

장기간(1997~2007) 항공관측을 이용한 서해상 SO₂ 및 NO_x의 거동 연구

송형도 · 최진수 · 장임석 · 김정수 · 이석조

국립환경과학원 기후대기연구 대기환경연구과
(2009년 3월 6일 접수; 2009년 4월 3일 수정; 2009년 4월 21일 채택)

Studies on the Behavior of SO₂ and NO_x over Yellow Sea Area during Long Term Aircraft Measurements(1997~2007)

Hyung-Do Song, Jin-Soo Choi, Im-Suk Jang, Jeong-Soo Kim and Suk-Jo Lee

*Climate and Air Quality Research Department Air Quality Research Division
National Institute of Environment Research
Environmental Research Complex, Incheon 404-708, Korea*

(Manuscript received 6 March, 2009; revised 3 April, 2009; accepted 21 April, 2009)

Abstract

Aircraft Measurements of gaseous pollutants(SO₂, NO_x and O₃) in the Yellow Sea area, were carried out on 1997-2007. Main measurement site in 124°-127°E, 35°-37°N (in the Yellow Sea), have been done along the paths classified vertically and zonally. To understand how the air stream affects Long-range transboundary pollutants in Northeast Asia (LTP), the tracks of pollutants in northeast Asia have been analyzed by dividing into 6 different regions(regions I-V and L). Compared with Korea's local sources and western north Pacific influenced by the Yellow Sea, when the air stream from region II is dominant, the SO₂ concentrations are 3-6times higher. In region II and III, SO₂ concentrations are represented highest at 25.0 and 14.7 ppb, respectively. However, in other regions, SO₂ concentration was recorded the highest at 1.1-3.8 ppb, which is 7-15% higher than the highest one over the region II and III. During 1997-2007, the mean amount of incoming pollutants is 0.162 ton/km·hr exceeding about 5-times mean amount of outgoing pollutants over the West Sea. During the observed period, the amount of incoming and outgoing SO₂ over the Yellow Sea is the highest in winter, at 0.224 ton/(km·hr) and 0.120 ton/(km·hr), respectively.

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

1. 서 론

동북아시아 지역의 경제성장과 함께 화석연료에 대한 의존도가 커지고 있으며, 이는 기후변화와 함

께 대기질을 급격히 악화시키는 요인이 되고 있다. 따라서 동북아시아 지역에서의 인위적인 대기오염 물질의 발생량을 평가하고 대책마련을 위하여 대기 오염의 현황을 파악하는 일은 보다 중요하다 하겠다. 대기경계층 하부에 존재하는 산성 침적물이나 광화학산화물 등과 관련된 대기오염물질들의 평균 체류시간은 1일에서 1주일 정도이며 이러한 물질들

Corresponding Author : Hyung-Do Song, Air Quality Research Division National Institute of Environment Research Environmental Research Complex, Incheon 404-708, Korea
Phone: +82-32-560-7267
E-mail: hdsong@korea.kr

은 수백에서 수천 Km까지 이동하는 대기오염물질의 장거리이동을 일으키게 되며, 최근 항공관측에 의하면 중국에서 발생하는 대기중 입자성분이 미국의 서부연안까지 장거리 이동되고 있다^{1,2)}.

우리나라는 지리학상 중국의 풍하측에 위치하고 있으며, 동북아시아로부터 장거리 이동되는 대기오염물질로 인한 직간접적인 피해국이라 할 수 있다. 따라서 한국은 물론 일본은 동북아시아로부터 배출되는 대기오염물질의 장거리 이동과 침적에 대한 정량적인 파악이 매우 중요하다. 2006년 황사기간 동안 중국 북부 해안지역방의 초미세먼지 연직분포연구³⁾를 위하여 입자의 입경별 개수농도장비를 장착하여 3500m고도까지 관측을 하였다. 이를 통해 강한 황사, 약한 황사, 비황사로 나뉘어 중국북부지역에서의 대기오염의 생성메커니즘과 과정을 알 수 있다. 대기오염물질이 이동하는 동안 먼지입자의 특성 변화와 이차오염물질의 원인이 되는 먼지의 입자와 가스상 오염물질(SO₂, NO_x, O₃)의 생성사이의 복잡한 물리 화학적 반응과 이동 과정 연구가 활발히 진행되고 있고⁴⁾, 항공관측으로는 모델 시뮬레이션과 항공관측을 통한 그리스 아테네의 대기질 분석연구⁵⁾ 및 가스상 및 입자상 오염물질 측정기를 항공기에 탑재하여 일본 오사카시의 초미세먼지 연직분포를 연구⁶⁾등이 활발히 진행되고 있다. 특히 ACE-1, INDOEX, ACE-Asia, TRACE-P와 같은 주요 관측 프로젝트에서 항공관측을 통해 미세먼지 및 가스상 대기오염물질 연구가 활발히 진행되고 있다^{7,8)}. 가스상 오염물질과 입자상 물질들의 공간적, 연직적 분포

특성 연구가 PM₁₀, PM_{2.5}의 화학적 종류 분석을 통해 에어로졸이 기후에 미치는 영향과 지역수송을 이해하는데 필수적인 연구로 알려져 있다. 하지만 이러한 연구들이 활발히 진행되고 있지만 한시적이고 제한적인 공간이란 점에서 신뢰성과 데이터의 축적이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 항공기를 이용하여 한반도 서해안 상공의 가스상 물질을 측정 분석하였고, 측정 자료를 이용하여 서해안을 경계에서 유입되는 대기오염물질의 이동량을 산정하였다. 무엇보다 항공관측의 한계점을 극복하고 장기간 관측을 통해 보다 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 항공측정 개요 및 방법

측정에 사용된 항공기는 (주)창운항공이 소유하고 있는 미국 PIPER사의 쌍발 프로펠러 Chiefain (PA-31-350) 기종이었고 시료의 흡입은 스테인레스 스틸 재질의 노즐을 항공기 바닥면에 비행방향으로 향하도록 설치하여 측정 중 프로펠러와 배기가스의 영향이 없도록 하였고 SO₂, NO_x, O₃의 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. 1에는 측정에 사용된 항공기와 설치된 장비의 모습, 그리고 항공기 내부의 세부적인

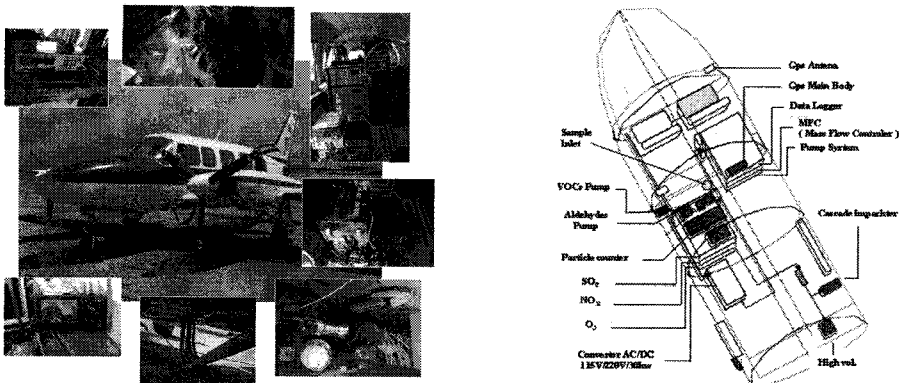


Fig. 1. Schematic view of aircraft measurement system arrangement and photos of main instruments.

모습을 나타내었다. 또한 항공 관측 결과와 함께 대기오염물질의 유입·유출되는 양을 정량적으로 산정하기 위하여 항공관측 기간 동안 충남 태안 안면도 해안에서 라디오존데를 사용하여 상층기상변수들의 연직구조를 측정하였다.

2.2. 측정기간 및 경로

2007년도 항공측정은 총 12회로 4월과 10월로 나누어 각각 6회씩 실시하였다(1차: '07년 4월 16일~26일, 2차: '07년 10월 15~25일). 각 측정경로는 Fig. 2에 F1, F2로 나누어 나타냈으며 Table 1에 각 비행경로의 세부적인 위, 경도 및 고도와 관측시간 등을 나타내었다.

경로 F1은 서해상의 장거리이동 오염물질의 연직 분포현상을 관측하기 위하여 경도 124° 30' E 선상을 따라 위도 37° 00' N 에서 35° 00' N까지 왕복하며 고도를 300~2800 m까지 순차적으로 변화시키며 F1-1, F1-2로 관측을 실시하였다. F2는 서해상의 장거리이동 오염물질의 이동에 따른 공간적 분포현상을 관측하기 위하여 경도 124° 10' E, 125° 30' E, 127° 00' E을 기준으로 위도 37° 00' N ~ 36° 00' N의 구간을 고도 800 m(F2-1)와 1500 m(F2-2) 중 한 고도를 선택하여 관측을 실시하였다.

2.3. 이동량 산정

동북아시아지역에서 오염물질의 이동을 정량적으로

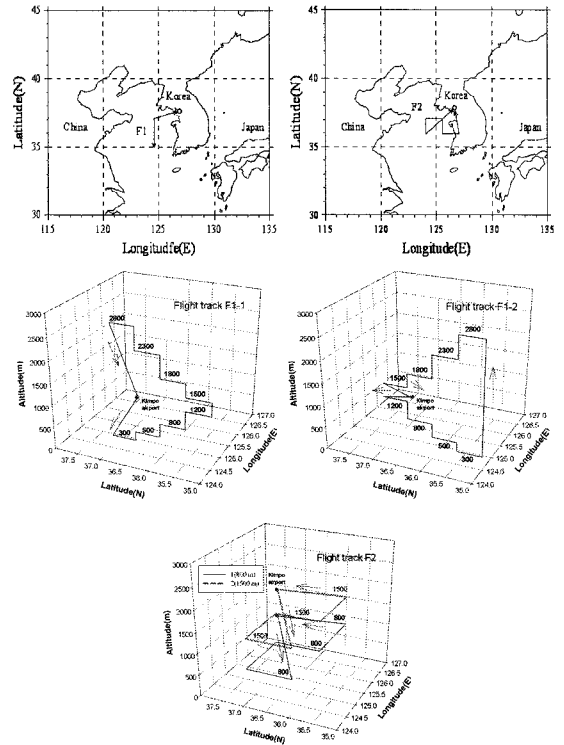


Fig. 2. Observation area and flight routes and for the experiments.

파악하기 위해서는 한반도를 중심으로 오염물질의 유출·입량 및 침적량을 구하는 것이 필요하다. 중국에서 많은 양의 오염물질이 대기로 배출되는 점

Table 1. Summary of flight track and measurement date in 2007

Flight track	Latitude	Longitude	Alt. (F1-1, F2-1)	Alt. (F1-2, F2-2)	Flight date	Flight time
F1	37°N-36°30' N	124°30' E	300 m	1200 m	4/18	12:53~16:39
	36°30' N-36°N	124°30' E	500 m	800 m	4/22	11:26~14:21
	36°N-35°30' N	124°30' E	800 m	500 m	4/23	13:24~16:45
	35°30' N-35°N	124°30' E	1200 m	300 m	4/24	11:26~14:37
	35°N-35°30' N	124°30' E	1500 m	2800 m	10/20	11:28~14:16
	35°30' N-36°N	124°30' E	1800 m	2300 m	10/21	09:39~12:50
	36°N-36°30' N	124°30' E	2300 m	1800 m	10/22	14:20~17:12
	36°30' N-37°N	124°30' E	2800 m	1500 m	10/24	13:03~16:00
F2	36°N-37°N	124°10' E	800 m	1500 m	4/19	12:33~15:52
	37°N	124°10' E-125°30' E	800 m	1500 m		
	37°N-36°N	125°30' E	800 m	1500 m		
	36°N	125°30' E-127°E	800 m	1500 m		
	36°N-37°N	127°E	800 m	1500 m		

을 감안할 때 중국대륙이 풍상측에 있고 한반도와 인근 일본이 풍하측이 되는 기상조건에 의해 서해상으로 오염물질이 이동되어 오는 현상을 이미 살펴 보았다. 항공관측의 주된 목적 중 하나는 지상 대기오염 측정자료 만으로는 추정할 수 없는 혼합층 내의 오염물질의 농도를 측정하고 상층기상관측을 통해 얻어진 기상변수들을 이용하여 서해상에서 이동하고 있는 물질의 이동량(Flux)을 산정하는 것이다.

대기 경계층 내에서 이동되는 오염물질의 이동량 산정연구⁹⁾가 있으며, 우리나라 서해 상공에서의 이동량 산정연구¹⁰⁾가 수행한 바 있다. 항공관측자료를 이용하여 대기 경계층 내 이동된 대기오염물질 이동량(F)은 다음과 같은 식에 의해 산정되었다.

$$F = C \cdot H \cdot U \cdot L \quad (1)$$

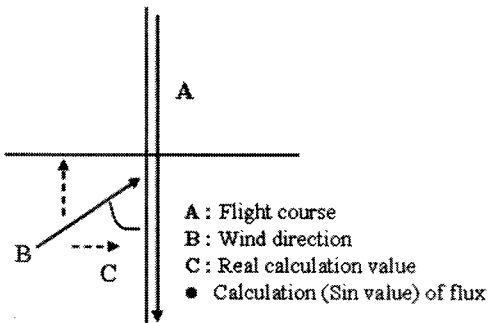
F = 대기오염물질의 이동량 (ton/hr · km)

C = 대기오염물질 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

H = 대기 경계층의 높이 (m)

U = 평균풍향과 비행방향이 이루는 각에 대한 보정값 (m/sec)

L = 비행구간의 수평거리 (km)



따라서, 오염물질의 이동량은 항공측정시 단위시간당 비행경로를 통과하는 오염물질의 양으로 정의된다. 식(1)에 포함된 변수들은 비행구간별로 측정된 값들을 평균한 것으로 flux 계산을 하기위해 각 농도는 경계층내의 농도 수준을 대표하는 값이고, 풍향, 풍속 역시 경계층 내의 대표값이라는 가정이 필요하다¹¹⁾. 풍향, 풍속 자료는 태안 파도리에서 라디오존데를 사용하여 측정된 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공간적 분포 특성

3.1.1. 서해상의 기상상태

라디오존데를 사용하여 측정된 연직 기상변수들을 혼합고 상·하로 나누어 Table 2에 정리하였으며 또한 종관적인 기상상태를 파악하기 위하여 각 측정일의 850 hPa 일기도와 Streamline을 이용하여 특징을 분석하였다. 4월의 경우 우리나라는 남으로는 중국 화중지방 고기압의 동진과, 북으로 만주지역에 발달한 저기압 사이에 놓이면서 강한 서-남서풍의 영향을 받았고 10월의 경우 우리나라에 영향을 주던 기압골이 동북해상으로 빠른 속도로 이동 하였으며 만주지역으로부터 남하한 대륙성 고기압은 화중지방으로 이동하였다. 이때 일본 동쪽해상을 이동하는 태풍의 영향으로 고기압의 이동이 정체되면서 지속적인 서풍의 유입을 가져왔다.

3.1.2. 항공관측 기간 중 고도별 특징

항공관측의 정확성을 위하여 항공기에 장착된 장비의 정도관리를 비행전후로 실시하였으며, 관측자료의 공간 및 시간적 해석을 위하여 항공기내 자체 탑재된 GPS와 본 연구팀의 GPS를 상호비교 분석하였으며, 자료의 기간 대표성을 위하여 분석하고자 하는 고도와 경도의 전후로 데이터를 분리하여 자료의 정밀도와 정량적인 분석을 하고자 하였다.

4월의 경우 고도별 측정은 18, 22, 23, 24일에 이루어졌다(Fig. 3-a). 이 중 4월 18일의 경우 1000 미하의 고도에서 높은 농도의 오염물질이 수송되는 현상을 나타내었다. 대기경계층은 약 1200 m까지 형성된 것으로 판단되며 경계층 범위 내에서 SO₂의 평균농도는 약 10.1 ppb였으며 1200 m이상에서 약 1.4 ppb로 약 7배의 차이를 보였다. 경계층 내의 평균 풍속은 약 4.5 m/sec였으며 경계층 위에서는 약 12.8 m/sec의 강풍이 불었다. 역궤적 분석결과 경계층 내의 기류는 중국 산둥반도와 화북지역의 해안을 지나 이동하여 왔고 경계층 위로 몽골지역에서 이동하여온 기류의 영향을 받았다. 때문에 오염원이 비교적 많은 지역의 영향을 받은 경계층 아래는 낮은 풍속과 수직적 혼합으로 전 고도에서 높은 농도를 보인 것으로 판단된다.

22일과 23일의 경우 SO₂의 농도는 전 고도에 걸쳐 1.0 ppb 이하의 낮은 농도를 나타내었다. 22일의 경

Table 2. Summary of measured meteorological parameters during the whole aircraft missions in 2007

Date	M. L. (m)	below M. L.					above M. L.					
		W. D.	W. S. (m/s)	W. R. (g/kg)	P. T. (°C)	R. H. (%)	W. D.	W. S. (m/s)	W. R. (g/kg)	P. T. (°C)	R. H. (%)	
Apr.	19	1400	SW	13.3	2.4	289	32	WS	13.2	2.3	296	39
	21	1368	SW	15.7	8.3	292	93	SW	16.4	3.6	301	43
	22	552	NW	5.2	4.9	285	68	WN	15.1	0.8	297	12
	23	2300	EN	2.4	2.7	290	42	WN	5.9	0.4	299	7
	24	650	WN	4.4	4.1	285	58	WN	6.9	2.3	291	44
Oct.	20	2200	NW	11.8	2.9	282	73	NW	25.8	0.6	290	20
	21(am)	1100	WN	6.2	4.8	286	72	WN	11.0	2.0	297	32
	21(pm)	1100	WS	6.0	5.6	288	74	WN	11.8	2.2	297	34
	22	1700	NW	3.5	5.3	292	65	WN	8.1	1.9	299	30
	24	1000	SW	3.0	6.7	292	67	SW	4.6	2.1	299	27

*M.L. : Mixed Layer W.D. : Wind direction
 W.S. : Wind Speed W.R. : Water Ratio
 P.T. : Potential Temperature R.H. : Related Humidity

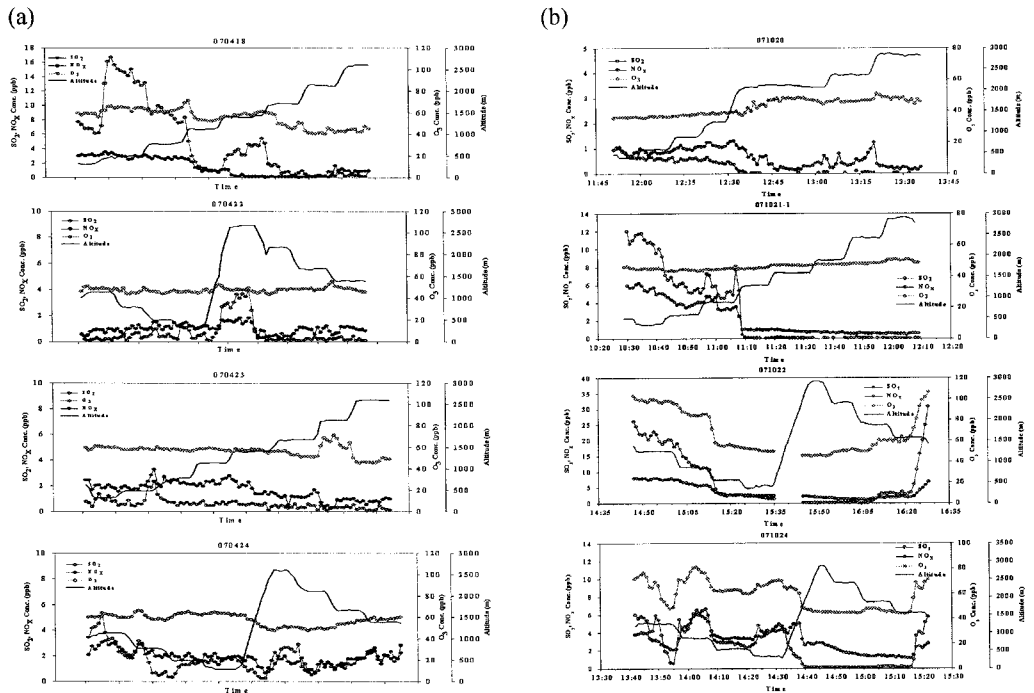


Fig. 3. Variations of SO₂, NO_x, O₃ concentrations measured in 2007((a)April, (b) October).

우 대기 경계층 상·하로 몽골지역에서 이동하여 온 기류의 영향을 받았으며 23일의 경우 경계층 내로 한반도 Local source의 영향과 경계층 위로 만주지역에서 이동하여 온 기류의 영향을 받아 비교적 인위

적인 오염원이 적은 지역의 영향을 받은 것으로 판단된다.

10월의 경우 고도별 측정은 20, 21, 22, 24일에 이루어졌고 21과 22일에 1500 m이하로 측정물질들이

높은 농도분포를 보였다. 21일의 경우 대기경계층은 1100 m까지 형성되었고 300~800 m에서 SO₂는 5.7~10.7 ppb의 농도범위를 나타내었다. 반면 1200~2800 m까지 0.02~0.6 ppb의 농도 범위를 나타내어 경계층을 기준으로 큰 농도의 차이를 나타내었다. 이는 중국 산둥반도를 지나 서해상으로 이동한 오염물질이 고기압의 영향으로 경계층 내로 유입되면서 경계층의 상하로 큰 농도차이를 보인 것으로 판단된다.

22일의 경우 대기 경계층은 약 1700 m까지 형성되었고 1500 m까지 약 5.3 g/kg의 수증기 혼합비를 보였으며 그 이상의 고도에서 약 2.0 g/kg 이하의 낮은 혼합비를 보였다(Table 2). 또한 온위로 보아 하층의 공기 밀도는 낮고 상층의 밀도는 높아 상층의 공기는 혼합층 내로 유입되고 하층의 공기 역시 수직적 상승에 의해 약 800~1500 m사이의 고도로 오염물질의 유입이 이루어 졌을 것으로 판단되며 고도 800~1500 m사이의 농도는 SO₂, NO_x, O₃가 각각 10.0~21.3 ppb, 3.1~7.7 ppb, 75.0~98.1 ppb의 고농도를 나타내었다.

3.1.3. 연직 분포 특성

1997~2007년까지 서해상 35° 00' ~37° 00' N, 124° 30' E 부근에서 측정된 SO₂, O₃, NO_x에 대한 고도별 농도 분포를 Table 3에 정리하였다. SO₂의 경우, 평균농도는 1000 m고도에서 약 3.24 ppb로 가장 높았으며 최고농도 역시 22.94 ppb로 가장 높았다. 500, 2000, 3000 m에서는 각각 2.97, 1.68, 0.90 ppb로

Table 3. Altitudinal distributions of SO₂, NO_x, O₃ during 1997~2007

Altitude (m)	item	SO ₂	O ₃	NO _x
500	Mean	2.97	52.0	2.92
	Min	0.07	23.6	0.58
	Max	14.70	87.7	13.06
1000	Mean	3.24	52.9	3.01
	Min	0.04	24.1	0.45
	Max	22.94	91.9	13.24
2000	Mean	1.68	49.5	2.58
	Min	0.05	21.9	0.07
	Max	10.93	101.0	9.29
3000	Mean	0.90	44.5	1.80
	Min	0.03	20.6	0.06
	Max	6.08	69.6	5.75

측정고도의 하층에서 높은 농도분포를 나타내었다. 상층 1000~1500 m의 경우 대략 오후 시간대에 서해상에 형성되는 혼합층 정도의 높이로써 대륙으로부터 배출된 SO₂는 혼합층 높이까지 mixing 되면서 이동하며, 그 이상의 고도에서는 혼합층과는 전혀 다른 기류에 의해 영향을 받으며 이동하는 현상으로 SO₂의 연직분포를 설명할 수 있으며 NO_x와 O₃ 역시 경향을 같이 하였다.

3.2. 역궤적 분석

3.2.1. 권역별 농도분포

기류의 특성에 영향을 미치는 이동경로를 역추적하기 위하여 태안부근의 서해 36°N, 126°E를 기준으로 발원지의 특성에 따라 중국 북동부와 북한을 포함한 I 권역, 산둥 반도와 발해만 연안을 포함한 II 권역, 중국 동지나해를 포함한 중국 중·남부 지역의 공업단지가 조성된 III 권역, 중국과 일본 사이의 제주도를 포함한 남태평양지역인 IV 권역, 일본을 포함한 북태평양 지역인 V 권역, 기류가 국내로부터 이동하는 경우를 L 권역으로 나누어 Fig. 4에 나타내었고 미국 NOAA에서 개발한 HYSPLIT4 모델을 이용하여 역궤적 분석을 실시하였다.

2007년 항공측정 기간 동안 기류의 이동경로에 따른 각 오염물질의 평균농도 및 최소값, 최대값을 Fig. 4의 방법으로 분류한 기원권역별로 나누어 Table 4에 정리하였다.

SO₂의 농도는 권역 II, III에서 각각 평균 2.44,

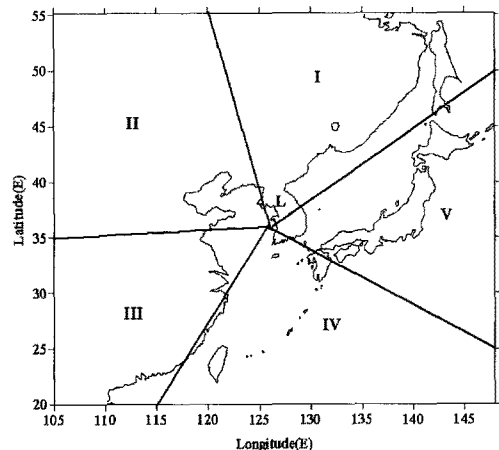


Fig. 4. Divided regions to classify the pathway of air mass.

Table 4. Summary of aircraft measurement for the different type of air pollutants in 2007

Region	Item	SO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	O ₃ (ppb)
I	Avr.	1.16	1.67	58.44
	Min.	0.20	0.79	46.90
	Max.	3.47	2.71	63.39
II	Avr.	2.44	1.78	51.14
	Min.	0.02	0.12	35.68
	Max.	14.44	5.47	74.97
III	Avr.	5.34	3.43	69.86
	Min.	0.91	2.03	50.63
	Max.	13.17	6.11	103.37
L	Avr.	0.81	2.18	58.39
	Min.	0.62	1.98	57.82
	Max.	1.02	2.30	59.63

5.34 ppb로 다른 권역의 영향을 받은 경우 보다 높은 농도를 보였으며 최대 14.44, 13.17 ppb의 고농도 사례를 나타내었다. 반면 I, L 권역의 영향을 받은 경우 각각 1.16, 0.81 ppb로 비교적 낮은 농도분포를 보였다. 반면 NO_x의 경우 역시 III 권역이 평균 3.43 ppb로 가장 높은 농도분포를 보였지만 한반도의 영향을 받은 L 권역의 경우 평균 2.18 ppb로 비교적 높은 농도를 나타내었다. 편서풍의 영향으로 권역 IV, V의 영향을 받지 않고 권역 I~L에 주영향을 받음을 알 수 있었다.

1997년부터 2007년까지의 항공측정 기간 동안 기류의 발생 및 유입 경로를 고도별로 구하여 아래 그림 5에 나타내었으며 Table 5에 각 유입 경로에 따른 % 및 권역별 농도분포를 정리하였다.

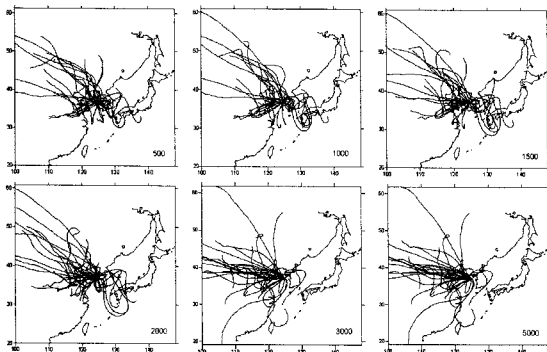


Fig. 5. Back-trajectories pattern at different altitude during the whole aircraft measurement(1997~2007).

Table 5. Summary of aircraft measurement data for the different type of air mass during 1997~2007

Region	percent (%)	item	SO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	O ₃ (ppb)
I	11	Avr.	1.37	2.46	40.6
		Min.	0.19	0.08	20.6
		Max.	3.78	7.66	63.1
II	62	Avr.	2.59	2.91	48.8
		Min.	0.03	0.06	22.5
		Max.	25.00	16.44	101.0
III	11	Avr.	4.69	3.85	56.5
		Min.	0.24	0.94	27.1
		Max.	14.70	13.24	103.4
IV	4	Avr.	0.39	1.85	54.7
		Min.	0.13	0.66	46.2
		Max.	1.09	3.53	63.2
V	5	Avr.	1.28	4.51	54.8
		Min.	0.04	2.19	37.3
		Max.	3.60	7.88	66.3
L	6	Avr.	0.77	2.17	49.5
		Min.	0.04	0.32	30.9
		Max.	1.79	5.32	61.5

1997~2007년까지 측정기간 중 서해상 기류의 62%가 산둥반도와 발해 연안을 포함한 II 권역의 영향을 받은 것으로 나타나 서해상의 대기질은 II 권역의 영향이 큰 것으로 판단되며 이 경우 서해상 SO₂의 평균농도는 2.6 ppb로 북태평양 지역과 국내의 local source의 영향을 받은 0.4, 0.8 ppb보다 약 3~6배 높은 농도를 보였다. II, III 권역의 영향을 받을시 SO₂는 최대 25.0, 14.7 ppb의 고농도 episode들이 발생하였고 그 외 권역들의 최대농도는 1.1~3.8 ppb로 II, III 권역과 비교하면 약 7~15 %에 불과하여 권역 II, III을 통과하는 기류의 이동을 고농도 episode의 주요 원인으로 생각할 수 있다.

3.2.2. II 권역의 농도분포

1997~2007년까지 권역별 영향은 II 권역에서 62%로 높게 나타나 권역별 주영향을 받는 II 권역을 대상으로 대기오염물질의 농도분포 및 계절별, 혼합층 상·하의 분포차이를 조사하여 Table 6에 정리하였다.

1997~2007년까지 항공관측 기간 중 II 권역의 영향을 받은 날의 혼합층을 기준으로 정리한 결과, 혼합층 내의 SO₂ 농도는 평균농도는 3.3 ppb였다. 해양

Table 6. Summary of air pollutants concentration during 1997~2007

Season	Item	Below mixing layer			Above mixing layer		
		SO ₂	O ₃	NO _x	SO ₂	O ₃	NO _x
Overall	Mean	3.27	50.0	3.41	1.18	47.5	2.34
	Std.	3.23	14.9	2.98	1.63	14.8	2.28
	Min.	0.14	23.6	0.43	0.03	22.5	0.06
	Max.	14.44	86.7	16.44	7.50	101	10.39
Winter	Mean	3.36	40.2	2.33	1.32	37.5	2.81
Spring		3.17	55.7	3.29	0.90	54.8	2.23
Summer		0.81	55.8	4.58	0.09	55.8	4.58
Fall		3.71	47.0	3.64	1.63	42.0	1.80

지역의 배경농도는 대략 0.1~0.2 ppb이며¹²⁾, Hatakeyama 등¹³⁾이 일본 근해에서 측정한 SO₂의 평균농도는 각각 0.24, 0.41, 0.93 ppb로 평균값은 0.58 ppb이었다. 따라서 II권역의 영향을 받은 경우 서해상의 SO₂ 농도는 태평양 지역에 비해 약 16배가량, 일본 근해에 비해 약 6배 가량 높았다. 또한 혼합층 이상에서도 평균 1.2 ppb를 나타내어 배경지역이나 타 연구결과에 비하여 높은 수준을 나타내어 서해상의 상층대기까지 고루 분포하는 특징을 나타내었다.

SO₂의 경우 혼합고내에서 봄, 가을, 겨울이 약 3.0 ppb 이상의 농도 수준을 보였고 여름철은 0.8 ppb로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 혼합고 상층에서도 봄, 가을, 겨울이 각각 0.9, 1.6, 1.3 ppb로 여름철 혼합고 내의 농도보다 높은 값을 나타내었고 전체적으로 SO₂의 농도는 가을>겨울>봄>여름 순으로 가을부터

봄까지 서해상이 오염물질의 장거리이동에 의한 영향을 받고 있는 것으로 생각할 수 있다.

3.3. 이동량 산정

1997~2007년까지의 서해상의 SO₂, NO_x, O₃의 총 평균 유입량은 각각 0.162, 0.171, 2.161 Ton/(hr·km)이며 평균 유출량은 0.036, 0.104, 0.979 Ton/(hr·km)로 SO₂의 경우 유입량은 유출량의 약 5배로 서해안이 중국으로부터 이동하는 SO₂의 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 나타났다(Table 7). 또한 NO_x와 O₃의 경우 역시 유입량이 약 2배를 나타내어 전 물질에 걸쳐 같은 경향을 보였다.

1997~2007년까지 산동반도와 발해 연안(II), 중국 중·남부 공업지역(III)의 영향을 받을 시 SO₂의 이동량은 평균 0.177, 0.344 ton/(km·hr)로 타권역 보다 높은 이동량을 보였으며 NO_x, O₃ 역시 같은 경향

Table 7. Yearly transboundary flux of SO₂, NO_x and O₃, during 1997 through 2007

Year	Gas	SO ₂		NO _x		O ₃	
		In Flow	Out Flow	In Flow	Out Flow	In Flow	Out Flow
1997		0.238	-0.12	0.288	-0.07	1.793	-0.52
1998		0.278	-0.035	0.036		2.835	-1.295
1999			-0.008		-0.107		-2.453
2000		0.011	-0.021	0.03	-0.12	0.633	-1.523
2001		0.127	-0.023	0.293	-0.091	0.143	-0.054
2002		0.203		0.234		5.45	
2003		0.096	-0.021	0.113		2.135	-0.699
2004		0.103	-0.021	0.327	-0.087	0.978	-0.945
2005		0.160	-0.065	0.134	-0.200	1.769	
2006		0.190	-0.008	0.178	-0.053	3.714	-0.751
2007		0.212		0.081		2.16	-0.570
Avr.		0.162	-0.036	0.171	-0.104	2.161	-0.979

Unit : ton/(hr·km)

Table 8. Regional transboundary flux of SO₂, NO_x, O₃, during 1997~2007

Region	SO ₂		NO _x		O ₃	
	In Flow	Out Flow	In Flow	Out Flow	In Flow	Out Flow
I	0.176	-0.021	0.256		2.801	-0.699
II	0.177	-0.081	0.151	-0.108	2.581	-0.502
III	0.344	-0.010	0.341	-0.040	2.848	-0.490
IV	0.020	-0.010	0.035	-0.060	0.320	-2.480
V	0.018	-0.026	0.006	-0.140	0.122	-1.945
L	0.066	-0.025	0.038	-0.073	1.452	-1.286

Unit : ton/(hr · km)

을 나타내었다(Table 8). 한반도로부터 유출되어진 양은 I, II, III권역에 모두 유입양보다 유출된 양이 적은 것으로 나타났으며 반면 IV, V, L권역의 경우 유출되어진 양이 많았다. 이는 중국 대륙으로부터 이동해온 기류의 경우 인위적인 배출원의 영향이 큰 것으로 판단되며 IV, V 권역과 같이 해양지역으로부터 이동해온 기류의 경우 특별한 오염원이 없는 해양지역의 특성상 낮은 유입량을 나타내며 유출량의 경우 한반도의 국지적인 영향이 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기의 지역적인 수평분포와 수직 분포에 대한 조사와 이동현상에 대한 조사를 위하여 항공기에 측정장비를 탑재하여 장기간 측정을 하였다. 장기간(1997~2007년)의 역계적분석을 해본결과 서해상 기류의 62%가 산둥반도와 발해 연안을 포함한 II권역의 영향을 받은 것으로 나타났으며, 이 경우 서해상 SO₂의 평균농도는 2.6 ppb로 북태평양 지역과 국내의 local source의 영향을 받은 0.4, 0.8 ppb 보다 약 3~6배 높은 농도로 나타났다. II, III권역의 영향을 받을 시 SO₂는 최대 25.0, 14.7 ppb의 고농도 episode들이 발생하였고 그 외 권역의 최대농도는 1.1~3.8 ppb로 II, III권역과 비교하면 약 7~15 %수준이었다.

1997~2007년까지 II 권역의 영향을 받은 경우 혼합층 내의 SO₂평균농도는 3.3 ppb였다. 해양지역의 배경농도는 대략 0.1~0.2 ppb수준이며, 서해상의 SO₂ 농도는 태평양 지역에 비해 약 16배가량 높음을 알 수 있었다. 혼합층 이상에서도 평균 1.2 ppb를 나타

내어 SO₂는 서해상의 상층대기까지 고루 분포하는 특징을 나타내었다. 2007년에 산출된 SO₂의 평균 이동량은 0.212 ton/(km · hr)였고, 1997~2007년까지의 평균 이동량은 0.162 ton/(km · hr)로 나타났고, 전 기간 동안 유출량에 비해 유입량이 약 5배가량 큰 것으로 나타났다. 1997~2007년까지 산둥반도와 발해 연안(II), 중국 중·남부 공업지역(III)의 영향을 받을 시 SO₂의 이동량은 평균 0.177, 0.344 ton/(km · hr)로 타 권역 보다 높은 이동량이 추정되었다.

항공기를 이용한 대기오염 관측은 일반 대기와 다르게 비행기속도 즉 공기역학적 운동에 따른 샘플의 채취가 어려웠으며, 본 연구에서는 가스상 오염물질을 위주로 측정 · 분석하였지만 향후 Inlet시스템 개발을 통하여 입자상 오염물질의 표준화된 측정 · 분석으로 입자상 오염물질의 거동과 이에 따른 기후변화와 연계한 연구를 위해 노력하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1) Maring H., Savioe D. L., Izaguirre M. A., Custals L., Reid J. S., 2003, Vertical distributions of dust and sea-salt aerosols over Puerto Rico during PRIDE measured from a light aircraft, *Journal of Geophysical Research*, 108(D19), 8587.
- 2) Strausberg M. J., Wang H. Q., Richardson M. I., Ewald S. P., Toigo A. D., 2005, Observations of the initiation and evolution of the 2001 marsglobal dust storm, *Journal of Geophysical Research*, 110, E02006.
- 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) Gunilla S., Otto K., 1998, Aircraft measurements and model simulations of the air quality in Athens, Greece, *Atmospheric Environment*, 32(12), 2269-2289.
 - 6) 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.
 - 7) Huebert B. J., Bates T., Russell P. B., Shi G. Y., Kim Y. J., Kawamura K., Carmichael G., Nakajima T., 2003, An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108(D23), 8633.
 - 8) Jacob D. J., Crawford J. H., Kleb M. M., Connors V. S., Bendura R. J., Raper J. L., Sachse G. W., Gille J. C., Emmons L., Heald C. L., 2003, Transport and Chemical Evolution over the Pacific(TRACE-P) aircraft mission: design, execution, and first results, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 108(D20), 1-19.
 - 9) Lelieveld J., Janson F. W., Dop H. V., 1989, Assessment of pollutant fluxes across the frontiers of the Federal Republic of Germany on the basis of aircraft measurement, *Atmospheric Environment*, 23, 939-951.
 - 10) 김병곤, 차준석, 한진석, 박일수, 김정수, 나진균, 최덕일, 안준영, 강창국, 1997, 항공기를 이용한 서해안에서의 SO₂ 및 NO_x 측정, *한국대기보전학회지*, 13(5), 361-369.
 - 11) Kim S. B., Lee T. Y., 2001, Comprehensive acid deposition model and its application to episodic acid deposition in east asia, *Air pollution modeling and its application XIV*, 721-722.
 - 12) Thornton D. C., Bandy A. R., Tu F. H., Blomquist B. W., Mitchell G. M., Nadler W., Lenschow D. H., 2002, Fast airborne sulfur dioxide measurement by atmospheric pressure ionization mass spectrometry (APIMS), *Journal of Geophysical Research*, 107(D22), 4, 632.
 - 13) Hatakeyama S., Takami A., Sakamaki F., Mukai H., Sugimoto N., Shimizu A., 2004, Aerial measurement of air pollutants and aerosols during 20-22 March 2001 over the East China Sea, *Journal of Geophysical research*, 109, D13304.