

## 서해연안 도시지역의 대기질 특성 연구: 군산과 전주의 대기질 비교를 중심으로

### Characteristics of Air Quality in the West-coastal Urban Atmosphere

김 득 수\* · 마 휘

군산대학교 공과대학 환경공학과 대기환경연구소

(2009년 10월 1일 접수, 2009년 11월 21일 수정, 2009년 12월 3일 채택)

Deug-soo Kim\* and Hui Ma

*Department of Environmental Engineering, Atmospheric Environmental Laboratory  
Kunsan National University*

(Received 1 October 2009, revised 21 November 2009, accepted 3 December 2009)

#### Abstract

This study is to investigate the air pollution characteristics of an industrialized midsize west-coastal city by comparing air quality to a neighboring inland city. The hourly averaged data of O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, and PM<sub>10</sub> measured from continuous air quality monitoring sites in Gunsan (coastal) and Jeonju (inland) were analyzed. The data set covers the period from 2004 to 2006. The annual average concentrations of the air pollutants in two cities were compared in their abundances and temporal trends as well. O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> in Gunsan were relatively higher than those in Jeonju, while vice versa in case of NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub>. It seems that heavy automobile emissions from Jeonju mainly bring on higher NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> than those in Gunsan on annual base. NO<sub>2</sub> concentrations in both cities showed bimodal diurnal variations with peaks in the morning and in the late evening. These peaks correspond to the coupled effects of rush hour traffic and meteorological conditions (i.e., variation of mixing height and dispersion conditions). Maximum hourly averages of NO<sub>2</sub> ranged from 18 ppb to 28 ppb at Jeonju, and from 12 ppb to 20 ppb at Gunsan. O<sub>3</sub> showed typical diurnal variation with a maximum in the afternoon between 14:00 and 16:00 LST. Diurnal variations of CO and PM<sub>10</sub> were similar to NO<sub>2</sub> while SO<sub>2</sub> was similar to O<sub>3</sub>. Seasonal variations of PM<sub>10</sub> in both cities indicated that their concentrations during spring season were significantly high. Asian dust storms occur frequently during spring and seem to affect increase in PM<sub>10</sub>. High O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> days were selected from both cities. The analyses based on the HYSPLIT trajectory model during the high O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> showed these episodes (six cases) were mostly coincident with Asian dust storm originated from northern China and Mongolia. However, these high air pollution episodes in the west coastal cities may not only be caused by the Asian dust but also affected by other air pollutants transported from China accompanying the Asian dust.

**Key words** : Urban air quality, West-coastal air quality, Ozone episode, Asian storm, Back trajectory

---

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)63-469-4764, E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

## 1. 서 론

군산시는 인구 약 30만 정도의 공업 항만도시로 인근 해안에 새만금 방조제 사업의 완공에 이어 산업단지 조성을 위한 내부 간척사업이 진행 중이며, 현대중공업의 대단위 조선소 입주와 함께 향후 산업단지의 활성화와 지역개발 수요를 위한 신항만 건설사업 확정 등 개발의 열기가 더해가고 있다. 따라서 장래 대기오염물질의 증가로 지역 대기질 악화에 영향을 줄 것으로 예상된다. 이들 오염물질 중 공단 및 도시에서 발생하는 미세먼지 농도는 지역 배출원 종류와 계절별 연료사용량의 변화, 지역의 지형특성과 연관된 기상학적 요인 등에 의해 주로 영향을 받는다(Son and Kim, 2009; Park and Kwon, 2006). 군산시는 해안에서 불과 십여 km에 위치하여 중국과 인접해 있고 군산 외항 인근에는 지방공단과 국가공단이 위치함으로 해서 중국으로부터 서해안으로 유입되는 황사와 지역 오염물질로 인한 영향이 가중되어 나타날 수 있다. 황사로 인한 피해는 발생지 주변의 국지적 영향뿐 아니라 장거리 수송으로 수천 km 범위 영역에도 영향을 미치는 것으로 나타나 국제적인 관심과 협력이 필요한 지역환경 문제로 인식되고 있으며(Chang *et al.*, 2009; David *et al.*, 2001; Jaffe *et al.*, 1999), 결과적으로 향후 공단 배출원 증가와 함께 중국에서 서해안으로 유입될 수 있는 황사를 포함한 대기오염물질의 증가로 인한 영향이 가중되어 군산시와 인근 지역의 직·간접적 환경 피해사태의 증가가 예상된다.

본 연구에서는 군산지역을 주 대상으로 서해안에 입지한 중규모 해안공업도시의 대기질 현황과 황사 발생시 장거리 수송에 따른 대기질 영향을 고농도 사례연구를 통해 조사하였다. 또한 전북지역에서 가장 규모가 큰 인근 내륙도시인 전주와의 비교를 통하여 연안도시의 대기질 특성을 조사하였다. 이를 위해 최근 3년간의 도심대기질 측정망 자료를 사용하여 군산시 도심에서의 오염원에 의해 주로 발생하는 주요 대기 오염물질의 시간·공간적 배출분포 특성을 파악하였으며 장거리 수송에 따른 영향도 함께 분석 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 지역대기질 측정자료 분석

대상지역의 도시대기질 특성분석을 위해 광화학 생성물인 오존(O<sub>3</sub>)의 농도 경향을 중심으로 단기간 동안 집중된 실시간의 측정결과를 기초자료로 사용하였고, 장기간 지역 대기질 특성분석을 위해 국가 대기오염자동측정망에 포함된 군산과 전주에 설치되어 있는 측정소의 주요 대기오염 기준물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub>)의 장기간 대기질 자료를 분석하였다. 지역대기질 자료의 분석은 환경부와 지자체에서 관리하고 있는 지역대기오염자동측정망자료를 입수(전라북도 보건환경연구원의 협조, 환경부 국립환경과학원을 통한 일부자료 구매)하여 연구개시 기준 최근 3년간(2004~2006)의 군산(3지점)과 전주(3지점) 측정소에서 관측된 주요 대기오염물질의 시간과 공간에 따른 농도변화 경향을 조사하여 수행하였다. 단기간의 집중측정은 실시간측정과 기기관리가 용이한 군산대학교 교정에서 2007년 10월부터 2008년 4월까지 수행되었으며, 이차오염물의 특성을 이해하기 위해 O<sub>3</sub> 생성에 관여하는 질소산화물(NO와 NO<sub>2</sub>)과 O<sub>3</sub>의 농도 경향을 위주로 비교 분석하였다.

농도측정 대상 오염물질은 자동측정망의 경우 기체상 대기환경 기준물질이었으며, 군산대학교 내에서의 실시간 측정은 SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>에 대해 수행되었다. 각 지점에서 관측된 15분 평균 자료를 기초자료로 하여 각 오염물질별로 일변화, 월별변화, 계절변화와 경년변화를 조사하였고 대기화학적 특성을 분석하였다. 측정소들이 위치한 도시와 각 측정소가 위치한 지역 특성을 고려하여 지역적 차이에 따른 분석을 수행하였다. 그림 1은 분석에 이용된 군산시내 대기오염 자동측정망 3개 측정소(소룡동-공업지역, 신평동-상업지역, 개정동-주거지역)의 위치를 나타낸 것이다.

### 2.2 실험방법 및 정도검사

주요 대기오염물질의 집중 연속측정은 지역대기자동측정망자료와 병행하여 군산대학교 대기환경연구실 건물옥상(N35° 56', E126° 40')에 설치된 시료흡입관(glass manifold)을 통하여 대기환경 중 오염물질 농도를 측정하였다. 측정에는 연구실에서 상시운영

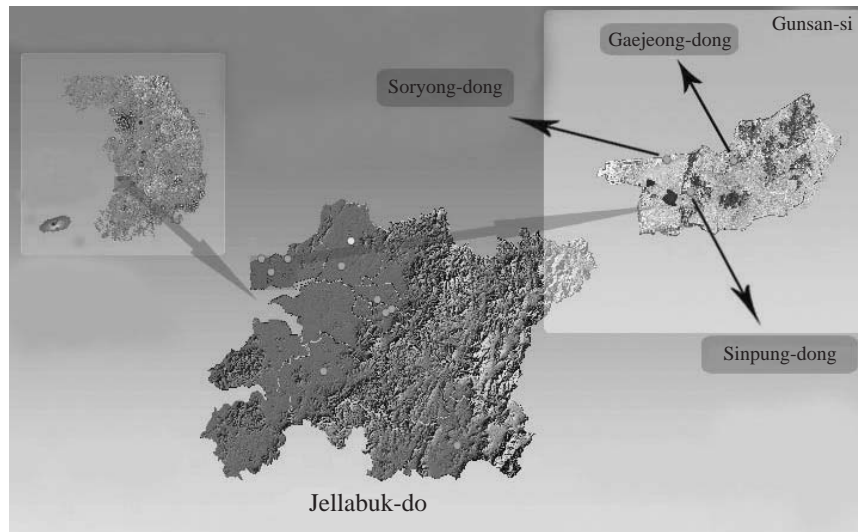


Fig. 1. Automated ambient air quality monitoring sites (●) in Jeonbuk province.

Table 1. Continuous real time gas analyzers for ambient air monitoring.

Gas analyzer and calibrator	Instrument model name
Chemiluminescence NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> analyzer	Thermo Environmental Instruments Inc. Model 42C
Pulsed fluorescence SO <sub>2</sub> analyzer	Thermo Environmental Instruments Inc. Model 43
U.V. photometric O <sub>3</sub> analyzer	Thermo Environmental Instruments Inc. Model 49
Multi-gas calibration system with zero-air supply	Thermo Environmental Instruments Inc. Model 146

중인 기체상 대기오염물질 실시간 측정기(SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>)가 사용되었으며, 측정자료의 신뢰성 확보를 위하여 내·외부 정도검사(internal and external: 외부검사의 경우는 매년 정기적으로 환경관리공단에 의한 환경측정기기 정도검사 수검)를 수시로 실시하였다. 이번 연구를 위한 실제 집중측정에 앞서 외부기관에 의한 정도검사가 1개월 전에 실시되었다.

대기환경연구실에서 기체상 대기오염물질 실시간 측정에 사용된 장치목록은 표 1과 같다. 이들 장치는 대기 중 농도를 측정하기 위한 것으로 실험실 조건에서 측정하기 전에 일정농도로 제조된 미국 NIST 인증표준기체를 이용하여 정도검사를 실시하였다. 이러한 내부 정도검사는 측정기간 중 일상적으로 행하는 zero/span검사를 통해 이상이 확인되었을 경우에도 수행되었으며, 항상 최상의 측정조건을 위해 준비하였다. 또한 외부 공인기관을 통한 정도관리를 연중 1회 실시하여 자료의 신뢰성을 확보하도록 하였다.

기체 분석기의 측정결과는 실시간으로 Campbell사의 data-logger(CR1000)를 통해 매 15분 간격으로 저장되었다. 군산대학교 교정에서의 주요 기체상오염물질 농도는 지역 대기질자료와 자동측정망자료의 비교를 위해 외부 정도검사 이후 2007년 10월부터 2008년 9월까지 24시간 연속 가동하였다.

입자상물질에 대한 조사는 측정장치의 작동에 문제가 있어 기체상 물질의 측정시기와 일치시키지 못하였으며, 2008년 2월에는 PM<sub>10</sub>의 경우는 연속 2일간, PM<sub>2.5</sub>의 경우는 연속 3일간 2회 정도 시험 가동하여 농도를 측정하였다. 2월 이후로는 가능한 주 1회~2회 주기로 일(24시간 연속측정)가동해오고 있으며, 질량농도 분석과 함께 이온크로마토그래피를 이용하여 주요 양이온과 음이온 분석을 수행하였다. 시료채취는 실시간 측정장치와 같은 군산대학 대기환경연구실 옥상으로 휴대와 이동이 간편한 휴대용 미세먼지측정기(Air Metrics MiniVol Portable Sam-

**Table 2. Statistical summary of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub> at Jeonju and Gunsan (2004~2006).**

Pollutant	Year	Mean		Median		Max		Min		Exceedances	
		Jeonju	Gunsan	Jeonju	Gunsan	Jeonju	Gunsan	Jeonju	Gunsan	Jeonju	Gunsan
O <sub>3</sub> (ppm) (0.1)	2004	0.015	0.022	0.013	0.02	0.089	0.097	0.001	0.001	0	0
	2005	0.018	0.019	0.015	0.018	0.092	0.084	0.001	0.001	0	0
	2006	0.022	0.024	0.019	0.022	0.086	0.097	0.001	0.001	0	0
NO <sub>2</sub> (ppm) [0.03](0.1)	2004	0.017	0.018	0.015	0.016	0.202	0.128	0.001	0.001	2	4
	2005	0.022	0.013	0.019	0.01	0.118	0.057	0.001	0.001	8	0
	2006	0.017	0.014	0.014	0.012	0.091	0.145	0.001	0.001	0	1
SO <sub>2</sub> (ppm) [0.02](0.15)	2004	0.004	0.005	0.003	0.004	0.087	0.123	0.001	0.001	0	0
	2005	0.004	0.005	0.003	0.004	0.085	0.083	0.001	0.001	0	0
	2006	0.004	0.006	0.003	0.004	0.056	0.074	0.001	0.001	0	0
CO (ppm) (25)	2004	0.677	0.666	0.7	0.6	6	3.8	0.1	0.1	0	0
	2005	0.694	0.674	0.7	0.5	2.9	7.9	0.1	0.1	0	0
	2006	0.673	0.689	0.7	0.6	3.4	5.8	0.1	0.1	0	0
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> ) [70]	2004	49	48	44	42	377	513	1	1	/	/
	2005	49	48	42	40	472	561	1	1	/	/
	2006	54	50	44	42	747	743	1	1	/	/

※ [ ] and ( ) denote national ambient air standard for long term and short term, respectively.

pler)를 사용하여 PM<sub>10</sub>을 측정하고, U.S. EPA reference method RFPS-0694-098을 적용하는(Rupprecht & Patashnick Co., Inc., 2004) Partisol Model 2000 Air Sampler (Rupprecht & Patashnick Co., Inc.)를 이용하여 PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1 지역 대기질 자료의 분석결과

##### 3.1.1 지역 대기질의 연간 경향

군산과 전주는 도심에 근접하여 공업단지가 위치하고 있는 면에서는 매우 유사하지만, 전주의 인구(627,000여명, 2007년 기준)가 군산(263,000여명)의 2배 이상 많으며, 인구밀도의 경우도 2006년 기준으로 군산이 전주의 약 1/4 수준 정도로 도시규모에서 차이가 있다. 군산시는 우리나라의 중서부에 위치하여 동절기에는 대륙성기후, 하절기에는 해양성기후의 영향을 받는다. 최근 10년간(1995~2004)의 연평균 기온은 13.0°C이며, 2004년의 최고기온은 35.3°C, 최저기온은 -14.7°C로 한서의 차가 비교적 크다. 최근 10년간 연평균 강수량은 1,269.1 mm로서 이중 50% 이상이 하절기인 7~9월에 집중된다. 평균풍속은 약 3.4 m sec<sup>-1</sup>이며, 지역 내 주풍향은 서풍으로 겨울에

는 대륙성 고기압의 영향으로 북서풍이, 여름에는 북태평양 고기압의 영향으로 남동풍이 주풍향으로 나타났다. 한편 전주시는 대륙성 기후를 보이며 여름과 겨울의 기온차가 큰 연평균 기온은 13.8°C, 강수량은 1,417.1 mm로서 역시 여름철에 집중된다. 평균풍속은 1.9 m sec<sup>-1</sup>로 군산시에 비해 낮게 나타나고, 연중 주풍향은 남동풍이 우세하게 나타났다. 또한 지형적으로 군산은 서해안에 인접한 항만공업도시로 새만금지역에 접해있으며, 전주는 도내 중심부에 위치하면서 남동쪽에 산지를 끼고 군산에서 남동쪽으로 약 50 km 내륙에 위치한다.

해안공업도시인 군산시와 전주시의 최근 3년간 대기질 경향을 표 2에 제시하였다. 대상물질별로 평균값 변동을 보이고 있는데, 전반적으로 전체기간 중 군산과 전주의 평균농도의 경우 O<sub>3</sub>과 아황산가스(SO<sub>2</sub>)의 경우 군산이 각각 ~0.022 ppm과 0.005 ppm으로 전주의 0.018 ppm과 0.004 ppm보다 높게 나타났다. 그 밖에 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 경우는 전주가 0.019 ppm, 0.681 ppm, 52 µg m<sup>-3</sup>으로 군산의 0.015 ppm, 0.676 ppm, 49 µg m<sup>-3</sup>보다 높게 나타났다.

주요 오염물질농도의 경우 전주, 군산 두 지역 모두에서 NO<sub>2</sub>를 제외하고는 대기환경기준을 초과하지 않았다. NO<sub>2</sub>의 경우는 전주에서 8회, 군산에서 3회

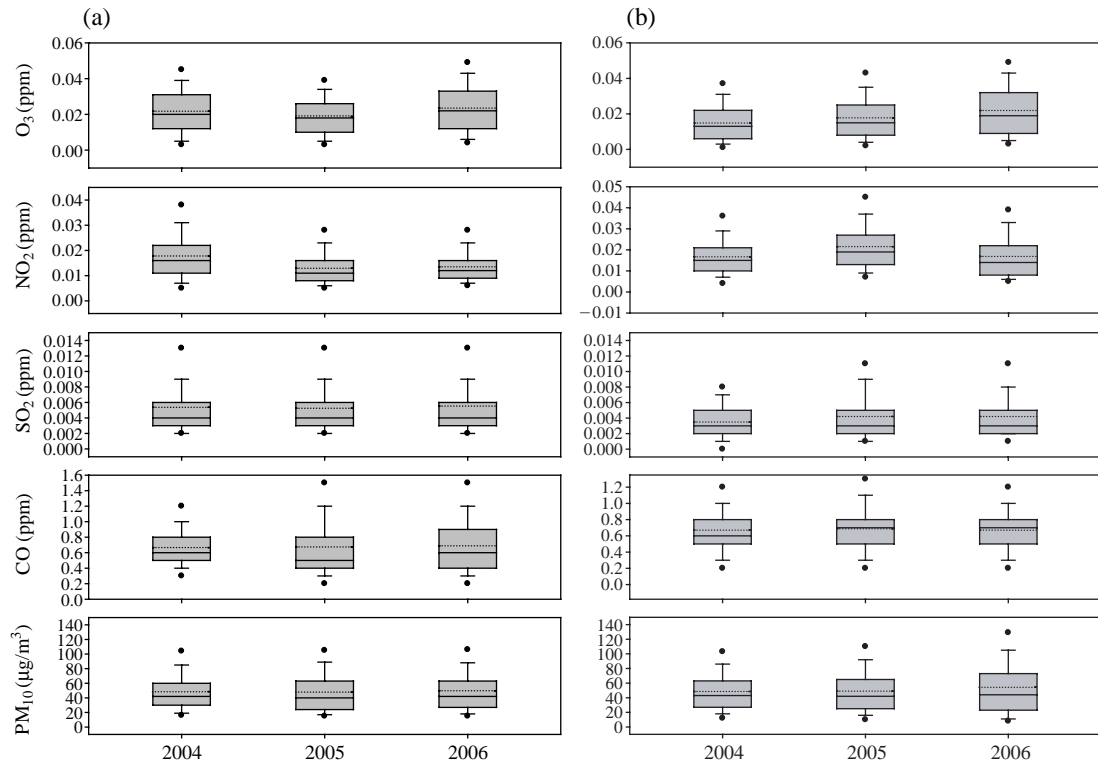


Fig. 2. Statistical plots of yearly variations for major air pollutants at (a) Gunsan and (b) Jeonju. Dots denote 5 and 95 percentile. Lower and upper bars represent 10 and 90 percentile, respectively. Box boundary indicate 25 and 75 percentile. Solid and dot lines indicate median and mean, respectively.

환경기준을 초과한 것으로 나타났다.  $O_3$ 과  $PM_{10}$ 의 경우는 환경기준에는 미치지 않은 것으로 나타났으나, 최대치의 경우 단기간 환경기준에 근접하거나 초과하는 것이 확인되어,  $NO_2$ 와 함께 지역대기질 악화에 기여하고 있음을 보였다. 따라서 공업단지가 도심과 혼재된 중규모 도시의 경우도 공단의 배출시설물과 함께 도시지역의 주 오염원인 차량운행에 따른 오염물질의 배출로 인한 지역대기질 악화(Oh *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2008)를 방지하기 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

그림 2는 군산시와 전주시 측정망자료의 연평균값, 중앙값, 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95% 값들을 나타낸 것이다. 군산의 연간변화 경향은  $NO_2$ 의 경우 점차적으로 개선되는 것으로 보이나, 그 밖의 물질들인  $SO_2$ 와  $CO$ 는 정체되거나 악화되는 경향이 나타난다.  $O_3$ 와  $PM_{10}$ 의 경우 약한 증가세가 나타나고 있

으며,  $PM_{10}$ 의 최대농도의 경우 수백  $\mu g m^{-3}$  이상( $513 \sim 743 \mu g m^{-3}$ )의 농도가 나타나고 있어 황사발생일 조사와 함께 일부 고농도 사례연구를 수행하여 그 관련성을 조사하였다.

전주시의 경우  $O_3$  농도는 2004년 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 95% 순위 값의 경우도 0.04 ppm에서 0.05 ppm 수준으로 증가세를 보였다. 그 외  $NO_2$ 와  $CO$ 의 경우는 다소 감소하거나 정체하는 경향을 보였으나,  $SO_2$ 와  $PM_{10}$  농도는 증가하여 95% 순위농도가 2004년에는 0.008 ppm과  $100 \mu g m^{-3}$  수준에서 2006년에는 0.012 ppm과  $130 \mu g m^{-3}$  수준으로 각각 증가하였다. 이 기간 중  $PM_{10}$ 의 단기간 최대농도는  $377 \sim 747 \mu g m^{-3}$ 으로 기록되어 측정기간 중 발생한 황사로 인한 영향으로 추정되었다. 이상에서와 같이  $NO_2$ 와  $CO$ ,  $PM_{10}$ 의 경우는 평균적으로 전주시의 경우가 상대적으로 높게 나타났는데, 이는

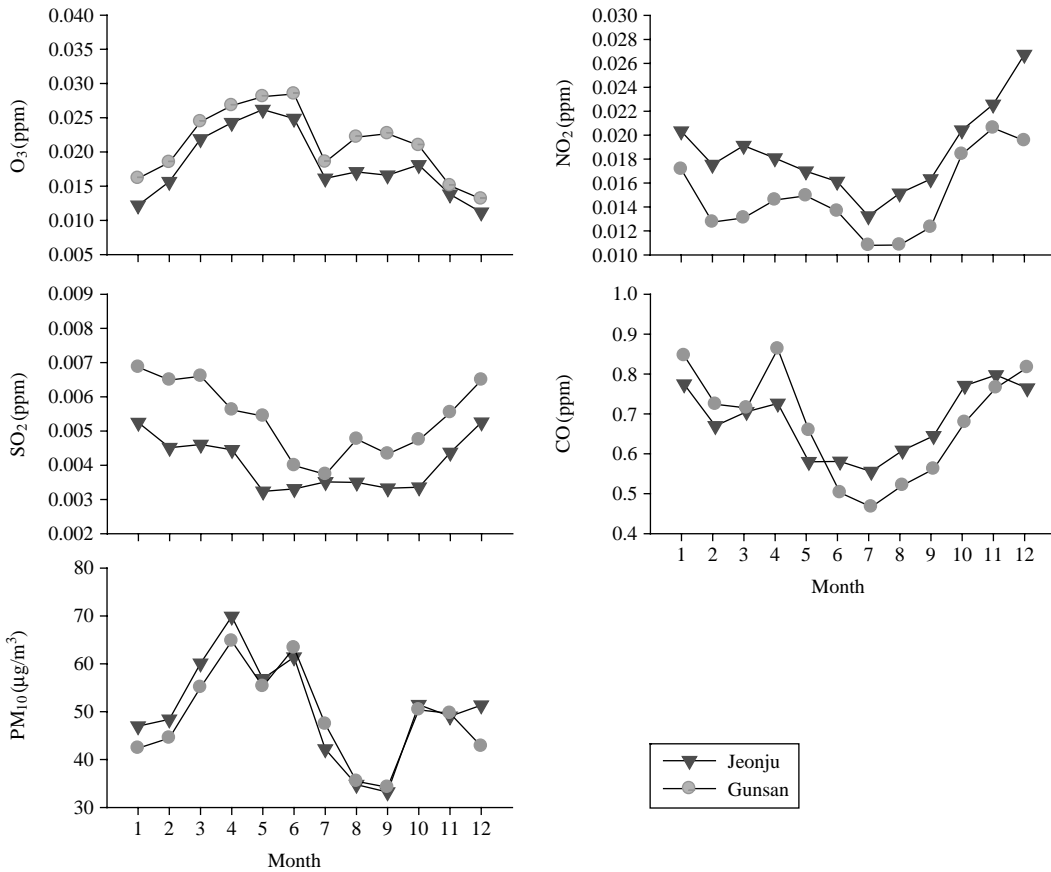


Fig. 3. Plots of monthly averages air pollutants at Gunsan and Jeonju (2004~2006).

NO<sub>2</sub>와 CO의 도심 주요배출원이 자동차임을 고려할 때 전주시에서 상대적으로 많은 차량과 높은 교통량을 보이기 때문에 사료된다. 반면에 SO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>의 경우는 군산시가 약간 높은 경향을 보였는데, SO<sub>2</sub>가 점오염원이 주요배출원임을 고려할 때 군산의 경우 해안에 입지한 공단에 밀집한 점오염원들로부터 해풍(주풍향 역시 서풍계열)에 의한 이류로 도심대기질이 영향을 받기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.1.2 지역대기질의 월별 경향

그림 3은 3년간의 군산과 전주지역에서의 주요대기오염물질에 대한 월평균 농도의 변화경향을 도시한 것이다. 두 지역 오염물질의 월평균에 의한 변화경향은 매우 유사함을 보였다. 연중 대부분의 대상물질 농도가 7월과 8월경에 감소함을 보였으며, 지역의

기후특성으로 여름철에 집중된 강우로 인한 세정효과가 크게 작용했을 것으로 추정될 수 있다. 한편, 최근에는 여름철 상대적으로 낮은 대기오염경향이 강수로 인한 세정효과 이외에도 여름철 북서태평양 기단과 중국남부의 청정한 공기체(air mass)의 유입에 따른 영향인 것으로 이해하듯이 종관기상학적인 관점으로 설명되는 사례가 있었으며(Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007), 추후 종관기상학적 기단배치가 지역대기질에 미치는 영향도 계절적 변화에 주요변수가 될 수도 있을 것이다. 봄과 여름철에 상대적으로 증가한 O<sub>3</sub>과 PM<sub>10</sub>의 경우는 광화학 반응에 의한 이차생성이 주로 기여했기 때문으로 판단된다. 한편 겨울철에는 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>, CO 농도가 여름철에 비해 상대적으로 높게 나타나 겨울철에는 일차오염원으로 인한 영향이 비교적 우세하게 나타났다. 두 지점에서

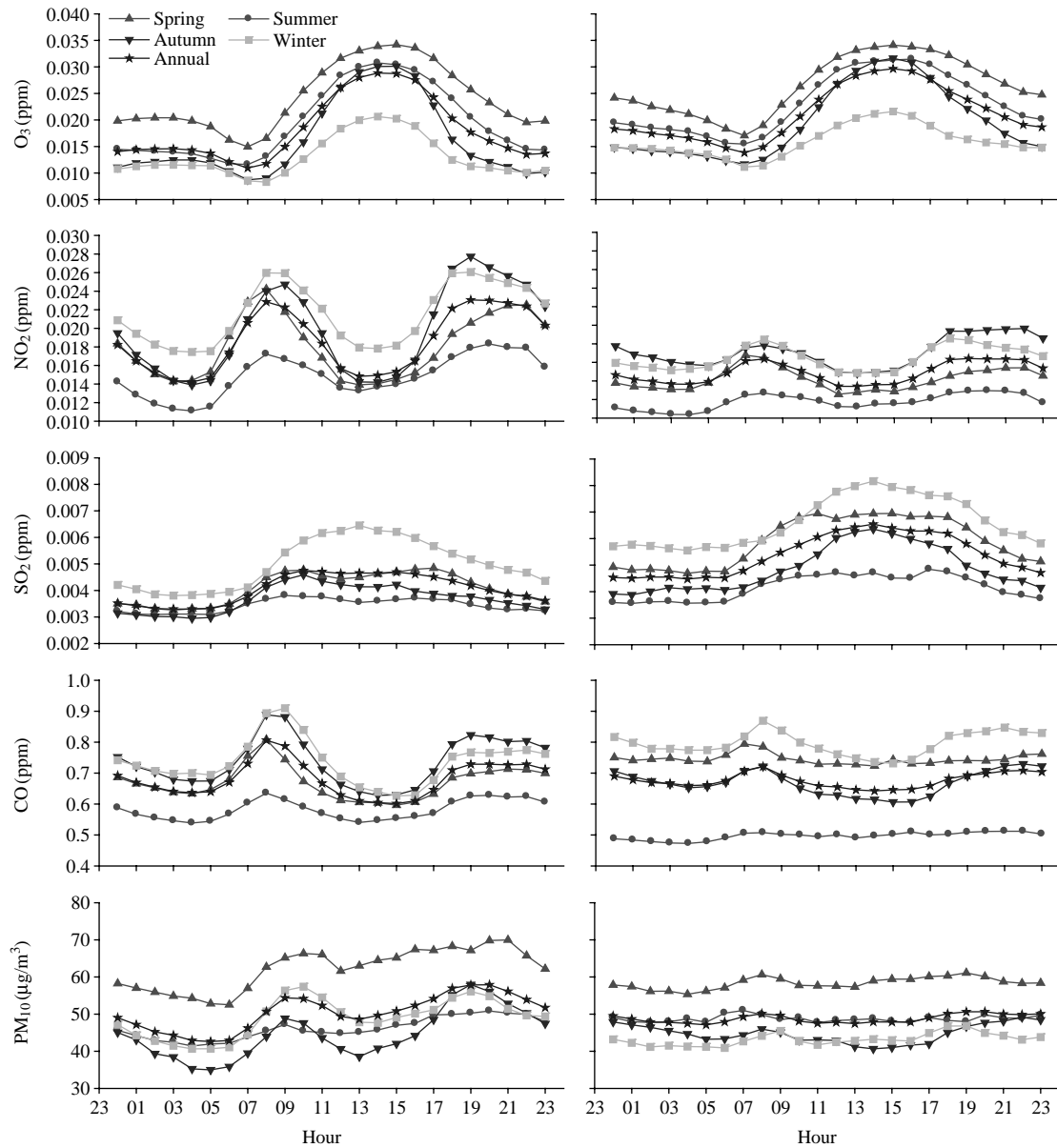


Fig. 4. Composite diurnal variations of air pollutants for each season at Gunsan (right) and Jeonju (left) during 2004~2006.

오염물질의 월별경향은 유사하게 나타났지만, 오염물질의 상대적 농도 크기는 전주와 군산에서 비교적 상이하게 나타났다. NO<sub>2</sub>와 CO, PM<sub>10</sub>의 경우, 연평균 농도는 모두 전주가 군산에서 보다 높게 나타났으나 월별경향은 차이를 보였다. 전월에 걸쳐 NO<sub>2</sub> 농도는

모두 전주가 군산에서 보다 높게 나타났으나, CO의 경우 겨울과 봄철(12월, 1월~5월)에는 군산에서 높게 나타난 반면 여름과 가을철(6월~11월)에는 전주에서 더 높게 나타나 계절에 따른 배출특성변화에 차이가 있음을 보였다. 또한 PM<sub>10</sub> 농도는 CO와는 상

**Table 3. Monthly average of air pollutants at KNU monitoring site.**

Yr-Month	SO <sub>2</sub> (ppb)	O <sub>3</sub> (ppb)	NO (ppb)	NO <sub>2</sub> (ppb)
2007-10	3.95±1.33	15.76±7.63	12.00±10.03	11.40±2.63
2007-11	6.98±2.62	24.84±10.24	13.18±10.00	13.73±3.80
2007-12	8.57±2.18	20.07±6.39	10.79±7.78	14.22±3.03
2008-01	8.79±3.12	23.17±6.21	13.34±11.68	19.29±3.06
2008-02	9.85±4.18	33.88±11.34	11.85±13.83	15.61±6.02
2008-03	7.32±4.44	40.86±13.09	6.25±8.67	13.39±4.17
2008-04	8.04±6.19	52.14±15.16	4.44±7.91	10.95±3.12

반되게 겨울과 봄철에는 군산에서 낮고 여름과 가을철에는 전주에서 낮게 나타났다. 한편 O<sub>3</sub>과 SO<sub>2</sub>의 경우는 모두 고르게 군산이 전주에서 보다 높은 수준의 농도를 보였으며, 월별경향이 매우 유사하게 나타났다. 전주의 경우 군산에 비해 상대적으로 높게 기록된 NO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>의 경우는 도시규모의 차이와 이동오염원의 영향이 가장 큰 원인일 것으로 사료되며, 군산의 경우 전주에 비해 연중 높았던 O<sub>3</sub>과 SO<sub>2</sub>의 경우는 고정오염원이 집중된 공단이 해안에 위치하여 지역기상특성으로 인한 해륙풍의 영향이 함께 지역 대기오염도에 기여했을 것으로 예상된다.

일반적으로 도심의 O<sub>3</sub>은 NO<sub>2</sub>의 광분해(photo-dissociation)와 탄화수소의 촉매역할에 의한 광화학과정을 통해 생성된다(Finlayson Pitts and Pitts, 1986). 미세먼지의 경우도 이차적인 생성에 의한 기여가 상당한 것으로 보고되고 있으며, 일반적으로 오존농도가 높은 경우에는 미세먼지의 농도도 함께 증가하는 경향이 있다(Kim, 2006). PM<sub>10</sub>의 월변화 경향도 오존과 유사하게 나타나고 있으나 4월에 최대가 되었고, 8월과 9월에 가장 낮으며 10월까지 다시 증가하여 겨울동안 일정 농도를 보이고 있다. 3, 4월의 고농도 경향은 동 시기에 빈번히 발생하는 중국으로부터의 황사 영향이 주된 것으로 보인다. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO는 주로 배출원으로부터 직접 발생하는 일차오염물로 알려져 배출원의 영향이 크게 나타난다. 따라서 이들 물질의 농도는 일반적으로 지표의 대류현상에 의해 난류혼합이 왕성하고 잦은 강수에 의한 washout 영향으로 여름철에 낮고 연료 사용량이 증가하는 겨울철에 증가하는 경향을 보이고 있다.

3.1.3 지역대기질의 일중 시간 경향

군산과 전주지역의 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>의 3년간의 매시간자료를 평균하여 계절별로 일중 시간변

화를 그림 4에 도시하였다. 두 지역에서의 장기간 일중 시간경향은 매우 유사하였으며, O<sub>3</sub>과 NO<sub>2</sub>의 경우 전형적인 도시지역의 시간변화경향을 나타내었다. O<sub>3</sub>의 시간변화는 이른 아침과 밤 동안은 매우 낮으며 오후 2~3시 경에 최고조에 이르는 형태를 보였다. NO<sub>2</sub>의 변화경향은 이른 아침과 초저녁 무렵에 최대 농도가 나타나는 이산형(bi-modal peak) 분포를 나타내었다. O<sub>3</sub>의 경우 이른 아침과 저녁 무렵의 낮은 농도분포는 오존 전구물질이 매우 적고 또한 광화학생성에 따른 오존발생이 거의 없기 때문이다. 이른 아침에 O<sub>3</sub>이 증가하는 경향은 출근 차량 증가로 인한 NO<sub>2</sub> 배출과 일사량 증가에 의한 것으로 광화학과정으로 생성된 O<sub>3</sub>이 증가함에 따라 NO<sub>2</sub>가 감소하고 있음을 보이고 있다. O<sub>3</sub>은 오후 3시경에 최대농도를 보인 후 서서히 감소하여 저녁 무렵에는 배경수준의 농도를 지속하였다. 퇴근 무렵부터 나타나는 NO<sub>2</sub> 증가현상은 차량의 배출증가와 대류층의 변화로 인한 대기혼합 공간의 감소에 따른 현상으로 생각된다. CO의 일중 시간경향도 NO<sub>2</sub>의 변화경향과 매우 유사하게 나타나고 있어 CO의 경우도 이동오염원에 따른 배출이 해당 도시지역 대기질에 상대적으로 높게 기여하고 있는 것으로 추정된다. 반면에 SO<sub>2</sub>는 겨울철이 타 계절에 비해 높게 나타났으며, 오후 시간대에 비교적 높은 것으로 기록되었다. PM<sub>10</sub>의 경우는 황사현상이 잦은 봄철이 타 계절에 비해 월등히 높게 나타났으며, 낮 동안에 상대적으로 고농도를 보였다. 한편 도시를 중심으로 설치된 지역측정망 자료와 함께 일반지역의 세부적인 대기질 추이를 개략적으로 비교해 보기 위하여 2007년 11월부터 2008년 4월까지 실시간 측정된 SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>의 월 평균 자료를 표 3에 나타내었다.

여기에서 O<sub>3</sub>의 경우는 2007년 10월부터 2008년 4월까지 약간의 변동은 있었으나 증가하는 추세를 보



였으며(평균 15.8 ppb~52.1 ppb), SO<sub>2</sub>, NO와 NO<sub>2</sub>는 겨울철인 12월~2월중에 상대적으로 높게 나타났다. 측정기간 중 SO<sub>2</sub> 평균농도는 3.95 ppb~8.04 ppb이었으며, NO와 NO<sub>2</sub> 평균농도는 각각 4.4 ppb~13.3 ppb

과 11.0 ppb~19.3 ppb으로 나타났다. 이는 지난 3년간 지역도심의 대기측정망에서 측정된 각 농도 범위와 유사한 수준이었다.

### 3.1.4 군산지역의 도심대기질 특성

그림 5는 군산시에 위치한 도심지역의 대기질측정망에 포함된 상업(신평동), 공업(소룡동), 주거지(개정동)를 대표하는 3곳의 측정소에서 최근 3년간 측정된 자료의 통계분석결과를 나타낸 것이다. 3년간의 측정결과는 광화학생성 기작을 갖는 O<sub>3</sub>의 경우를 제외한 모든 오염물질에서 공업단지가 입지하고 있는 소룡동 측정소에서의 대기질 오염도가 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 공단 내에 위치한 소룡동 측정소가 공단에 소재한 각종 산업시설물들로부터 배출되는 오염물질의 영향을 상대적으로 많이 받았기 때문으로 소룡동 공업지역에 밀집된 고정오염원들에 의한 오염부하가 상대적으로 적은 상업지역과 주거지역 인근 측정소의 결과보다 높았던 것으로 사료된다.

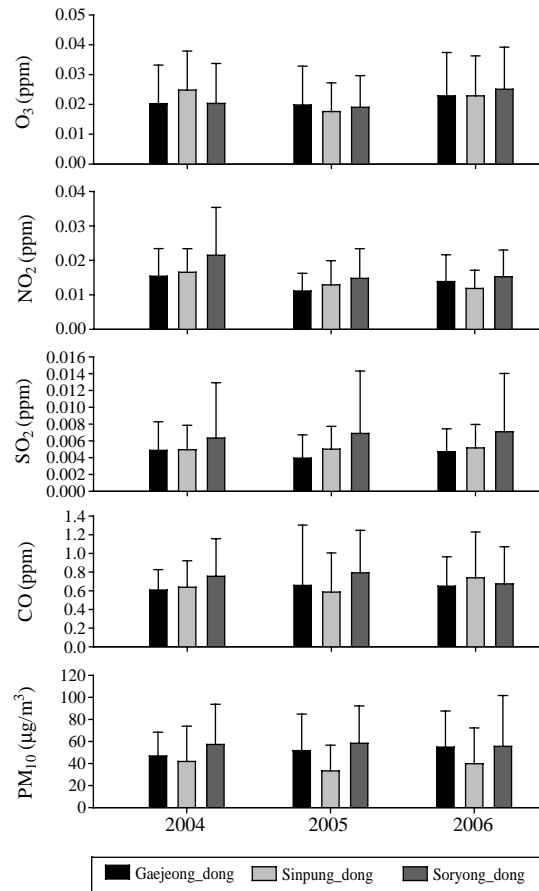


Fig. 5. Annual means and standard deviations for the air pollutants at Gunsan automated air quality monitoring sites.

### 3.2 HYSPLIT 모델을 이용한 고농도 사례 분석

연구지역은 서해안에 인접하고 있어 지역의 대기질이 황사유입에 따른 영향을 받을 수 있을 것으로 사료되어 역궤적분석(back trajectory analysis)을 이용한 고농도사례분석을 위해 측정기간 중 O<sub>3</sub>와 PM<sub>10</sub>을 대상으로 연중 고농도가 군산과 전주에서 동시에 발현되었을 경우를 조사하여 표 4에 제시하였다. 선정사례는 연중 2004년, 2005년, 2006년 각 2회씩 나타났다. O<sub>3</sub>의 경우 일 최대농도기준은 60 ppb 이상, PM<sub>10</sub>의 경우는 250 ug m<sup>-3</sup> 이상으로 하여 선정하였다. 여기에서 사례1(case 1)를 제외하고는 모두 황사가 발생하는 봄철에 발생하였다.

Table 4. High concentration episode cases for O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> during 2004~2006.

Episode number	Case	Pollutant	Occurring date	Max hourly Con.	
				Jeonju	Gunsan
(a)	Case 1	O <sub>3</sub>	2004-08-12	81.0 ppb	85.0 ppb
(b)	Case 2	O <sub>3</sub>	2005-04-03	70.0 ppb	66.0 ppb
(c)	Case 3	O <sub>3</sub>	2006-05-30	75.0 ppb	88.3 ppb
(d)	Case 4	PM <sub>10</sub>	2004-03-11	258 ug m <sup>-3</sup>	319 ug m <sup>-3</sup>
(e)	Case 5	PM <sub>10</sub>	2005-04-10	257 ug m <sup>-3</sup>	271 ug m <sup>-3</sup>
(f)	Case 6	PM <sub>10</sub>	2006-04-08	700 ug m <sup>-3</sup>	699 ug m <sup>-3</sup>

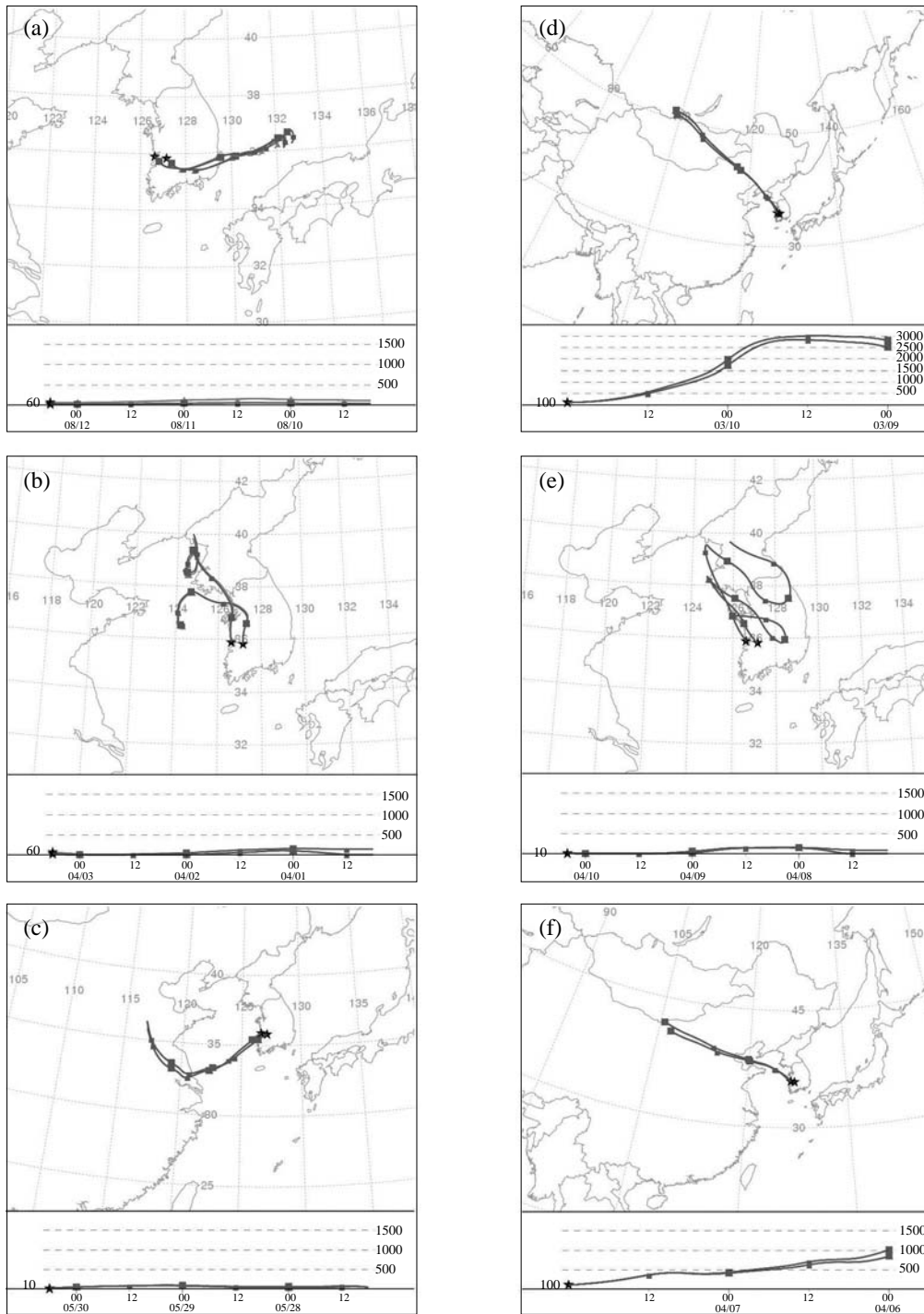


Fig. 6. Backward trajectories corresponding to several episodes (a) 12 August 2004 [ $O_3$ ], (b) 03 April 2005 [ $O_3$ ], (c) 30 May 2006 [ $O_3$ ], (d) at 00 UTC 11 Mar 2004 [ $PM_{10}$ ], (e) 10 April 2005 [ $PM_{10}$ ], and (f) 08 April 2006 [ $PM_{10}$ ]; 48 hrs backward trajectories for (d) and (f), and 72 hrs ending at 06 UTC for others.

각 사례에서 측정지점에 도착한 기단의 발원지와 오염물질 농도와의 연관성을 조사하기 위하여 미국 해양기상청(Air Resources Laboratory, NOAA)의 웹사이트(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>)를 통해 제공되고 있는 온라인 수송 확산모델(on-line transport and dispersion model)인 HYSPLIT를 사용하여 기단의 이동경로를 분석하여 72시간 역궤적의 이동경로와 고도 변화를 그림 6에 제시하였다. 여기에서 O<sub>3</sub>의 경우는 case 1과 case 2에서 대부분의 기류이동이 한반도 내륙이나 인근 해상의 대기경계층 이내 고도를 이동하고 있어 광화학생성에 의한 지역발생으로 인한 영향이 높게 작용했을 것으로 생각될 수 있는 경우와 case 3에서는 중국내륙에서의 발원과 함께 서해안으로 유입되는 경로가 나타나 장거리 이동으로 인한 영향의 가능성을 보였다. 그러나 이 경우도 기단의 고도는 경계층 이하로 나타났다. 그림 6(d)와 (f)에 나타난 PM<sub>10</sub>의 case 4와 6에서는 몽고와 중국북부지역에서 발원하여 유입되는 기류의 영향을 받았던 것으로 나타났으며, 이 때 48시간 전 기단의 고도를 보면 발원지에서 상승기류에 의한 지표입자의 상승으로 상층에 황사층이 형성되었을 것으로 보인다. 이렇게 형성된 황사층이 역궤적분석결과 제시된 경로를 따라 이동하여 한반도 인접한 서해상에 도달하면서 고도가 낮아지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 내륙에 근접하면서 주변에서 하강기류가 형성될 때 상층의 오염된 기류가 유입됨으로 인한 지표고농도 현상으로 이어지는 것과 무관치 않을 것으로 사료되어 황사 발생 시 한반도 상공에서의 상층고기압 배치로 인한 하강기류 형성이 지표고농도 현상을 유발할 수 있을 것으로 판단되어 황사계절에 한반도 중관기상조건의 중요성이 강조될 수 있을 것이다. 한편 case 3, 4와 6은 모두 황사가 관측된 기간으로 오존의 경우처럼 지역의 광화학생성과 더불어 오염물질의 장거리 수송과 황사가 함께 군산 지역의 대기질에 영향을 주고 있음을 나타내는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

최근 새만금개발사업과 지역산업의 활성화로 지역 대기질 예측과 관리가 필요한 군산 해안 공업지역에

서 중국으로부터 장거리 오염으로 인한 영향을 조사하기 위하여 서해안에 입지한 군산시의 장기간 지역 대기측정망 자료를 분석하였으며, O<sub>3</sub>과 PM<sub>10</sub>의 고농도사례를 선정하여 역궤적분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

자동측정망 측정소의 연간 측정자료 중 NO<sub>2</sub>를 제외하고는 대기 환경기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 최대치의 경우 환경기준에 근접하거나 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 지방공단 입지에 따른 배출시설물과 함께 도시민의 생활과 직결된 차량 운행에 따른 배출이 예상되는 지방 중규모 도시의 경우도 대기환경의 악화 방지를 위한 노력이 필요할 것으로 사료된다.

월별로는 군산과 전주 두 지역에서 오염물질의 월별 경향이 매우 유사하였다. CO의 경우 겨울에서 봄(12월, 1월~5월) 동안은 군산이 높고, 여름부터 가을까지(6월~11월)는 전주가 높게 기록되어 두 지역의 계절적인 배출특성에 차이가 있는 것으로 판단된다. SO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>의 경우 전월에 걸쳐 연중 군산이 전주보다 높게 나타났다. 월별 변화를 종합하면 NO<sub>2</sub>와 CO, PM<sub>10</sub>의 농도가 높은 전주의 경우는 군산보다 큰 도시규모의 차이에 따른 이동오염원의 영향이 가장 큰 기여를 했을 것으로 사료된다. 반면 SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>의 농도가 높은 군산의 경우는 고정오염원이 집중된 공단이 해안에 위치하여 해풍에 의한 고정오염원의 직접적인 배출기여와 대기화학특성이 함께 지역 대기질에 영향을 주었을 것으로 보인다. 일중 시간변화는 O<sub>3</sub>의 경우 오후 2~3시 경에 최고조에 이르는 형태를 보이고, NO<sub>2</sub> 경우 이른 아침과 초저녁 무렵에 최대 농도가 나타나는 경향을 나타냈다. 또한 back trajectory HYSPLIT모델을 이용한 O<sub>3</sub>와 PM<sub>10</sub>의 고농도 사례분석을 통해 조사한 결과 중국에서 발원하여 유입되는 기류의 영향으로 나타나 황사와 함께 장거리 수송된 오염물질이 서해안으로 유입되어 군산지역이 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

결과적으로 연안 측에 공단이 위치한 지역의 경우 해륙풍과 같은 국지순환으로 인해 공단에 밀집한 오염원으로부터의 오염물질이 풍하지역의 오염도에 기여할 수 있으며, 이에 가중하여 황사발생시 내륙과 인접한 연안에서 하강기류가 형성될 경우 지역대기질 수준을 더욱 악화시킬 수 있을 것으로 사료된다.

이번 연구를 통하여 지역특성이 고려된 지역도시

와 중규모 해안공업도시의 효율적 대기환경관리의 필요성을 제안하며, 본 연구는 지역주민의 건강, 복리증진과 지역 대기환경의 질을 개선하고 향후 국가환경, 복지정책에 반영을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2007-521-C00296)이며, 재단의 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Chang, M.H., E.-H. Ha, Y.J. Suh, B.E. Lee, H.J. Kwon, S.S. Hwang, Z.M. Li, J.H. Seo, and B.M. Kim, (2009) The perceived symptom and preventive behavior related to Asian dust event: in South Korean and Chinese, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 25(1), 26-37. (in Korean with English abstract)
- David, M.T., J.F. Rober, and L.W. Douglas (2001) April 1991 asian dust event, A southern California perspective, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18371-18379.
- Finlayson-Pitts, B.J. and J.N. Pitts (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and experimental techniques* pp. 533-534, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York.
- Hwang, I., Y.H. Cho, W.G. Choi, H.M. Lee, and T.O. Kim (2008), Quantitative estimation of PM-10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 24(1), 100-107. (in Korean with English abstract)
- Jaffe, D., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Bertsen, S. Karlsdotir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael, and I. Uno (1999) Transport of Asian air pollution to north America, *J. Geophys. Res. Lett.*, 26(6), 711-714.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, C.H. Song, S.-C. Yoon, and J.S. Han (2007) Seasonal characteristics of air masses arriving at Gosan, Korea, using fine particle measurements between November 2001 and August 2003. *J. Geophys. Res.*, 112, D07202, doi:10.1029/2005-JD006946.
- Kim, Y.P. (2006) Air pollution in Seoul caused by aerosols, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 22(5), 535-553. (in Korean with English abstract)
- Lee, S., Y.S. Ghim, S.-W. Kim, and S.-C. Yoon (2008) Seasonal variation of chemical composition and optical properties of aerosols at Seoul and Gosan, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 24(4), 470-482. (in Korean with English abstract)
- Oh, M.-S., T.-J. Lee, and D.-S. Kim (2009) Characteristics of ionic components in size-resolved particulate matters in Suwon area, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 25(1), 46-56. (in Korean with English abstract)
- Park, O.-Y. and O. Kwon (2006) Statistical analysis of air pollutants concentration and meteorological parameters in Masan and Jeonju area, *Proceeding of the 41st Meeting of KOSAE*, pp. 412-413, Korean Society of Atmospheric Environment.
- Son, H.Y. and C.-H. Kim (2009) Interpretating the spectral characteristics of measured particle concentrations in Busan, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 25(2), 134-140. (in Korean with English abstract)