

# 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO<sub>2</sub> 농도 변화 특성

## Characteristics of the Baseline SO<sub>2</sub> Concentration Variations at Kosan, Cheju Island, Retrieved from 1994's Data

장광미 · 이호근 · 서명석 · 박경윤

강창희<sup>1)</sup> · 허철구<sup>1)</sup> · 심상규<sup>2)</sup>

시스템공학연구소 지구환경정보연구부

<sup>1)</sup>제주대학교 화학과

<sup>2)</sup>한국과학기술연구원 환경연구센터

(1996년 8월 31일 접수, 1996년 12월 4일 채택)

Kwang Mi Jang, Ho-Geun Lee, Myoung Seok Suh, Kyoung Yoon Park  
Chang-Hee Kang<sup>1)</sup>, Chul-Goo Hu<sup>1)</sup>, Shang-Gyoo Shim<sup>2)</sup>

*Systems Engineering Research Institute,*

<sup>1)</sup> *Department of Chemistry, Cheju National University*

<sup>2)</sup> *Korea Institute of Science and Technology*

(Received 31 August 1996; accepted 4 December 1996)

### Abstract

A set of 1994 data was analyzed to investigate the characteristics of background surface SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan, Cheju Island, Korea. The SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan site show a seasonal variation with a minimum (0.46 ppb) in summer, maximum (1.02 ppb) in spring and an annual mean of 0.83 ppb. These values were 4~7 times higher than those measured in other remote areas, such as Bermuda and Oki Island, but they were similar to the baseline concentrations of other sites in the world. The diurnal variation of SO<sub>2</sub> concentrations was very small and it shows a peak at 10 am in spring and fall, 2 pm in summer, and 1 pm in winter, respectively. Correlations between local meteorological parameters and SO<sub>2</sub> concentrations were not significant. This suggests that the variations of the Kosan's SO<sub>2</sub> concentrations were relatively independent on local meteorological variables. Backward trajectory analysis results showed that the seasonal variation of the SO<sub>2</sub> concentrations was mainly due to the inflow of air masses from the continent in spring and from the Pacific Ocean in summer. The results also revealed that the air masses with the highest SO<sub>2</sub> concentration came through China or the Korean peninsula in spring and through Japan during summer. It was found that the SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan were under the influence of passage of air masses arriving at this site.

**Key words** : background surface SO<sub>2</sub> concentration, backward trajectory analysis

### 1. 서 론

산업화로 인한 지구 대기의 화학 성분 변화와 그 영향

에 대한 연구가 활발히 진행되는 세계적인 추세에 맞추어 한국에서도 대기 오염 배경 농도 측정 시도가 4~5년 전부터 시작되었다(박경윤 등, 1994; 정용승 등, 1992). 특히 1991년 제주도 고산 배경 농도 측정소 설립(박경

윤 등, 1994) 이후 그간 많은 연구들이 시행되었고 아직도 활발히 진행 중에 있다. 이들 배경 농도 자료는 배경 농도 데이터의 생성과 인접 국가간의 대기오염 물질의 장거리 이동 조사를 위한 기초 자료뿐만 아니라 향후 계속 발전될 대기오염 모델 연구를 위한 중요한 입력 자료로도 활용될 것이므로 지속적인 데이터의 생성뿐만 아니라 특성 분석 연구가 필요하다.

기존의 모델 연구에서는 주로 배경 농도 자료 없이 주요 오염 배출원지인 대도시 자료 위주로 조사되었으므로 실제로 인위적인 배출량 측정에 불확정 요인이 많았고, 인접 국가로부터 장거리 유입된 양의 조사에 있어서도 한반도 안에서의 배출량이 많기 때문에 실제로 외부로부터 유입된 것에 대한 정량적인 분석이 어려웠다(이상인 등, 1993, 1994; 김영성 등, 1992).

SO<sub>2</sub>는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 기인 물질로서 질소화합물과 더불어 산성비를 유발하여 생물계에 영향을 줄 뿐만 아니라, 인체에는 공기 중에서 습기와 공존시 호흡기 질환의 빈도가 높아지고 심할 때는 사망하기도 한다. 또한 대기 중의 입자상 물질, 질소산화물, 탄화수소 등과 광화학반응을 일으켜 haze를 생성함으로써 시정 감소를 초래하며, 식물과 여러 가지 물질에 대해서도 비교적 심한 손상을 미치는 것으로 알려져 있다(김용환 등, 1986).

전 세계적으로 하나뿐인 지구를 보존하고자 하는 인간의 다양한 노력에 의해 대기 중의 SO<sub>2</sub> 농도는 그 양이 점진적으로 감소하고 있는 추세이다(Lefohn, 1991; Serrano, 1989). 그러나 동북아시아 지역, 특히 중국에서는 아직도 증가되는 추세에 있고(Akimoto, 1994), 앞으로도 중국의 8, 9차 산업화의 계획에 따라 계속 증가할 것으로 보이며(강동근, 1993), 지리적으로 편서풍대의 풍하측에 위치한 한국은 중국으로부터 SO<sub>2</sub>의 유입 가능성에 대한 우려가 많아 이에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(강동근 등, 1993; 전종갑, 1991; 정용승 등, 1991). 특히 한반도에서 외부로부터 오염물질의 유입 가능성에 대한 연구 지역으로서의 고산이 최적지 중의 하나임을 이미 밝힌 바 있다(김용표 등, 1995).

고산에서의 SO<sub>2</sub> 배경 농도 연구는 홍민선 등(1992), 박경윤 등(1994), 김용표 등(1996)의 연구가 있었으나 사계절동안 SO<sub>2</sub> 배경 농도의 특성 및 공기질의 장거리 이동 경로에 따른 사례별 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 1994년 1월부터 12월까지 시스템 공학연구소, 한국과학기술연구원 및 제주대학교가 공동으로 제주도 고산에서 측정된 SO<sub>2</sub> 데이터를 중심으로 1년간의 SO<sub>2</sub> 배경 농도 특성을 연구하고, 고산에 도착한 공기질의 장거리 이동 경로별로 SO<sub>2</sub> 농도를 분석하였

다. 이 결과는 지구 대기의 화학 성분 변화와 그 영향에 대한 연구 및 대기 오염의 장거리 이동 연구뿐만 아니라 향후 대기 모델 연구를 위한 입력 데이터로 유용하게 활용될 것으로 보인다.

## 2. 측정 및 분석

측정소의 지리적 위치는 그림 1에서 보는 바와 같이 제주도 서단에 위치한 제주도 북제주군 한경면 고산리 수월봉(126° 10' E, 33° 17' N)으로 해발고도가 약 70 m의 절벽에서 10 m 정도 내륙으로 들어온 곳이다. 측정장비를 운영하기 위한 측정소는 4평 규모의 컨테이너 박스를 이용하였다. 컨테이너 박스는 남서방향을 향하도록 하였으며, 시료 공기 흡입구는 직경 50 mm의 Polyvinyl Chloride (PVC) 관을 사용하여 지상 10 m에 위치하게 했다. 측정소에서 약 100 m 북동쪽에는 기상청 제주 고층 레이다 기상대가 있다. 측정소 주변은 삼면이 바다이고 육지부분에는 섬 중앙에 한라산(해발고도 1,950 m)이 있고 북동쪽에 제주시, 남동쪽에 서귀포시가 있으나 SO<sub>2</sub>를 배출할 만한 배출원이 적고(박경윤, 1994) 주풍향이 북풍과 북서풍이므로 이동되어 오는 오염량도 적을 것으로 이들 지역의 오염원이 본 측정소에 직접적으로 영향을 주지 않을 것으로 판단되었다(서명석 등, 1995).

측정 기간 동안의 기상 요소는 표 1에 나타내었다. 사용된 데이터는 측정소에서 인접한 제주 고층레이다 기상대의 자료로 기상청으로부터 제공받았다. 측정 기간 중의 기온은 겨울에 7.6°C로 가장 낮고, 여름에 24.6°C로 가장 높으며, 연평균 기온은 16.0°C였다. 이는 과거 5년간(1988~1992년)의 연평균 기온 15.6°C 보다 약

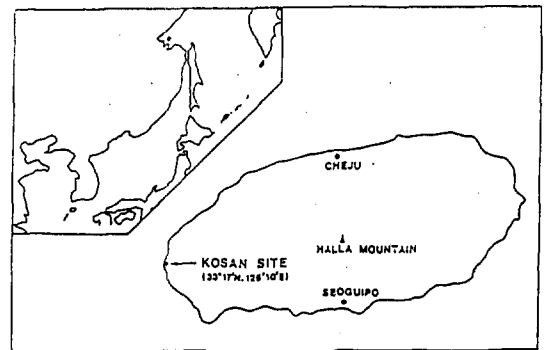


Fig. 1. The location of the Kosan station at Cheju.

간 높은 편이었다. 상대습도는 과거 5년간의 77%에 비해 약간 낮지만 강수량은 1,118.3mm에 비해 약간 높은 편이었으며, 풍속은 한반도 내륙 지역에 비해 상대적으로 높은 편이지만 특히 겨울에 높고 여름에 약간 낮은 편이었다. 또한 겨울에는 북서쪽의 대륙고기압의 영향

으로 해면 기압이 상승하고 여름에는 북태평양의 약한 고기압의 영향으로 겨울보다 해면 기압이 하강했다. 대체로 기상 요소는 높은 상대 습도, 강한 풍속 등 해안가의 특성을 잘 나타내었다. 그림 2는 관측 기간 동안 국지 기상의 풍향과 풍속을 통계적으로 나타낸 계절별 바

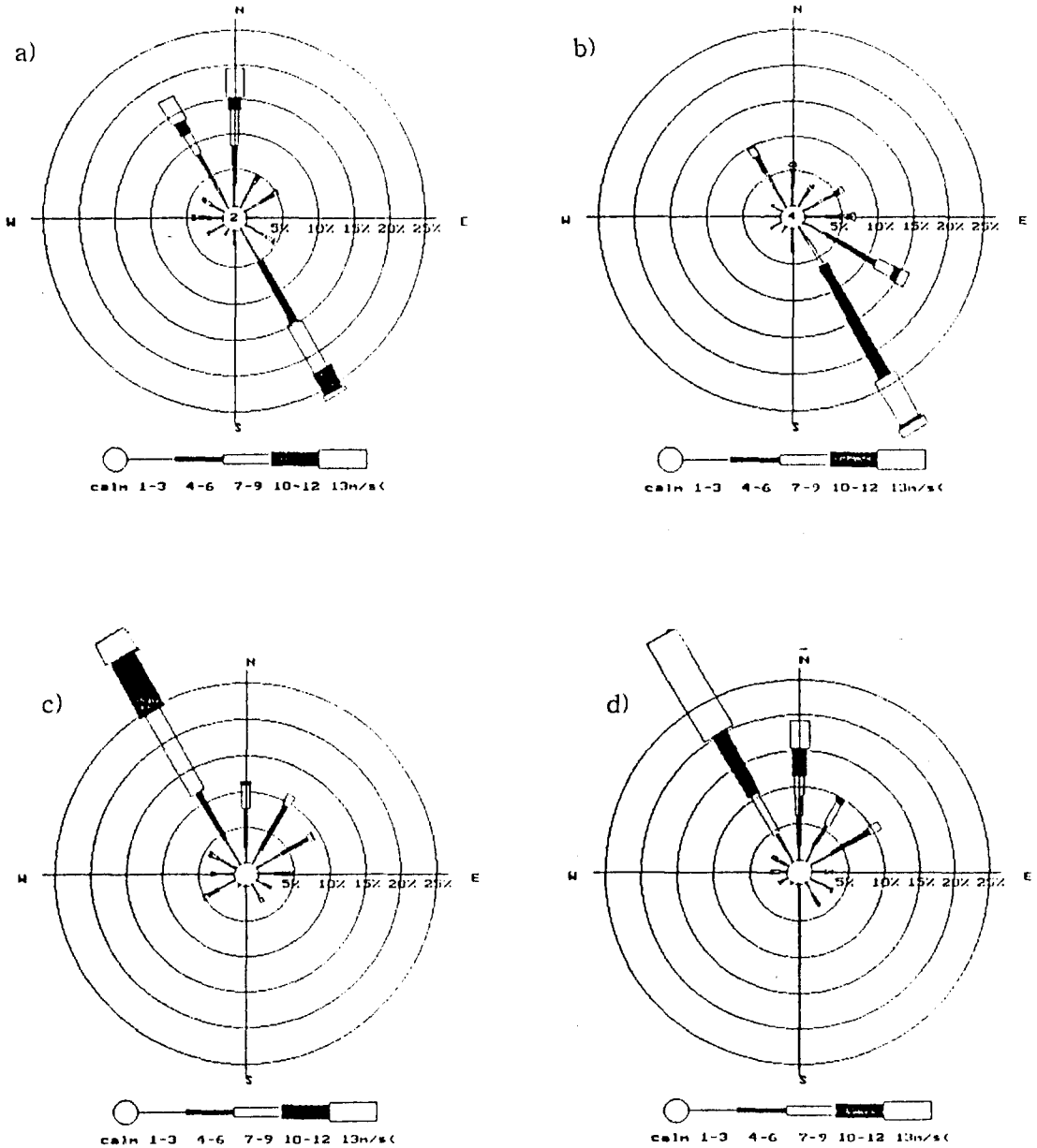


Fig. 2. Windrose of surface winds in, spring (a), summer (b), fall (c), winter (d) at Kosan.

Table 1. The seasonal mean and standard deviation of meteorological data in 1994.

	Spring		Summer		Fall		Winter		Annual	(1988~1992)
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	Mean
Temp(°C)	13.0	6.1	24.6	5.5	18.7	6.6	7.6	5.1	16.0	15.6
Rain(mm)*	403.2	-	463.1	-	336.6	-	174.4	-	1377.3	1118.3
Wspd(m/s)	6.8	4.6	5.4	4.1	6.2	4.4	8.6	5.3	6.8	
Rhum(%)	78.8	17.5	86.1	14.3	70.8	18.2	66.6	17.5	75.6	77.0
DewT(°C)	9.5	7.2	22.2	5.5	13.6	7.4	2.3	5.8	11.9	
Seap(hPa)	1014.6	7.1	1006.8	5.0	1016.8	6.7	1021.5	5.8	1014.8	

\* : Summation  
 STD, standard deviation, Temp: temperature, DewT: dew point temperature, Rhum: relative humidity,  
 Wspd: wind speed, Seap: sea pressure

람 장미이다. 봄철에는 북풍 및 북서풍 그리고 남동풍이 우세하고 여름철에는 남동풍이, 가을철과 겨울철에는 북서풍이 현저히 우세하다. 따라서 고산의 기류는 주로 제주도 내륙보다는 삼면으로 쌓인 바다쪽으로부터의 유입이 많을 것으로 추측된다.

측정항목은 SO<sub>2</sub>이며 측정기간은 1994년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간이며 매분마다 측정된 자료를 매시간 단위로 산술 평균하여 이용하였다. 측정기기는 TECO Model 43S (미국)의 SO<sub>2</sub>분석기로써 pulse U.V. fluorescence method가 사용되었으며, 이 기기의 측정범위는 0~20 ppb이고 측정오차는 0.05 ppb, 검출한계는 0.1 ppb이다(TECO Model 43S, 1989). 측정은 정전과 기기 고장을 제외하고는 연속적으로 실시하였다. 기기보정에는 자동보정(one point calibration)과 수동보정(two point calibration)을 동시에 실시하였다(TECO Model 43S, 1989).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자료 처리 및 빈도 분포

측정기기는 개인용 컴퓨터와 연결되어 있어 기기로부터 얻어지는 측정 자료는 컴퓨터의 하드디스크에 자동적으로 저장되도록 하였다. 측정기에서 최종적으로 나오는 자료는 측정 성분의 양에 따른 상대적 크기의 전압(voltage)을 이용하여 실제 농도를 계산하였다. 데이터의 처리는 측정된 데이터 중 측정범위 이하의 값은 0으로 처리하였고 나머지 값은 모두 이용하였다. 측정 기간 동안 측정된 SO<sub>2</sub> 농도의 농도별 빈도 분포는 그림 3과 같다. SO<sub>2</sub> 농도 빈도는 0.5 ppb 이하가 50% 이상을 차지하여 저농도에 편중된 비대칭형을 이루고 있음을 알 수 있었다. 이러한 비대칭형 분포 현상은 대도시(신찬

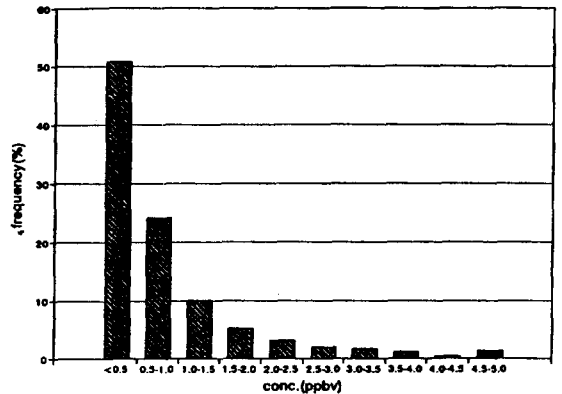


Fig. 3. Frequency distribution of SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan.

기 등, 1992)와도 비슷한 결과이다.

#### 3.2 계절별 분포

1년간의 월별 농도 분포는 표 2에 나타내었다. 6월에는 기기 고장 및 정전으로 측정되지 못하였고, 5월과 7월에도 같은 이유로 측정되지 못한 날이 많았다. 최저 농도를 나타낸 달은 8월로 0.34 ppb이었고 최고 농도를 나타낸 달은 2월로 1.22 ppb이었다. 두 번째 최고 농도를 나타낸 달은 4월로 1.15 ppb이었다. 대체로 봄철과 겨울철에 높은 농도값을, 여름철에 낮은 농도값을 나타내었다.

측정 기간 동안 측정된 SO<sub>2</sub> 농도의 계절별 분포는 표 3에 나타내었다. 여름에는 앞서 말한 바와 같이 6월에 기기 고장으로 인하여 측정이 중지되어 측정 빈도가 낮았다. 표 3에 의하면 1년 중 여름에 0.46 ppb로 최저 농도를 나타내었고, 봄에 1.02 ppb로 최고 농도를 나타

**Table 2. Monthly variation of SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan during study period.**

Year	Month	Mean(ppb)	STD	Frequency
94	1	1.00	0.93	633
94	2	1.22	1.43	670
94	3	0.95	1.06	694
94	4	1.15	1.35	720
94	5	0.75	0.28	155
94	6	-	-	-
94	7	0.81	1.67	223
94	8	0.34	0.47	689
94	9	0.72	0.79	621
94	10	0.72	0.78	715
94	11	0.78	0.92	547
94	12	0.55	0.51	740

STD: standard deviation

**Table 3. Seasonal variation of SO<sub>2</sub> concentrations at Kosan during study period.**

Season	Mean (ppbv)	STD*	Frequency
Spring	1.02	1.17	1569
Summer	0.46	0.95	912
Fall	0.74	0.83	1883
Winter	0.92	1.06	2043
Annual	0.83	1.03	6407

\* STD: standard deviation

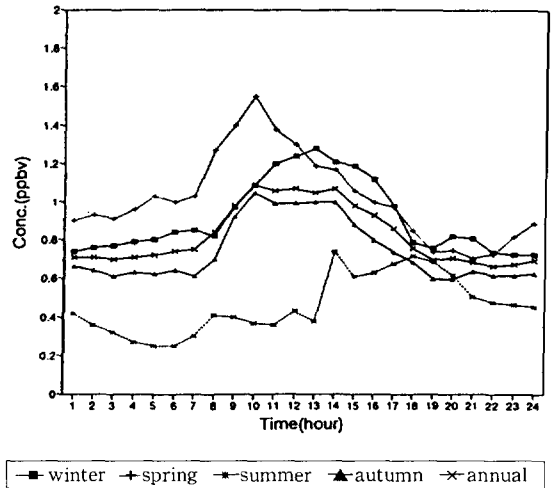
내었다. 여름에 최저값을 나타낸 것은 대도시와 유사하나 대도시가 다른 계절에 비해 겨울에 월등히 높은 값을 나타내는 것과는 달리 본 연구에서는 봄철의 낮은 측정 빈도를 고려할 때 봄철과 겨울철의 농도값의 차이가 미미하다. 또한 관측 기간동안 연평균 농도는 0.83 ppb로 이는 1년 대기환경기준치 30 ppb에 비하면 훨씬 적은 값이었다.

**3.3 일변화**

계절에 따른 일변화 경향을 알아보기 위해서 그림 4에 계절별로 일변화를 나타내었다. 사계절 모두 SO<sub>2</sub> 농도의 일변화는 아주 작았으며, 일중 최고 농도가 봄·가을에는 오전 10시경에, 여름에는 오후 2시경에, 겨울에는 오후 1시경에 최고 농도를 나타내었다. 대도시의 경우 계절에 관계없이 오전 8시경에 최고 농도를 보이고 오후 9시경에 두 번째 높은 값을 보인 경우(전병일 등, 1994; 윤순창, 1992)와는 약간 달랐다. 이는 대도시의 경우는 이러한 peak를 인위적인 오염원의 증가와 기상학적 요인으로 해석할 수 있다. 즉 아침에는 그 날 하루

의 산업체 가동을 위해 연료를 아침에 연소하는 것과 출근 시간의 차량 증가 및 지표의 야간 복사 냉각에 의해 형성된 역전층의 영향으로 대기층이 안정하여 확산이 억제 되기 때문에 최고치를 나타내고, 두 번째 최고치는 퇴근 차량운행 증가와 가정의 난방을 위한 연료 연소 및 아침과 같은 기상학적 요인 때문인 것으로 해석된다. 특히 다른 계절에 비해 여름철에는 오후의 peak가 거의 나타나지 않는 것은 여름철에는 난방을 위한 연료 연소가 거의 없기 때문이다.

그러나 고산의 경우는 이런 대도시의 국지적인 인위적 오염원으로 인한 일변화 경향과는 차이가 있었다. 우선 여름을 제외한 나머지 계절에는 1차 peak만 나타나고 그 출현 시각도 봄, 가을, 겨울에 각각 10시, 10시~14시, 13시에 나타나 대도시와는 시간 지연을 보였다. 그리고 여름철에는 1차 peak도 거의 판별하기 어렵다. 이는 고산의 SO<sub>2</sub> 농도는 고산 지역의 국지적인 오염원보다는 기류의 이동에 의해 한반도와 중국 등 주변으로부터 유입되어 왔음을 시사한다.



**Fig. 4. Diurnal variation of average hourly concentrations of SO<sub>2</sub> at Kosan.**

**3.4 기상요소와의 상관관계**

인위적인 오염물질, 특히 SO<sub>2</sub>는 연료의 연소에 의해 생성되는 양이 많으므로 국지오염원에 의한 SO<sub>2</sub> 배출량은 국지기상의 영향을 많이 받는다. 따라서 고산의 SO<sub>2</sub> 특성을 알아 보기 위해서 표 4에서 측정 기간 동안 계절별로 SO<sub>2</sub> 농도와 국지기상 요소와의 상관관계를 살펴

았다. 국지 오염원이 많은 대도시의 경우, SO<sub>2</sub> 농도는 풍속, 기온 및 기압과 높은 상관관계를 가지는 것(전병일 등, 1994; 신찬기 등, 1992; 박일수 등, 1991)에 비해 본 제주도 고산 자료에서는 대부분의 국지 기상 요소와 SO<sub>2</sub> 농도는 거의 상관성이 없었다. 강수의 경우는 강수량과는 유의한 상관이 없지만 강수의 유무와는 관련이 많았다(3.6절 참조). 따라서 SO<sub>2</sub> 농도와 국지기상 요소와의 유의한 상관이 없는 점으로 보아 고산의 SO<sub>2</sub> 농도는 그 절대량은 적지만 외부로부터 유입되었을 가능성이 많음을 시사하고 있다.

**3.5 외국의 다른 청정지역과의 비교**

고산 측정소에서는 홍민선 등(1992), 박경윤 등(1994)과 김용표 등(1996)에 의해 SO<sub>2</sub> 농도가 이미 측정되었다. 홍민선 등(1992)에 의하면 1992년 2월 평균 농도는 1.4 ppb, 박경윤 등(1992)에 의하면 1992년 2월~12월까지의 평균 농도는 1.42 ppb, 김용표 등(1994)에 의하면 1994년 3월~4월의 평균 농도는 0.97 ppb이었다. '94년 일년 동안의 자료에서의 평균값은 이들 값보다 낮은 0.83 ppb였으며 이는 서울을 비롯한 대

도시에서 감소하는 추세와 유사하나 정확한 원인은 더 연구되어야 할 분야이다.

세계적으로 알려진 청정지역의 SO<sub>2</sub> 농도와 고산의 값을 비교하기 위해서 표 5에 세계의 다른 청정지역에서 관측된 데이터를 나타내었다. 고산의 SO<sub>2</sub> 농도는 여름철을 기준으로 볼 때 미국 버뮤다보다는 약 7배, 가을철을 기준으로 볼 때 일본 오키섬보다는 약 4~5 배정도 높고 그외 청정지역과는 유사하거나 대륙의 교외지역보다는 높은 값이다. 따라서 고산의 SO<sub>2</sub> 농도는 세계의 다른 청정지역보다는 높은 편이므로 순수히 자연적인 기원에 의한 것이라고 볼 수 없고 외부로부터 유입되었을 가능성이 충분히 있다. 그동안 많이 논의되었던 중국으로부터의 유입 가능성에 있어서, 김용표 등(1996)은 SO<sub>2</sub>의 감소속도는 미국 동해안에서 버뮤다까지 1,000 km를 이동하는 동안 그 농도가 약 20분의 1로 감소한 것에 비해 중국 동해안에서 제주도로 이동하는 동안 30분의 1 이상으로 감소하는 높은 감소 속도를 보인다고 보고하였다. 그럼에도 불구하고 고산이 버뮤다에 비해 높은 SO<sub>2</sub> 농도를 나타낸 것은 중국의 산업화로 인한 SO<sub>2</sub> 배출량이 미국보다 많기 때문일 것으로 추측된다

**Table 4. The correlation coefficients between the SO<sub>2</sub> concentration and meteorological elements at Kosan for the study period.**

Season	Temp	DewT	Rain	Rhum	Wspd	Radi	Seap
Spring	0.16	-0.01	0.13	-0.27	-0.29	0.17	0.12
Summer	0.13	-0.26	0.08	-0.35	-0.18	-0.06	-0.09
Fall	0.06	-0.17	-0.01	-0.38	-0.25	0.22	0.18
Winter	0.16	-0.02	-0.30	-0.24	-0.21	0.23	-0.14
Annual	-0.08	-0.17	0.13	-0.30	-0.20	0.07	0.10

\* Temp: temperature, DewT: dew point temperature, Rhum: relative humidity, Wspd: wind speed, Radi: radiation, Seap: sea pressure

**Table 5. Comparison of baseline concentrations of SO<sub>2</sub> at other sites in the world. (Units : ppbv)**

Station	Concentration	Period	Remark
Colorado	0.75		Georgii(1970)
American Tropics	0.1~1.3		Lodge <i>et al.</i> (1974)
Tropical Rain Forest			
West Africa	3.5~10		Delmas <i>et al.</i> (1978)
Antartica	0.3~1.4		Fischer <i>et al.</i> (1968)
Bermuda	0.06	26~28 July, 1988	Sievering(1992)
Oki Island	0.15	29 Sep. ~ 7 Oct. 1991	'91 ICAC/APARE/PEACAMPOT
"	0.22	18~12 Nov. 1992	'92 ICAC/APARE/PEACAMPOT
Tsushima	0.92	4~11 Oct. 1991	"
Hiroshima	2.1	1~16 Jul. 1982	Mizoguchi <i>et al.</i> (1985)
West America	0.29~0.58	Nov.	Miller(1992)
Kosan	0.83	1 Jan~ 1 Dec. 1994	This work

(Akimoto *et al.*, 1994; Hastie *et al.*, 1988).

### 3.6 장거리 이동 분석

이미 발표된 많은 논문들이 제주도에서의 SO<sub>2</sub> 오염원이 공기괴(또는 기단)의 장거리 이동에 의한 유입 가능성에 대해 제기해 왔다(김용표 등, 1996; 박경운 등, 1994; 홍민선 등, 1992). 본 연구에서는 연구 기간 중의 최고 농도를 나타낸 봄철을 대표할 수 있는 4월과 최저 농도를 나타낸 여름철을 대표할 수 있는 8월에 대해서 4일간씩 공기괴의 궤적을 역궤적분석을 통해 구하였다. 사용된 자료는 일본 기상청의 GPV (grid point value)자료이고 09시와 21시에 700 hPa, 850 hPa 및 1,000 hPa 세 등압면상에서 역궤적선을 구하였다. GPV자료는 전 세계에 불규칙하게 위치하고 있는 각 고층관측소 데이터를 입력 자료로 하여 수치모델을 이용하여 표준 등압면상에서 공간적으로 위·경도 2.5° 간격으로 격자점 데이터를 만든 것이다. 현재 GPV자료는 표준등압면상에서 00GMT, 12GMT로 제공되고 있다. GPV 데이터를 이용하여 궤적선을 계산하는데는 3시간 간격으로 시간과 위치에 대해 선형 내삽법(Linear interpolation)을 사용하였다. 사용된 알고리즘은 NOAA의 GAMBIT (gridded atmospheric multilevel backward isobaric trajectories) Model을 토대로 하여 만들었다(Harris, 1982).

김용표 등(1996)은 제주도 고산에 도달한 기류의 이동 경로와 발원지를 조사하기 위해 한반도 주변을 중심

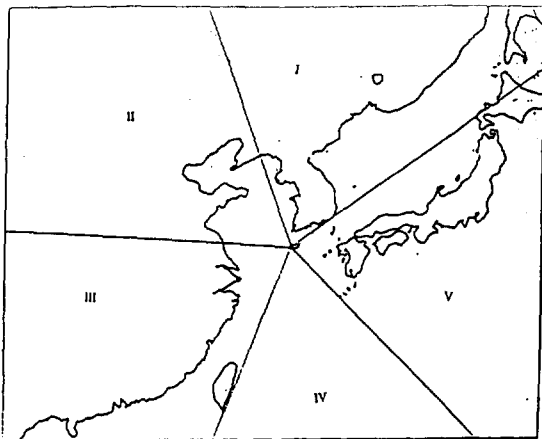


Fig. 5. Sectors used in air parcel trajectory analysis, I : Korean Peninsula, II: Northern China, III: Southern China, IV: Pacific, V: Japan.

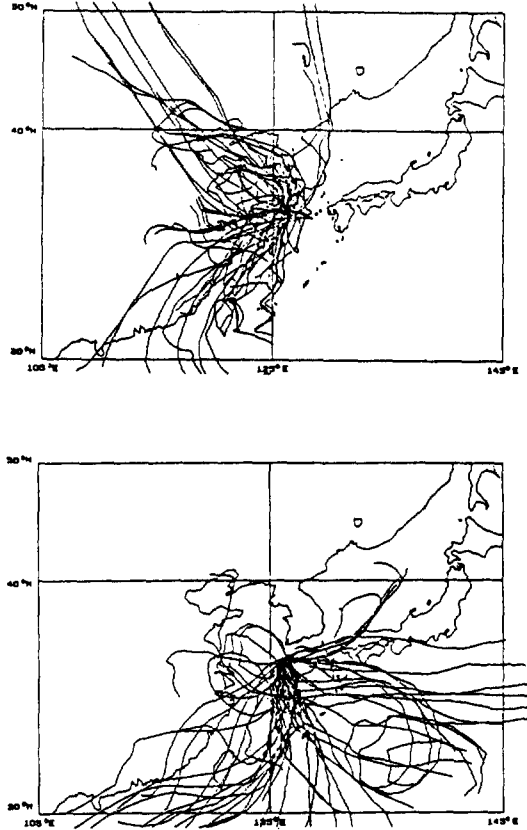


Fig. 6. Air mass backward trajectories of 850 hPa in April (upper) and in August (lower) arriving at Kosan.

으로 동북아시아 지역을 다섯구역으로 나누었다(그림 5). 이 구역의 구분은 강동근 등(1993)에 의해서 한반도에 영향을 줄 수 있는 오염 발원지별로 잘 구분된 것으로 판단되어 본 연구에서도 이를 기준으로 기류의 이동 경로를 나누었다. 850 hPa의 등압면에서 4월 4일~29일(26일간)과 8월 4일~29일(26일간) 역궤적선을 분석하였다(그림 6). 이들 기류를 고산에 도달하기 1일전, 2일전, 3일전 및 4일전 기류의 위치를 구역별로 조사하였다(표 6).

그림 6과 표 6에 의하면 4월의 역궤적선은 중국남부(구역 III)를 경유해서 고산에 유입되는 경우가 50% 이상이고 나머지는 중국 북부(구역 III)를 경유한 경우 및 한국(I)을 경유한 경우 그리고 태평양(IV)을 경유한 경우의 순으로 나타났다. 4월 중에는 일본을 경유한 경우는 없었다. 8월의 경우는 태평양(구역 IV)을 경유한 경

**Table 6. Distribution of air parcel trajectories arriving at Kosan by sector on April (upper) and August (lower).**

Section	Number of Trajectories*(% of total)			
	1 day prior	2 days prior	3 days prior	4 days prior
I . Korea	9(17)	9(17)	8(15)	4( 8)
II . Northern China	10(19)	10(19)	12(23)	17(33)
III . Southern China (including Taiwan)	28(54)	28(54)	28(54)	26(50)
IV . Pacific	5(10)	5(10)	4( 8)	5(10)
V . Japan	0( 0)	0( 0)	0( 0)	0( 0)

\* : Number of total trajectories is 52.

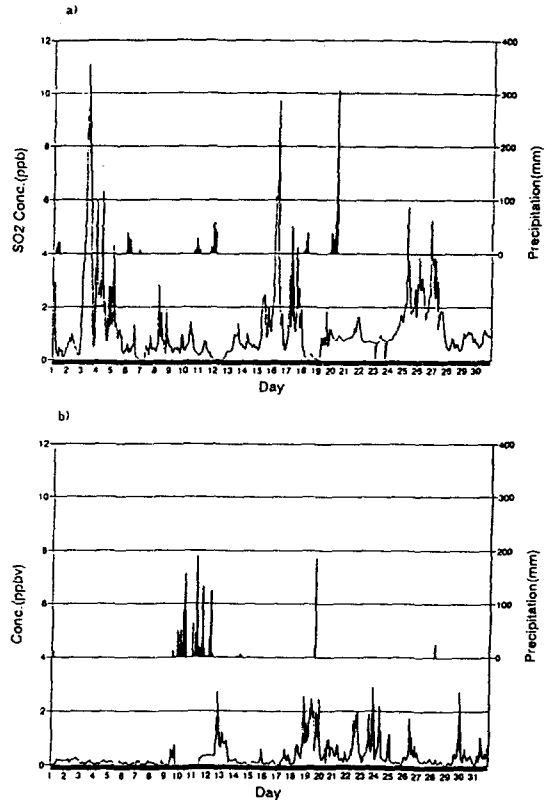
Section	Number of Trajectories*(% of total)			
	1 day prior	2 days prior	3 days prior	4 days prior
I . Korea	0( 0)	0( 0)	0( 0)	0( 0)
II . Northern China	0( 0)	0( 0)	0( 0)	1( 2)
III . Southern China (including Taiwan)	14(27)	14(27)	15(29)	13(25)
IV . Pacific	24(46)	25(48)	27(52)	28(54)
V . Japan	14(27)	23(25)	10(19)	10(19)

\* : Number of total trajectories is 52.

우가 거의 50% 정도이고 나머지는 중국 남부(II)와 일본(V)을 경유한 경우의 순이었다. 이러한 현상은 4월의 경우는 봄철이 편서풍 기간대이고, 우리나라가 편서풍대의 풍하측에 위치하고 있음과 연관된 결과이고, 8월의 경우는 우리나라가 여름철에 북태평양 기단의 유입 영향을 받음으로 인한 결과이다.

그림 7은 4월(a)과 8월(b)의 SO<sub>2</sub> 농도의 시계열과 강우 정도를 같이 나타내었다. 4월과 8월의 역궤적선 중에서 장거리 이동 분석을 위해서 유의한 날짜의 역궤적선을 그림 8과 그림 9에 각각 제시하였다. 여기서는 850 hPa 등압면상의 역궤적선을 대상으로 분석하였다.

4월의 경우(그림 7(a)와 그림 8), 강수가 있었던 날인 6일(09시), 11일(09시), 18일(21시), 20일(09시)은 그 풍향이 각각 중국남부, 중국남부, 태평양, 중국남부이었지만 풍향에 관계없이 대부분 SO<sub>2</sub> 농도가 낮았다. 이는 강수에 의해 SO<sub>2</sub>가 세정되어 없어지기 때문으로 생각된다. 4월중 강수일과 비강수일의 SO<sub>2</sub> 농도는 각각 0.46 ppb, 1.40 ppb로써 비강수일이 강수일에 비해 3배 이상 높았다. 4월중 가장 높은 농도일인 3일은 역궤적선분석 데이터가 없지만 4일(09시)과 16일(09시)은 그림 8에서 보인 바와 같이 중국남부(구역 III)를

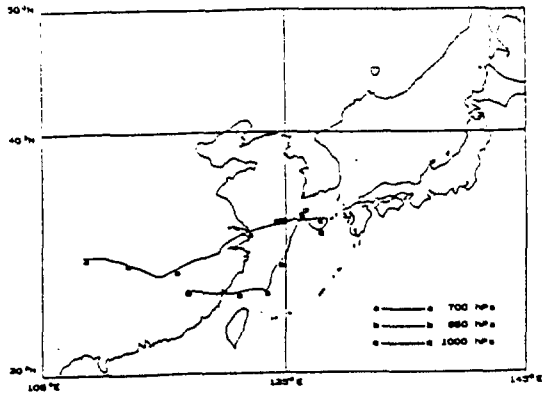


**Fig. 7. Time series of SO<sub>2</sub> concentration and precipitation in April (a) and in August (b) at Kosan, upper bar: precipitation, lower solid line: SO<sub>2</sub> concentration.**

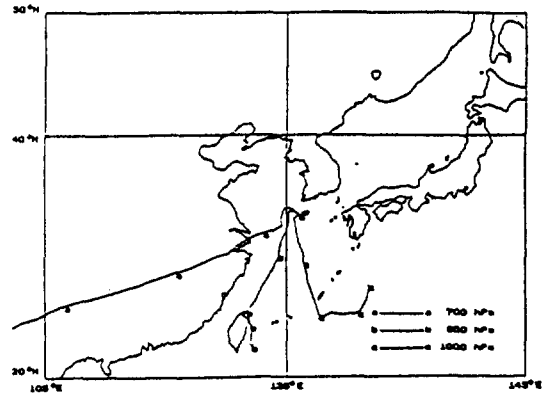
경유해서 고산에 유입된 경우이고, 두 번째 높은 농도를 보인 25일(09시)~27일(09시)은 중국북부(구역 II)와 한반도를 경유해서 고산에 유입된 경우이다. 강수일을 제외하고 저농도를 보인 19일(09시)은 태평양(구역 IV)을 경유해서 고산에 유입된 경우이다. 따라서 4월의 높은 농도일은 공기기가 주로 중국 북부와 중국 남부 및 한반도로부터 고산에 유입되고 있음을 알 수 있다.

8월의 경우(그림 7(b)와 그림 9)도 4월과 마찬가지로 강수가 있었던 날인 9일(09시)~10일(09시), 11일(09시)~12일(21시), 14일(21시), 28일(09시)은 그 풍향이 각각 태평양-중국남부, 한반도-일본, 중국남부, 태평양이었지만 풍향에 관계없이 대부분 SO<sub>2</sub> 농도가 낮았다. 8월중 높은 농도일인 13일(09시), 19일(21시), 22일(21시), 24일(09시)은 일본(구역 V)을 경유해서 고산에 유입된 경우이고 저농도일인 4일(09시)

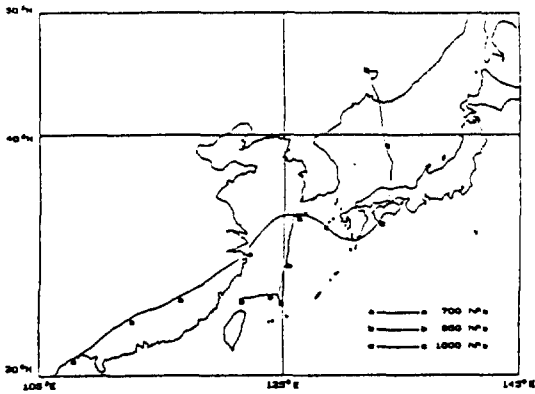




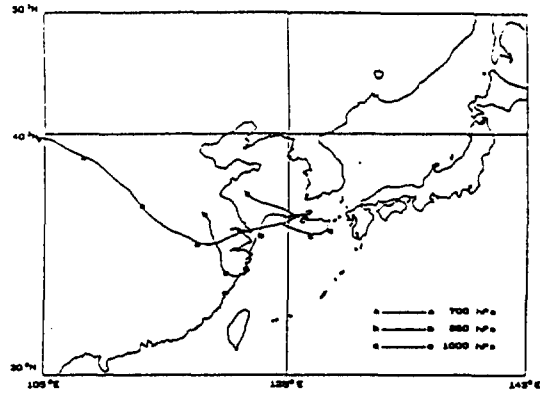
(a)



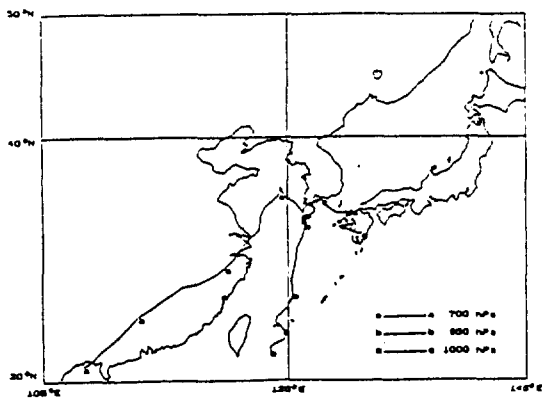
(b)



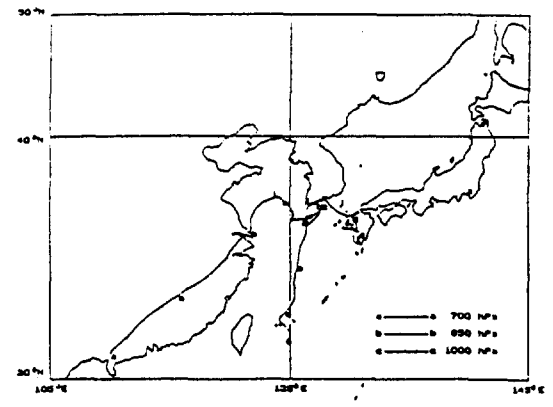
(c)



(d)

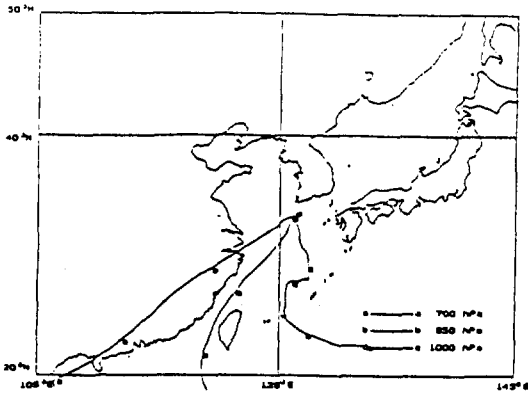


(e)

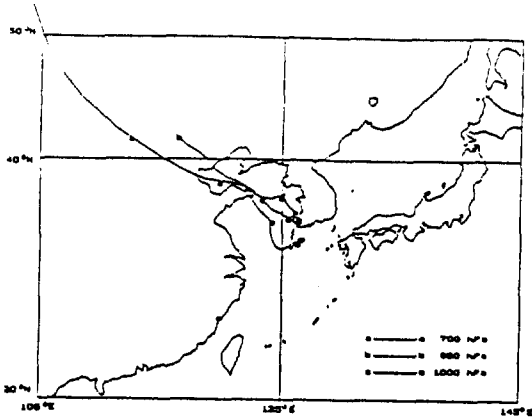


(f)

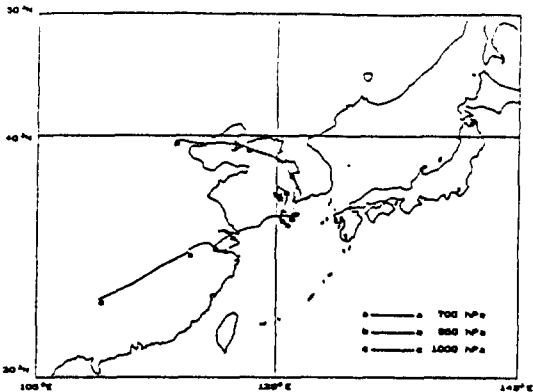
Fig. 8. Air mass backward trajectories on 4:09h (a), 6:09h (b), 11:09h (c), 16:09h (d), 18:21h (e), 19:09h (f), 20:09h (g), 26:09h (h), 27:09h (i) April.



(g)



(h)



(i)

Fig. 8. Continued.

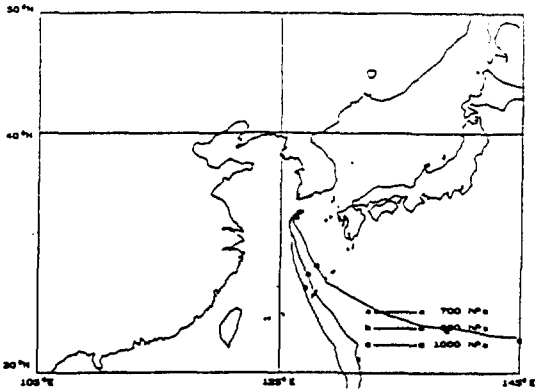
~9일(09시)과 15일(21시) 등은 태평양(구역 IV)을 경유해서 고산에 유입된 경우이다. 또한 19일(21시)의 경우는 강수일이었지만 높은 농도를 보인 것은 기류가 일본쪽으로부터 유입되었기 때문으로 추측된다. 즉, 8월의 SO<sub>2</sub> 농도는 그 절대량은 적지만 상대적으로 높은 농도일의 SO<sub>2</sub>는 주로 일본쪽으로부터 유입되고 있음을 알 수 있다. 따라서 고산의 SO<sub>2</sub> 농도에는 중국뿐만 아니라 한반도 및 일본으로부터도 유입된다고 판단된다. 그러나 이동경로에 따른 정량적인 SO<sub>2</sub> 유입량은 발원지 곧 인접한 일본, 중국 및 한반도의 SO<sub>2</sub> 농도 자료가 동시에 분석되어야 가능하며 따라서 이들 자료의 확보가 요구된다.

#### 4. 결 론

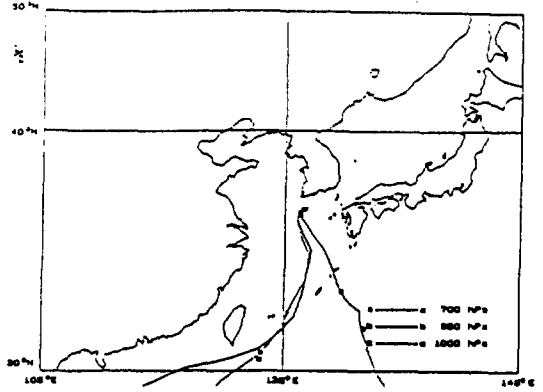
본 연구에서는 여러 기관과 협동으로 제주도 고산에서 1994년 1월 1일부터 1994년 12월 31일까지 SO<sub>2</sub>를 측정하여 SO<sub>2</sub> 배경농도의 특성과 오염원의 장거리 이동 경로를 분석하였다. 고산의 SO<sub>2</sub> 농도는 1년중 봄철에 최고 농도 1.02 ppb, 여름철에 최저 농도 0.46 ppb, 연평균 0.83 ppb로 버뮤다나 오키 섬보다는 4~7배 높았다. 또한 국지 기상 요소와의 상관성은 거의 없었고 일변화 경향은 아주 낮을뿐만 아니라 최대값이 나타나는 시간도 봄·가을에는 오전 10시경, 여름철에는 오후 2시경, 겨울철에는 오후 1시경이어서 고산 지역의 인위적인 오염원에 의한 영향보다는 외부로부터 유입되었을 가능성이 크다는 것을 짐작 할 수 있다.

역계적선 분석 결과와 연중 봄철의 최고 농도와 여름철의 최저 농도는 기류 유입 경로의 차이 때문이라고 분석되었다. 즉 기류가 봄철에는 주로 오염원이 산재한 중국 및 한반도 즉, 대륙으로부터 유입되고 여름철에는 청정한 북태평양쪽으로부터 유입되기 때문이다. 또한 봄철의 고농도일은 주로 기류가 중국 남부와 중국 북부 및 한반도를 경유해서 유입된 경우이고 여름철의 고농도일은 그 양은 적지만 일본쪽으로부터 유입된 날이었다. 따라서 고산의 SO<sub>2</sub> 농도에는 중국뿐만 아니라 한반도 및 일본으로부터도 유입된다고 판단된다.

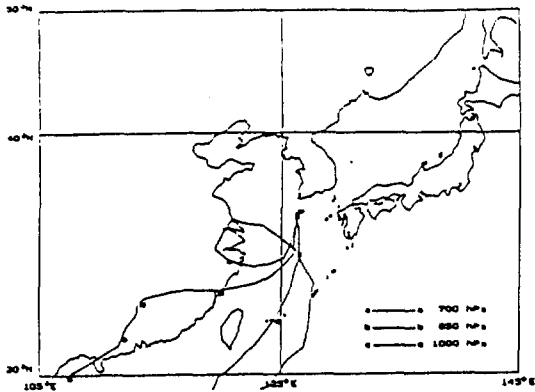
대기오염 배경 농도 연구는 계속되는 산업화로 인한 지구대기 화학성분의 변화와 그 영향 연구를 위해서 앞으로도 더 많은 측정소의 증설과 계속적인 데이터의 축적으로 인한 장기간의 데이터 분석이 요구된다. 또한 동북아시아 지역에서의 대기오염 물질의 장거리 이동량을 정량적으로 파악하기 위해서는 이들 배경 농도뿐만 아니라 발원지라고 추측되는 인접한 중국, 한반도 및 일본의



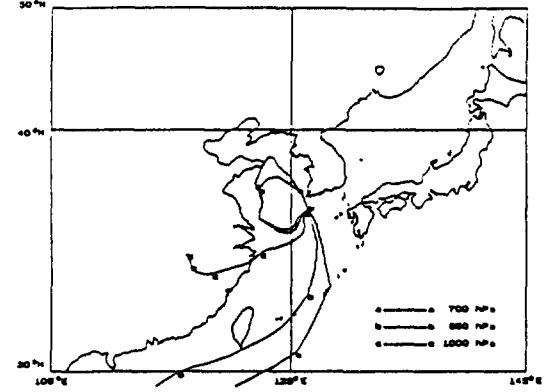
(a)



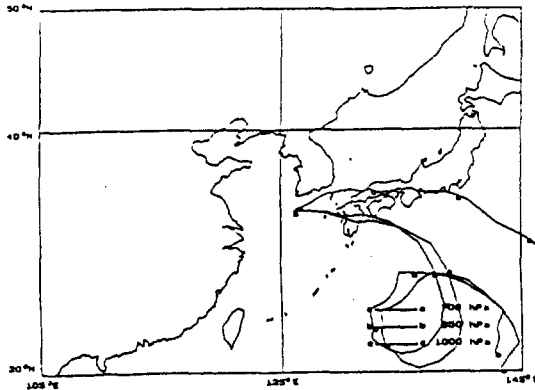
(b)



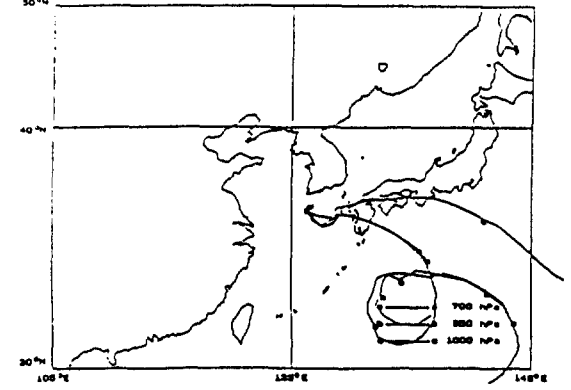
(c)



(d)

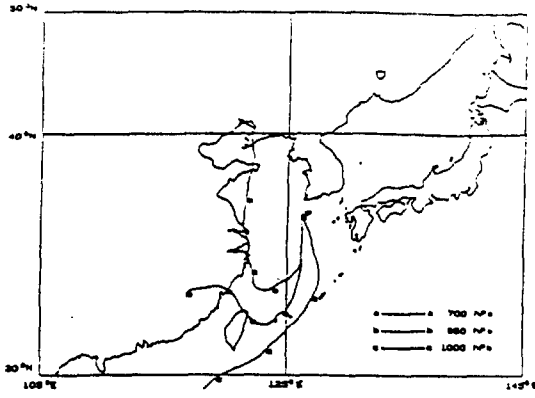


(e)

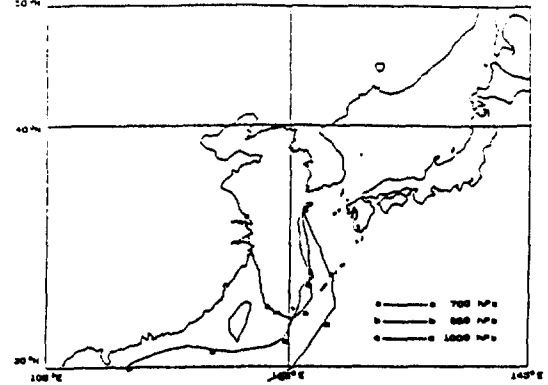


(f)

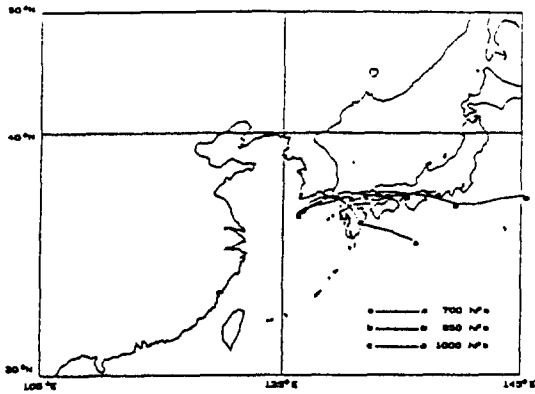
Fig. 9. Air mass backward trajectories on 4:09h (a), 9:09h (b), 10:09h (c), 11:09h (d), 12:21h (e), 13:09h (f), 14:21h (g), 15:21h (h), 19:21h (i), 22:21h (j), 24:09h (k) August.



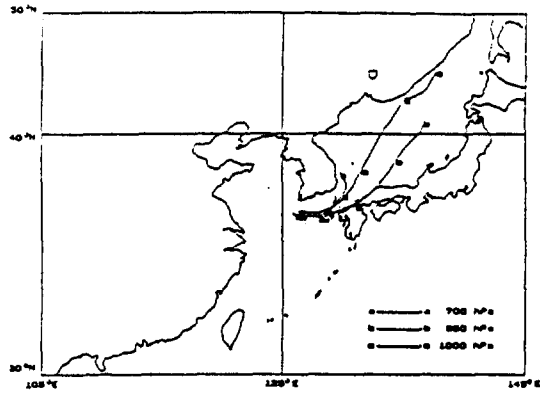
(g)



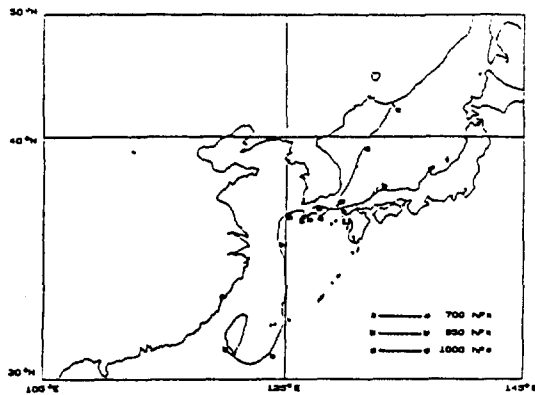
(h)



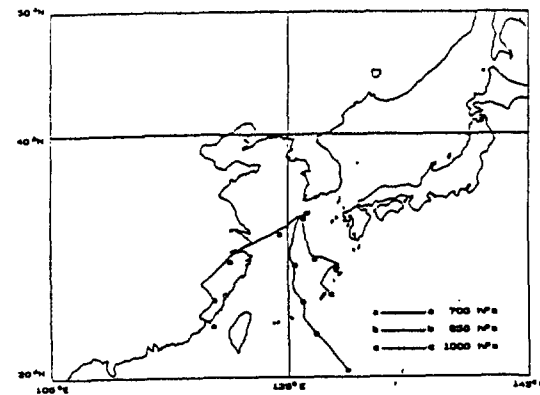
(i)



(j)



(k)



(l)

Fig. 9. Continued.

농도 자료를 이용한 분석이 필요하고 궁극적으로 대기 오염 물질의 장거리 이동량의 예측을 위해서는 이들 자료를 입력 데이터로 한 3차원 광화학 모델을 이용하여야 할 것으로 판단된다.

**감사의 글**

이 논문은 과학기술처의 지원에 의한 시스템공학연구소 출연연구소사업(과제번호 N21931)으로 작성되었습니다. 고산 측정소 관리에 힘써 주신 제주대학교 강충민 학생에게 감사를 드립니다.

**참 고 문 헌**

강동근, 김선태, 김정욱(1993) 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.

김영성, 손재익(1992) ISCLT에 의한 서울지역의 SO<sub>2</sub> 오염도 조사, 한국대기보전학회지, 8(2), 128-137.

김용완, 김준연, 이채연, 전진호, 문덕환, 신태립, 이종태, 이명철, 김성천, 배기택(1986) 부산의 대기오염조사, 예방의학회지, 19(2), 252-262.

김용표, 심상규, 문길주, 백남준, 김성주, 허철구, 강창희(1995) 제주도 고산 지역 입자 특성: 1994년 3월 11일~17일 측정 결과, 한국대기보전학회지, 11(3), 263-272.

김용표, 박세욱, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희(1996) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구:(I) 입자상 오염 물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12(1), 79-90.

김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구(1996) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구:(II) 기체상 대기 오염물질의 특성, 한국대기보전학회지, 12(1), 91-99.

나진균(1989) 도심지역에서의 풍속에 따른 SO<sub>2</sub> 농도 변화, 한국대기보전학회지, 5(2), 97-105.

박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.

박일수, 이덕길, 강인구(1991) 서울지역 겨울철 SO<sub>2</sub> 농도를 지배하는 기상 인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96-104.

서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1995) 청정지역과 도시지역의 오존 농도

특성 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 253-262.

신찬기, 한진석, 김윤신(1992) 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 213-220.

윤순창(1992) 한반도의 대기 오염 분석 결과, 한반도의 국지기상 특징과 대기환경 Workshop 자료집, 서울대학교 자연과학대학 대기환경연구소.

이상인, 조석연, 심상규(1994) STEM II를 이용한 한국과 중국동부 지역의 대기 오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구: I. 입력자료작성과 모델 검증, 한국대기보전학회지, 10(4), 260-280.

이상인, 조석연, 심상규(1995) STEM II를 이용한 한국과 중국동부 지역의 대기 오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구: II. 한·중간 SO<sub>2</sub>와 sulfate의 이동에 관하여, 한국대기보전학회지, 11(2), 163-170.

전종갑(1991) 대기오염물질 수송과 관련된 동북아시아 상층대기의 순환특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 27(2), 180-196.

전병일, 김유근, 이화운(1994) 부산 지역의 SO<sub>2</sub> 농도 변화 특성에 관한 고찰, 한국대기보전학회지, 10(4), 245-251.

정용승, 김태근(1991) 대기오염의 장거리 이동 사례연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 197-202.

정용승, 이근준(1992) 태안반도에서 관측된 CH<sub>4</sub>의 지역적 배경농도에 관한 연구, 한국환경과학회지, 1(2), 33-48.

홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경윤(1992) 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 257-261.

Akimoto, H. and H. Narita(1994) Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, Atmospheric Environment, 28(2), 213-225.

Delmas, R., J. Baudet, and J. Servant(1978) Mise en evidence des sources naturelles de sulfate en milieu tropical humide, Tellus, 30, 158-168.

Fischer, W.H., J.P. Lodge, jr., A.F. Wartburg, and J.B. Pate(1968) Estimation of some atmospheric trace gases in antarctica, Environ. Sci. Technol., 2, 464-466.

Georgii, H.W.(1970) Contribution to the atmospheric sulfur budget., J. Geophys. Res.,

- 75, 2365-2371.
- Harris, J.M.(1982) The GMCC atmospheric trajectory program, NOAA Technical Memorandum, ERL ARL-166, U.S.A.
- Hastie, D.R., H.I. Schiff, D.M. Whelpdale, R.E. Peterson, W.H. Zoller, and D.L. Anderson(1988) Nitrogen and sulfur over the Western Atlantic Ocean, Atmospheric Environment, 22, 2381-2391.
- Hatakeyama, S.(1993) Data of '91 IGAC/APARE/PEACAMPOT Survey, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Hatakeyama, S.(1994) Data of '92 IGAC/APARE/PEACAMPOT Survey, National Institute for Environmental Studies, Japan.
- Lefohn, A.S.(1991) Ozone, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide trends at rural sites located in the United States, 25A(2), 491-501.
- Lodge, J.P., P.A. Machado, J.B. Pate, D.C. Sheesley, and J.A. Wartburg(1974) Atmospheric trace chemistry in the American humid tropics, Tellus 26, 250-253.
- Miller, D.F. and M. Flores(1991) Sulfur dioxide concentrations in Western U.S., Atmospheric Environment, 26A(2), 345-347.
- Mizoguchi, T., M. Kunugi, and M. Nishikawa(1985) Background air pollution measurements and selection of background sites in Japan, National Institute for Environmental Studies, Japan, No. 79, 9-19.
- Serrano, E., E. Zurita, and M. Castro(1989) Analysis of the annual trend in SO<sub>2</sub> and particulate matter emissions in Madrid (Spain), 23(3), 631-642.
- TECO Model 43S(1989) Pulsed fluorescent ambient SO<sub>2</sub> analyzer: Instruction manual.