

2008년 북경 올림픽이 한반도 대기질에 미치는 영향

송형도 · 최진수 · 홍성철* · 장임석 · 김정수 · 이석조
국립환경과학원 대기환경연구과, *국립환경과학원 기후변화연구과
(2009년 3월 19일 접수; 2009년 4월 7일 수정; 2009년 5월 20일 채택)

The Effect of 2008 Beijing Olympic on Korean Air Quality

Hyung-Do Song, Jin-Soo Choi, Sung-Chel Hong*, Iim-Seok Chang,
Jung-Soo Kim and Suk-Jo Lee

*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research(NIER)Environmental
Research Complex, Incheon 404-708, Korea*

**Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research(NIER)Environmental
Research Complex, Incheon 404-708, Korea*

(Manuscript received 19 March, 2009; revised 7 April, 2009; accepted 20 May, 2009)

Abstract

This study aims to identify the impacts of air quality in the Korean Peninsula according to the China's environmental policies in preparation of the Beijing 2008 Olympic Games. The measurement of emission variations in China, aircraft measurement, and modelling were carried out. The reduction measures in Beijing, China and its emission changes resulted in 30~65% in decrease out of the total emissions within the Beijing region, whereas when it comes to the whole nation of China, the reduction rate was about 4~9%. Comparing the concentration of the air pollutants in Seoul and Ganghwa in August 2008 during around the period of Beijing Olympic Games with one in 2004~2007 showed that the SO₂ concentrations in the past was above 5ppb, while the concentration in the 2008 olympic period was 4ppb and below. The NO_x at the Seokmori site in Ganghwa tended to be lower in concentration in 2008 than in between 2004~2007. As for O₃ and PM_{2.5}, the concentration tended to be rather low since August 11. The air current track that showed during the period of aircraft measurement presented to be flowed into Korea through the Northeast part of China and the coast of Bohai Bay, while the concentrations of SO₂, NO_x, and O₃ over the west sea on August 20 and 24 were 0.54 (0.28ppb), 0.86 (1.84ppb), and 54.0 (41.5ppb) respectively, similar or lower than the ones measured in the past in the similar current patterns. The modelling result showed similar patterns to the data of aircraft measurement, in particular in SO₂. Overall, the reduction measures in Beijing, China affected directly and indirectly the air quality in the Korean peninsular, but the impact was not significant as it was momentary and limited to the intended area.

Key Words : Long-range transboundary, Aircraft measurement, Backward trajectory

1. 서 론

대기오염은 지역적이거나 한 국가적인 문제를 떠나 이미 지구적인 수준으로 이슈화 되었고, 특히 국경을 초월하는 장거리이동 대기오염문제는 국가간의 피해 분쟁을 야기 시킬 수 있는 중요한 문제로 부각될 뿐만 아니라 국제적인 관심도는 매년 증가되고 있다^{1,2)}. 특히 우리나라는 중위도 편서풍대에 위치하여 급속한 경제발전과 함께 자연적·인위적 대기오염배출량의 증가에 따른 관심이 집중될 수 밖에 없는 실정이다. 한반도와 일본은 지정학상으로 중국 및 동아시아지역으로부터 장거리 이동되는 대기오염물질로 인한 직·간접적 피해국이며, 따라서 한·중·일 3국은 자국의 대기질을 관리하기 위하여 자국 내에서 발생하는 대기오염물질의 규제나 관리 뿐 아니라 이 지역에 대한 대기오염물질의 이동과 침적에 대한 정량적인 자료 확보에 초점을 맞춰왔다. 최근 연구에서는 2008년 황사기간 동안 중국 북부 해안지역의 초미세먼지 연직분포연구³⁾를 통해 강한 황사, 약한 황사, 비행사로 나누어 중국북부지역에서의 대기오염의 생성메커니즘과 과정을 알 수 있으며, 대기오염물질이 이동하는 동안 먼지입자의 특성 변화와 이차오염물질의 원인이 되는 먼지의 입자와 가스상 오염물질(SO_2 , NO_x , O_3)의 생성사이의 복잡한 물리 화학적 반응과 이동 과정 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾. 이러한 장거리 이동에 대한 정량적 평가 및 평가를 위해서는 지역대기화학모델은 필수적이라 하겠다. 미국의 중서부에서 배출된 대기오염물질이 장거리 이동하면서 광화학 반응을 통하여 미동북부지역의 오존 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다⁵⁾.

국내에서는 주로 지상 배경농도지역에서의 측정이나 대기오염물질 장거리 이동에 대한 모델링 등이 개별적으로 수행되어 왔으나 연구 결과를 대기오염물질 장거리 이동 현상의 입체적인 해석이나 모델링의 검증자료로 활용하는 데는 부적합 점이 많았다. 이러한 문제점들을 보완하여 항공관측과 모델 시뮬레이션을 통하여 그리스 아테네의 대기질분석 연구 및 일본 오사카시에서도 활발히 진행되고 있다^{6,7)}. 장거리이동 대기오염물질의 거동은 항공기관측이나 지상측정 및 모델링을 통하여 보다 정량적인 거

동파악을 할 수 있다.

본 연구에서는 2008년 북경 올림픽개최에 따른 중국의 녹색계획의 일환으로 배출량 저감에 따른 한반도 대기질에 미치는 영향을 파악하고자 항공기를 이용하여 서해안 상공의 가스상물질(SO_2 , NO_x , O_3) 및 VOCs를 측정·분석하였고, 대기화학모델의 입력자료로 기상모델인 MM5(PCU/NCAR Mesoscale Model version5)의 결과를 사용하였으며, 장거리이동되는 대기오염물질의 정량적 평가를 위해 3차원 대기질 모델인 CMAQ(Community Multi-scale Air Quality Modeling System)을 사용⁸⁾하여 중국의 배출량 저감 시나리오에 따른 한반도 대기질 영향을 보고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 측정내용 및 방법

측정에 사용된 항공기는 (주)창운항공이 소유하고 있는 미국 PIPER사의 쌍발 프로펠러 Chieftain (PA-31-350) 기종으로 크기는 10.55(L)×3.96(H)×12.40(W) m이며, 엔진용량은 350 HP, 순항속도는 373 km/h이며, 순항거리는 약 1971 km이고 수용중량은 1365 kg이다. 시료의 흡입은 스테인레스 스틸 재질의 노즐을 항공기 바닥면에 비행방향으로 향하도록 설치하여 측정 중 프로펠러와 배기가스의 영향이 없도록 하였고 SO_2 , NO_x , O_3 의 측정은 각각 Thermo Environmental Instruments사의 Trace Level 43C, 42C, 49C를 사용하였다. 항공관측이 이루어지는 동안 GPS(GARMIN co., GPS III PILOT)로 측정되는 위·경·고도의 자료와 함께 매 5초마다 data logger를 통하여 저장하였고 보정 후 1분 평균값으로 계산하였다. Fig. 1은 측정에 사용된 항공기와 장비의 설치 전·후 모습이다.

2.2. 측정기간 및 경로

항공측정은 8월 20일, 8월 24일 2회 실시하였으며, 장거리이동현상 및 농도분포 파악을 위하여 주로 서풍계열의 기상조건에서 측정 하였으며 국내의 영향을 배제하기 위하여 최대한 국내연안에서 떨어진 해상에서 측정을 실시하였다. 측정경로는 Fig. 2에 비행경로와 측정일등은 Table 1에 정리하였다.

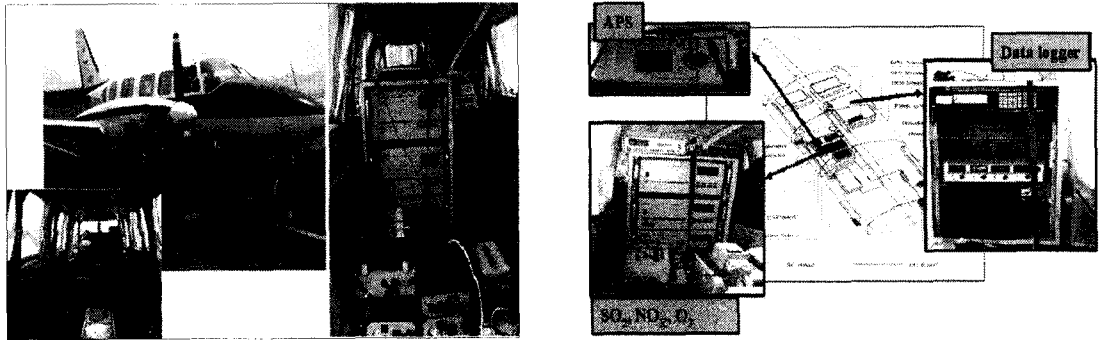


Fig. 1. The aircraft(left) and main instrument(right).

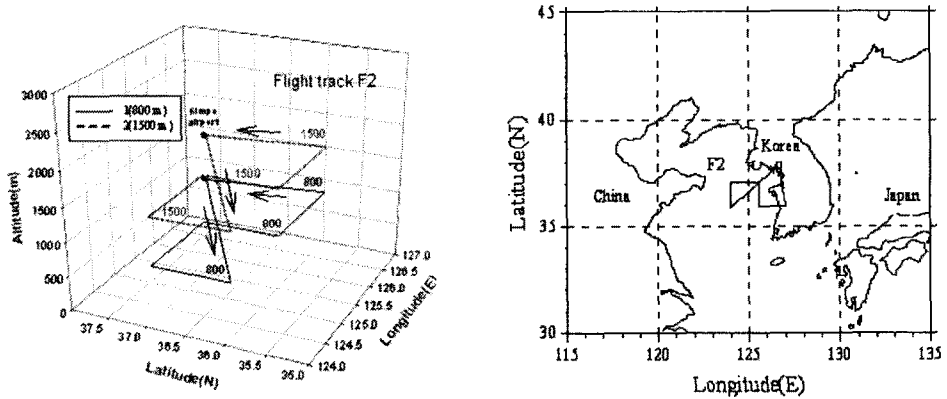


Fig. 2. Aircraft flight paths for the period.

Table 1. Summary of flight track and measurement date in 2008

Flight Track	Latitude	Longitude	Alt. (F2)	Alt. (F2)
F2	36N-37N	124.10E	800 m	1500 m
	37N	124.10E-125.30E	800 m	1500 m
	37N-36N	125.30E	800 m	1500 m
	36N	125.30E-127E	800 m	1500 m
	36N-37N	127E	800 m	1500 m

경로 F2는 서해상의 장거리이동 오염물질의 이동에 따른 공간적 분포현상을 관측하기 위하여 경도 124° 10' N, 125° 30' N, 127° 00' N을 기준으로 위도 37° 00' N ~ 36° 00' N의 구간을 이동 하였고 800 m와 1500 m 중 한 고도를 선택하여 관측을 실시하였다. 항공관측 시간이 약 13시 이후인 것을 고려하여 오후시간대에 기온 상승에 의해 대기 혼합층이

약 1000 m까지 발달할 것으로 가정, 800 m를 주측정 고도로 정하여 관측을 수행하였다.

2.3. 수치 모델

본 연구에 사용된 오염 모델의 입력 자료 생성에 필요한 기상장 모사를 위한 기상모델은 미국 기상연구소(U.S.National Center for Atmospheric Research)와 펜실베니아 주립대학(Penn Stat. Univ.)이 공동 개발한 모델인 MM5(Mesoscale Meteorological Model version³⁾이며, 고분해능을 요구하는 물리과정을 지원하고 있다⁹⁾.

대기질 수치모의에 사용된 모델은 미국 환경국(U.S. Environmental Agency)에서 개발한 Models-3/CMAQ(The Third Generation Community Multi-scale Air Quality Modeling System)과 CADM(Comprehensive Acid Deposition Model)으로 수행하였다. CMAQ과 연동될 기상 모델인 MM5는 중규모 대기 순환을 모

사하거나 예측하기 위하여 고안된 제한된 지역에 따른 시그마 좌표계를 따르는 대표적인 중규모 3차원 비정수계 모델로써, 국내·외 기상관련 연구 분야에서 현재 가장 많이 사용되고 있으며 현재 우리나라 기상청의 예보모델이다. 수평격자는 Arakawa-B 격자체계를 사용하며 연직격자로는 지형을 따라가는 시그마 좌표계 (σ -coordinate)로 쓰여진 비압축성 비정수계 (non-compressible non-hydrostatic)와 정역학 (hydrostatic) 방정식계를 사용한다. 공간적으로 2차 중앙차분법을 사용하며, 시간 적분 방법은 반암시 (semi-implicit scheme) 및 시간 분리 방안 (time splitting scheme)을 사용한다. 또한 기상분석과 관측자료 (종관, 비종관)의 4차원 자료동화 (FDDA)가 가능하며, 다중 격자방법 또한 사용할 수 있으며, 미시 물리학에 관련된 여러 가지 방법들을 선택적으로 사용 가능하다.

항공기 관측에서 도출되는 대기오염물질 중 3개 항목(SO₂, NO_x, O₃)에 대하여 CMAQ 결과와 비교 분석을 수행하였다. 사례의 모델링 영역 내에서의 평형 상태의 대기 농도를 모의하기 위한 전처리 기간을 고려하여 모델링 적분 기간은 항공기 관측 사례에 비해 3일을 더 길게 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 북경올림픽을 대비한 중국의 환경정책 중국의 북경올림픽의 개최확정에 따라 국제올림

픽위원회(IOC : International Olympic Committee)가 북경의 환경상황에 대한 우려를 표명하여 중국정부는 IOC와 전 세계에 대규모의 환경개선사업을 전개하였다. 그에 따라 북경시 환경보호국은 2000년 환경보호 개선에 116억 위안을 투자하였고, 2008년까지 북경시는 20여 항목의 대규모 환경보호 프로젝트를 완공할 계획을 세웠다. 특히 대기분야에서 천연가스 사용량을 1998년 대비 3~4배 증가시키고, 연탄의 비율을 현재의 50%에서 2008년까지 20%로 감소시켰고, 올림픽 기간 중 차량 2부제를 실시하여 330만대 중 50%운행을 중지시켰다. 특히 대기오염물질의 배출량 저감을 위하여 에너지 집약사업인 북경의 연산 시멘트 공장과 철합금공장 등 1000여개 이상의 중공업과 발전소를 이전하고, 화력발전소 및 석탄, 철광석 등 생산 중단을 하였고, 2005년까지 북경시 내지역에 1.2만 hr의 녹화지대를 건설하고 올림픽 건설용지 녹화면적을 50%에 이르도록 계획을 세워 실천하였다.

3.2. 중국 지역 및 분야별 저감 대책 및 배출량 변화

북경의 대기오염물질 저감 정책에 따른 대기오염물질의 장거리 이동 영향을 파악하기 위해 대기질 모델의 입력 자료인 배출량에 저감 효과가 고려되어야 한다. 중국정부의 배출량 저감 효과가 중국 전체 또는 북경의 배출량에 어떤 효과가 있는지 살펴보면, 중국의 각 분야별 저감 대책을 고려했을 경우 배출량

Table 2. Variations of emission in China

[Unit : ton/year]

	BC	CO	NO _x	OC	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	VOC
Before								
Industry	676,171	88,585,302	8,483,442	664,520	12,031,708	7,953,181	17,589,377	14,407,484
Power	49,039	2,449,222	13,145,571	36,580	4,566,750	2,770,409	23,909,279	1,235,082
Residential	1,685,863	122,078,323	2,287,495	5,490,037	11,142,074	10,134,760	3,878,228	20,521,774
Transportation	417,927	83,742,989	12,043,389	280,872	1,121,303	1,002,651	1,420,081	17,785,813
Total	2,829,000	296,855,836	35,959,897	6,472,009	28,861,835	21,861,001	46,796,965	53,950,153
After								
Industry	563,718	72,770,139	7,715,049	559,935	10,167,130	6,708,000	16,278,343	12,906,686
Power	43,357	2,111,411	11,813,182	35,706	4,244,228	2,578,330	21,195,271	1,098,310
Residential	1,611,062	117,973,550	2,204,614	5,312,982	10,779,592	9,810,124	3,669,272	19,934,808
Transportation	393,183	79,469,606	11,589,409	268,968	1,068,890	953,712	1,405,054	16,983,038
Total	2,611,321	272,324,705	33,322,254	6,177,591	26,259,839	20,050,166	42,547,939	50,922,841
rate of change	-7.695%	-8.264%	-7.335%	-4.549%	-9.015%	-8.283%	-9.080%	-5.611%

Table 3. Variations of emission in Beijing

[Unit : ton/year]

	BC	CO	NOX	OC	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	VOC
Before								
Industry	6,284	1,112,687	75,531	4,762	86,763	59,303	78,344	216,830
Power	278	37,540	145,319	35	28,332	16,151	220,919	15,202
Residential	12,164	451,224	32,098	18,059	44,134	37,186	68,022	92,203
Transportation	3,883	1,274,624	128,239	1,582	8,048	7,403	4,645	196,561
Total	22,609	2,876,075	381,187	24,438	167,277	120,043	371,930	520,796
After								
Industry	1,257	222,537	15,106	952	17,353	11,861	15,669	43,366
Power	70	9,396	36,371	9	7,091	4,042	55,292	3,805
Residential	9,731	360,979	25,678	14,447	35,307	29,749	54,418	73,762
Transportation	2,625	861,646	86,690	1,069	5,440	5,004	3,140	132,875
Total	13,682	1,454,558	163,845	16,478	65,191	50,656	128,519	253,808
rate of change	-39.482%	-49.426%	-57.017%	-32.573%	-61.028%	-57.802%	-65.445%	-51.265%

을 재 산정하여 중국 전체 배출량에 주는 효과를 살펴 보았다. 중국 지역에서의 각 오염물질별 저감 대책 전과 후를 살펴보면 그 효과가 약 4~9 % 정도 저감 효과가 나타나는 것을 알 수 있다(Table 2). 특히 SO₂의 저감 효과가 -9.08 %로 가장 크게 나타났다.

한편 저감 대책으로 인한 베이징 지역의 효과를 고려하여 배출량을 재 산정하여 살펴본 결과 약 30~65 %의 저감 효과가 나타나는 것을 알 수 있다 (Table 3). 앞선 결과와 마찬가지로 베이징의 SO₂ 저감 효과가 -65.445 %로 가장 큰 것을 알 수 있다. 그 결과는 많은 공장들의 이전과 가동에 대한 규제에 의한 효과로 사료된다.

중국의 배출량 저감정책에 따른 중국의 대기질 변화를 공기오염도지수(API : Air Pollution Index)를 Fig. 3에 시계열로 나타내었다.

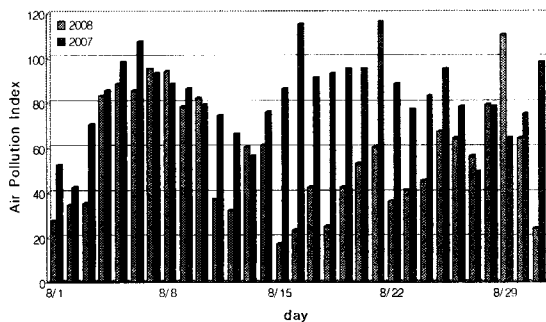


Fig. 3. Distribution of API in August 2007, 2008.

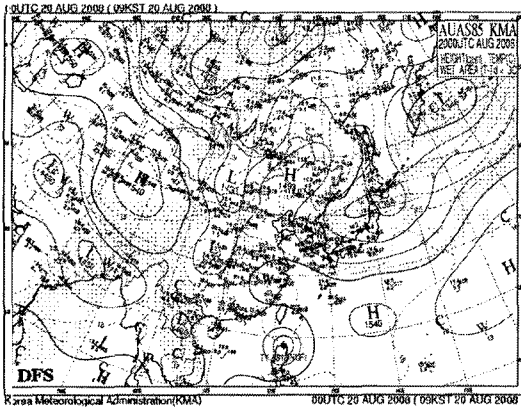
API는 일상에서 관측된 대기오염물 데이터를 국가유관기술규정에 의거 환산·도출하여 간단하면서도 직관적인 방식으로 대기환경 질량 상황을 표시하는 지표이다. API가 50이면 공기질 상태는 양호하고 100은 보통수준, 200은 가벼운 오염, 300은 중간 오염, 400이상은 심각한 오염상태를 뜻한다. 올림픽 기간과 동일한 2007년 8월의 API 수치는 II(9일)~III(2일)등급으로 정상 활동은 가능하나 다소 오염된 상황을 나타내고 있었다. API평균값은 92.3으로 II등급의 수준을 나타내었다. 2008년 올림픽 기간 동안의 대기질은 I 등급 8일, II등급 3일 API수치는 평균 45.5로 I 등급 수준을 나타냈으며, 전년도 대비 56%정도 개선되었음을 알 수 있었다.

3.3. 기상상태

항공관측기간에 대한 당시의 종관적인 기상상태를 파악하기 위하여 각 측정일의 850 hPa 일기도와 streamline을 이용하여 특징을 분석하였다(Fig. 4). 또한 기상변수들의 연직구조를 파악하기 위하여 기상청에서 측정한 상층기상자료를 이용하였으며 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) 서해상 측정시 오산측정소의 자료를 사용하였다.

측정일중 8월 20일에는 강수대가 동해상으로 물러가면서 한반도에 넓은 안개지역의 분포를 보이다가 산둥반도 지역의 강한 고기압과 북태평양 고기압에 밀려 올라온 저기압사이에 기압골이 빠른 속도로 발달하여 국지적인 호우가 발생하며 동해안

a) 00UTC 20 AUG 2008 850hpa



b) 00UTC 24 AUG 2008 850hpa

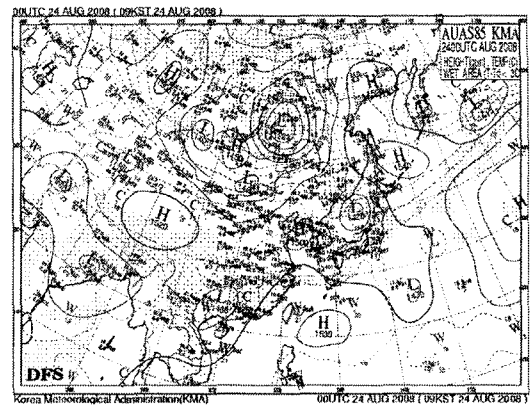


Fig. 4. 850 hpa weather charts during for August, 2008.

지방은 북동기류의 영향으로 기단이 불안정하였다. 8월 24일에는 강수대가 동해상으로 물러가면서 한반도에 넓은 고기압대 영향을 받다가 강한 일조량으로 남부지역에 저기압이 발달하여 국지적 호우가 발생하였다.

3.4. 역궤적 분석

기류의 이동경로를 역추적하기 위하여 역궤적분석을 실시하였으며, 역궤적분석은 미국 해양대기청(NOAA)에서 개발한 HYSPLIT4 모델을 이용하여 8월 20일, 8월 24일 측정일을 중심으로 72시간(3일)을 수행하였으며 Fig. 5에 분석결과를 측정일별로 나타

내었다.

역궤적 분석결과 8월 20일에는 중국 북동부 지역 및 발해만 연안 지역에서 이동방향을 나타내었고, 8월 24일에는 중국의 연안에 가까운 경도에서는 북경쪽의 영향을 받고 있으며, 한반도와 가까워질수록 일본해 지역을 거쳐 한반도 내륙으로 이동되어 오고 있음을 알 수 있었다.

3.5. 한반도 지상 대기질

북경올림픽 기간동안 한반도의 대기질 파악을 위하여 국가대기오염 정보관리시스템(NIMIS)자료를 분석하였다. Fig. 6은 과거 4년(2004-2007년)과 2008

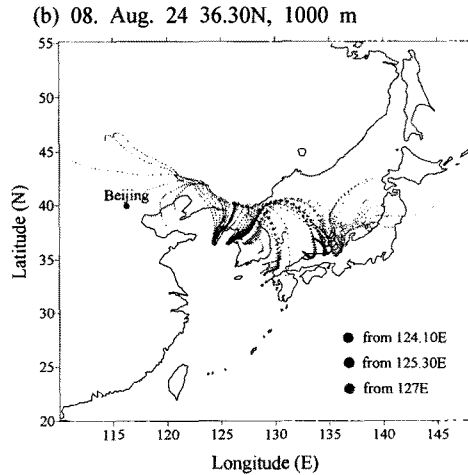
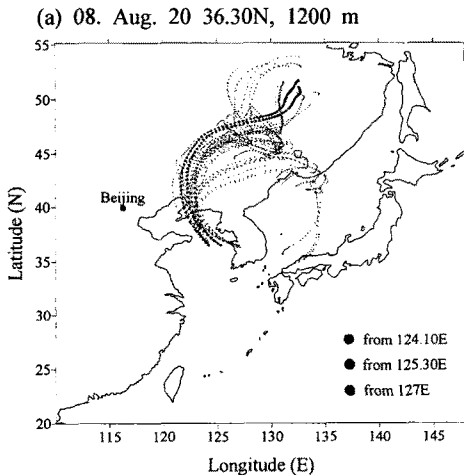


Fig. 5. Back-trajectories for (a) 20 and (b) 24 August, 2008.



Fig. 6. Distribution of SO₂, NO_x, O₃ and PM₁₀ in Seoul, Gwanghwa during 2004~2007.

년 두지역(서울, 강화)의 8월 대기오염물질의 농도분포를 시계열로 나타내었다. SO₂의 경우 서울 불광동 측정소는 4 ppb이하의 낮은 농도를 보였으며, 배경대기 지역인 강화석모리 측정소의 경우 6 ppb이상의

고농도 사례를 보였지만 올림픽기간 측정결과 대부분 4 ppb이하의 일정한 농도분포를 보이고 있었다. NO_x의 경우 서울 불광동 측정소는 20~30 ppb의 일정한 농도분포를 보이고 있으며, 강화석모리 측정소

의 경우 '04~'07년 농도에 비해, '08년의 농도가 낮은 경향을 보이고 있었으며, O₃와 PM_{2.5}의 경우 배경대기 지역인 강화석모리 측정소에서 8월 11일 이후 다소 낮은 농도경향을 보였다.

3.6. 항공관측결과

항공관측을 통해 북경올림픽 기간동안의 서해상 대기오염물질 농도분포를 파악하고자 하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 항공관측결과 8월 20일 SO₂는 0.54, 0.28 ppb로 역계적 분석에서 기류패턴이 비슷한 '06년 6월 0.49 ppb, '07년 10월 20일 0.4 ppb를 제외한 기간보다 낮은 농도를 나타내었다. 특히 농도의 최고치는 '07년 1.06 ppb를 제외한 전 기간에서 2.05~15.33 ppb 범위를 나타내어 올림픽 기간에 비해 높게 나타났다.

NO_x는 8월 관측에서 0.86, 1.84 ppb로 '07년 4월 22일 1 ppb와 10월 20일 0.63 ppb를 제외한 나머지 기간보다는 낮은 농도를 나타내었으며, O₃의 경우 2008년 8월 관측에서는 54.0, 41.5 ppb로 나타났으며, 다른 기간과 비슷한 농도를 나타내지만, '06년 6월 12일 65.9 ppb보다는 다소 낮게 관측되었음을 알 수 있었다.

3.7. 모델링 수행결과

북경 올림픽 기간 동안 중국정부의 저감효과에 의

한 우리나라에 미치는 영향을 파악하기 위해 INTEX-B 2006년 배출량자료를 이용하였다. INTEX-B 배출자료는 0.5° × 0.5°의 격자체계를 갖고 Table 5에 나타낸 것처럼 각 부문별 8개의 배출자료를 이용하였다¹⁰⁾. 모델 수행한 실험과 저감 정책을 반영하여 구축한 배출량 자료를 이용하여 모델을 수행하였다. 이 두 실험의 결과를 가지고 우리나라 영역에 대한 대기오염물질의 변화를 살펴보았다.

Fig. 7은 올림픽기간동안 우리나라 영역에서의 대기오염물질의 변화를 날짜별로 나타낸 것이다. SO₂의 경우 19일과 23, 24일에 약간의 차이를 보였으며, NO_x의 경우 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. O₃의 경우 저감대책 전과 비교하여 볼 때 저감대책 후 전체적으로 오존 농도가 조금씩 낮아진 것을 알 수 있었다. 변화를 보이는 SO₂, O₃에 대해 항공관측기간을 포함한 기간동안의 모델링수행결과를 해상도 높게 Fig. 8에 나타냈다.

앞선 결과와 같이 북서풍이 유입되었던 19일과 23, 24일에 약간의 차이를 보였다. 이는 북서풍과 함께 유입된 오염물질이 강수에 의한 효과로 농도가 낮아진 것으로 판단되며, 특히 타 계절에 비해 비교적 낮은 농도의 분포를 갖는 여름철은 중국의 영향이 약하게 나타나는 것을 알 수 있다.

항공기 관측을 수행한 8월 20일과 24일 이들 동안

Table 4. Comparison of SO₂, NO_x, O₃ during Aircraft measurement(2006~2008)

Date		'06				'07			'08	
		4/12	6/12	4/22	4/24	10/20	10/21(am)	10/21(pm)	8/20	8/24
SO ₂ (ppb)	Avr.	3.45	0.49	0.65	1.75	0.40	3.36	5.94	0.54	0.28
	Min.	0.12	0.05	0.05	0.21	0.02	0.02	0.49	0.02	0.02
	Max.	6.46	2.05	3.93	5.36	1.06	12.03	15.33	1.53	0.90
NO _x (ppb)	Avr.	3.66	4.93	1.00	1.86	0.63	2.17	3.33	0.86	1.84
	Min.	2.82	3.62	0.21	0.64	0.11	0.38	1.09	0.10	0.94
	Max.	4.38	6.04	1.81	3.17	1.28	6.20	7.71	2.98	4.56
O ₃ (ppb)	Avr.	59.1	65.9	47.5	57.7	42.2	46.2	56.7	54.0	41.5
	Min.	49.1	59.2	43.1	47.4	35.3	43.0	43.8	34.2	30.8
	Max.	66.5	74.9	55.4	66.4	50.7	50.8	73.4	74.3	57.8

Table 5. Total emissions in 2006

[Unit: kton/year]

	Regional Gas				Regional Aerosol			
	SO ₂	NO _x	CO	NM VOC	OC	BC	PM ₁₀	PM _{2.5}
Total	46,811	35,975	296,869	53,965	6,484	2,841	29,197	22,171

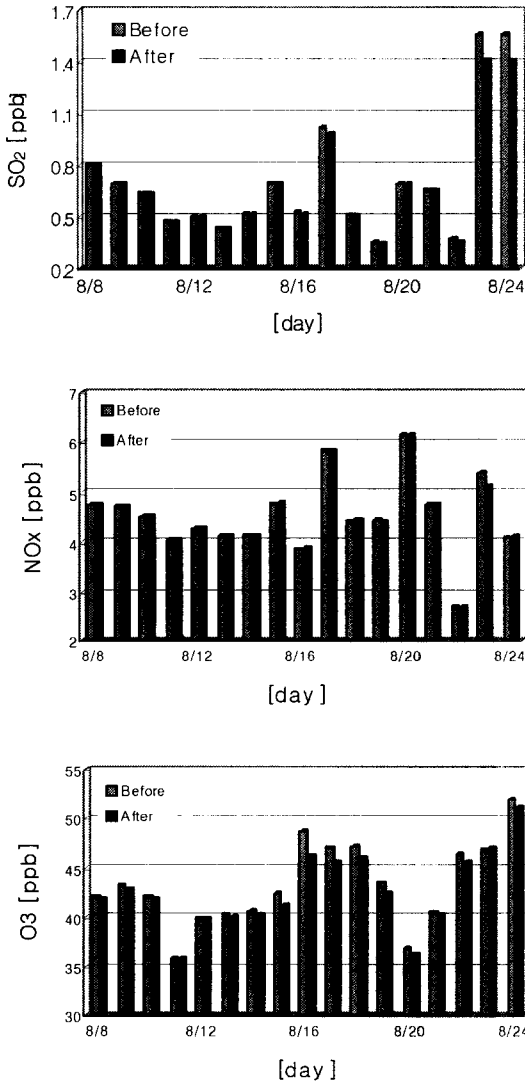
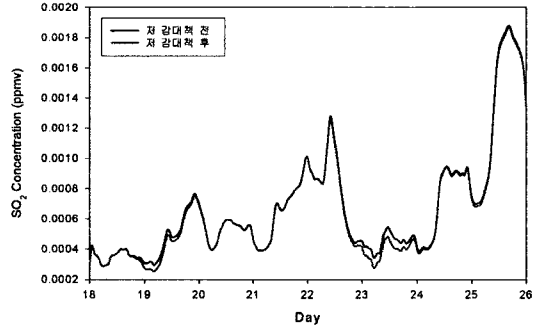


Fig. 7. Variations of model predicted (a) SO₂, (b) NO_x and (c) O₃ concentration in Korea.

이루어졌고, Fig. 9는 이 사례 기간에 측정된 SO₂, NO_x, O₃ 관측 결과와 CMAQ 결과를 비교하여 나타낸 것이다. SO₂와 NO_x의 경우 전반적으로 관측과 모델의 결과의 경향이 상당히 일치함을 알 수 있다. 모델 결과와 관측 결과의 회귀분석결과를 살펴보면, 저감 대책 전 배출량을 사용한 결과 중 SO₂의 선형회귀 방정식은 $OBS = 3.10 \times CMAQ - 1.70$, 상관계수는 $r^2 = 0.88$ 이고 저감 대책 후 배출량을 사용한 결과

a) SO₂

Comparison of SO₂ Concentration using CMAQ results



b) O₃

Comparison of O₃ Concentration using CMAQ results

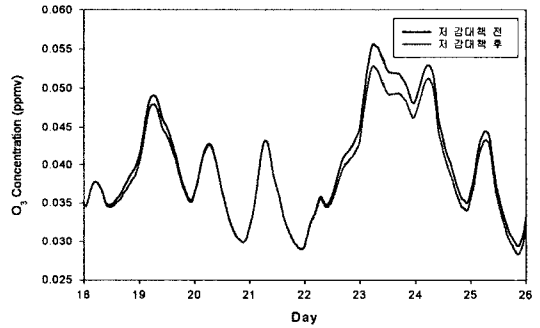
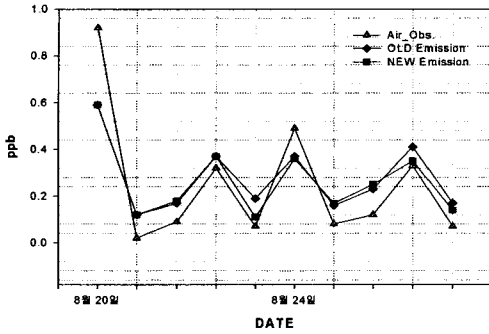


Fig. 8. Variations of model predicted (a) SO₂ and (b) O₃ concentration in Korea.

중 SO₂의 선형회귀 방정식은 $OBS = 3.10 \times CMAQ - 1.63$, 상관계수는 $r^2 = 0.86$ 으로 관측과 상관관계가 높게 나타났다. NO_x의 경우 저감 대책 전의 선형회귀 방정식은 $OBS = 0.39 \times CMAQ - 0.36$, 상관계수는 $r^2 = 0.79$ 이고 저감 대책 후의 선형회귀 방정식은 $OBS = 0.40 \times CMAQ - 0.35$, 상관계수는 $r^2 = 0.76$ 으로 상관관계가 높게 나타났다. O₃의 경우 저감 대책 전의 선형회귀 방정식은 $OBS = 1.97 \times CMAQ + 1.54$, 상관계수는 $r^2 = 0.13$ 이고 저감 대책 후의 선형회귀 방정식은 $OBS = 2.71 \times CMAQ + 1.54$, 상관계수는 $r^2 = 0.13$ 으로 나타났다. SO₂와 NO_x의 경우 상관관계가 상당히 높게 나타나 관측을 잘 모사한 반면에 O₃의 경우 그림에서 알 수 있듯이 관측을 잘 모사하지 못하였으며 상관관계 또한 낮게 나타났음을 알 수 있다. 특히 SO₂와 NO_x 모두 저감 대책 전 배출량을 이용한 모델 결과값이 관측값에 더 유사성이 높은

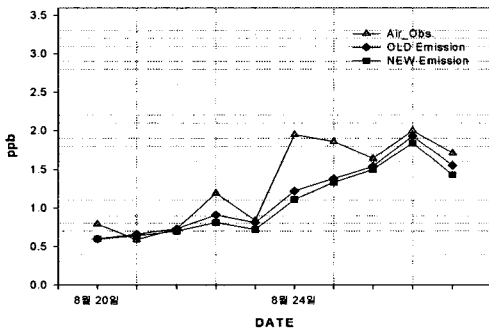
a) SO₂

Compare CMAQ model output with obs. (SO₂)



b) NO_x

Compare CMAQ model output with obs. (NO_x)



c) O₃

Compare CMAQ model output with obs. (O₃)

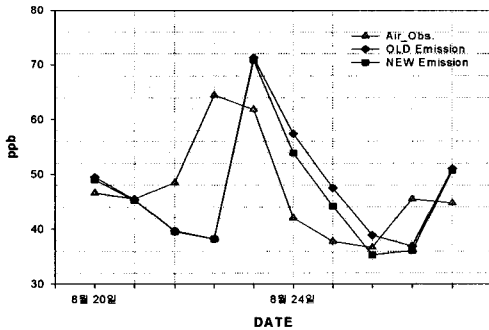


Fig. 9. Comparison of aircraft and model predicted (a) SO₂, (b) NO_x, and (c) O₃ concentration in May, 2008.

것을 알 수 있다. 이는 역계적 분석에서 알 수 있듯이 항공 관측일 당시 공기과의 흐름이 북경 지역의 영향을 받지 않았기 때문이다. 즉 한반도 내륙지역과 북만주 지역의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 따라서 저감 대책이 고려된 배출량을 사용하여 모델링을 수행한 경우 한반도 영역에서의 오염물질 농도는 일반적으로 감소하였지만 그 정도는 크지 않았음

을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 중국의 2008년 북경올림픽을 대비한 환경정책에 따른 한반도의 대기질 영향을 살펴보고자 중국의 배출량 변화 및 항공관측과 모델링을 수행하였다.

중국 북경지역의 분야별 저감 대책 및 배출량 변화는 북경지역자체에서는 전체 30~65%정도의 저감 효과가 나타났지만, 중국 전 지역의 저감 대책전과 후 그 효과가 약 4~9% 정도 저감 효과를 보였다.

북경올림픽 기간을 전후로 '08년 8월의 대기오염 물질의 한반도(서울, 강화) 농도와 과거 '04~'07년의 농도를 비교해 본 결과 SO₂는 과거 농도는 5 ppb 이상의 농도를 보이는 사례가 빈번한 반면, '08년 올림픽 기간에 4 ppb 이하의 낮은 농도를 보이고 있으며, NO_x의 경우 강화석모리 측정소의 경우 '04~'07년 농도에 비해 '08년의 농도가 낮은 경향을 보였고, O₃, PM_{2.5}의 경우 8월 11일 이후 다소 낮은 농도경향을 보였다.

항공기를 이용한 대기오염 측정 기간중의 기류 이동경로는 중국 북동부 지역 및 발해만 연안지역을 거쳐 우리나라로 유입된 것으로 나타났으며, 8월 20일, 24일의 서해상공의 대기오염물질 농도는 SO₂가 0.54, 0.28 ppb로 NO_x는 0.86, 1.84 ppb, O₃는 54.0, 41.5 ppb로 나타났며, 기류패턴이 비슷한 과거의 농도보다 유사하거나 다소 낮은 농도로 나타났다.

북경올림픽 기간 중국의 대기오염 저감정책에 따른 영향을 파악하고자 항공기 관측을 수행한 결과 8월 20일, 24일 양일간 동안 이루어졌으며, 그 결과 SO₂, NO_x의 경우 R²이 0.88, 0.86의 높은 선형회귀 방정식을 나타내었으며, O₃의 경우 R²이 낮은 선형회귀방정식을 나타냈다. 모델링 결과가 항공기 관측 자료와 비슷한 패턴을 나타내었고, 특히 SO₂의 경우, 관측 자료와 매우 유사한 패턴을 보이고 있었다.

중국 북경의 저감정책에 따른 대기질의 영향이 한반도 대기질에 영향을 직간접적으로 받는 것으로 나타났지만, 한시적이고 대상 지역의 제한성이 있어 그 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 이는 기류의 이동이 한반도 내륙지역과 북만주 지역의 영향이 강한 것으로 사료되며, 항공관측 측정값에서 중

국 북경의 저감 효과를 정량적으로 파악하기에는 어려우나, 지속적인 항공관측을 통하여 자료의 신뢰성을 구축하고 중국으로부터의 장거리 이동되는 오염물질의 양을 정확하게 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Kato N., Akimoto H., 1992, Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia : emission inventories, *Atmospheric Environment*, 26A, 2997-3017.
- 2) Macpherson J. I., Desjardins R. L., Schuepp O. H., Pearson R., 1995, Aircraft-measured ozone deposition in the San Joaquin Valley of California, *Atmospheric Environment*, 29(21), 3133-3145.
- 3) Wei W., Jianzhong M., Shiro H., 2008, Aircraft measurements of vertical ultrafine particles profiles over Northern China coastal areas during dust storms in 2006, *Atmospheric Environment*, 21, 1323-1332.
- 4) Matsuki A., Iwasaka Y., Osada K., Matsunaga K., Kido M., Inomata Y., Trochkin D., Nishita C., Nezuka T., Sakai T., Zhang D. Z., Kwon A. S., 2003, Seasonal dependence of the long-range transport and vertical distribution of free tropospheric aerosols over east Asia : on the basis of aircraft and lidar measurements and isentropic trajectory analysis, *Journal of Geophysical Research* 108(D23), 8663.
- 5) Soloman P. A., Cowling E., Hidy G., Furness C., 2000, Comparison of scientific findings from major field studies in North America and Europe, *Atmospheric Environment*, 34, 1885-1920.
- 6) Gunilla S., Otto K., 1998, Aircraft measurements and model simulations of the air quality in Athens, Greece, *Atmospheric Environment*, 32(12), 2269-2289.
- 7) Shuichi H., Shinji W., Toshimasa O., 2007, Vertical profiles of ultrafine to supermicron particles measured by aircraft over Osaka metropolitan area in Japan, *Atmospheric Environment* 41, 717-729.
- 8) Byun D., Ching J. K. S., 1999, Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality(CMAQ) Modeling Systems, United States Environmental Protection Agency Rep., EPA-600/R-99/030, 727pp.
- 9) Dudhia J., 1993, A nonhydrostatic version of the Penn state-NCAR Mesoscale Model : Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.
- 10) Zhang Q., Streets D., He K., Reddy S., Kannari A., Park I. S., Fu J., Klimont Z., 2007, A new anthropogenic emission inventory system for Asia in support of atmospheric modeling, Presented at the 6th Annual CMAS Conference, Chapel Hill, NC.