, 127.5°E에 중앙 격자점을 잡고 주변 4개 격자점을 이용하여 와도 및 지균폭속의 동서(u_g)-남북(v_g) 성분을 각각 구하여 지균폭속 ($|V_g| = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$)을 결정하였다. 마지막으로 하층 대기 안정도를 계산한 후, 와도의 부호가(-), 즉 한반도 상공 고기압이 존재하고, 그 이동속도(지균폭속)가 4m/s 이하이면서 하층 대기안정도가 안정한 날을 정체성 사례로 최종 분류하였고, 850 hPa 와도가(+)이면서 안정도와 상관없이 지균폭속이 4m/s 이상인 날은 이동성 사례로 간주하였다. 기타 분류되지 않은 사례는 본 연구 대상에서 제외하였다. 자세한 분류 방법은 Jo and Kim (2010)에 기술되어 있다.

이렇게 분류된 정체성 및 장거리 수송 사례별 우리나라 대도시(서울과 부산)의 대기질을 수집하고 사례별 차이를 분석하였으며, 특히 장거리 수송 사례의 경우 역궤적 경로분석을 통해 연무의 원인물

질 고배출지역 추적과 함께 그 이동 패턴을 정성적으로 정리하였다. 역궤적 분석은 미국의 NOAA/ARL에서 제공하는 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)모델을 이용하였다.

2.2 분석영역 및 자료

본 연구의 대상지역은 우리나라 대도시의 대표 지역으로서 서울과 부산을 우선 선정하였다. 연무(발생)일을 결정하기 위하여 서울기상청과 부산기상청에서 운영·관측하는 지상기상관측자료를 사용하였다. 연무일 선정을 위해 기상 변수 중 매 3시간 시정자료, 안개 및 안개지속시간자료, 상대습도 자료를 사용하였고, 기타 박무 등 연무 이외의 기상상태에 따른 대기질 변화 패턴을 연무일과 비교하기 위하여 시정, 안개, 습도자료 이외에도 강수량, 운량, 적설량 자료를, 그리고 황사 관련 자료는 기상청에서 제공하는 황사관측일수자료를 사용하였다. 또한 연무의 메커니즘을 정체성과 장거리 수송 사례로 선정하기 위한 와도, 지균폭속, 안정도 계산을 위해 850 hPa 일기도와 우리나라를 포함한 동북아시아 지역의 NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 격자 자료를 사용하였다.

연무와 관련된 대도시 대기오염 특성 분석을 위해 환경부가 운영하는 대기오염자동측정망에서 서울과 부산의 매시간 측정되는 PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃의 대기질 측정망 자료를 이용하였다. 이 때 PM₁₀이 측정되기 시작한 2000년부터 2007년 기간의 서울지역에 위치한 27개 측정소와 부산지역에 위치한 13개 측정소에서 측정된 시간별 PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ 농도 자료를 사용하였다. 결측이 발생한 측정소는 제외하여 매시간 측정소 평균을 계산하였다.

연무의 배출원 사례별 기류의 역궤적 분석을 위해 미국의 NOAA/ARL (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>)에서 제공하는 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)모델을 이용하였다. 역궤적 분석에 사용된 기상자료는 미국의 NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료이며 72시간 동안의 공기 이동경로를 분석하였다.

Table 1. Statistical summary of haze occurrences according to two different types of haze: stagnant case and long-range transport case, for the period of 2000~2007. The values in parentheses are standard deviations.

Pattern	Number (days)	Frequency (%)	Region	PM ₁₀ (μg/m ³)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	O ₃ (ppb)
Stagnant high pressure case	40	64.5	Seoul	110.6 (±47.5)	6.7 (±2.6)	46.5 (±13.1)	21.7 (±11.5)
			Busan	94.8 (±26.5)	9.8 (±5.0)	34.3 (±8.3)	27.4 (±8.5)
Long range transport case	22	35.5	Seoul	102.0 (±45.5)	9.9 (±3.3)	49.8 (±9.8)	14.2 (±13.1)
			Busan	83.9 (±25.7)	10.0 (±4.2)	34.6 (±7.2)	25.8 (±9.2)
Unclassified	(7)	—					
Total	69	100					

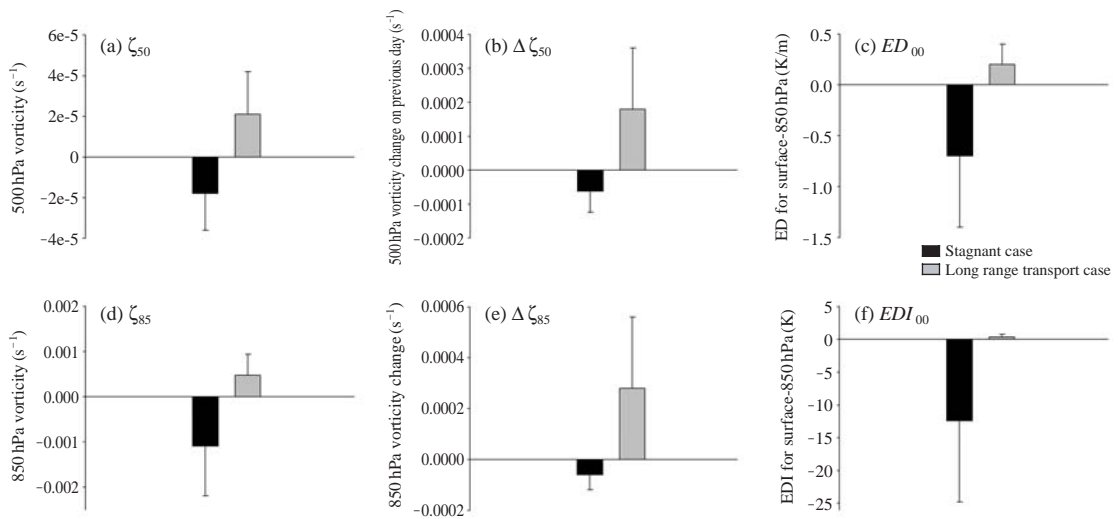


Fig. 1. Various meteorological parameters according to the two different haze generation mechanism: stagnant and long-range transport cases. (a) 500 hPa Vorticity, (b) 500 hpa vorticity advection, (c) 850 hPa Vorticity, (d) 850 vorticity advection, (e) Temperature lapse rate for Surface-850 hpa, and (f) Temperature difference for Surface-850 hpa.

3. 결과 및 분석

3.1 정체성 및 장거리 수송형 연무의 구분 및 발생빈도

사례기간(2000~2007년) 중 서울과 부산에서 동시에 연무가 발생한 날은 69일로서 정체성 사례가 40일(64.5%), 장거리 수송 사례가 22일(35.5%)로 나타났다. 기타 분류되지 않은 날은 약 10% (총 7일) 정도로 나타났다(표 1). 또한 도표로 제시하지 않았으나 분석 기간 중 각 도시의 개별 총 연무 발생은 두 도시가 동시에 발생한 69일을 포함하여 서울 총 480일, 부산 136일로 서울이 3배 이상 많이 발생하였으며, 각 도시별로 사례를 따져도 정체성과 장거리 수송형

연무 발생의 비율은 정체성 연무가 전체의 2/3, 장거리 수송형 연무가 1/3 정도로 유사하였다. 이때 연무 발생 중 장거리 수송 사례 빈도인 35.5%는 연무 발생의 배출원-수용지 관계(Source-Receptor relationship) 정량 분석 결과가 아니므로 연무발생 기여도 중 외부 요인이 35.5%임을 의미하지는 않으며, 다만 일기도 패턴상의 장거리 수송이 우세한 사례의 발생 빈도를 의미한다. 특히 분류 방법상 사용된 기준(와도의 이동 속도) 등에 따라 본 연구 결과는 달라질 수 있으며, 마찬가지로 정체성 사례 또한 중국을 포함한 외부 요인을 완전히 배제한 사례가 아니므로 실제 배출원-수용지 계산 결과는 이와는 다르게 나타날 수 있다.

구분된 두 사례별 종관기상 패턴은 뚜렷이 그 특

징이 구분되었다. 그림 1에 정체성 및 장거리 수송형 사례별 850hPa 와도(ζ_{850})와 그 시간변화율($\nabla\zeta_{850}$), 그리고 그 상층인 500hPa 와도(ζ_{500})와 그 시간 변화율($\nabla\zeta_{500}$), 500~850hPa 기온감률을 이용한 하층 대기안정도(ED), 지상~850hPa사이의 습윤도(EDI)의 부호와 크기를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 정체성 사례의 경우 500 hPa와 850 hPa 소용돌이도와 그 시간 변화율이 상대적으로 매우 적은 값을 나타내었고, EDI와 500~850hPa 대기안정도는 (-)의 값을 보인 반면, 장거리 수송 사례는 뚜렷이 그 반대의 양상을 보였다. 특히 소용돌이도 변화율($\nabla\zeta$)이 정체성 사례에서 매우 약하게(-)를 나타낸 것은 결국 한반도 상공 고기압의 강도가 피크를 유지하면서 정체하거나 약하게 소멸되는 단계에서 정체성 연무가 주로 발생하였음을 알 수 있다. 반면 기온과 연관된 대부분의 종관기상학적 열역학 요소는 역학적 요소와는 달리 안정도지수(EDI)를 제외하고는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다(Jo and Kim, 2010).

요약하면 연무발생 메커니즘은 두 사례로 구분할 수 있다. 첫 번째 사례인 정체성 사례는 풍속이 약하고 안정한 대기 상태의 특징을 가지며 고기압권의 영향으로 대기정체로 인하여 공기가 잘 확산되지 않아 발생과 수송 및 지속에 유리하여 연무 발생 시 한반도 자체 기여율이 높은 사례로 볼 수 있다. 반면 두 번째 사례인 장거리 수송 사례는 다소 강한 바람을 유도하여 외부로부터 한반도로 연무 혹은 연무 생성 물질을 수송한 것으로 유추되는 사례로 구분할 수 있다. 따라서 이들 특징을 구분할 수 있는 기상요인은 대기 열역학적 변수보다는 와도 등의 모멘텀과 연관된 역학적 요인에 의해 상대적으로 더 뚜렷이 구분될 수 있음을 알 수 있다.

3. 2 서울과 부산의 연무 현상 시 대기오염물질의 평균 농도 변화

3.2.1 일평균 농도 변화

한반도 대도시의 연무현상 시 사례별 대기질 수준을 파악하기 위해 사례기간 동안 서울과 부산의 지상 기상 관측 자료로부터 사례별 연무발생일과 비연무 발생일(예를 들어 강수, 박무, 황사, 청명(맑은 날), 강수+박무)의 각종 대기질(PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3) 자료를 모두 수집하여 연무 발생일의 대기질의 특징과 비교하였다. 이 때 강수일은 박무를 동반하지 않은

순수한 강수일을, 그리고 강수+박무일은 두 일기 현상이 동시에 나타난 날로서 순수 박무일과 구분하였다. 표로 제시하지는 않았지만 서울과 부산의 각 도시별 기상상태별 발생빈도를 살펴보면 분석 기간 중 서울은 청명(41.0%), 연무(16.4%), 강수(15.0%), 박무+강수(11.9%), 박무(2.1%), 황사(0.8%) 순으로 나타났고, 부산은 청명(54.5%), 강수(23.1%), 박무+강수(10.1%), 연무(4.7%), 박무(3.8%), 황사(1.0%) 순으로 나타났다. 서울의 경우 연무 발생일이 강수일보다 높게 나타났으며, 특히 입자상 오염물질과 연관이 적은 청명한 날을 제외하면 서울의 경우 연무 발생일이 가장 많이 출현하였다는 사실이 주목할 만하였다. 또한 박무의 경우 두 도시 모두 강수를 동반한 박무일이 순수 박무일보다 발생 빈도가 서울 약 5배 부산 약 3배 높게 나타나, 박무 시에는 대부분 강수를 동반하였음을 알 수 있었다.

그림 2는 사례별 연무일을 포함한 기상상태별 서울과 부산에서 측정된 대기오염물질(PM_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3)의 일평균 농도를 나타낸 그림이다. 그림 2에서 S-Haze는 정체성 연무를, 그리고 L-Haze는 장거리 수송 연무를 각각 나타낸다. 서울과 부산에서 상대적으로 매우 높은 대기오염 농도를 나타낸 경우, 연무 발생일임을 알 수 있으며 이는 고농도 미세먼지로 인해 연무현상이 발생된다는 것을 확인할 수 있다. 먼저 미세먼지(PM_{10})농도의 경우 최고치를 보인 황사 사례를 제외하고는 제일 높게 나타났는데, 이 중 정체성 연무의 미세먼지 농도수준(서울 $111 \pm 48 \mu g/m^3$, 부산 $95 \pm 27 \mu g/m^3$)은 장거리 수송 연무 사례(서울 $102 \pm 46 \mu g/m^3$, 부산 $84 \pm 26 \mu g/m^3$)와 매우 유사한 수준을 보였으나 부산의 경우가 정체성 연무 사례가 장거리 이동사례보다 소폭 높게 나타났다. 박무일의 경우 강수가 없는 경우 연무와 유사한 농도 수준을 보였으나 강수가 있는 날 박무의 경우가 세정 작용으로 인하여 그렇지 않은 경우보다 서울 1/2, 부산 2/3 정도로 낮게 나타났고, 강수가 없는 박무일에는 서울과 부산 모두 제일 낮게 나타났다. SO_2 의 경우 다른 사례보다 연무일에서 역시 제일 높게 나타났다(그림 2). 그러나 연무 발생 사례별 SO_2 농도 경향은 서울과 부산에서 각각 다르게 나타났는데, 서울의 경우 정체성 연무 사례(6.7 ± 2.6 ppb)보다 장거리 이동성 연무 사례(9.9 ± 3.3 ppb)에서 약 1/3정도 더 높게 나타났고 부산의 경우 각각 9.8 ppb, 10.0 ppb로서 큰

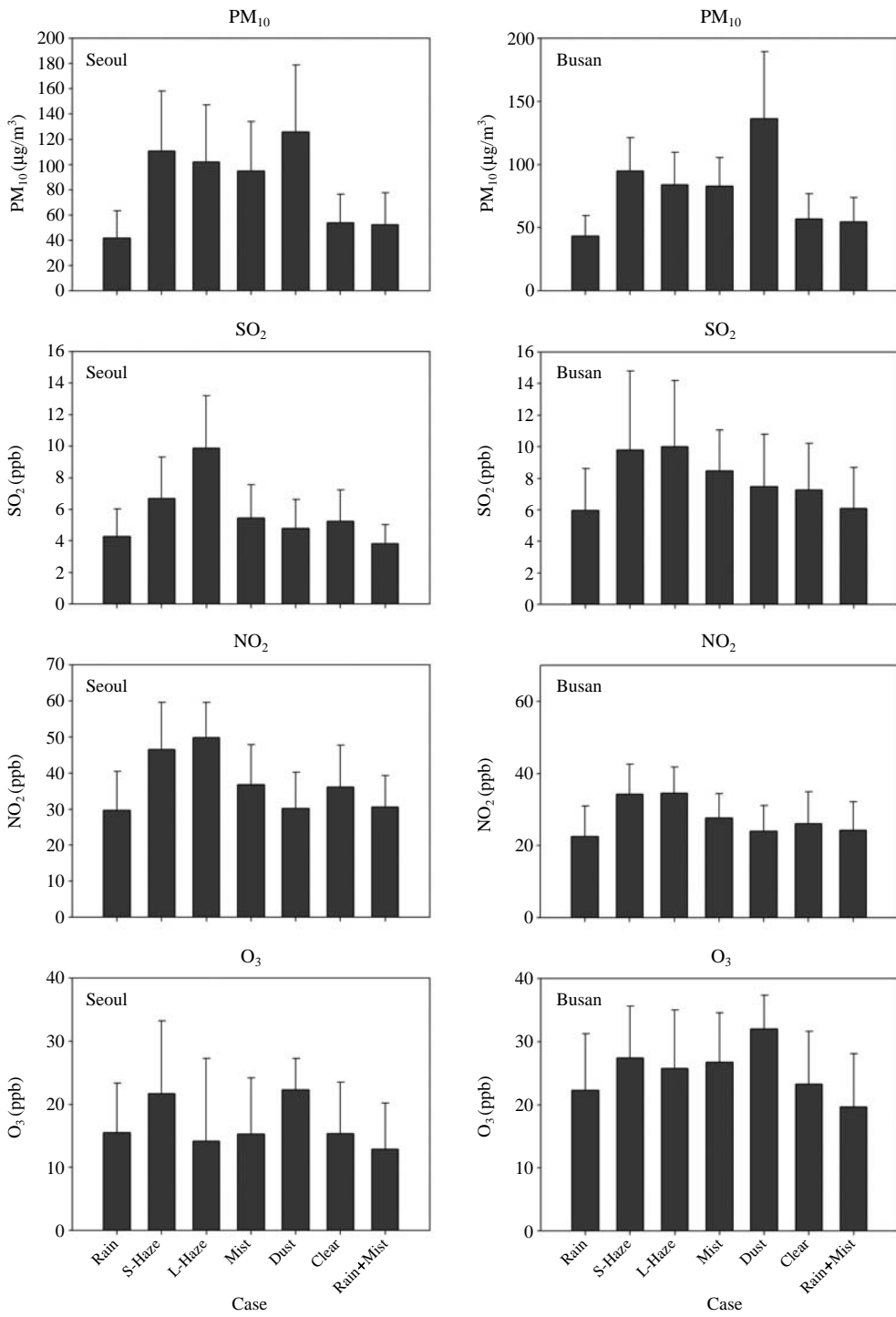


Fig. 2. Ensemble mean air pollution concentrations of PM₁₀, SO₂, NO₂, and O₃ observed under the several meteorological conditions for the period from 2000 to 2007, in Seoul and Busan, respectively.

차이가 나타나지 않았다. 또한 부산의 경우 청명, 박무의 경우에도 5ppb 이상의 SO₂ 농도 수준을 보여 기상상태별 큰 차이가 없었으나, 서울에서는 연무일 이외의 사례에서는 모두 5ppb 이하를 보여 연무 사례와 상대적으로 많은 차이를 보였다. 따라서 서울의 경우 특히 장거리 수송 연무 사례에서 높게 나타난 것으로 볼 때 우리나라 대도시 중 지역적으로 수도권 이 부산권보다 장거리 수송에 더 취약한 위치임을 유추할 수 있다.

NO₂의 경우 역시 SO₂와 마찬가지로 다른 사례보다 연무일에서 역시 제일 높게 나타났으며 서울과 부산 모두 박무 혹은 청명한 날의 농도 수준보다 약 20~25% 내외로 높은 수준을 보였다. 정체성 연무와 장거리 수송 연무의 사례별 NO₂ 농도 경향은 서울과 부산 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 서울의 경우 정체성 연무 사례(47±13ppb)보다 장거리 수송성 연무 사례(50±10ppb)에서 소폭 높게 나타났으나 그 차이가 10% 이내로 유사한 수준이며, 부산의 경우 역시 정체성 사례(34±8ppb)와 장거리 수송 사례(35±7ppb)가 유사하였다. O₃의 경우 사례별 가장 큰 폭을 보였는데, 역시 SO₂와 마찬가지로 다른 사례보다 연무일에서 역시 제일 높게 나타났으며 서울과 부산 모두 박무 혹은 청명한 날의 농도 수준보다 약 20~25% 내외로 높은 수준을 보였다. 정체성 연무와 장거리수송 연무의 사례별 O₃ 농도 경향은 서울과 부산에서 각각 다르게 나타났다. 서울의 경우 정체성 사례(22±12ppb)가 장거리 수송성 연무 사례(14±13ppb)보다 약 40~50% 내외로 높은 수준을 보였으나 부산의 경우 정체성 사례(27±9ppb)와 장거리 수송 사례(26±9ppb)가 유사하였다.

이상의 결과로 볼 때 한반도 연무현상은 그 기원이 농도가 높은 기체상 오염물질과 연관이 높으며, 따라서 광화학 반응에 의해 입자상 오염물질로 2차 생성되어 발생할 확률이 많음을 뒷받침하며, 따라서 이러한 2차 먼지의 생성 기작이 장거리 수송 과정에서뿐만 아니라 정체성 혹은 자체 광화학 기여율이 높은 사례 쪽에도 발생할 여지는 모두 큰 차이 없이 동일하게 존재하므로 향후 보다 심도 있는 관련 연구가 필요할 것이다. 본 연구에서의 연무의 사례별 차이는 부산의 경우 연무 발생 사례별 농도 차이는 거의 없었고 서울의 경우도 비록 PM₁₀과 NO₂ 농도수준은 유사하였으나, 서울의 SO₂ 농도는 장거리 수송 사례

가, 그리고 O₃ 농도는 정체성 사례가 상대적으로 20% 이상 높게 나타났다. 이는 SO₂의 경우 여전히 중국 고 배출지역에서 발생하여 장거리 수송된 후 한반도 대기질에 광역적으로 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, O₃ 농도는 수도권에서는 장거리 수송 보다는 지역 자체 광화학 반응에 의한 오존 생성이 일평균 오존 농도에 더 많은 영향을 주었음을 유추해 볼 수 있다. 그러나 이 경우 역시 연무 사례일에 한정된 분석 결과인 만큼, 장거리 수송에 대한 황과 오존의 정량적인 외부 기여도 추정은 장기간의 자료 고찰과 모델링 연구 결과가 축적되어야 할 것으로 판단된다. 반면 박무현상은 연무와 마찬가지로 대기질을 악화시키는 기상현상이지만 연무보다는 입자상, 기체상 오염물질 모두 상대적으로 낮은 값을 보였다. 서울과 부산의 박무 시 상대습도는 평균 77.8%, 81.8%로서 연무의 상대습도인 평균 63.8%, 62.9%보다 높으며, 따라서 만약 강수에 의해 박무가 세정되지 않는다면 박무는 2.5µm 이하의 미세한 물방울이나 황산염, 질산염과 같은 흡습성 입자가 발생되고 적절히 높은 습도에서 핵화과정을 통해 에어로졸이 생성되거나 성장하는 기작을 고려해 볼 때 그림 2에 나타난 것처럼 박무의 미세먼지 농도 수준이 연무에 비해 결코 낮지 않음을 추론할 수 있다.

3.2.2 시간대별 평균 농도 변화

그림 3은 기상상태별 서울과 부산의 대기오염물질(PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃)의 시간평균 측정 농도변화를 사례별 연무 구분 없이 나타난 그림이며, 그림 4는 연무 발생 사례별로 구분하여 각 대기오염물질의 일변화를 나타낸 그림이다. 그림 3에서 나타난 것처럼 예상대로 연무 사례에서 서울과 부산에서 측정된 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃ 농도) 모두 가장 높게 나타났으며 이는 그림 2의 일평균 농도 경향과 일치하였다.

정체성과 장거리 수송 구분 없이 분류된 연무시의 미세먼지(PM₁₀)의 시간대별 평균 농도 변화양상(그림 3)은 서울과 부산 모두에서 8시 이후로 서서히 증가하여 10시경에 최대값을 보였고 오후 2시경에 혼합고의 성장에 따라 서서히 감소하다가 새벽 4시경에 최소값이 나타났으며 박무, 청명, 강수, 박무+강수가 있는 날에도 이와 비슷한 변화를 보여 전반적으로 기상 상태의 일변화에 영향을 받는 양상을 보였다. 다만 박무시 서울에서 16시까지 일정한 수준을

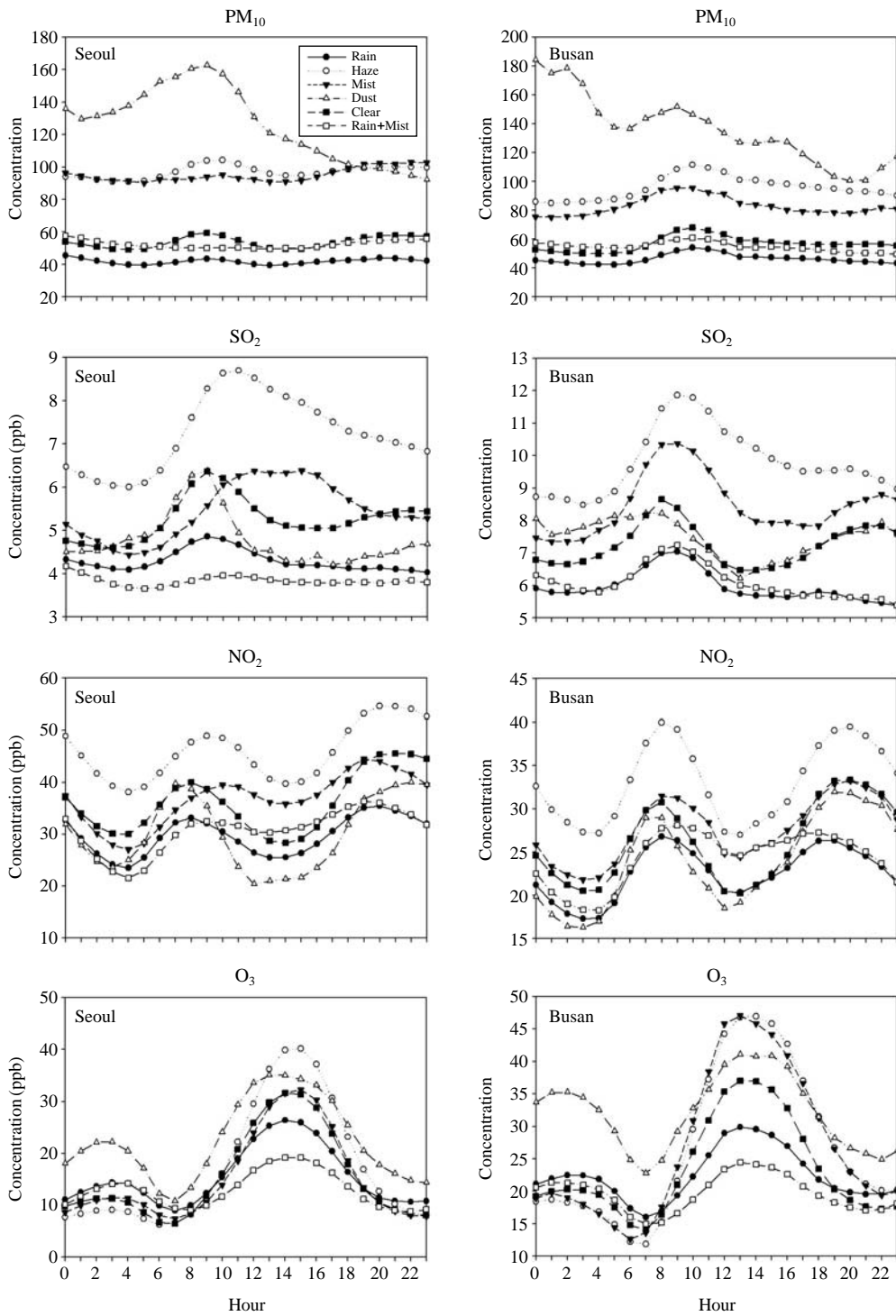


Fig. 3. Hourly averaged variations of observed air pollutant concentrations (PM₁₀, SO₂, NO₂, and O₃) under the several meteorological conditions for the period from 2000 to 2007.

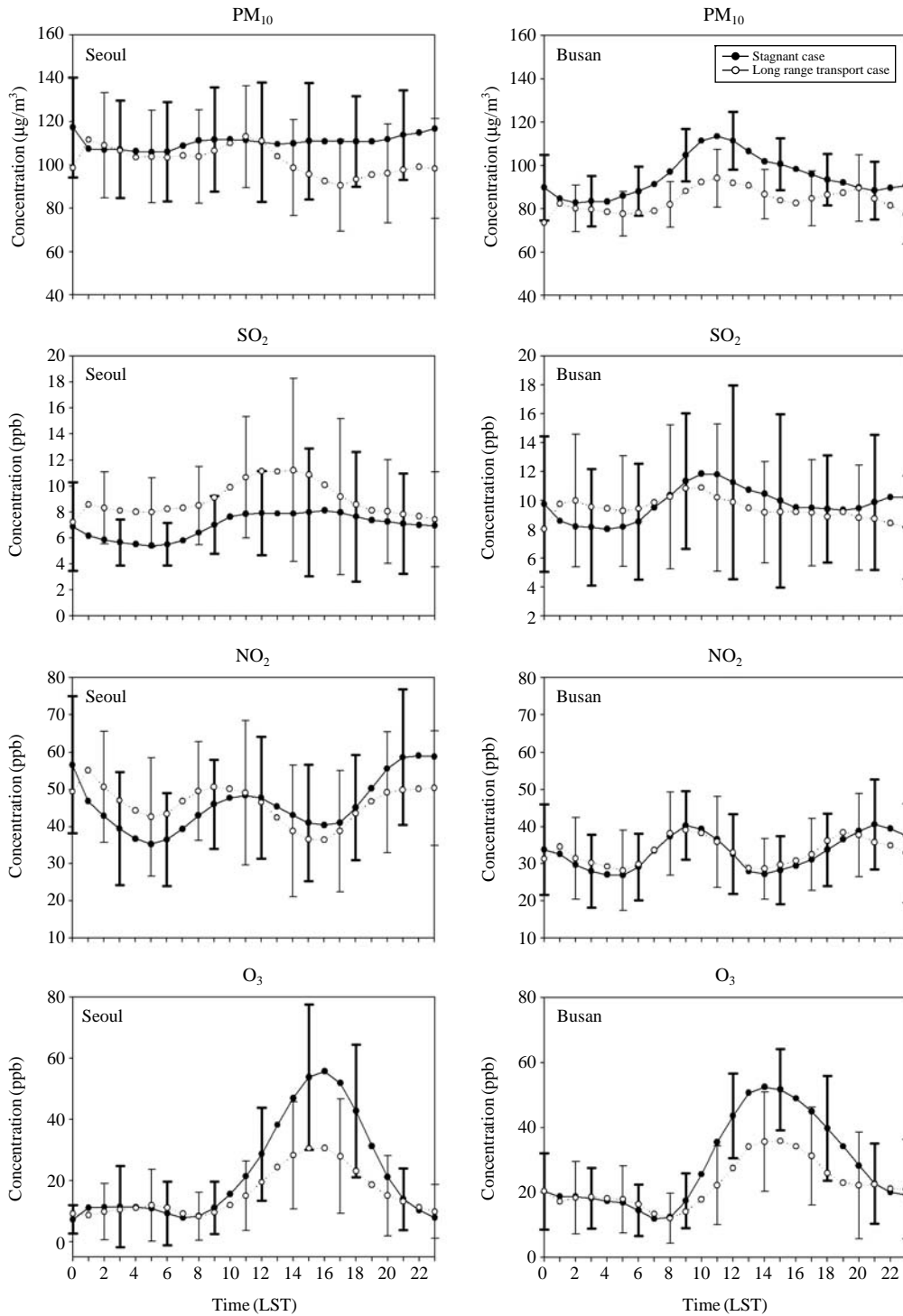


Fig. 4. Hourly averaged variations of observed air pollutant concentrations (PM₁₀, SO₂, NO₂, and O₃) in both stagnant and long range transport haze case for the period from 2000 to 2007.

보이다 이후 증가하고, 20~23시경에 최고값이 나타났으며 부산에서는 연무 사례보다 1~2시간 앞선 9~10시경에 최고치를 보였고 16시까지 일정한 수준을 유지하는 양상을 보였다. SO₂의 경우 PM₁₀의 변화양상과 유사하게 오전 7시 이후로 서서히 증가하여 서울에서 10~11시경에 최고치를 보였으며 부산에서는 이보다 앞선 8~9시에 최고 농도를 보였다.

NO₂의 시간대별 평균 농도 변화양상은 이른 아침과 초저녁 무렵에 최대 농도가 나타나는 이산형(bimodal peak) 분포를 보인 것은 광화학 오존 생성에 의한 감소, 혼합고의 성장과 출퇴근 배출량 영향 등 여러 선행 사례 연구 결과와 동일한 맥락에서 해석될 수 있다. 또한 연무일은 모든 시간대에서 맑은 날에 비해 약 1.5배 가량 일중 내내 높게 나타난 것이 특징이다. 사례별 O₃의 시간대별 평균 농도변화양상은 황사 사례를 제외하고는 사례별 모두 유사한 패턴을 보였으나 연무 사례가 일변화가 가장 높게 나타났고 일 최고치와 최저치의 차이가 가장 큰(서울 36ppb, 부산 40ppb) 특징을 나타냈다. 오존은 황사 사례 시 일변화 폭이 상대적으로 연무 사례 시보다 적었으며 야간의 오존의 소멸과정 또한 적게 나타났다.

정체 혹은 장거리 수송 연무 사례로 세분하여 제시한 대기오염농도 일변화(그림 4)는 각 오염물질별로 조금씩 다르게 나타났다. 미세먼지의 경우 서울에서 정체성과 장거리 이동시 유사한 농도 수준을 보였고, 부산에서는 정체성 사례가 소폭 높게 나타났는데, 이는 역시 그림 2에 나타난 특징과 동일하다. 반면 SO₂의 경우 서울에서는 장거리 수송 사례가 정체성 사례보다 높으며 그 일변화 폭도 높게 나타났고 부산의 경우 그 일변화 경향과 농도 수준이 유사하였다. NO₂의 경우 또한 서울과 부산에서 유사한 경향을 보였으나 서울의 경우 소폭이긴 하지만 두 최소 극값이 정체성 연무시 오후에, 그리고 장거리 수송 사례 시 오전에 상대적으로 더 높게 나타났다. O₃의 경우 유사한 일변화를 보였으나 그 농도 수준은 야간의 경우 거의 유사한 농도 수준을, 그러나 주간의 경우 오존 최고 농도가 정체성 연무시(서울 약 55ppb, 부산 50ppb) 그 농도 수준이 장거리 수송 사례(서울 약 30ppb, 부산 약 35ppb)보다 40~50% 높게 나타남으로써 두 대도시 모두 자체 광화학 반응의 기여도가 훨씬 많음을 유추할 수 있다. 그렇다 하더라도 연무 발생 시 서울과 부산에서 자체적으로 배출된 기체상

오염물질 우세 속에서도 중국 고 배출지역 등의 동아시아 지역으로부터 발생되어 장거리 수송된 전구물질이 광화학 반응에 의해 O₃으로 2차 생성되었음을 유추할 수 있고 미세먼지의 경우도 그림 4의 SO₂, NO₂ 농도 경향을 볼 때 이차 생성에 의한 기여가 상당할 것으로 판단된다. 따라서 동일한 연무라 하더라도 사례별 다양한 물리적·화학적 특성이 다르게 나타날 것으로 판단되어 먼지 농도의 상세한 화학 성분 분석연구가 동반되어야 할 것으로 판단된다. 또한 연무현상 시 대도시인 서울과 부산 자체에서 발생하는 오염물질 농도변화패턴은 유사하나 서울의 경우 이동오염원의 영향으로 NO₂ 농도가 높게 나타난 반면 부산의 경우 고정오염원과 해안의 영향으로 SO₂, O₃ 농도가 상대적으로 높아 지역 대기질 수준의 차이가 있음을 알 수 있었다.

3.3 HYSPLIT 모델을 이용한 고농도 연무 사례 분석

우리나라 대도시의 연무현상은 대기오염물질(PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃)의 일평균, 일 중 시간대별 농도변화수준이 매우 높았으며 연무 발생 배출원에 따른 정체성 사례와 장거리 수송 사례 시 일별 대기질 수준은 SO₂, O₃ 농도에서 주로 뚜렷이 차이가 있었고 특히 장거리 수송 연무의 경우 계절과 무관하게 빈번히 나타났음을 또한 확인하였다. 본 연구에서는 연무 현상 중 장거리 수송 사례의 발원지를 추적해 보기 위하여 미국 NOAA의 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 장거리 수송 연무 사례에 대하여 역적 분석을 수행하였다. 이 때 정체성 사례 또한 함께 분석하였는데, 이를 통해 정체성 사례와 장거리 수송 사례별 차이를 분석해 보고, 특히 장거리 수송 사례의 배출원을 정성적으로 추적하였다. 그 결과 대표적인 경우를 사례별로 그림 5에 제시하였다. 그림 5의 (a), (b)는 정체성 사례, 그리고 그림 5의 (c), (d), (e), (f)는 장거리 수송 사례의 72시간 역적 이동경로와 고도변화를 나타낸 그림이다. 정체성 사례인 그림 5의 (a), (b)는 심한 연무 현상이 나타났던 사례 중에서 음의 와도와 양의 연직 대기안정도, 4m/s 이하의 약한 풍속을 가지는 전형적인 정체성 사례로서 2000년 5월 25일, 2005년 6월 20일이며, 장거리 수송 사례는 2003년 1월 10일, 2006년 5월 21일과 2007년 1월 16일, 2007년 1월 24일이다. 정체성 사례와 장거리 수송 사례 시 모

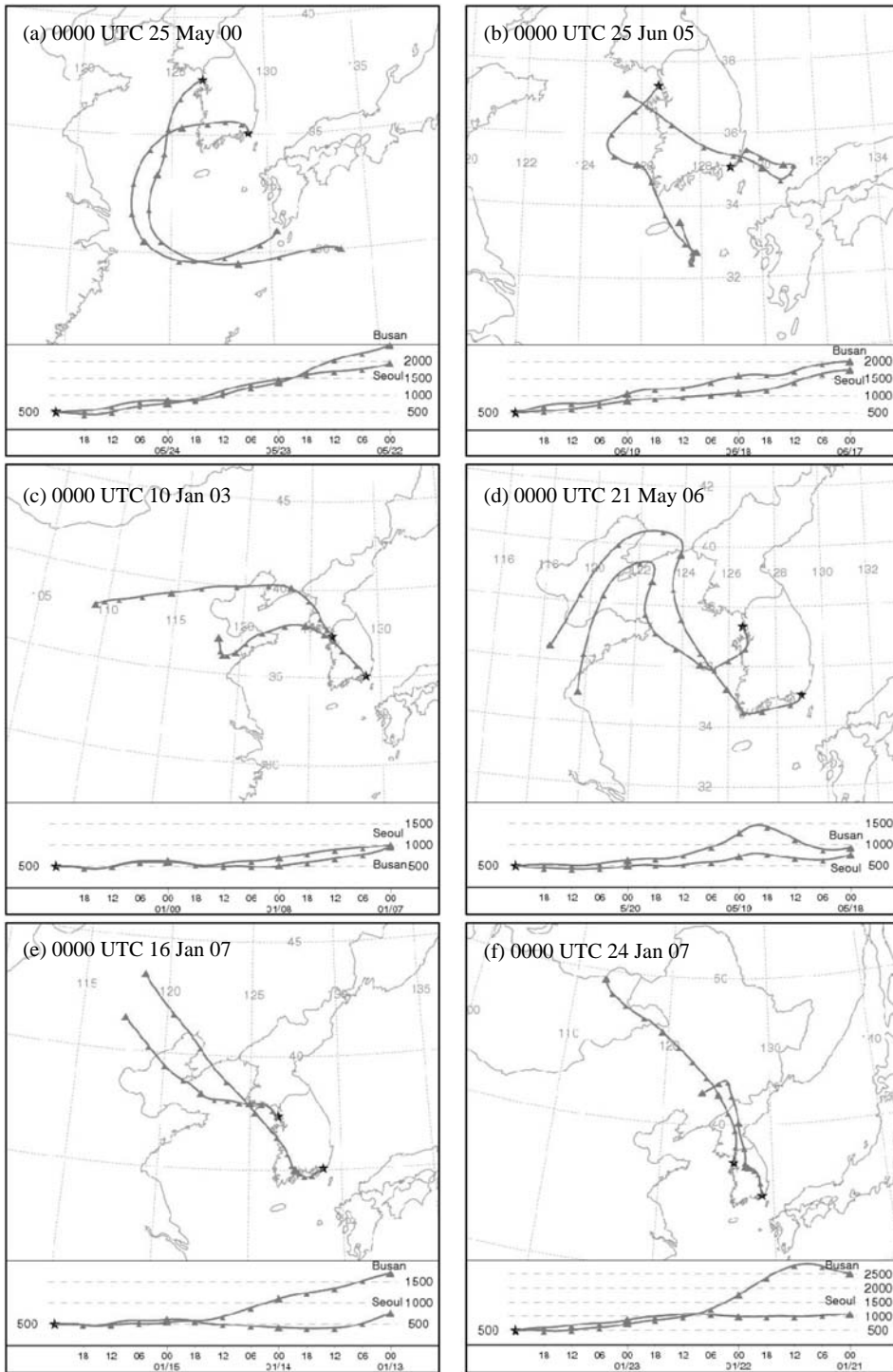


Fig. 5. Backward trajectories for two types of haze: stagnant case (a), (b) and long-range transport case (c), (d), (e), (f) starting from Seoul and Busan, respectively.

든 기류이동이 한반도 내륙이나 서해 남부해상의 대기경계층 이내 고도로 하강하고 있어 연무발생 시기체상·입자상 오염물질이 유입되므로 대기질 수준이 고농도로 나타남을 보였다. 따라서 그림 5의 (a), (b)에서 기류이동이 한반도 내륙이나 서해 남부해상의 상층고도에서 대기경계층 이내 고도로 이동하고 있음을 보여, 특별한 고 배출원 지역에서 기원한 사례가 아닌 지역자체 발생원으로 인한 영향이 크다고 판단되는 사례이며, 선행연구에서 많이 연구되었듯이 한반도의 서해 남부해상에 고기압의 중심이 정체되면서 동서 고압대의 영향을 받는 중관기상 특성으로 인해 국지성 수송 및 확산이 적어 고농도의 대기질 수준을 나타남을 잘 보였다.

반면 장거리 수송 연무 사례 시에는 베이징을 포함하여 고 배출 지역인 중국 화중(혹은 그 이남)지역에서 배출(혹은 경유)하는 경우와 그렇지 않고 황사 발원지와 인접한 만주 및 몽고지역에서 북서풍을 따라 한반도로 직접 이동하거나 혹은 이동과정 중에서 중국 북쪽인 화북지역을 경유하는 사례로 분류할 수 있었다. 그림 4의 (c), (d)는 장거리 수송 사례 시 첫 번째 패턴으로서 중국 고 배출 지역인 화중(혹은 그 이남)지역에서 배출(경유)된 대기오염물질들이 상층기류를 타고 서해안 상공을 거쳐 고도가 점점 낮아지면서 한반도로 유입된 대표적인 사례(2003년 1월 10일, 2006년 5월 21일)이며, 그림 4의 (e), (f)는 내몽골과 고비사막의 중국 북부지역에서 발원하여 북서풍 계열의 바람을 타고 한반도로 직접 유입되거나 혹은 화북지역을 경유하는 패턴(2007년 1월 16일, 2007년 1월 24일)으로서 비록 황사 사례로 분류되지는 않았으나 이와 유사한 연무 수송사례로서 mineral dust 등의 입자상 오염물질들이 상대적으로 많이 장거리 수송되었을 것으로 판단된다. 이 경우 중국 화북지역을 거치면서 중국 대륙지역과 같은 도심지를 경유하면서 인위적 오염물질과의 물리·화학적 상호 작용이 있을 것으로 예상되나 중국 화북지역은 화중지역과 비교하여 배출량의 강도, 화학적 특성이 다르게 나타나므로 연무의 물리·화학적 특성도 구분이 가능할 것으로 판단된다.

각 장거리 수송 사례일을 역궤적 분석을 통하여 정성적으로 조사된 두 사례의 발생 빈도는 각각 다르게 나타났다. 장거리 수송 두 사례 중 그림 5(c, d)와 같은 사례인 중국 화중지역 이남에 존재하는 대도시

에서 주로 배출된 것으로 추정되는 공업지역 배출(경유) 우세사례는 전체 22개 장거리 수송 연무 사례 중 서울 약 70%, 부산 약 85%로 나타났으며, 두 번째인 자연 배출 우세 사례로서 만주 및 몽고 지역에 인접한 지역에서 이동하였거나 이동 중 생성하였을 것으로 판단되는 사례는 서울 약 30%, 부산은 10% 이내로 나타났다. 부산의 경우 장거리 수송 연무 사례는 대부분 중국 화중이남 지역에서 배출(경유)한 사례가 대부분이었으나 일본 혹은 남서 해양지역에서 발원한 공기가 부산으로 이동하면서 연무를 발생시킨 사례(10% 이내)도 제한적이기는 하나 일부 존재하였다.

연무의 두 장거리 수송 사례의 구분은 모델링연구를 통한 각 사례별 배출원-수용지 관계(source-receptor relationship) 계산과 모니터링 연구를 통한 사례별 입자상 물질의 화학성분 고찰 등을 통해서 확인될 수 있을 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서는 연무 발생 시 기류의 발원지 및 이동경로의 차이를 확인할 수 있었고, 특히 장거리 수송 사례의 경우 각 사례별 한반도 대도시 대기오염물질 특성 고찰과 함께 한반도 연무를 발생시킨 발원지 혹은 경유지를 추적, 그리고 장거리 수송성 사례의 중관기상 특징 등을 정성적으로 살펴보았다. 어느 경우든 한반도 대도시 대기질 수준에 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 연무발생 시작에도 다양한 조건과 특성이 존재하였음을 확인하였다.

4. 결 론

분석 기간(2000~2007년) 중 서울과 부산의 지상 기상관측자료로부터 빈도수 높은 기상상태(연무, 강수, 박무, 황사, 청명, 강수+박무)를 각각 추출하여 먼저 연무 발생일을 다른 기상 상태별 대기오염 농도를 비교 분석하였다. 분석 대상 오염물질은 환경부가 운영하는 대기질 측정망 자료에서 얻은 매시간 PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ 농도를 이용하여 연무 발생일에 측정된 대기오염물질의 일별, 시간별 농도변화를 연무가 발생하지 않은 기상상태에서 농도와 비교분석하였다. 또한 연무 발생일에 대하여는 연무의 발생기작을 우리나라 자체 배출 기여가 높은 정체성 사례와 외부 기여율이 높은 장거리 수송사례로 통계적으로 분류

하였다. 그 분류 기준은 종관기상 850hPa 와도와 그 이동속도, 지균풍속, 대기안정도를 이용하였다. 마지막으로 역계적 분석을 통하여 장거리 수송 연무 사례일을 다시 공업지역 배출(경유) 우세 사례와 자연 배출 우세 사례로 세분하여 각 사례의 발원지 및 이동경로를 비교 분석하였다. 그 결과 연무 현상이 서울과 부산에서 동시에 발생한 날 중에서 정체성 사례가 약 64.5%, 장거리 수송형 사례가 35.5%로 나타나 정체성 사례가 약 2배 이상 많았고 지역적으로는 서울이 부산보다 3배 이상 연무가 관측된 날이 많았다. 연무 발생시 일평균 대기오염 농도변화는 SO₂, NO₂, 일 최고 O₃ 농도, 황사사례를 제외한 미세먼지농도가 모두 가장 높게 나타났다. 황사시에는 미세먼지농도만 높게 나타난 반면 연무 사례 시 입자상·기체상 오염물질 모두 매우 높게 나타나 같은 먼지현상이라도 황사와 연무는 매우 다른 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 연무현상과 같이 대기질을 악화시키는 박무현상은 비교적 높은 상대습도로 상대적으로 낮은 농도수준을 보였으나 대부분 강수를 동반하여 나타났고, 강수를 동반한 박무일의 각종 대기질 농도 수준은 연무 발생 시보다 훨씬 낮게 나타났다.

시간대 평균 대기오염물질 농도변화에서도 연무 발생시 황사 사례를 제외하고 최고 농도를 보였고, 일중 시간대별 미세먼지 농도변화 폭은 가장 크게 나타났다. 연무 발생 시 PM₁₀, SO₂가 10~11시에 한 차례의 최고값을 나타내며 비슷한 패턴을 보였고 NO₂는 10~11시, 20~21시에 두 차례의 최고값을 나타냈다. 반면 이차생성물질인 O₃는 태양복사가 강한 오후 2~3시경에 고농도현상을 보이는 전형적인 광화학 패턴을 보였다. 정체 혹은 장거리 수송 연무 사례별 나타난 대기오염농도 일변화는 미세먼지와 NO₂는 서울에서 정체성과 장거리 이동 시 유사한 농도 수준을, SO₂는 장거리 수송 사례가 높게, O₃는 주간에 정체성 사례가 약 30~40% 높게 나타났다.

장거리 수송형 연무 발생사례를 역계적 결과를 통해 다시 세분해 본 결과 두 가지 사례로 구분이 가능하였다. 첫 사례는 중국 화중(혹은 그 이남 지역)에서 장거리 수송된 연무 사례로서 인공 배출원이 우세한 사례이며, 두 번째 사례는 만주 및 몽고 지역에서 인접한 지역에서 장거리 수송되는 사례로서 인공 배출원보다는 자연 배출 기여도가 더 우세할 것으로 사료된다. 각 장거리 수송 사례 중 서울에서는 약 70%가

화중 공업지역 배출(경유) 우세사례로, 나머지 30%가 자연 배출 우세 사례로 세분할 수 있었고, 부산의 경우 화중 공업지역 배출(경유) 우세사례가 약 90%를 차지하였다. 그러나 역계적이라는 정성적인 방법에 의한 것이므로 사례별 입자상 물질의 물리적 화학적 성분 고찰 등 보다 심도 있는 추가 연구가 수행되어야 명료한 특징 구분이 가능할 것이다.

이상의 결과는 연무 생성 메커니즘 구분 기준에 따라 달라질 수 있으나 최소한 자체 기여율이 높은 경우와 그렇지 않은 경우를 일기도를 통해 정성적으로 분류한 것이므로, 보다 정량적인 외부 기여율을 알기 위해서는 장기간의 정량적인 배출원-수용지 관계를 계산하여야 할 것이다. 연무현상은 대기 중에 고농도의 오염물질을 부유시켜 대기오염과 대기질 악화의 원인요소가 되며 그 결과 생태계뿐만 아니라 기후변화에도 영향을 미치므로 대기질 모델링을 통한 더 활발한 발생 기작 및 그 영향연구가 수행되어야 할 것이다. 이 경우 본 연구 결과를 토대로 최소한 한반도 대기질 연구에 있어 자체 기여요인과 외부 요인을 물리기상학적으로 구분하고 그 특성을 이해하는 데 충분한 기초자료가 될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3212)의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문을 완성하는데 도움을 주신 심사위원들께 감사를 드립니다.

참고 문헌

기상청(2002) 기상용어해설, 204pp.
 노영민, 정진상, 김정은, 김영준(2006) GIST 다파장 Raman Lidar를 이용한 2005년 10월에 관측된 연무 현상의 광학적·미세물리적 특성 관측. 한국기상학회 학술대회 논문집, 102-103.
 이권호, 정현록, 김민정, 김영준(2005) 인공위성과 지상 관측 자료를 이용한 2004년 두 가지 연무 현상에 대한 비교 분석. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 313-314.
 Chen, L.W.A., J.C. Chow, B.G. Doddridge, R.R. Dickerson, W.F. Ryan, and P.K. Mueller(2003) Analysis of a

- summertime PM_{2.5} and haze episode in mid-Atlantic region, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 53, 946-956.
- Chun, Y.S., J.Y. Lim, and B.C. Choi (2003) The features of aerosol in Seoul by Asian dust and haze during springtime from 1998 to 2002, *Atmosphere*, 39, 459-474. (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, *Atmosphere*, 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, C.-M., H.-S. Lee, B.-W. Kang, S.-K. Lee, and Y. Sunwoo (2004) Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, *Atmos. Environ.*, 38, 4749-4760.
- Kim, C.-H., I.-S. Park, S.-J. Lee, J.-S. Kim, Y.-D. Hong, J.-S. Han, and H.-A. Jin (2005) Evaluation of the effect of traffic control program on the ambient air quality in Seoul metropolitan area using the lower level stability index of atmosphere, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21(2), 243-27. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P. (2006) Air pollution in Seoul caused by aerosols, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22(5), 535-553. (in Korean with English abstract)
- Lim, J.H., Y.-C. Chun, K.M. Cho, S.S. Lee, and H.J. Shin (2004) The meteorological, physical, and chemical characteristics of aerosol during haze event in May 2003, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(5), 697-711. (in Korean with English abstract)
- Wang, Y., G. Zhuang, Y. Sun, and Z. An (2006) The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze, and clear days in Beijing, *Atmos. Environ.*, 40, 6579-6591.
- United Nation Environment Programme (2002) *The Asian Brown Cloud: Climate and Other Environmental impacts.*