한국대기보전학회지 제 13 권 제 5 호
J. KAPRA Vol. 13, No. 5 (1997) pp. 361~369
Journal of Korea Air Pollution Research Association

항공기를 이용한 서해안에서의 SO_2 및 NO_x의 측정

Aircraft Measurement of SO_2, NO_x over Yellow Sea Area

김병곤 · 차준석 · 한진석 · 박일수 · 김정수
나진균 · 최덕일 · 안준영 · 강창국
국립환경연구원 대기연구부

(1997년 5월 28일 접수, 1997년 11월 3일 채택)

Byung-Gon Kim, Jun-Seok Cha, Jin-Seok Han, Il-Soo Park, Jeong-Su Kim
Jin-Gyun Na, Doug-Il Choi, Jun-Young Ahn, Chang-Guk Kang
Air Quality Research Department
National Institute of Environmental Research

(Received 28 May 1997; accepted 3 November 1997)

Abstract

In order to investigate the abundance and transboundary fluxes of air pollutants over the Yellow Sea, airborne measurements were made aboard the SF-600 aircraft (Pan-Asia Engineering) in March, 1996. The data presented in this paper are preliminary results and airborne experiment will be carried out until 1999. The vertical profile of relevant meteorological parameters such as temperature, water vapor, wind direction and wind speed were also observed at Taean. Mixing layer height was about 1000~1100 m during the flights.

The SO_2 and NOx concentrations were 3~6 ppb and 5~7 ppb below 1000 m, within 1 ppb and 3~5 ppb at 1000~2000 m, respectively. Backward trajectory analyses were also carried out.

A mathematical method by Lelieveld *et al.*(1989) was used to estimate the flux of air pollutants through the planetary boundary layer of Yellow Sea area. Transboundary fluxes were calculated using the measurement results with respect to the pollutants concentration, depth of the planetary boundary layer, wind speed and wind direction. The estimated transboundary flux of SO_2 through the western boundary of Korea was about 39~42 tons/hour.

Key words : transboundary flux, airborne measurement, backward trajectory

1. 서 론

동북아시아 지역은 인구의 증가와 빠른 산업 발달로 인위적인 SO_2와 NOx의 발생이 가장 큰 지역 중의 하나이며(Rhode, 1989), 또한 이 지역의 경제 발전으로 인한 지속적인 에너지 사용의 증가는 이 지역의 대기질을 급격히 악화시키는 요인이 되고 있다(Galloway, 1989). 따라서 동북아시아 지역에서의 인위적인 대기오염물질의 발생량을 평가하고 대책마련을 위하여 대기오염의 현황을 정확하게 파악하는 일은 매우 중요하다. 동북아시아 지역은 인구가 조밀하고 서로 인접해 있어서 한 국가에서 발생한 대기오염물질이 기류를 타고 인접국으로 이동하

게 되는 소위 대기오염물질의 월경 현상을 일으키게 된다(Kato and Akimoto, 1992; Akimoto and Narita, 1994; Macpherson *et al.*, 1995).

대기층 하부에 존재하는 산성 침적물이나 광화학 산화물 등과 관련된 대기오염물질들의 평균체류시간은 1일에서 1주일 정도로 알려져 있으며 이러한 오염물질들은 보통 수백에서 수천 km까지 이동하게 되므로 이들 오염물질들의 장거리이동은 국가간의 매우 커다란 관심사이며 이로 인한 국가간 분규의 가능성도 증가하고 있는 실정이다. 그동안 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 부족한 점이 많았다(문길주 등, 1996). 일반적으로 장거리이동 대기오염물질의 유출입량은 모델링이나 항공기 측정 및 지상측정 또는 이들의 조합으로 인해 대략적으로 계산할 수 있다.

항공기에 의한 상층의 고도별 대기오염 수직분포 파악은 장거리 이동되는 대기오염물질의 이동량을 조사하는데 매우 중요한 자료로 이용될 수 있고, 또한 장거리이동 모델개발 및 기존 모델을 검증하는데도 유용하게 이용된다. 인근 국가인 일본, 중국, 대만 등에서는 대기오염물질의 월경문제가 국가간의 문제로 부각됨에 따라 항공기에 의한 대기오염 측정을 실시하고 있고, 일본의 경우 우리나라 경계해역에서 1987년 이후 수차례 항공기 관측을 실시하였으며(Hatakeyama *et al.*, 1995), 특히 관동지역의 광화학 오염실태를 조사하기 위해서 집중 조사를 실시한 바 있다(환경이화학연구소, 1979). 항공기에 의한 대기오염조사는 동북아지역에서의 대기오염 이동현상에 대한 파악, 물질수지 규명 및 환경보전을 위한 국가간 협력방안 등을 도출하기 위하여 필연적으로 요구되는 수단이다.

중국에서의 SO_2와 NOx의 연간 배출량은 각각 19700 kton, 7600 kton으로 한국(SO_2 1000 kton, NOx 820 kton)의 약 20배, 9배로 나타났고, 아시아 전체의 SO_2와 NOx 배출량의 86%, 72%로 많은 부분을 차지하고 있다(Fujita *et al.*, 1991). 그리고 한반도가 중위도 편서풍대에 위치하고 있고, 서울과 중국 산둥반도의 거리가 약 400 km밖에 되지 않아 한국은 중국에서 발원한 오염물질의 직접적인 영향을 받을 가능성이 높은 지역이다. 동북아 지역에서 이상인 등(1995)의 장거리 이동모델에 의한 계산 결과, 기체상의 SO_2 이동량도 상당한 것으로 보고하고 있다. SO_2의 장거리 이동과 관련하여 청정지역으로 알려진 제주도에서 측정한 결과(문길주, 1996)에 의하면, SO_2 평균농도는 한반도보다는 훨씬 낮으나 외국의 청정지역보다 높았고 NOx는 국지오염원의 영향을 상당히 받는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 항공기를 이용하여 서해안 상공을 비행하면서 가스상물질(SO_2, NOx)를 측정 · 분석하였고 측정자료를 이용하여 한반도 서쪽 경계에서 유입되는 대기오염물질의 이동량을 산정하여 보았으며, 대기오염물질의 이동을 추적하기 위해 역궤적 방법으로 기단의 유적선 분석도 함께 수행하였다.

2. 분석방법

2.1 항공측정

항공기 측정의 장점은 단시간내에 넓은 지역을 짧은 시간내에 조사할 수 있다는 것과 다른 방법으로는 수행하기 어려운 상층에 대한 신속한 조사 및 시료 채취 등이 가능한 데 있다. 그러나 많은 비용이 소요되고 조종과 관리가 자유롭지 못하며 비행시간, 측정 범위의 제한, 탑재장비의 중량, 안정한 측정기의 가동을 위한 충분한 전원 확보, 탑재가능한 측정기의 크기 제한, 그리고 측정기의 응답시간 제한 등의 단점이 있다.

본 연구에 사용된 항공기는 범아 엔지니어링(주)이 소유하고 있는 이태리 AGUSTAR사에서 제작한 모델명 SF-600로, 크기는 15 m × 12.15 m × 4.6 m, 엔진마력 860 HP, 운항속도는 250 km/hr (최대 305 km/hr), 순항고도는 10,000 ft인 쌍발기가 사용되었다. 측정에 사용된 항공기의 사진 및 제원을 그림 1(a) 및 표 1에 나타내었다.

상층비행 중 대기오염물질을 채취하는데 사용된 노즐(ID 25.4 mm)은 지상 촬영용 카메라를 설치하는 항공기 바닥면에 장착하였고, 외부 공기는 이 노즐을 통해 항공기 내부로 유입되어 유리 재질의 manifold를 통해서 탑재된 가스상 분석기에 주입된다. 항공기에 장착된 노즐의 사진을 그림 1(b)에 나타내었다. 노즐의 방향은 항공기의 진행방향을 향하

Table 1. Description of SF-600 aircraft.

Model Type	SF-600	Maximum Speed	305 km/hr
Manufacturer	AGUSTAR (Italy)	Maximum Altitude	10,000 ft
Dimension	15 × 12.15 × 4.6 m	Empty Weight	2,300 kg
Maximum Power	860 hp	Crew	Two Pilots+9 Seats
Normal Speed	250 km/hr	Owner	Pan-Asia Engineering

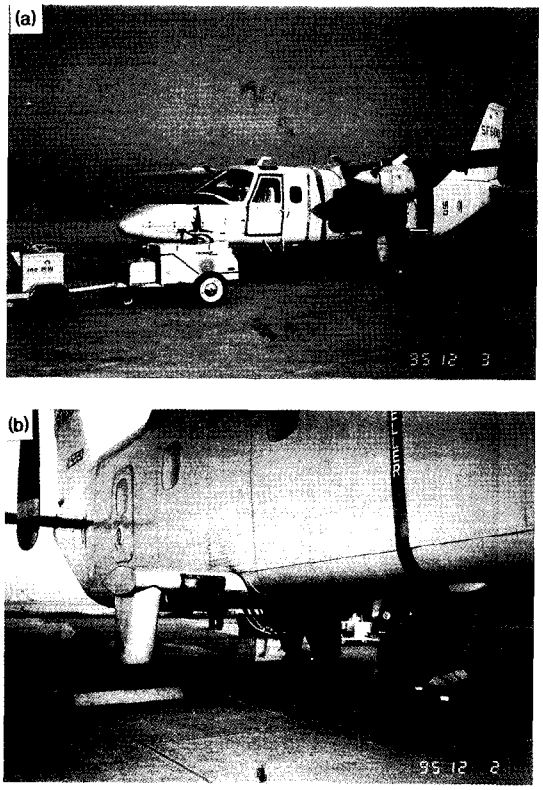

Fig. 1. The aircraft (a), and sampling nozzle (b) installed on the bottom of the aircraft.

도록 하여서 측정 중 항공기 양쪽 날개에 부착되어 있는 프로펠러나 배기가스가 채취되는 공기에 영향을 미치지 않도록 설계·제작되었다.

항공기 탑재장비 및 연료의 무게에 따라 연료 소비율과 비행시간 등에 영향을 받기 때문에 탑재할 측정기들의 무게를 재었고, 최대한 많은 항목들을 측정하기 위하여 지지대와 기타 장비들을 경량화하였다. 항공기 자체의 무게는 2300 kg이고, 3시간 정도의 비행이 가능할 정도인 700 kg 정도의 연료를 실을 수 있었다. 그리고 항공기에는 기장, 부기장, 장비를 하드웨어적으로 점검하는 엔지니어 그리고 기기 작동을 담당할 오퍼레이터가 각각 탑승하였다. 항공기에 탑재할 측정기의 총무게는 400 kg 이하로 제한을 받았다. 항공기내에는 SO_2, NOx 측정기외에도 O_3 측정기 그리고 입자상물질 측정기인 high volume air sampler, Anderson air sampler, 입자개수 측정기 등이 탑재되었다. 그러나 본 연구에서는 SO_2, NOx 중심으로 분석한 결과를 정리하였다.

항공기 내부의 각 측정장비에 안정된 전원 공급을 위해서 직류(DC 24 volt)를 교류(AC 115 volt)로 전환시키는 inverter와 고도, 위도 및 경도를 측정할 수 있는 GPS도 탑재하였으며, 측정자료의 수집을 위한 시스템에는 486 DX2 Lap-top 컴퓨터가 사용되었다.

측정기에 공급되는 교류전원은 inverter를 통해 얻었는데 이 과정에서 전기적인 잡음(noise)이 발생하여 전기 필터(isolator)를 사용하여 불필요한 출력신호들을 제거시켰다. 비행 도중 소음과 진동으로 측정기 안정화가 용이하지 않았으나 접지를 항공기 본체에 시도함으로써 일부 이런 문제점을 완화시킬 수 있었다.

노즐을 통해 유입된 공기는 manifold에 의해 각각의 자동분석기에 분배되어 실시간으로 분석되고, 항공기내에 탑재된 자료 수집 시스템에 의해 컴퓨터에 저장되었다. 각각의 오염물질에 대한 분석방법 및 기기들에 대한 특성을 표 2에 나타내었다. SO_2와 NOx 측정기들은 기존 측정기 모델을 개량한 모델로써 반응시간(response time)을 짧게 하고, 압력저하에 따른 유량변동을 자동 조절할 수 있도록 구성되었다. 그리고 상층을 비행하는 도중 제로가스를 측정기에 주입하여 영점조정함으로써 검·교정의 정확도를 향상시켰다.

이밖에도 비행경로 결정에 큰 영향을 주는 요소로 군사작전 계획을 알려주는 항공고시보(NOTAM; NOTice Air Man)라는 것이 있는데 이는 항공기 운

Table 2. Relevant aircraft instrumentation employed in the experiment.

Parameter	Operation Principle or Instrument	Range (Detection Limit)	Accuracy	Manufacturer (Model)
SO_2	UV Fluorescence	≤ 500 ppb (1 ppb)	≤ 2%	MCSAM-2AM
NO_2	Chemiluminescence	≤ 2000 ppb (1 ppb)	≤ 2%	MCSAM-2AM
NO	Chemiluminescence	≤ 2000 ppb (1 ppb)	≤ 2%	MCSAM-2AM
Position & Altitude	GPS	Position (°) & Altitude (m)		Trimble Navigation Co.
Data Acquisition System	486-DX2			SAMSUNG

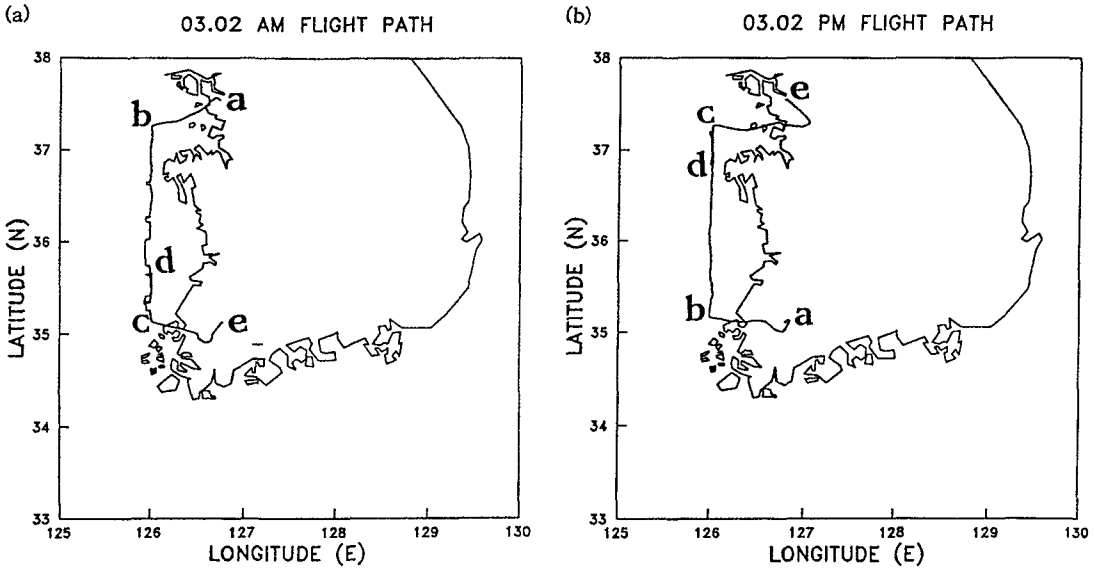

Fig. 2. Aircraft flight paths for March 2; morning flight (a) and afternoon flight (b).

행 가능 구역을 제한하는 공고로써 비행에 앞서 기상조건과 함께 고려해야 할 중요한 변수이었다.

항공기를 이용한 SO_2, NOx 측정은 1996년 3월 1일에 시험 비행을 실시하였고, 본 조사는 1996년 3월 2일 오전, 오후에 각각 수행되었으며 해발 300~2000 m 사이 고도를 120 knots의 일정속도로 유지하면서 김포공항에서 출발하여 서해안 상공 126 E를 따라 남쪽으로 내려가 광주공항까지 비행한 후 오후에는 역순으로 비행하였다. 그림 2는 1996년 3월 2일 항공기 운항 경로를 나타낸 것이다. 오전에는 9시 25분 항공기 warming up을 시작한 후 10시에 측정기 가동을 시켰고, 10시 30분에 이륙하여 2시간 10분 동안 비행을 한 후 12시 40분에 광주공항에 착륙하였다.

그리고, 광주공항에서 급유를 한 후 오후 2시 15분에 다시 공항을 이륙하여 2시간 30분 후인 4시 45분에 김포공항에 도착하였다.

2. 2 기상관측

고도별 풍향, 풍속, 기온 및 습도 등은 서해안의 항공기 측정 경로의 중간지점에 해당되는 충남 태안의 안면도 해안에서 측정하였다. 라디오존데 (USA AIR Co.)를 헬륨기체가 주입된 300 g 풍선에 부착하여 03시, 09시, 15시, 21시 등 매 6시간 간격으로 상층으로 띄우면 4~5초 간격으로 상층의 기압, 기온, 습도, 바람 등의 신호가 송신되며 이 신호는 지상의 안테나에서 수신되어 고도별 기압, 온위, 수증기의 혼합비, 바람, 풍선의 상승속도 등이 계산 되고 컴퓨

터에 자동저장하도록 되어 있다. 그리고 온위나 수증기 혼합비 등의 연직구조를 통해서 대기경계층의 높이를 추정할 수 있다.

대기오염물질의 이동경로를 추적하는 유적선 모델은 오염물질이 특정기압면을 따라서 이동한다고 가정하여 이동경로를 추정하는 것으로써, 본 연구에서는 동아시아지역의 기상 관측 정보를 2.5° 간격으로 객관분석한 GPV (Grid Point Value) 자료를 기상청에서 입수하여 사용하였으며 등압면 분석법에 의해 850 hPa (평균 1500 m) 및 700 hPa 고도 (평균 3000 m)에서의 이동 경로를 구하였다. 이것이 측정기간중 한 지점을 통과하는 정확한 궤적을 나타내지는 못하지만 측정기간 중의 한반도를 지나는 기단의 개략적인 경로를 파악하기 위한 것이다. 항공기 측정 경로를 대표하기 위해서 강화, 태안 그리고 제주를 기준으로 각각의 지점의 공기가 지나온 경로를 시간을 역으로 추적하는 역방향 궤적 (backward trajectory)을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 관측결과

항공기를 이용한 상층의 대기오염 측정기간 중의 기상장을 살펴보면 전반적으로 화남지방에서 이동해오는 고기압의 영향을 받는 건조한 맑은 날씨였고, 서해 상공에서는 서풍~북서풍이 4~8 m/s로 불고 있었다 (기상청, 1996).

충남 태안에서 03시와 15시에 관측한 상층 기상자료를 그림 3에 나타내었다. 1996년 3월 2일 03시의 온위 (potential temperature) 분석결과, 지상에서 1100 m고도까지 혼합층이 발달해 있는 것을 확인할 수 있으며, 수증기의 혼합비 (mixing ratio) 역시 이 고도까지 잘 혼합되어 있음을 알 수 있었다. 풍속은 하층에서는 log profile를 보이면서 고도에 따라 증가하는 것을 잘 보여주고 있었으며, 풍향은 고도에 관계없이 북서풍으로 나타났다. 해발 1000 m 이상에서는 10 m/s 이상으로 바람이 강하였으며, 풍향은 03시에는 북서풍 계통의 바람이 주간이 되면서 서풍으로 바뀌었다. 1996년 3월 2일 15시에는 혼합층의 고도가 1000 m고도로 낮아진 것을 알 수 있었는데, 이는 수증기 혼합비의 연직구조에서도 확인할 수 있었다. 수증기의 혼합비는 1000 m 고도 아래에서는 2 g/kg 정도이었고, 15시에 200~300 m 고도내에 해풍에 의해 혼합비가 증가하고 있었다. 주간임에도 불구하고 혼합층이 야간에 비하여 낮아진 것은 관측지점이 해안가로써 지면가열에 의한 혼합층 성장보다는 이류에 의한 영향을 많이 받기 때문으로 생각된다. 바람은 야간과 비교해서 별 차이가 없음을 알 수 있었다.

강동근 등 (1993)의 연구결과에 의하면 여름을 제외한 대부분의 기간에는 한반도에 도착하는 대다수의 기단이 중국을 경유하고 있었으며, 여름철의 경우는 중국남부를 통과하는 사례가 과반수 이상을 차지하고 있었다.

측정기간 중의 대기오염물질 이동을 추적하기 위해서 태안을 기준으로 측정 3일전 (1996년 2월 29일~3월 3일 동안)부터 850 hPa (그림 4a)와 700 hPa (그림 4b)에서 역방향 궤적 (backward trajectory)을 구하였다. 850 hPa 유적선의 경우, 시베리아 서쪽 평원 지역 부근을 출발한 기류가 바이칼호, 몽고 내륙, 그리고 중국 북동 내륙 지역을 통과한 후 서해안을 거쳐 이동되어 왔으며, 700 hPa의 경우에서는 근원지가 시베리아 북쪽 지역인 것을 제외하고는 850 hPa의 이동 경로와 유사하였다. 항공기에 의한 상층 대기오염 측정 기간 동안 태안에 도착한 공기는 대체로 시베리아에 근원을 두고 빠르게 이동되어 중국 북동 내륙 지역을 통과한 기단으로, 중국의 대기오염물질이 우리나라로 장거리 이동되고 있는 조건을 만족하고 있었다.

3.2 대기오염물질 측정결과

종관적인 기상 패턴은 몽고와 중국 화북지방에서 발달하는 대륙성 고기압의 영향으로 북서계열의 바람이 산둥반도 북쪽의 발해만 서쪽 지역을 거쳐 한반도에 유입되고 있었다. 항공기를 이용한 상층의 가스상 성분 분석결과를 항공기 운항 고도와 함께 그림 5~6에 제시하였다. 그림 5는 1996년 3월 2일 오전에 항공기가 동경 126° 선을 따라 비행하면서 측정한 SO_2, NOx 농도와 운항 고도를 나타낸 것인데 (경로순은 a → b → c → d → c → e, 그림 2a), 서해상공의 1000 m 이하 고도에서 남쪽으로 내려갈 때 농도 수준이 8 ppb에서 점차 감소하여 2~3 ppb까지 감소하였으나 북위 36° 상공에서 5 ppb까지 상승하였다. 800 m 고도에서 300 m로 고도를 변화시켰을

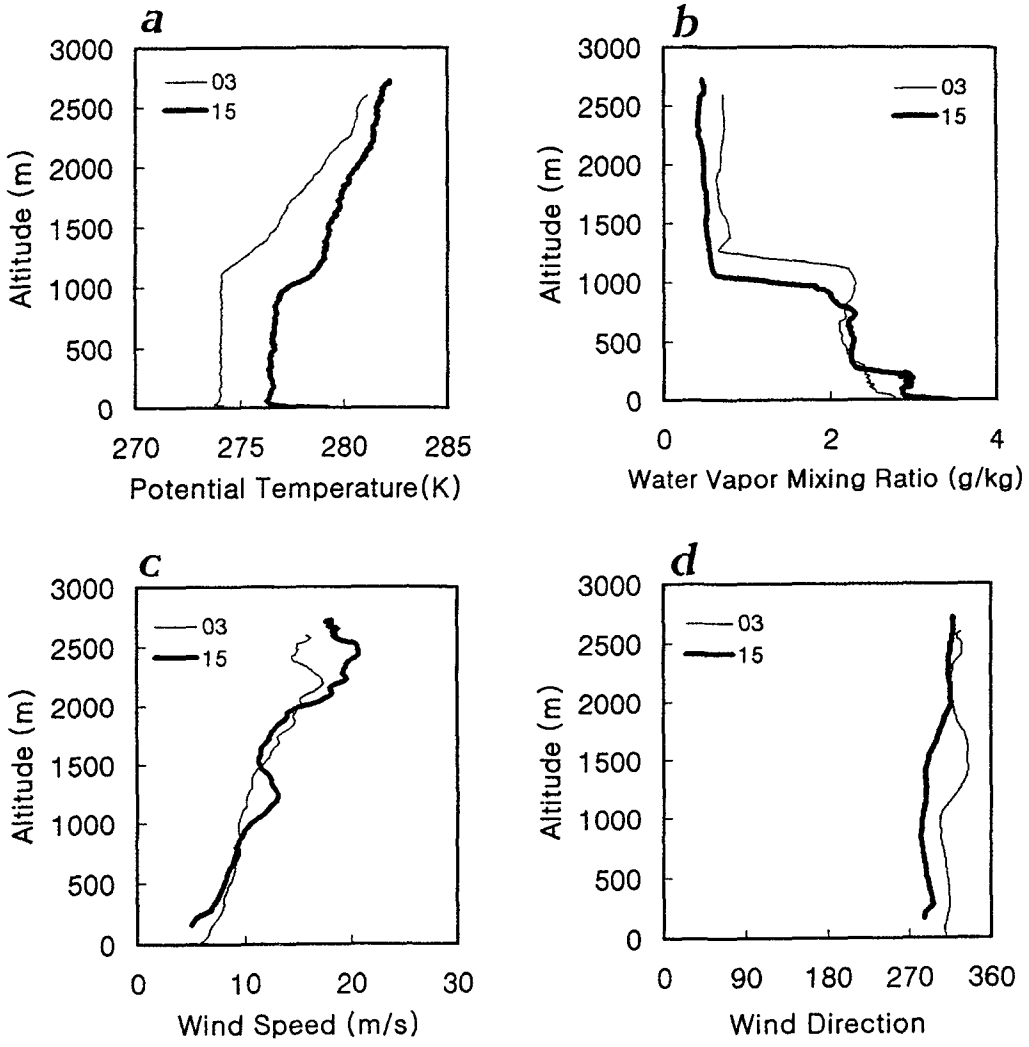

Fig. 3. Vertical profiles of meteorological variables at 0300 LST (thin line) and 1500 LST (thick line) on Mar 2; potential temperature (a), mixing ratio (b), wind speed (c) and wind direction (d).

때는 SO_2의 농도가 4~5 ppb 수준으로 다시 증가하였다(그림 5의 위쪽). 그리고 500 m고도를 왕복하며 (c → d → c) 측정한 결과는 거의 4~5 ppb 수준으로 일정하게 나타났다(그림 5의 아래쪽). NOx는 800 m 고도로 비행할 때는 7~8 ppb 수준으로 큰 변화가 없었으며 500 m 고도를 왕복하며 측정한 결과는 5~7 ppb 수준으로 나타났다.

그림 6은 3월 2일 오후에 광주공항에서 출발하여 동경 126° 선상을 따라 북상하면서 SO_2와 NOx를 측정한 결과인 데, 700~800 m 고도사이를 비행하면서 측정하였을 때는 4~5 ppb 수준이었고 400~500 m 고도 사이를 비행하면서 측정한 결과는 8~10 ppb 수준으로 나타나 고도별로 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다(그림 6의 윗쪽). 대기경계층 상부라고 판단되는 1000 m 이상의 고도에서는 2 ppb 이하이었으며, 1800 m 고도 부근에서는 검출한계인 1 ppb 이하 수준의 농도를 보였다(그림 6의 아래쪽). 1100 m 고도를 비행할 때 SO_2의 농도 변화를 살펴보면 1 ppb 이하에서 변화하지만 일부 5 ppb를 초과하는 고농도 봉우리를 살펴볼 수 있었다. NOx 분석 결과는

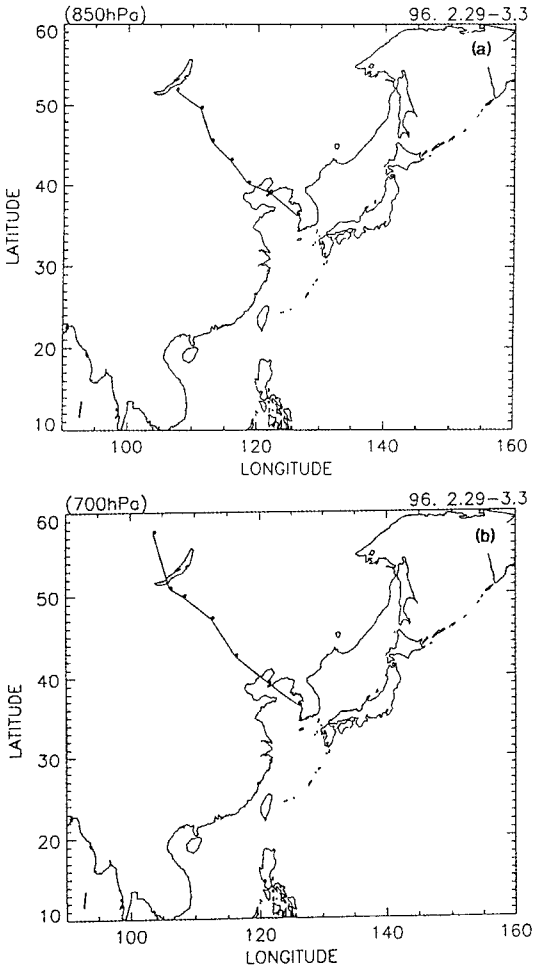

Fig. 4. Backward trajectories of the air mass arrived at Taean on March 3 in the surface of 850 hPa (a) and 700 hPa (b).

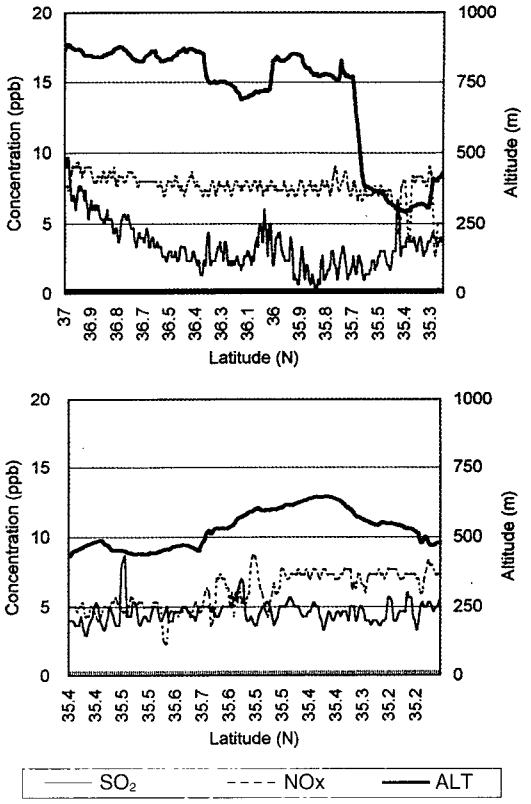

Fig. 5. Concentrations of SO_2 and NOx for morning flight on Mar 2.

1000 m 고도 아래에서는 5 ppb 수준으로 거의 일정한 반면에(그림 6의 윗쪽), 1100 m 고도에서 5~6 ppb, 1700 m 고도에서 4~5 ppb 정도로 고도별 차이를 뚜렷하게 확인할 수 있었다(그림 6의 아래쪽).

유럽에서 독일의 경계선상에서(500 m~1000 m 고도) 측정한 SO_2 수준은 5~40 ppb, NOx는 3~30 ppb로 측정기간에 따라 변화폭이 컸고(Institute für Physik der Atmosphere, 1988), Hatakeyama *et al.* (1995)가 남해와 동해 상공(3000 m 고도)에서 측정한 SO_2 수준은 1 ppb 이하, NOx는 0.4~2 ppb로 나타났다. 그리고 미국 아틀랜타에서 SOS (Southern Oxidant Study)의 일환으로 헬기를 이용하여 plume를 통과하면서 측정한 SO_2 농도는 80~120 ppb로 높게 나타났으며, NOx는 5~15 ppb로 보고되었다 (Imhoff *et al.*, 1994).

항공기를 이용한 대기오염물질 측정의 주된 목적 중의 하나는 대기 경계층내의 오염물질의 농도를 측정하고 대기의 역학적 매개변수를 관측하여 경계층내에서 이동되는 오염물질의 이동량를 산정하는 일이다. Van Dop (1985)은 이러한 대기오염물질들의 이동량이나 침적량을 통계학적인 근거에서 모델링한 바 있다. Klemm *et al.*(1989), Lelieveld *et al.* (1989)은 오염물질이 고루 혼합되어 있다고 가정할 수 있는 대기 경계층(planetary boundary layer)을 통한 오염물질의 이동량은 항공측정시 단위시간당 비행경로를 통과하는 오염물질의 양으로 정의하고 아래와 같은 가정을 통해 식(1)을 유도하여 대기 경계층내에서 오염물질의 이동량을 계산하였다.

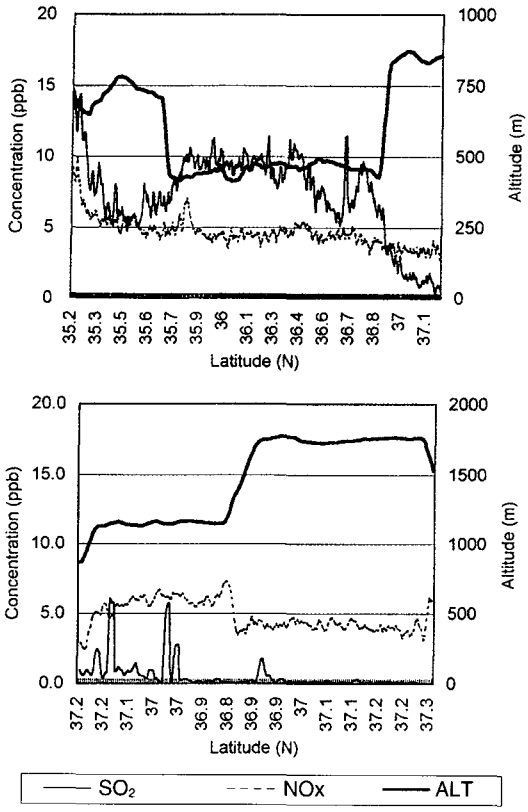

Fig. 6. Concentrations of SO_2 and NOx for afternoon flight on Mar 2.

(i) 비행경로를 따라 측정된 오염물질의 농도는 경계층내의 농도를 대표하는 값이며

(ii) 사용된 풍향 및 풍속 수치도 경계층내의 풍향 및 풍속을 대표할 수 있는 값이다.

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

여기에서 C : 대기오염물질의 농도(g/m^3), H : 대기 경계층의 높이(m), U : 대기 경계층내 평균 풍속(m/sec), L : 비행구간의 수평거리(m), Q : 대기 경계층내 평균 풍향과 비행 방향이 이루는 각을 나타낸다.

본 조사에서는 항공기에 풍향 · 풍속계를 탑재하지 않아 비행경로상에서 바람자료를 얻지 못하였고, 항공기 측정 횟수도 많지 않은 상황이었기 때문에 본 조사 당시의 측정자료와 태안에서 관측한 상층 기상자료를 최대한 활용하여 경계층을 통한 오염물질의 이동량을 산정하였다(표 3).

계산에 사용된 U는 태안에서 관측한 상층 풍속을 고도 평균한 값이고, L은 측정 경로상의 길이를 의미하며, H는 대표지점 태안에서 관측한 기상변수의 연직구조로 추정한 대기경계층의 고도이며, Q는 관측한 풍향과 항공기 진행방향이 이루는 각도를 의미한다. 오염물질 농도는 대기경계층내의 농도를 평균한 값이다.

산정결과, 한반도 서쪽 경계에서 유입되는 SO_2의 이동량은 시간당 39 ton (오전)과 42 ton (오후) 가량으로 추정되었으며 SO_2의 단위길이당 오염물질속은 각각 0.17과 0.18 ton/hour · km이었다. 이 추정량은 1980년대 후반 유럽의 항공기 측정시 SO_2의 질량속과 비교해 볼 때 (0.1~4.0 ton/hr · km) 약간 적은 수준이었다. NOx의 경우 같은 기간동안의 측정결과를 토대로 계산한 결과, 단위길이당 이동량은 0.17과 0.08 ton/hr · km로 나타났다. 항공기를 이용한 상층의 대기오염 측정이 지속적으로 수행되어 자료가 축적되면 보다 정확한 장거리 대기오염물질의 이동량 산정이 이루어질 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기의 지역적인 수평분포와 수직분포에 대한 조사와 이동현상에 대한 조사를 위해서 항공기에 SO_2, NOx 측정장비를 탑재하여 측정하였다.

항공기를 이용한 대기오염 측정기간 중의 기류 이동 패턴을 알아보기 위하여 유적선을 분석해 본 결

Table 3. Transboundary fluxes across the western boundary of Yellow Sea.

Sampling Period	Concentration (ppb)		U (m/s)	L (km)	H (m)	Q (°)	Flux (ton/hr)		Unit Flux (ton/hr · km)	
	SO_2	NOx					SO_2	NOx	SO_2	NOx
1996. 3. 2 AM	3	6	5.0	232	1100	90	39	39	0.17	0.17
1996. 3. 2 PM	6	5	8.1	232	1070	20	42	18	0.18	0.08

과, 시베리아를 통과한 기단이 중국 북동 내륙지방을 거쳐 우리나라로 유입된 것으로 나타났으며, 이 기간동안의 혼합고는 1000~1100 m로 관측되었는데 SO_2는 1000 m 고도 이하에서 평균 3~6 ppb 정도이였으며 대기경계층 상부라고 판단되는 1000 m 이상에서는 1 ppb 이하로 나타났다.

NOx는 1000 m 이하 고도에서는 5~7 ppb, 1000 m 이상에서는 3~5 ppb 수준이었다.

본 연구에서는 Lelieveld *et al.*(1989) 등이 제시한 방법에 의해서 항공기로 측정한 상층의 대기오염물질 농도와 태안에서 측정한 상층 기상 변수들을 이용하여 대기 경계층내에서 이동하는 오염물질의 이동량을 산정하여 보았는데, 한반도 서쪽 경계에서 시간당 SO_2가 이동되어지는 양은 39~42 ton으로 추정되었다. 이는 기상 관측이나 대기오염 측정상의 분석 오차를 내포하고 있기 때문에 자료의 신뢰성을 구축하기 위해서는 지속적인 측정이 이루어져야 할 것이다.

항공기를 이용한 대기오염 측정의 의의로서는 국내에서는 처음으로 서쪽 경계에서의 SO_2, NOx의 수평·수직 구조를 파악할 수 있었다는 점과 이와 더불어 항공기 측정 기술 및 자료를 축적해 갈 수 있다는 점들을 들 수 있다. 몇차례에 걸쳐 실시한 측정 자료를 이용하여 중국에서 한반도로 이동되는 대기오염물질의 양을 산정해 본 것은 다소 이른 감은 있지만, 중국으로부터 유입될 수 있는 오염물질의 양에 대한 비교 가능한 수치로써 활용할 수 있을 것이다. 향후 서해안뿐만이 아니고 남해안 및 동해안등에서 항공기 측정을 실시하여, 측정자료들이 축적되면 이를 이용하여 오염물질의 이동양을 계산하고 유출입의 차를 산정해 보면 한반도내에 침착되는 오염물질의 양을 정확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

강동근, 김선태, 김정욱(1995) 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.

기상청(1996) 1996년 3월 2일 일기도 및 기상개황.

문길주, 김용표, 김희강, 이종범, 정용승 외(1996) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(I), 대기오염물질 장거리 이동현상과 감시망 운영, 한국과학기술연구원, 372pp.

이상인, 조석연, 심상규(1995) STEM II를 이용한 한국과 중국 동부 지역의 대기오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구-II. 한·중간 SO_2와 sulfate의 이동에 관하여, 한국대기보전학회지, 11(2), 163-170.

환경이화학연구소(1979) 광화학 대기오염예측 시스템 설정을 위한 항공기조사(일본), 환경청 위탁업무 결과보고서, 1157pp.

Fujita, S., Y. Ichikawa, and R.K. Kawaratani (1991) Preliminary inventory of sulfur dioxide emissions in East Asia, Atmospheric Environment, 1409-1411.

Galloway, J.W. (1989) Atmospheric acidification; Projections for the future, Ambio, 18, 161-166.

Hatakeyama, S., K. Murano, H. Bandow, F. Sakamaki, M. Yamato, S. Tanaka, and H. Akimoto (1995) The 1991 PEACAMPOT aircraft observation of ozone, NOx, and SO_2 over the East China Sea, the Yellow Sea, and the Sea of Japan, Journal of Geophysical Research, Vol. 100, D11, 23, 143-151.

Imhoff, R.E., R.J. Valente, J.F. Meagher, and M. Luria (1994) The production of O_3 in an urban plume: airborne sampling of the Atlanta urban plume, Atmospheric Environment, 29, 2349-2358.

Kato, N. and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO_2 and NOx in Asia: emission inventories, Atmospheric Environment, 26A, 2997-3017.

Klemm O. and E. Schaller (1994) Aircraft measurement of pollutant fluxes across the borders of eastern Germany. Atmospheric Environment, 28(17), 2847-2860.

Lelieveld, J., F.W. Janson, and H. van Dop (1989) Assessment of pollutant fluxes across the frontiers of the Federal Republic of Germany on the basis of aircraft measurement, Atmospheric Environment, 23(5), 939-951.

Macpherson, J.I., R.L. Desjardins, O.H. Schuepp, and R. Pearson (1995) Aircraft-measured ozone deposition in the San Joaquin Valley of California, Atmospheric Environment, 29(21), 3133-3145.

Rhode, H. (1989) Acidification in a global perspective, Ambio, 18, 155-160.