

장거리이동 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이 (1997~2004년)

Spatial Distribution and Variation of Long-range Transboundary Air Pollutants Flux during 1997~2004

한진석* · 김영미 · 안준영¹⁾ · 공부주 · 최진수 · 이상욱 · 이석조
인천시 서구 경서동 종합환경연구단지 내 국립환경연구원 환경진단연구부 대기환경과
¹⁾원주지방청

(2005년 11월 22일 접수, 2005년 12월 19일 채택)

J.S. Han*, Y.M. Kim, J.Y. Ahn¹⁾, B.J. Kong, J.S. Choi, S.U. Lee and S.J. Lee
Department of Air Quality Research, National Institute of Environmental Research
¹⁾*Department of Measurement and Analysis, Wonju Regional Environmental Office*

(Received 22 November 2005, accepted 19 December 2005)

Abstract

Aircraft measurements have been executed for the purpose of monitoring the long range transported air pollution and estimation of air pollutant in/out-flux over the Yellow sea. Total 74 missions of measurements have been done since 1997, mainly in spring and fall. The main study domain was over 124° E~128° E, 35° N~37° N below 3,000 m.

In long-term trends, mixing ratios of SO₂ were around 2 ppbv expect in summer (< 1 ppbv). NO_x exhibited 2~4 ppbv and have no clear annual trends over the Yellow Sea. The concentrations of O₃ were 51, 58, 41 ppbv in spring, summer and fall-winter, respectively.

Backward trajectory was performed for three days to investigate the source regions of the air mass. Six regions were divided around Korea peninsular centering at 36° N, 126° E. I, II, III, IV and V regions represents in sequence northeast China and Siberia, Sandong peninsula and Balhae gulf, Sanghi and southern China, the south Pacific included Jeju island and the East sea included Japan. L region correspond to the air mass from Korea peninsula.

Influx of SO₂ was approximately five times higher than outflux in yearly flux variation and showed a decreasing long-term trend since 1998. NO_x outflux was average 0.095 ton/km/hr and three times higher than SO₂ outflux. In/out flux of O₃ showed even distribution in yearly basis except 2002 (influx 5.45 ton/km/hr). The transported amounts from I, II, III regions were much higher than those from other region. In seasonal flux variation, influx levels of gas phases were the lowest in summer and the levels gradually increased from fall toward spring. As a result, transport of pollutants begins from fall and prevails in winter and spring.

Key words : Aircraft measurement, Long range transports, Air pollutants flux

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7103, E-mail : nierhan@me.go.kr

1. 서 론

대기층 하부에 존재하는 산성 침적물이나 광화학 산화물 등은 평균체류시간이 1일~1주일로 알려져 있으며 이러한 오염물질들은 보통 수 백~수 천 km 까지 이동하게 되므로 오염물질들의 장거리이동은 국가간의 매우 커다란 관심사이다. 특히 동북아 지역에서의 급속한 산업화는 이 지역의 대기오염을 심화시키고 있을 뿐만 아니라 기류의 이동에 의한 대기 오염물질의 장거리이동 현상은 한 국가의 문제에서 인접 국가들 간의 문제로 광역화되고 있다. 편서풍대에 위치한 한반도는 서풍의 영향을 많이 받으며 중규모의 기압배치에 따라 흘러들어오는 기류의 영향을 받기도 한다.

대기오염물질의 장거리 이동사례는 SO₂와 관련하여 Prospero (1999), Jaffe *et al.* (1999), Clarke *et al.* (2001) 등에 의해 연구되었으며, 태평양 너머까지 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. Thonton *et al.* (1996)은 동북아 국가들에 인접한 북태평양에서 20 ppbv 이상의 장거리 이동된 고농도 SO₂를 관측하였으며 C₂H₂/CO 값으로 인위적 배출의 여부를 파악하였다. Tu *et al.* (2003)는 서해상공을 비롯한 동지나해, 일본 근해에서 항공관측 하였는데, 서해상공에서 SO₂의 농도는 봄철 1~12 ppbv의 범위로 분포하였고, 고도별 분포에 있어서 구름층에서 SO₂의 산화와 관련된 농도 감소를 보여주었다. 1991년에 PEACAMPOT 캠페인으로 10월에 서해상공에서 항공관측 되었을 때 SO₂는 1 ppbv 이하였고, O₃과 NO_x는 각각 51, 0.48 ppbv의 수준으로 분포하였다 (Hatakeyama *et al.*, 1995). 또 Hatakeyama *et al.* (2004)은 중국 중부지방에서 동지나해로 확장하는 고기압계의 확장으로 한반도에까지 오염물질이 운송되는 과정에서 SO₂의 경우 황사의 입자에 흡착되어 산화됨을 입자상 이온성분의 상관관계와 함께 설명하였다. 한진석 등 (2004)는 서해상으로 장거리 이동할 때 SO₂의 연직 분포를 선형으로 감소하는 형태, 지수함수적으로 감소하는 형태, 혼합층 중간고도에서 정규분포의 형태 등으로 분류하였고, 고농도 사례가 발생한 경우 정규분포의 형태로 장거리 이동된다고 하였다. Uematsu *et al.* (2002)은 황사와 관련하여 운송되는 인위적으로 배출된 입자상에 대하여 일본의 류슈 섬에서 지

상관측한 바 있다. 이와 같이 많은 연구사례들이 대기오염물질의 장거리 이동을 증명하고 있으며, 운송되면서 2차 오염물질로 변하는 사례에 대해서도 연구되고 있다.

서해상공은 이동되어오는 기류에 따라 대륙의 영향을 많이 받으며 바다 위의 대기로서 수증기량이 대륙 내에 비해 높아서 서해상공을 지나가는 대기는 가스상 물질의 입자변환 현상으로 2차 오염물질을 생성할 가능성이 높기 때문에 지속적인 연구가 필요한 중요한 지리적 위치라 할 수 있다. 항공기에 의한 상공의 대기오염 조사는 짧은 시간에 고도별 경도별로 넓은 영역을 측정할 수 있고, 직접적인 오염원이 없는 상공에서 관측이 이루어진다는 장점이 있어 현 시점에서 광역적 조사를 위한 효과적인 모니터링 방법이다.

본 연구에서는 일차오염물질로 규정되는 SO₂와 NO_x 그리고 광화학적으로 산화제의 역할을 하는 O₃의 공간적 분포를 파악하고자 1997년부터 2004년까지 서해상공을 중심으로 항공관측을 수행하였고, 이 결과를 바탕으로 오염물질 운송의 장기간 경향을 파악하고 서해상공의 유·출입되는 장거리 운송물질속 (flux)을 산정하였다.

2. 측정 방법

2.1 항공관측

본 연구에 사용된 항공기는 (주)창운항공이 소유하고 있는 미국 Piper사에서 제작한 모델명 PA 31-350으로 조종석을 포함하여 총 10인승이며 양쪽 날개에 프로펠러가 있는 고정익 쌍발기이다. 크기는 10.55 m (길이)/3.96 m (높이)/12.4 m (넓이, 날개 포함)이고 연료탑재량이 236 gal으로 운항속도 300 km, 항속시간 5시간 30분이며 고도를 3,000 m 이하로 제한하여 운항하였다.

관측경로는 크게 경도별과 고도별로 나누어 수평적, 수직적 농도분포를 파악하고자 하였다(그림 1). 관측시기마다 매번 고도별과 경도별 조사가 수행되었으며 주로 경도별 분포를 파악하고자 할 때 37-36°N에서 124°10', 125°30', 127°E를 중심으로 운항하였고(실선), 고도별 분포를 파악하고자 할 때 37-35°N내에서 124°30'E 선상에서 고도를 변경하며 운

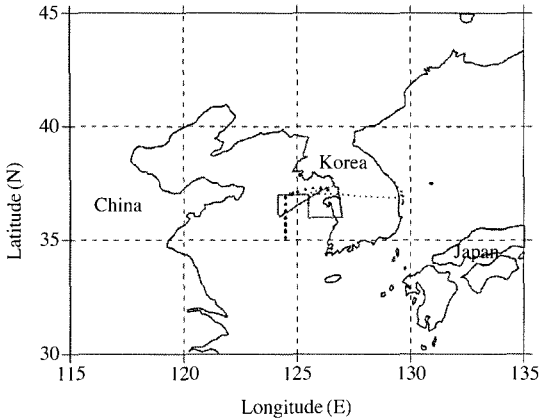


Fig. 1. Research domain and aircraft track over the Yellow sea. A solid, dashed, and dotted line are tracks for longitudinal, altitudinal, and reference flight.

항하였다(파선). 2004년 10월에는 서해상과 동해상에서 고도별 측정을 수행하였다(점선).

SO₂, NO_x, O₃는 각각 Thermo Environmental Instruments사의 모델 43C, 42C, 49C로 측정하였다. 기기의 보정은 항공기에 설치하는 조건과 동일하게 하여 관측 전후로 실험실에서 이루어졌는데 먼저 zero gas를 흘려 배경농도값을 정하고 NO_x와 SO₂ 측정기는 span gas를 희석장치를 통과시켜 교정하였으며 O₃의 경우 표준과학기술원에서 제작한 오존발생기를 이용하여 200 ppbv부터 0 ppbv사이에서 7포인트 이상의 농도를 맞추어 교정하였다(국립환경연구원, 1996~2004). 이밖에 측정기의 원리와 성능, 장착에 관련된 자세한 내용이 Kim *et al.* (2001)에 설명되었다.

항공관측이 이루어지는 동안 GPS (GARMINco., GPS III PILOT)로 측정되는 위·경·고도의 정보와 함께 TEI 값이 매 5초마다 data logger를 통하여 컴퓨터에 자동 저장되었다. 이 자료는 기기교정과 함께 보정하여 1분 평균값으로 계산하였다. 그런 다음 목표 하는 구간의 값만을 모아 정리하였는데 예를 들면 고도별 측정 자료는 김포공항에서 37°N, 124°30'E까지의 값은 제외하여 고도변경이 시작되는 구간의 자료를 사용하였고, 경도별 측정인 경우 124°10'E, 125°30'E, 127°E 선상의 자료를 사용하였다.

항공관측이 이루어진 구체적인 날짜를 표 1에 정

Table 1. Summary of the flight measurements time.

Year	Measurement periods	Flight number	Time of Asian Dust Break*
1997	10/3~5, 12/17~19	12	3/20
1998	4/26~27, 11/7~10	9	3/28~30 4/14~22, 28
1999	4/9~11	4	1/25~28, 2/27, 4/5
2000	11/15~19	4	3/7, 23~24, 27~28 4/7~8, 23, 26~27
2001	4/13~17, 11/7~10	9	1/2, 3/3~7, 20~25 5/16~19, 12/13~14
2002	3/7~11, 4/17~21, 12/14~19	11	1/12~13, 3/17~19, 21~23, 4/8~10, 12, 16~17, 11/11~12
2003	4/5~7, 5/28~6/4 11/13~18	11	3/27, 4/12~13
2004	3/17~19, 6/15~16, 10/13~21	14	2/25, 3/10~11, 30~31 4/23

*Meteorological Administration.

리하였고, 비행횟수와 서울에서 황사가 관측된 날짜를 같이 표시하였다.

2.2 권역별 기류 이동

우리나라를 둘러싼 환경을 5개 권역으로 나누어 장거리로 수송되는 오염물질의 근원지를 파악하고자 하였다(그림 2a). 이 방법은 국립환경과학원(1997~2004)에서 꾸준히 사용하고 있으며 권역의 기준을 서해 36°N, 126°E으로 정하였다. I권역은 중국 북동부와 북한을 포함한 지역이고, II권역은 산도반도와 발해만 연안을 포함한 중국 북부지역이며, III권역은 중국 동지나해를 포함한 중국 중·남부 지역이고, IV권역은 중국과 일본사이의 제주도를 포함한 남태평양 지역이고, V권역은 일본을 포함한 북태평양 지역이다. 기류가 5개 권역에 속하지 않고 국내로부터 이동한 경우는 L권역으로 나타내었다.

기류의 이동방향을 조사하기 위하여 미국 NOAA에서 개발한 HYSPLIT 모델을 이용하여 3일간의 역궤적을 추적하였다. 역궤적 분석을 한 기류의 위치는 36°N, 126°E, 고도 1,000 m에서 수행되었으며 항공관측한 날 관측시간 내에 한번 수행되었다. 그 결과가 그림 2b에 나타나있으며 기류의 권역별 빈도수는 I권역 10%, II권역 51%, III권역 13%, IV권역 5%, V권역 11% 그리고 L권역 10%로 나타났다.

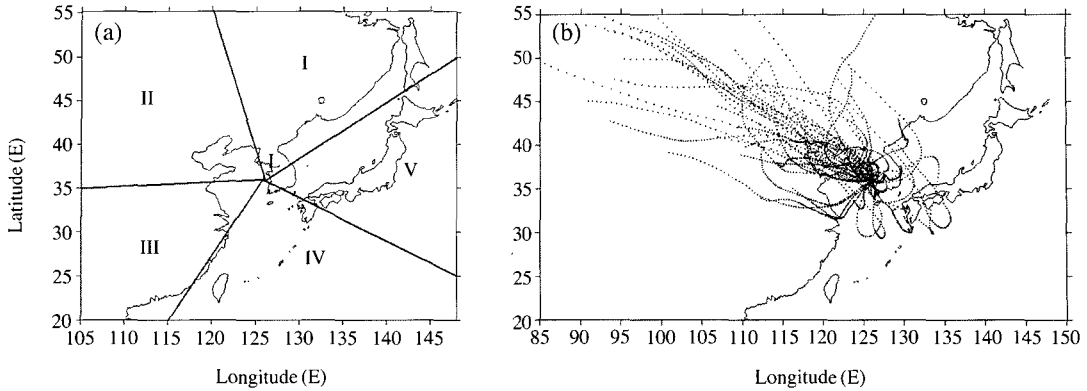


Fig. 2. (a) Divided regions to classify the pathway of air mass and (b) backward trajectories. Square plot in (a) is at 36° N and 126° E.

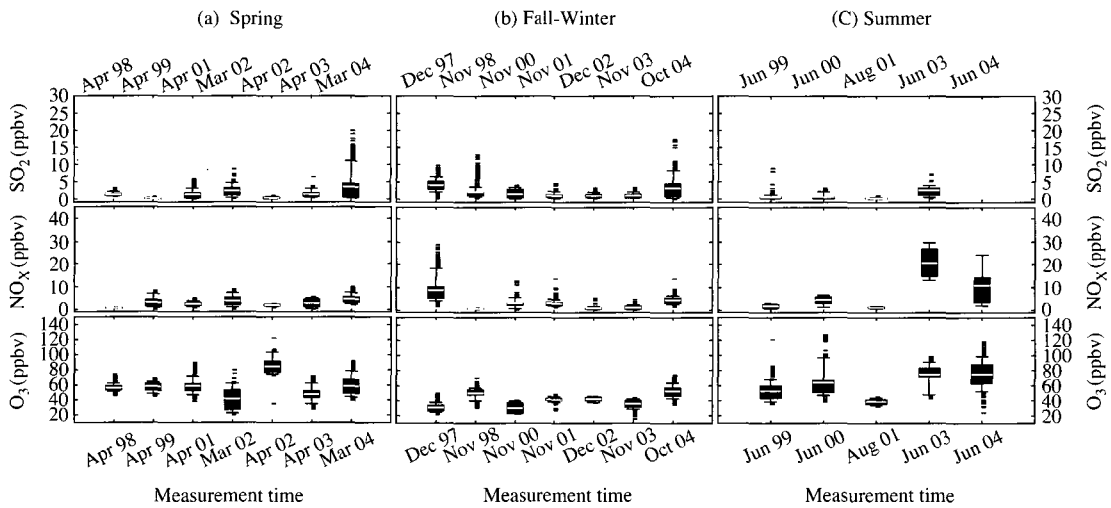


Fig. 3. Yearly variation of SO₂, NO_x, O₃. Classified to (a) Spring, (b) Fall-Winter and (c) Summer. In box and whiskers plot, white thin line denotes mean values. The box represents the 25th and 75th percentile and whiskers represent the 10th and 90th percentiles. Horizontal marks are outliers.

3. 결과 및 고찰

3.1 SO₂, NO_x O₃의 분포특성

1997년부터 2004년까지 서해상공에서 항공기로 측정된 가스상의 농도분포를 봄, 가을-겨울, 여름의 계절별로 나누어 그림 3에 나타내었다.

SO₂의 연간 분포 경향을 보면 봄 평균 2 ppbv, 가을-겨울 평균 2.3 ppbv로 태안의 배경대기 농도인 3

ppbv보다 대체로 낮으나, 2002년 3월과 2004년 3월에는 비교적 높은 농도를 보였다. 이와 비슷한 시기에 황사가 관측되었으며 역계적 추적결과 II, III권역으로부터 기류가 이동된 것으로 나타나 관측당시 중국으로부터 강한 풍속으로 오염물질이 이송된 것으로 추정된다. 여름철 SO₂의 농도는 평균 0.7 ppbv로 매우 낮게 나타났다.

NO_x의 연간 분포는 봄 평균 5 ppbv, 가을-겨울 평균 4 ppbv였으며 매년 큰 농도차이를 보이지 않고

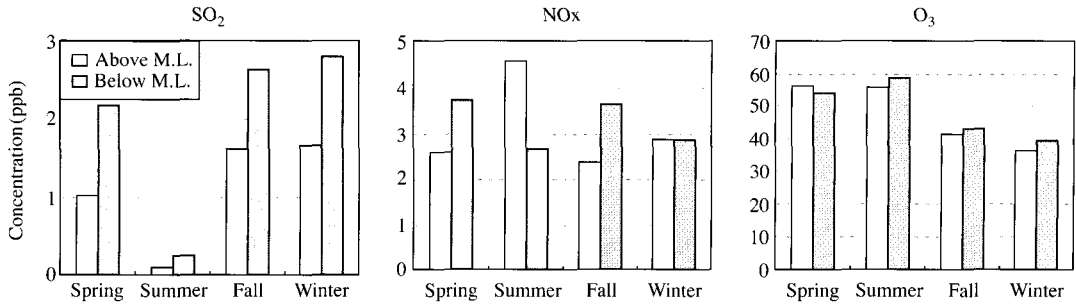


Fig. 4. Average concentrations of (a) SO₂, (b) NO_x and (c) O₃ below and above mixing layer during 1997~2004.

고르게 분포하였다. 여름철에는 평균 4.1 ppbv이며 이는 2003년과 2004년에 126° E 선상과 내륙사이에서 관측이 이루어져 내륙의 영향을 받은 것으로 추측된다. 이 두 해의 농도를 제외하면 평균값은 2.9 ppbv였다. O₃는 SO₂나 NO_x가 산화하는데 있어 중요한 산화제 역할을 하며 한편으로는 그 자체가 고농도로 발생되면 (120 ppb/hr) 광화학 오염물질로 볼 수 있다. O₃는 봄, 여름, 가을-겨울의 순서로 평균값이 각각 51, 58, 41 ppbv로 관측되었다. 1997년부터 2004년까지 측정된 O₃의 혼합층 전체의 평균 농도는 47 ppb로 상층배경농도와 거의 같은 수준으로 나타났다. 대부분의 아시아 지역 배경농도 측정지점에서 O₃의 농도는 봄철에 높게 나타나고 여름철에 오히려 더 낮은 값을 나타낸다(Pochanart *et al.*, 2003; Nagao *et al.*, 1999). 이 현상은 여름철 낮은 O₃ 농도를 가진 태평양기단의 영향을 받은 것으로 보며 그 외의 계절, 특히 봄철에는 오염된 대륙기단의 영향으로 높은 값을 나타내는 특징으로 설명되고 있다.

1997~2004년도의 측정값을 혼합고를 기준으로 위·아래로 구분하여 그 평균농도를 그림 4에 나타내었다. 계절에 따른 혼합층 상하의 농도차이는 봄과 가을에 크게 나타나고 SO₂의 경우 겨울에도 그 차이가 크게 나타났다. 또한 SO₂는 여름의 경우 하층의 농도도 가장 낮으며 상층에서는 타계절의 10% 정도의 농도가 나타났다. 그러나 O₃는 고도 3 km 이내에서 거의 고르게 분포한 것으로 나타났다.

측정시기에 따라 다른 농도 분포는 계절적으로 우세한 기단에 의해 형성되는 기류의 이동에 영향을 받는다. 앞에서 한반도 서해의 한 지점을 중심으로 5개 권역으로 나누었는데(그림 2) 표 2는 1997년부터

2004년까지 서해상에서 측정된 결과를 권역별 기류의 이동방향별로 정리한 자료이다.

SO₂ 농도는 권역 II와 III에서 각각 1.8, 4.3 ppb로 중국 남서부지방을 통과하여 기류가 이동하는 경우 대체로 높은 농도를 나타내었으며 Shandong 반도를 통과하는 경우도 높은 농도가 나타났다. 그러나 권역 I, IV, V, L에서는 각각 1.5, 0.5, 1.3, 0.7 ppb로 나타나 인위적 오염물질 배출원이 거의 없는 권역 IV가 가장 낮은 농도를 보였다. 권역 II, III에서는 최대농도 12.5, 14.7 ppb를 나타내는 고농도 episode 사례들이 2004년도에 발생하였다. 그 외 권역들의 최대농도는 1.8~3.8 ppb로서 고농도 episode 사례의 6~21% 농도수준에 불과하여 권역 II, III을 통과하는 기류의 이동을 SO₂ 고농도 episode의 주요 원인으로 생각할 수 있다. NO_x의 경우 SO₂와 달리 권역 V에서 5 ppb로 가장 높게 나타났고, 그 외 권역 I, II, III, IV, L에서 2.8, 3.1, 3.5, 3.3, 2 ppb로 나타났다. NO_x는 인위적 배출원이 없더라도 근해에서는 광화학적 반응에 의해 NO_x 농도가 생성될 수 있다. 또한 다른 권역에 비해 일본을 포함하고 있는 권역 V에서 NO_x의 농도가 높게 분포한 결과는 대륙에서 서해상으로 SO₂가 장거리 수송되는 것과는 다르며 기상측정과 함께 동해상공의 지속적인 모니터링이 필요하다. O₃의 경우 권역 IV, V에서 54, 55 ppb로 가장 높은 농도를 나타내었고, SO₂의 농도가 높은 II, III의 권역에서는 모두 48 ppb로 비교적 낮게 나타났다.

3.2 이동량 산정

대기 경계층 내에서 이동되는 오염물질의 이동량 산정은 Klemm *et al.* (1989), Lelievre *et al.* (1989) 등

Table 2. Statistic of SO₂, NO_x and O₃ for designated regions.

	Item	SO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	O ₃ (ppb)
Region I	Mean	1.5	2.8	37
	SD	1.0	1.9	13
	Min	0.2	0.1	21
	Max	3.8	7.7	62
Region II	Mean	1.8	3.1	48
	SD	2.2	3.0	16
	Min	-	0.5	23
	Max	12.5	16.4	101
Region III	Mean	4.3	3.5	48
	SD	3.0	1.8	14
	Min	0.2	3.2	30
	Max	14.7	7.7	82
Region IV	Mean	0.5	3.3	54
	SD	0.5	2.2	6
	Min	0.1	0.7	44
	Max	2.4	8.3	63
Region V	Mean	1.3	5.0	55
	SD	1.2	1.9	9
	Min	-	2.0	1
	Max	3.6	9.3	66
Region L	Mean	0.7	2.0	43
	SD	0.7	1.6	17
	Min	-	0.3	38
	Max	1.8	5.3	61

에 의해 연구되어 우리나라 서해상공에서의 이동량 산정을 Kim *et al.* (1997)에서 수행한 바 있다.

항공관측자료를 이용하여 대기 경계층 내 이동된 대기오염물질 이동량(F)은 다음과 같은 식에 의해 산정되었다.

$$F(\text{ton/hr}) = 10^{-3} \cdot C \cdot H \cdot U \cdot L \cdot \sin Q \quad (1)$$

C=대기오염물질 (μg/m³)

H=대기 경계층의 높이 (km)

U=대기 경계층 내 평균 풍속 (km/hr)

L=비행구간의 수평거리 (km)

Q=대기 경계층 내 평균 풍향과 비행방향이 이루는 각 (°)

따라서, 오염물질의 이동량은 항공측정시 단위시간 당 비행경로를 통과하는 오염물질의 양으로 정의된다. 식 (1)에 포함된 변수들은 비행구간별로 측정된 값들을 평균한 것으로 flux 계산을 하기 위해 각 농도는 경계층내의 농도 수준을 대표하는 값이고, 풍

향, 풍속 역시 경계층 내의 농도 수준을 대표하는 값이고, 풍향, 풍속 역시 경계층 내의 대표값이라는 가정이 필요하다(김병곤 등, 1997). 풍향, 풍속 자료는 태안 파도리에서 라디오존데로 측정된 상층기상자료를 사용하였다.

1997년부터 2004년까지 서해상공에서 장거리로 이동된 오염물질의 유입·유출량을 식 (1)을 이용하여 계산하였고 연도별, 권역별, 계절별로 나누어 그림 6에 나타내었다. 유입되는 이동량을 중심으로 산정하였으므로 식 (1)에서 풍향의 요인을 포함하는 Q값이 (-)이면 flux는 (-)값을 갖게 되며 이는 유출량을 의미한다. 식 (1)에 의해 계산된 값은 다시 단위길이를 이동하는 이동량으로 계산하여 연도별, 지역별, 계절별로 그림 5에 나타내었다.

연도별 이동량을 보면 SO₂의 이동량은 1998년을 정점으로 감소하는 경향을 보였다. SO₂는 유출량에 비해 유입량이 약 5배 가량 많으며, '97년을 제외하고 유출량이 매우 낮게 나타났다. NO_x의 유입량은 평균 0.189톤/km/시간으로 SO₂의 평균값인 0.151톤/km시간과 비슷한 수준이지만 유출량은 0.095톤/km/시간으로 SO₂보다 3배 가량 높게 나타났다. 오존의 이동량은 유입·유출량의 연간분포에 두드러진 특징을 보이지 않았으며, '02년의 유입량이 5.45톤/km/시간으로 매우 높게 나타났다.

권역별로는 육지가 없는 VI권역에서 각 물질들의 유입·유출량이 다른 권역에 비해 매우 적게 나타났다. II권역에서의 이동은 앞서 말한 바와 같이 다른 권역에 비해 이동사례가 51%로 가장 높은 비율을 차지한다. V권역의 사례는 한반도 전역에 약한 고기압이 중국동부를 포함하여 넓은 영역에 정체한 경우에 나타나며 중국 북동부에서 동지나해에 걸쳐있는 권역 I, II, III에서 유입되는 오염물질의 양은 다른 곳에 비해 매우 많으며, 그 외의 권역에서는 대체로 유입량보다는 유출량이 많으나 권역 I, II, III의 유입량에 비해 3~5배 적은 수준이다. 오존은 권역 I, II, III에서의 유입량과 비슷한 수준의 유출량이 권역 IV, V, L에서 나타났다.

계절별 이동량을 살펴보면 봄철과 겨울철에 모든 오염물질의 이동량이 많으며, 여름철 이동량이 가장 적게 나타났다 이것은 아마도 태풍이나 강우량이 많은 계절적 영향도 있고, 다른 계절에 비해 여름철에는 서풍보다는 남풍계열의 풍향이 잦은 이유 때문인

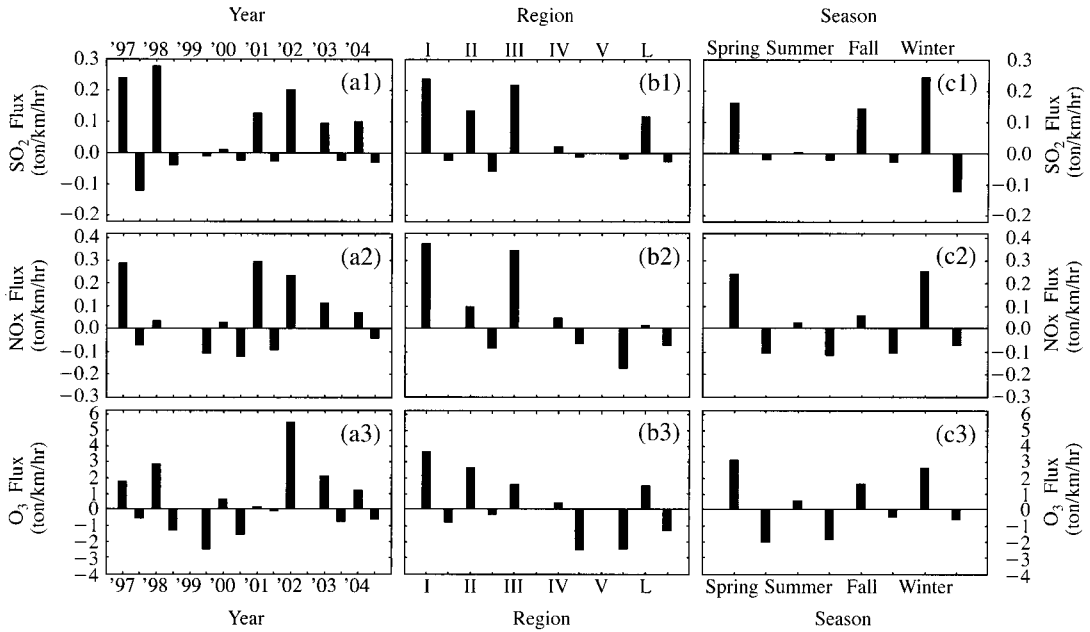


Fig. 5. The bar charts of (1) Yearly, (2) Regional and (3) Seasonal transboundary flux during 1997~2004.

것으로 추측된다. 따라서 장거리 이동은 가을부터 서서히 시작되어 겨울, 봄에 가장 많이 이루어진다고 볼 수 있다.

4. 결 론

대기오염물질의 장거리 이동 현상을 파악하기 위하여 1997년부터 2004년까지 서해상공에서 항공관측이 수행되었다. SO₂, NO_x, O₃의 장기간 농도분포 경향을 계절별로 나누어 살펴보았을 때 SO₂는 2002년 3월, 2003년 4월, 2004년 3월에 황사발생과 비슷한 시기에 평균농도 이상의 높은 농도로 관측되었다. NO_x는 SO₂에 비해 연간 또는 계절적으로 분포의 차이를 보이지 않았다. 그러나 내륙에 가까운 관측지점에서 다소 높은 농도로 나타나 근해에서 내륙의 영향을 받는 것으로 나타났다. 혼합층을 경계로 상·하층의 평균 농도분포를 계절별로 살펴본 결과, SO₂는 크기는 1 ppbv까지 상·하층의 차이를 보였으며, 혼합층 내에서 높은 농도를 보였다. NO_x도 대체로 혼합층 내의 농도가 높았지만 여름철에는 혼합고 상층의 농도가 더 높게 나타났으며 이는 내륙의 대기

가 한반도 근해의 높은 고도까지 영향을 미치고 있음을 보여주었다. O₃는 전 고도에 걸쳐 고르게 분포하였으며, 혼합층 내에서는 O₃의 계절적 분포는 여름에 가장 높게 겨울에 가장 낮게 나타났다.

역궤적분석의 결과는 한반도로 이동하는 기류의 60% 이상이 중국대륙에서 건너왔으며, 이러한 경우 SO₂와 NO_x는 다른 주변지역보다 높은 농도가 관측되었고, O₃는 일본을 포함한 동해상이나 한반도 남쪽에서 이동하는 기류에서 높은 값이 측정되었다.

장기간 측정결과로부터 이동량을 산출하여 연도별, 권역별, 계절별로 나타낸 결과 각 측정물질의 유입량이 조금씩 줄어드는 추세로 나타났고, 오염물질은 I, III권역에서 유입량이 높게 나타났다. 그리고 봄철과 가을 겨울철에 유입량이 많고 여름철에는 거의 없어 장거리 이동은 가을부터 서서히 시작되어 겨울, 봄에 많이 이루어진다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (1997~1999) 장거리이동 대기오염물질의 공간분포 및 변화에 관한 연구.

- 국립환경과학원 (2000~2004) 동북아대기오염 감시체계구축 및 환경보전협력사업.
- 대기환경연보 (2001).
- 김병곤, 차준석, 한진석, 박일수, 김정수, 나진균, 최덕일, 안준영, 강창국 (1997) 항공기를 이용한 서해안에서의 SO₂ 및 NO_x 측정, 한국대기보전학회지, 13(5), 361-369.
- 한진석, 안준영, 홍유덕, 공부주, 이석조, 신우영 (2004) 한반도 서해상으로 장거리 이동하는 SO₂의 농도 및 연직분포 특징, 한국대기환경학회지, 20(5), 671-683.
- Clarke, A.D., W.G. Collins, P.J. Rasch, V.N. Kapustin, K. Moore, S. Howell, and H.E. Fuelberg (2001) Dust and pollution transport on global scales: Aerosol measurements and model predictions, *Journal of Geophysical research*, 106, 32555-32569.
- Hatakeyama, S., K. Murano, H. Bandow, F. Sakamaki, M. Yamato, S. Tanaka, and H. Akimoto (1995) The 1991 PEACAMPOT aircraft observation of ozone, NO_x, and SO₂ over the East China Sea, the Yellow Sea and the Sea of Japan, *Journal of Geophysical research*, 100, D11, 23143-23151.
- Hatakeyama, S., A. Takami, F. Sakamaki, H. Mukai, N. Sugimoto, and A. Shimizu (2004) Aerial measurement of air pollutants and aerosols during 20~22 March 2001 over the East China Sea, *Journal of Geophysical research*, 109, D13304, doi: 10.1029/2003JD004271.
- Jaffe, D.A., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harries, G. Carmichael, and I. Uno (1999) Transport of Asian air pollutant to North America. *Geophysical Research Letters*, 26, 26711-26714.
- Kim, B.G., J.S. Han, and S.U. Park (2000) Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea, *Atmospheric Environment*, 35, 727-737.
- Kerminen, V.M., R.E. Hillamo, T. Mäkelä, J.L. Jaffrezo, and W. Maenhaut (1998) The physicochemical structure of the Greenland summer aerosol and its relation to atmospheric processes, *Journal of Geophysical research*, 102, 5661-5670.
- Lelieveld, J., F.W. Janson, and H.V. Dop (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.
- Nagao, I., K. Matsumoto, and H. Tanaka (1999) Characteristics of dimethylsulfide, ozone, aerosols, and cloud condensation nuclei in air masses over the northwestern Pacific Ocean, *Journal of Geophysical research*, 104, 11675-11693.
- Prospero, J.M. (1999) Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality, *Journal of Geophysical research*, 104, 15917-15927.
- Pochanart, P.H., Y.K. Akimoto, V.M. Potemkin, and T.V. Khodzher (2003) Regional background ozone and carbon monoxide variations in remote Siberia/East Asia. *Journal of Geophysical research*, 108, 4028-4045.
- Uematsu, M., A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arao, and I. Uno (2002) Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa event over East Asia, *Journal of Geophysical research*, 107, D7, 4059, doi: 10.1029/2001JD000333.
- Tu, F.H., D.C. Thornton, A.R. Bandy, M.S. Kim, G. Carmichael, and Y. Tang (2003) Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P, *Journal of Geophysical research*, 108, D20, 8790, doi:10.1029/2002JD003227.