

## 항공기를 이용한 서해안에서의 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>x</sub>의 측정 Aircraft Measurement of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> over Yellow Sea Area

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

### 1. 서 론

동북아시아 지역은 인구의 증가와 빠른 산업 발달로 인위적인 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>의 발생이 가장 큰 지역중의 하나이며 또한 이 지역에서의 경제발전으로 인한 에너지 사용의 증가는 이 지역의 대기질을 급격히 악화시키는 요인이 되었다. 따라서 이 지역에서의 인위적인 대기오염물질의 발생량을 평가하고 대책마련을 위하여 대기오염의 현황을 정확하게 파악하는 일은 매우 중요하다. 특히 동북아 지역은 인구가 조밀하고 서로 인접해 있어서 한 국가에서 발생한 대기오염물질은 기류를 타고 인접국으로 이동하게 되는 소위 대기오염물질의 장거리이동현상을 일으키게 된다.

항공기에 의한 상층의 고도별 대기오염 수직분포 파악은 장거리 이동되는 대기오염물질의 이동량을 조사하는데 매우 중요한 자료로 이용될 수 있고, 물질수지 규명 및 환경보전을 위한 국가간 협력방안 등을 도출하기 위하여 필연적으로 요구되는 수단이다.

본 연구에서는 항공기를 이용하여 서해안 상공을 비행하면서 가스상물질 (SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>)을 측정 및 분석하였고 측정자료를 이용하여 한반도 서쪽 경계에서 유입되는 대기오염물질의 이동량을 산정하여 보았으며, 대기오염물질의 이동을 추적하기 위해 역계적 방법으로 기단의 유적선 분석도 행하였다.

### 2. 분석 방법

본 연구에 사용된 항공기는 (주) 범아 엔지니어링이 소유하고 있는 이태리 AGUSTAR사에서 제작한 모델명 SF-600로, 크기는 15m×12.15m×4.6m, 엔진마력 860 HP, 운항속도는 250 km/hr (최대 305 km/hr), 순항고도는 10,000 ft인 쌍발기가 사용되었다. 상층비행중 대기오염물질을 채취하는데 사용된 노즐(ID 25.4 mm)은 항공기 바닥면에 장착하였고, 이를 항공기 내부에 탑재된 가스상 분석기에 연결시켰다. 항공기를 이용한 대기오염물질 측정은 '96년 3월 1일~3월 3일 동안 수행되었으며 비행고도를 300~3000m로 변화시키며 김포공항에서 서해안상공을 경유하여 광주공항을 왕복하는 코스로 진행되었다(그림 1).

### 3. 결과 및 고찰

대기오염물질의 이동을 추적하기 위해서 항공기의 출발 기점인 김포(126.48 N, 37.33 E)에 대해서

측정 3일전부터 기단 이동 경로를 대기오염물질의 장거리 수송 가능층으로 보이는 850 hPa에서 역궤적 (backward trajectory) 방법을 이용하였다.

그림 2는 '96년 2월 29일~3월 3일 동안 850hPa에서의 역궤적에 의한 유적선 분석결과를 나타낸 것이다. 850hPa 유적선의 경우, 시베리아 서쪽 평원 지역 부근에 근원을 두고 바이칼호, 몽고 내륙, 그리고 중국 북동 내륙 지역을 통과한 후 서해안을 거쳐 이동되어 왔음을 알 수 있었다.

항공기를 이용한 상층의 가스상 성분 분석결과를 그림 3에 제시하였다. '96년 3월 2일 오전에 동경 126 °선을 따라 고도 750m에서 300m 사이로 김포공항에서 광주공항까지 비행하며 측정된 결과를 나타낸 것인데 SO<sub>2</sub>의 농도가 3~5ppb 수준이었다. NO<sub>x</sub>는 지상에서 25~30ppb 수준이었으나 500m 이상 고도에서는 8~10ppb 이었다. SO<sub>2</sub>(그림 3)는 동경 126 °선상을 따라 800m 고도에서 측정하였을 때는 4~5 ppb 수준이었고 고도를 400~500 m 수준으로 변화시켜 측정된 결과는 9~10 ppb 수준으로 나타났다. 대기경계층 상부라고 판단되는 1000m이상의 고도에서는 0~3ppb 수준이었으며, 1800m 고도 부근에서는 검출한계인 1ppb이하 수준의 농도를 보였다.

항공기를 이용한 대기오염물질 측정의 주된 목적중의 하나는 지상 대기오염 측정자료로는 추정할 수 없는 대기 경계층내의 오염물질의 농도를 측정하고 대기의 역학적 매개변수를 관측하여 경계층내에서 이동되는 오염물질의 flux를 산정하는 일이다. Lelieveld (1989) 등은 오염물질이 고루 혼합되어 있다고 가정할 수 있는 경계층 (Planetary boundary layer)을 통한 오염물질의 flux는 항공측정시 단위시간당 비행경로를 통과하는 오염물질의 양으로 정의하고 아래와 같은 수학적 식 (1)을 사용하여 transboundary flux를 계산하였는데 이 수치는 경계층내의 오염물질의 농도와 경계층의 높이 및 풍향·풍속 등의 변수에 의해 좌우된다.

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

여기에서, C : 대기오염물질의 농도 (g/m<sup>3</sup>), 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.

이러한 계산을 하였을 때 오차를 유발할 수 있는 요소들 가운데 풍속이 가장 민감한 변수인 데, 보통 기상조건에 따라 다르지만 풍향·풍속 데이터와 경계층의 높이에 대한 부정확성에 기인하여 오차의 범위는 ±20~±55% 정도까지 가능하다.

항공기를 이용한 대기오염 측정에서 풍향·풍속 자료가 제외되었고 또한 항공기 측정 횟수도 많지 않은 상황이지만 현재까지의 측정자료와 태안에서 Radiosonde를 이용하여 상층 관측한 기상자료를 최대한 활용하여 경계층을 통한 오염물질의 flux를 산정하여 표 1에 나타내었다.

Table 1. Transboundary fluxes across the western boundary of Korean peninsula.

Sampling time	Concentration (ppb)		U (m/s)	L (km)	H (m)	Q (°)	F (ton/hr)		unit F (ton/hr · km)	
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>					SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
'96. 3. 2 AM	3	8	5.0	232	840	90	30	40	0.13	0.17
'96. 3. 2 PM	8	6	8.1	232	1070	20	57	21	0.24	0.09

산정결과 한반도 서쪽 경계에서 유입되는 SO<sub>2</sub>의 질량속은 시간당 30 ton에서 57 ton 가량으로 추정

된다. 또한 SO<sub>2</sub>에 대한 단위길이당 오염물질속(unit F)은 0.13~0.24 ton/hr·km 이었다. 추정량은 당시 ('96.3.2~3.3)의 기상 조건들을 기초로 계산한 것이기 때문에 일반화시키기에는 부족한 감이 있지만 '80년대 후반 유럽의 항공기 측정시 SO<sub>2</sub>의 질량속과 비교해 볼 때(0.1~4.0 ton/hr·km) 약간 적은 수준이었다.

항공기를 이용한 대기오염 측정의 의의로서는 국내에서는 처음으로 서쪽 경계에서의 수평 오염물질 분포와 수직 구조를 파악할 수 있었다는 점과 이와 더불어 항공기 측정 기술의 축적 및 얻어진 자료의 신뢰성을 점차로 구축해 갈수 있었다는 점들을 들 수 있다. 몇차례에 걸쳐 실시한 측정 자료를 이용하여 중국에서 한반도로 이동되는 대기오염물질의 양을 산정해 본 결과 다소 부족한 점은 있지만, 중국으로부터 유입될 수 있는 오염물질의 양에 대한 비교 수치로써 제시될 수 있을 것이다. 향후 서해안뿐만이 아니고 남해안 및 동해안등에서 항공기 측정을 실시하여, 측정자료들이 축적되면 이를 이용하여 오염물질의 flux를 계산하고 유출입의 차를 산정해 보면 한반도내에 침착되는 오염물질의 양을 산정할 수 있을 것으로 생각된다.

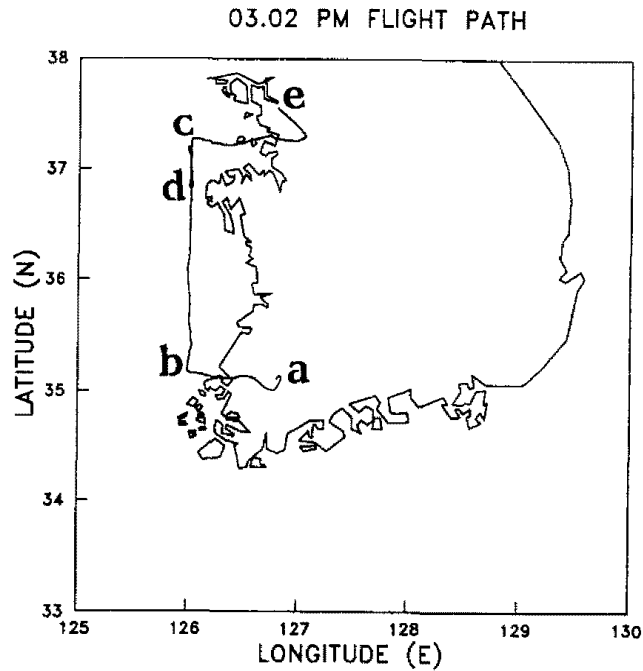


Fig. 1. Aircraft flight path at 3 March, 1996.

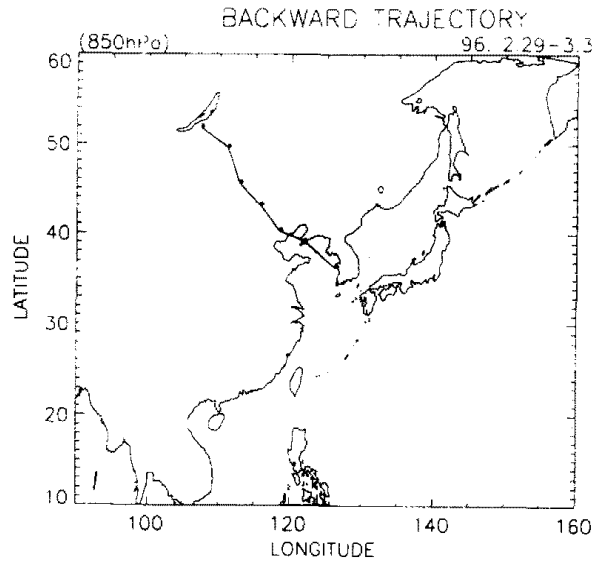


Fig. 2. Backward trajectory of air parcel arriving at Kimpo air port.

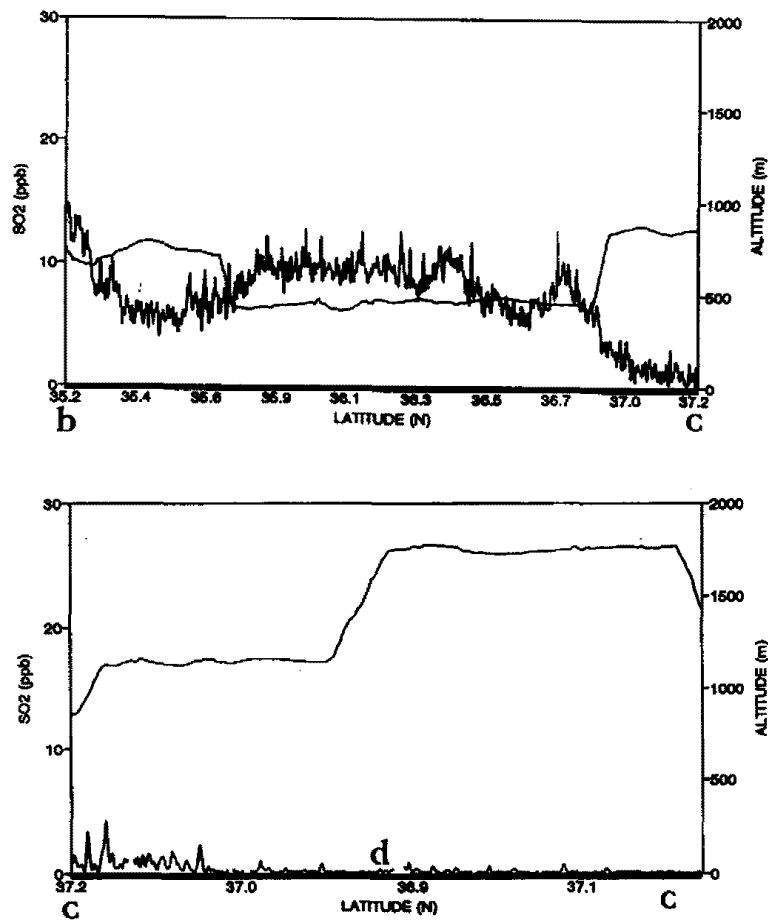


Fig. 3. The results of SO<sub>2</sub> measurements on 3 March, 1996.