

1999년 기류의 이동궤적에 따른 우리 나라 주요 도시의 일산화탄소 농도 변화

Influences of Air Trajectories on the Variations of Carbon Monoxide in Major Cities in Korea for the Year of 1999

김 영 성* · 김 영 주 · 김 진 영
한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(2001년 6월 5일 접수, 2001년 10월 29일 채택)

Young Sung Ghim*, Young Joo Kim and Jin Young Kim
Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology
(Received 5 June 2001; accepted 29 October 2001)

Abstract

Backward trajectories were calculated from five urban areas in Korea in 1999 in order to assess the effects of long-range transport on the air quality variations on an annual basis. The five areas selected were Seoul, Mokpo, Cheju, Pohang, and Kangnung, which are evenly distributed along the shoreline in Korea. Meteorological fields used in the work were prepared by the Korea Meteorological Administration using the RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) with grid spacing of 40 km and 12-h intervals (0000 and 1200 UTC). Upwind regions around the Korean Peninsula were divided into five sectors including the region to the northeast (I), northern China (II), southern China (III), the northwestern Pacific (IV), and Japan (V). The influence of air flow from these sectors on the variations of carbon monoxide concentrations in the selected areas was investigated. The results showed that the influences of Sectors II and III were persistent although some influences of adjacent sectors were observed according to the location of the areas. In general, the concentration of carbon monoxide tended to go up under the influence of Sectors II and III but tended to go down under the influence of Sector I. However, the influences of other sectors were rather mixed. The importance of the long-range transport was examined when the whole country was uniformly influenced by Sectors II and III with strong synoptic winds. The effects of long-range transport were large in Mokpo and Cheju, close to Sectors II and III, where the local emissions were considered small. The effects of local emissions were significant in Pohang and Seoul; such effect was more distinct in Pohang located farther from Sectors II and III.

Key words : backward trajectories, long-range transport, sector analysis, local emissions, carbon monoxide

* Corresponding author
Tel : + 82-(0)2-958-5817. E-mail : ysghim@kist.re.kr

1. 서 론

한반도를 중심으로 한 동북아시아는 좁은 지역에 대기오염물질 배출이 밀집되어 있어 대기오염물질의 월경이동 가능성에 대한 관심이 높은 지역이다. 특히 우리 나라는 중위도 편서풍 지대에 위치하여 400~500 km 서쪽에 자리한 중국에서 발생한 대기오염물질이 편서풍과 함께 이동하며 영향을 미치기 쉽다. 중국의 배출 실태를 살펴보면, 1990년대 중반 현재 아황산가스 1,900만톤, 질소산화물 970만톤으로 각각 러시아 동북부와 몽골을 포함하는 동북아시아 지역 배출의 85%, 70%를 차지하고 있으며, 1988년에는 두 물질 모두 미국에 이어 2위를 기록하였다(김용표, 1999; Roser and Gilmour, 1995). 이에 따른 피해도 막대하여 중국에서는 매년 30만명이 대기오염으로 사망하고 전 국토의 30%가 산성비에 의하여 피해를 입는 것으로 추정되고 있다(Hajari, 1999).

우리 나라의 대기환경이 외부의 영향에 민감함을 보여주는 사례는 적지 않다. 이상인 등(1995)은 한반도에 서풍이 지배적이었던 1989년 11월 하순의 동북아 지역을 모델링하며, 한반도 SO₂와 황산염 변화의 85%가 중국 배출의 영향 때문으로 추정하였다. 김용표 등(1996b)은 1994년 7월 20일부터 8월 10일까지 제주도 고산에서 미세입자 성분을 분석한 결과 7월 20일부터 8월 1일까지는 한반도나 일본으로부터 기류가 유입되어 인위적 배출의 영향이 큰 반면, 8월 2일부터는 북태평양으로부터 기류가 유입되면서 입자 농도와 함께 비해염 황산염 등 오염성분의 농도가 크게 떨어짐을 관찰하였다. 오현선과 김영성(1999)은 1994년 8월 고농도 사례를 분석하면서, 8월 18일 이후 광화학 반응에 이상적인 기상조건이 지속되었음에도 한반도 북동부로부터 깨끗한 공기가 유입되어 오존농도가 상승하지 못하다가 22일 이후 종관풍의 영향이 약해지면서 오존농도가 높아지는 것으로 추정하였다.

한반도에 대한 외부의 영향은 이상인 등(1995)과 같이 동북아 지역에 대한 대기질 모델링을 통하여 가장 정확하게 전반적 내용을 파악할 수 있다. 그러나 미국 NASA 등의 지원으로 실시된 1990년대

중·후반 PEM-West (Pacific Exploratory Mission-West) A, B (Hoell *et al.*, 1996, 1997) 이래 최근의 China-MAP (The Yangtze Delta of China As An Evolving Metro-Agro-Plex; Chameides, 2000)에 이르기까지 여러 시도가 있었음에도 불구하고 중국과 연계된 대기오염물질 배출은 아직 상당 부분이 명확하지 않다(Streets, 2000). 이에 따라 많은 연구자들은 기상변수만을 이용하는 역궤적 분석을 통하여 오염물질의 이동을 추적함으로써 한반도에 대한 외부의 영향을 추정하고 있다(예를 들면, 김용표 등, 1996a, b; 장광미 등, 1996; 전영신 등, 1994; 강동근 등, 1993; 정용승과 김태군, 1991).

본 연구 역시 현실적으로 가능한 최선의 수단 중 하나로써 역궤적 분석을 통하여 한반도에 대한 오염물질 장거리 이동의 영향을 조사하고자 하였다. 역궤적 분석을 실시한 대부분의 연구가 특정 사례를 대상으로 하였거나, 그렇지 않은 일부 연구는 이동 궤적만을 살펴보았을 뿐 이를 오염도 변화와 연관짓지는 않았다(강동근 등, 1993). 그러나 Ghim and Chang (2000)은 1990년부터 1995년까지 우리나라의 오존농도 분포를 분석하며 1990년대 초반 여수 지방의 연평균 오존이 높은 것은 인접한 아시아 대륙 배출의 영향 때문이고, 강릉의 오존의 연중 변화 폭이 좁을 뿐 아니라 농도가 낮은 것은 오염원으로부터 멀리 떨어진 북동부 청정지역의 영향을 받은 때문으로 해석하는 등 외부의 영향으로 인하여 지역별 오염 특성이 달라질 수 있음을 주장하였다.

이에 따라 본 연구에서는 1999년 1년을 대상으로 계절별로, 한반도 내 고루 분포된 서울 등 5개 지역에 도달하는 기류의 이동 궤적을 조사함으로써 지역별, 계절별 오염물질의 이동 특성을 살펴보았다. 동북아시아 지역을 5개 구역으로 구분하여 기류이동 궤적의 분포를 알아보았으며, 지역의 오염물질 농도 변화와의 연관성, 지역별 장거리 이동과 국지 배출의 영향을 조사하였다. 지역의 대기환경에 대한 장거리 이동의 영향은 이동 경로에 따라 반응성이 작은 일산화탄소의 농도 변화를 통하여 살펴보았는데, 지역별 계절별로 편차가 클 수 있으므로 이들을 같은 조건에서 비교하기 위하여 지역별로 계절 평균에 대한 차이를 분석하였다.

2. 분석 방법

2.1 분석대상 지점의 선정

한반도에 도달하는 기류의 지역적 차이를 분석하기 위하여 역궤적의 출발지점으로써 그림 1과 같이 5개 지점을 선정하였다. 이와 같은 지점들은 외부의 영향을 효과적으로 알아볼 수 있도록 해안을 따라 적절히 분포되어 있다는 사실 외에도 각각 다음과 같은 특징들을 지니고 있다. 서울은 우리 나라의 수도로 배출 밀도가 가장 높은 곳이고, 목포는 국지 배출이 많지 않음에도 오존의 연평균 농도가 높아 오염물질 장거리 이동의 영향이 큰 것으로 추정되는 곳이다(김영성, 2000). 제주시로부터 남서쪽으로 약 40 km 떨어진 고산은 김용표 등(1996a, b)과 장광미 등(1996)에서 볼 수 있는 것과 같이 국지 배출이 거의 없어 우리 나라에서 오염물질의 장거리 이동 연구에 가장 이상적인 곳의 하나이다. 포항에서는 1994년 이후 매주 1회 오존의 수직분포를 측정하고 있어 한반도 상공의 광화학 오염물질 이동에 관한 유용한 정보를 제공할 수 있다(기상청, 2000). 강릉은 이미 언급한 바와 같이 한반도 동북부의 영향으로 인하여 연간 오존농도가 낮은 것으로 추정되는 지점이다(Ghim and Chang, 2000).

2.2 자료 이용 및 역궤적 계산

역궤적 분석을 위한 기상 자료로는 기상청에서 제공한 1999년 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System; InterMet, 2001) 자료 중 0000 UTC (coordinated universal time, 0900 LST)와 1200 UTC (2100 LST)의 기온, 상대습도, 바람성분(u, v)의 고도별 값을 이용하였다. RDAPS는 한반도를 포함한 동북아시아 영역을 대상으로 한 수치 모델로, 수평방향으로는 격자 간격 40 km의 105 × 121 격자를, 수직방향으로는 100 hPa까지 총 22개의 층으로 나누어 기상변수를 산출한다. 그림 1에서 가장 가까운 목포-제주의 거리가 약 150 km이므로 수평방향의 격자 간격 40 km는 그림 1의 출발 지점들을 충분히 다른 지점으로 인식할 수 있을 만큼 상세하다.

역궤적은 그림 1의 각 지점으로부터 매일 0000 UTC에 출발하여 4일간의 궤적을 역으로 추적하였다. 궤적의 추적에는 NOAA (National Oceanic and

Atmospheric Administration)의 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectories; Draxler, 2000) Version 4.4를 이용하였다. 역궤적 출발 고도는 10 m, 1,500 m, 3,000 m를 시험하였으나 10 m는 국지 영향이 너무 강하고, 우리 나라의 경우 3,000 m는 경계층 위로 지표 부근 대기환경과 연관성이 상대적으로 작다고 생각되어 실제 분석은 1,500 m에서 출발한 궤적을 이용하였다.

2.3 구역 구분

그림 1과 같이 한반도 주변 영역을 5개 구역으로 나누어 이들로부터 기류 이동이 우리 나라에 미치는 영향을 구분하였다. 그림 1의 구역 구분은 한반도를 중심으로 역궤적 분석을 시도하였던 앞서의 연구들과 크게 다르지 않다. 강동근 등(1993)은 서울을 기점으로 한반도 주변 영역을 6개로 구분하였는데, 그림 1의 II, III 구역을 북경/요녕성, 산둥성, 상해 지구의 셋으로 구분하였으며, IV, V 구역이 조금씩 시계바늘 반대방향으로 이동하며 면적이 좁아졌다. 김용표 등(1996a)과 장광미 등(1996)의 구역 구분은 제주도 고산을 기점으로 함에 따라 약간의 차이가 있으나 그림 1과 거의 유사하다. 우리 나라 배출의 영향도 적지 않을 것으로 생각되어 한반도를 중심으로 VI 구역을 설정하는 방안을 검토하였으나 역궤적의 출발이 1,500 m로 대부분 지표면의 배출이 직접적으로 영향을 미치기에는 높은 고도로 판단되어 구역을 별도로 설정하지 않았다.

앞선 연구들이 역궤적 출발 지점을 중심으로 구역을 구분하였던데 비하여 본 연구에서는 한반도 중앙을 기점으로 구역 구분을 고정하였다. 후자의 경우 출발 지점이 일정 구역에 속함으로써 그 구역의 영향이 강조될 것을 예상할 수 있다. 그러나 뒤에서 설명하겠지만, 12시간 간격으로 궤적을 추적한 본 연구에서는 그 영향은 무시할 수 있다고 인정되어 궤적의 출발 지점에 관계없이 구역별 특성을 특징짓기 용이하도록 구역 구분을 고정하였다. 앞선 연구들을 토대로 구역 특성을 알아보면, I 구역은 대부분 산지로 오염원이 거의 없어 북서태평양의 IV 구역을 제외하고는 가장 깨끗하다(Akimoto *et al.*, 1996; 강동근 등, 1993). 중국의 II 구역과 III 구역은 오염이 가장 심하나 남부의 III 구역으로부터 유입되는 공기가 북부의 II 구역으로부터 유입되는 공기

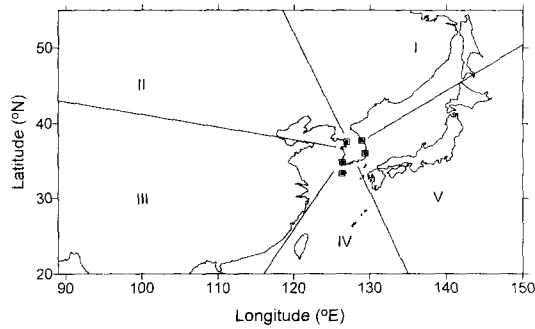


Fig. 1. Location of target areas in Korea and sector division of the upwind regions for the backward trajectory analysis. The target areas where the backward trajectories were started are, from the northwest, Seoul, Mokpo, Cheju, Pohang and Kangnung, counterclockwise.

보다 오염이 심한 것으로 보고되고 있다(김용표 등, 1996a, 1998). 일본의 V 구역에도 II, III 구역보다는 적으나 상당수의 오염원이 산재하고 있다.

2.4 결과 분석

지금까지의 연구를 토대로 그림 1의 구역을 깨끗한 구역부터 배열하면, IV, I, V, II, III 순서를 예상할 수 있다. 만일 그림 1에 표시된 우리나라 대상 지점에서 국지 배출의 영향을 무시할 수 있다면 이들 지점의 오염물질 농도는 이들 지점에 도달하는 궤적이 어느 구역으로부터 유래하였느냐에 따라 결정된다. 그러나 이들 지점은 도시지역으로 자체 배출의 비중이 작지 않다. 이와 같이 지점을 선정할 것은 앞에서 이미 설명한 것과 같이 공간 분포와 함께 각 지점별 특징 때문이지만, 도시지역을 선택함으로써 별도 측정을 하지 않아도 환경기준 초과를 감시하기 위한 측정망 자료를 이용할 수 있다는 장점이 있다.

1999년 현재 서울은 27개, 포항은 2개, 목포, 제주, 강릉은 각각 1개의 측정소에서 환경기준 대기오염 물질을 측정하고 있다. 본 연구에서는 앞서도 언급한 것과 같이, SO₂ 등 5개 기준물질 중 반응성이 가장 작은 가스상 오염물질로써 일산화탄소 농도를 분석하여 이에 대한 오염물질 장거리 이동의 영향을 조사하였다. 그러나 우리나라 일산화탄소 농도가 대부분 환경기준보다 월등히 낮다 하여도 차량이 주 배출원으로써 지역의 기상 특성에 따라 지역

별 계절별로 국지변화가 있을 수 있다(김영성 등, 2001). 따라서 본 연구에서는 이의 영향을 배제하기 위하여 농도값을 직접 이용하는 대신, 지역별로 계절 평균을 산출한 후 농도값에서 계절 평균을 뺀 차이를 분석하였다.

2.5 강수의 영향

본 연구에서는 기류의 이동궤적에 따른 일산화탄소 농도 변화를 조사하였으며, 이는 우리나라에 대한 오염물질 장거리 이동의 영향을 알아보기 위한 것이다. 그러나 잘 알려진 바와 같이 강수는 세정 작용을 통하여 대기 중 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있다(Poster and Baker, 1997). 이에 따라 표 1에서는 지역별로 강수일과 비강수일의 계절 평균에 대한 일산화탄소 농도 차이를 표시하였다. 이 때 강수일은 하루 중 강수량이 3mm 이상인 날을 의미하며, 지역별로는 제주가 다소 많고, 계절별로는 여름에 빈번하나 날 수로 대략 20% 정도이다. 편차가 크기는 하나 강수일의 농도가 기타일보다 대체로 낮다. 그러나 일산화탄소의 물에 대한 용해도는 이산화탄소에 비하여서도 약 1/40로 작아(Lide and Frederikse, 1993), 강수의 효과는 그리 크지 않다. 포항의 경우는 오히려 강수일에 일산화탄소 농도가 높는데 강수일의 기상 조건과의 연관성 등을 생각할 수 있으나 명확하지는 않다.

강수일에 대하여 다음과 같은 3가지 선택이 가능하다. (1) 강수의 영향이 크지 않으므로 무시한다. 이 경우 어떤 구역으로부터 기류가 이동될 때 강수가 많아 농도가 낮아졌다면 이 역시 그 구역의 특성으로 분류되게 된다. (2) Mukai and Suzuki(1996)가 에어로솔 분석 때 이용한 것과 같이 기류 이동 과정의 세정 효과를 계산하여 이를 감안한다. 그러나 강

Table 1. Annual mean differences of CO concentrations (ppm) from the seasonal averages on rainy days in comparison with those on non-rainy days.

Classification	Seoul	Mokpo	Cheju	Pohang	Kangnung
Rainy days ^a	-0.078 (0.281) ^b	-0.019 (0.561)	-0.017 (0.292)	+0.077 (0.422)	-0.031 (0.080)
Non-rainy days	+0.014 (0.346)	+0.004 (0.428)	+0.005 (0.379)	-0.016 (0.458)	+0.006 (0.131)

^a Daily precipitation is 3 mm or higher.
^b Numbers in the parentheses indicate the standard deviation.

수의 효과가 크지 않은 상황에서 이와 같은 과정이 얼마나 효과가 있을지 장담하기 쉽지 않다. (3) 강수량이 3 mm 이상인 날을 분석 대상에서 제외함으로써 불확실성을 제거한다. 본 연구에서는 가장 안전하게 (3)의 방법을 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 궤적 분포

그림 2는 1999년 1년간 서울에 도착한 기류 이동 궤적 분포를 2° × 2° 간격으로 조사한 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 매일 아침 9시 서울 상공 1,500 m 위치에서 궤적을 출발시켜 12시간 간격 역으로 4일간 궤적이 지난 지점을 확인한 후 격자별로 1년간 궤적이 지난 횟수를 조사한 것이다. 거리가 가까울수록 궤적이 지난 횟수가 많은 것은 당연하나 II 구역과 III 구역을 향하는 다시 말하면, II 구역과 III 구역으로부터 도달하는 궤적의 수가 월등하게 많다.

그림 2는 서울에 대한 것이나 서울을 포함하여 지역별로 구역별 영향을 알아보기 위하여 이와 같은 그림으로부터 구역별 날 수를 합산하여 지역별로 분율을 계산한 후 그림 3에 표시하였다. 서울과 강릉은 II 구역의 영향이 크나, 목포, 제주로 갈수록 II 구역의 영향이 줄어드는 대신 III, IV 구역의 영향이 커지고 있다. 포항에 대한 구역별 영향은 서울, 강릉과 목포, 제주의 중간 정도이나 V 구역의 영향

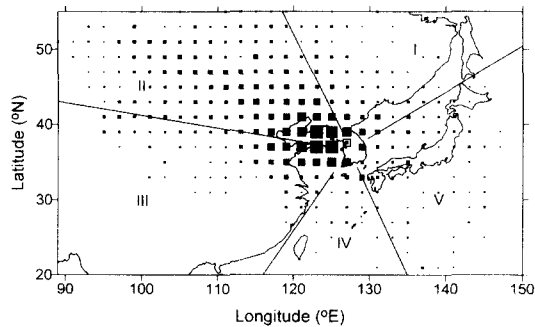


Fig. 2. Distribution of trajectories arriving in Seoul in 1999. Size of rectangles is proportional to the frequency of trajectories passing the grid cell that were traced at intervals of 12 hours. The largest rectangle denotes 85 passages.

이 크다. 또한 I 구역의 영향은 강릉이, IV 구역의 영향은 제주에서 상대적으로 크게 나타나는 등 전체적으로는 II, III 구역의 영향이 큰 상황에서 지역의 위치에 따라 인접 구역의 영향이 커지고 있다.

그림 4에서는 그림 3에서, 남북에 위치하여 각기 다른 양상을 보이고 있는 서울과 제주에 대하여 계절별 구역의 영향을 알아보았다. 그림 4(a) 서울의 경우 특히 겨울에 II 구역의 영향이 크며, 여름에는 II 구역의 영향이 줄면서 I, II, V 구역의 영향이 거의 유사하다. 그림 3의 연간 분포를 보면 제주는 III 구역의 영향이 가장 크고, II, IV 구역의 영향이 뒤를 잇고 있다. 그림 4(b)의 계절 분포에서는, 여름을 제외하고는 III, II 구역의 영향이 크나 여름에는 V, IV

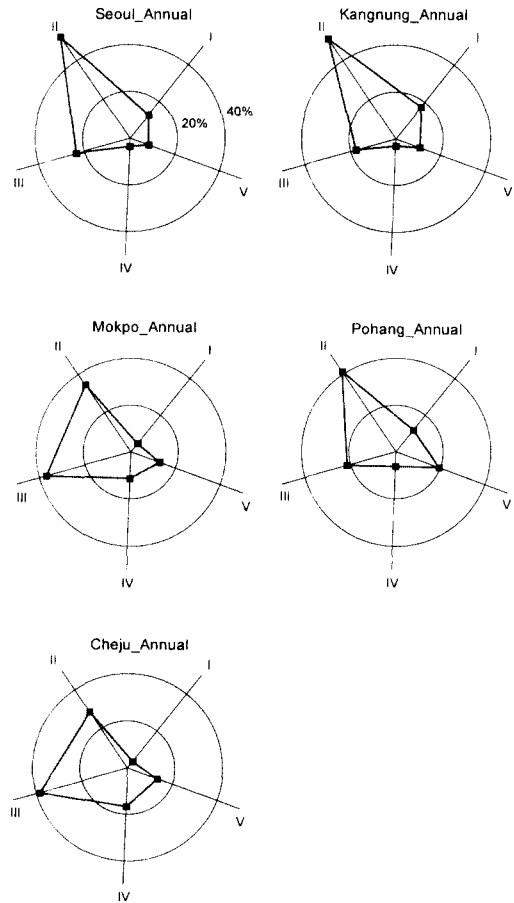


Fig. 3. Annual frequency of trajectories arriving in the target area by sectors in 1999.

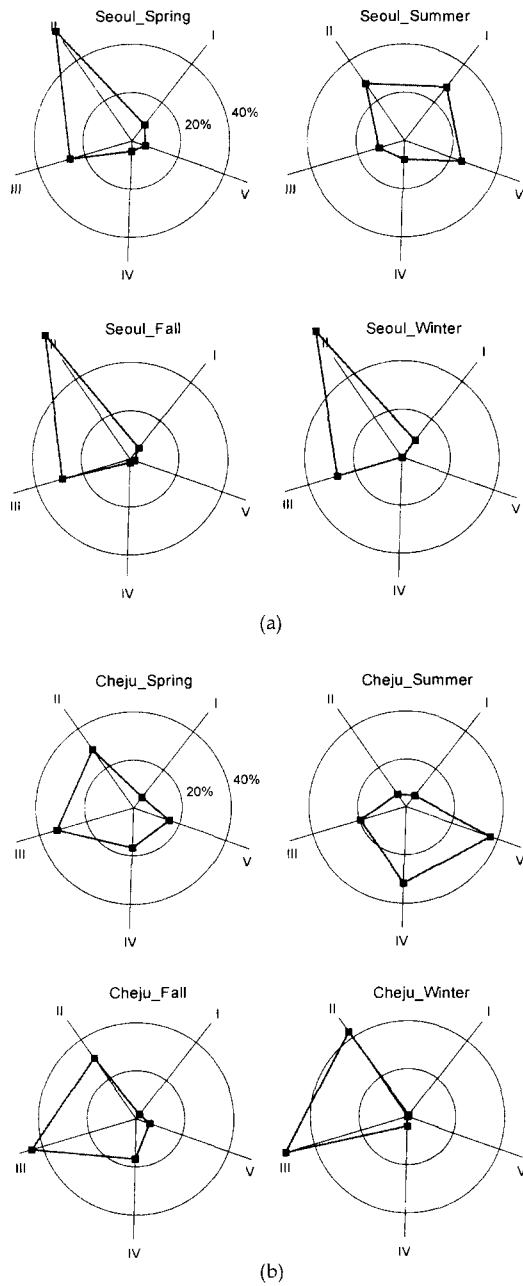


Fig. 4. (a) Seasonal frequency of trajectories arriving in Seoul by sectors. (b) Seasonal frequency of trajectories arriving in Cheju by sectors.

구역의 영향이 크다. 그림 4의 계절 분포를 그림 3과 비교하면, 연간 분포의 큰 틀은 중관풍이 강한

Table 2. Seasonal average CO concentrations (ppm) by area.

Area	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Seoul	1.04	0.71	1.14	1.44	1.10
Mokpo	1.12	0.68	0.48	1.00	0.82
Cheju	0.78	0.52	0.63	0.68	0.66
Pohang	1.17	0.72	0.79	1.04	0.94
Kangnung	0.26	0.15	0.31	0.47	0.32

겨울의 분포에 따라 결정되나 여름에는 V 구역의 영향이 커지면서 한반도 내 위치에 따라 인접 구역의 영향이 증가하고 있다. 그림으로 제시하지는 않았으나 포항은 여름에 V 구역의 영향이 압도적이고, 목포도 여름에는 그림 4(b)의 제주와 비교하여 IV 구역의 영향이 작은 대신 V 구역의 영향이 커서 결과적으로 V 구역의 영향이 가장 크다. 강릉은 그림 4(a)의 서울에 비하여 II 구역의 영향이 작고 I, V 구역의 영향이 조금씩 크다.

3.2 오염물질 이동에 따른 CO 농도 변화

표 1에서도 볼 수 있는 것과 같이 본 연구에서는 절대 농도 대신 계절 평균에 대한 차이를 분석하였으며, 이는 앞서도 설명하였지만 지역별 계절별로 나타날 수 있는 고유의 특징적 변화를 배제한 상태에서 장거리 이동에 의한 영향을 관찰하기 위하여 서였다. 표 2에는 이들 분석의 기반이 되는 지역별 계절별 평균을 정리하였다. 먼저 연평균을 살펴보면 서울, 포항, 목포, 제주, 강릉 순으로 높는데, 1990년대 후반 일산화탄소 농도 변화에서 차량 배출이 차지하는 비율이 90%를 넘고(김영성 등, 2001; 환경부, 2000), 일산화탄소가 1차 오염의 지표가 될 수 있다는 점에서 대략 1990년대 후반 차량 오염으로 대표되는 지역별 오염도가 종합적으로 표현된 것으로 볼 수 있다.

특이한 사실은 자체 배출이 작아 청정지역으로써 장거리 이동 연구에 적합한 지역으로 알려진 제주의 농도가 강릉보다 크게 높다는 사실이다(예를 들면, 김용표 등, 1998). 그러나 이와 같은 현상은, 1990년대 후반 서귀포, 정산포 등 도내 다른 지역과 달리 제주시의 시정이 급속히 악화되고 있는 것으로 보아(이시혜 등, 2001) 제주도 전체보다는 제주시의 오염 현황이 반영된 결과로 판단된다. 계절별로는 대체로 봄, 겨울에 농도가 높으나 서울과 강릉

Table 3. Mean differences of CO concentrations (ppm) of the upper and lower 20% from the seasonal averages by area and season.^a

Area	Spring	Summer	Fall	Winter
Seoul	0.508/ -0.339	0.213/ -0.187	0.609/ -0.442	0.661/ -0.534
Mokpo	0.760/ -0.652	0.312/ -0.370	0.297/ -0.270	0.980/ -0.688
Cheju	0.397/ -0.376	0.521/ -0.315	0.747/ -0.367	0.558/ -0.404
Pohang	0.745/ -0.790	0.632/ -0.437	0.477/ -0.356	0.752/ -0.574
Kangnung	0.143/ -0.105	0.057/ -0.042	0.288/ -0.142	0.241/ -0.158

^aMean difference of upper 20%/lower 20%.

은 겨울, 가을, 봄철 순인데 비하여, 나머지 지역은 봄철에 가장 높다. 국지 배출에 기상 특성이 결합되어 나타난 결과로 추측되나 명확하지는 않다.

그림 5는 지역별로 일평균을 산출하여 계절별로 상위 20%와 하위 20%를 구분한 후 각 그룹에 대한 구역별 기여율을 조사한 것이다. 또한 표 3은 상위 20%와 하위 20% 그룹의 평균 농도와 계절 평균과의 차이를 나타낸 것이다. 먼저 표 3을 살펴보면 무엇보다도 강릉의 상, 하위 농도 차이가 작는데, 표 2에서 평균 농도 자체가 낮은 때문으로 해석된다. 같은 이유로, 표 2에서 서울을 제외하고 평균 농도가 높은 목포와 포항의 겨울, 봄 등에서 상, 하위 농도 차이가 크다. 반면 서울은 평균 농도가 높음에도 상, 하위 차이가 크지 않은데, 다른 지역과 달리 27개 측정소 측정치를 평균하는 과정에서 크고 작은 변화들이 서로 상쇄되면서 나타난 결과일 수 있다.

앞에서는 이전 연구를 토대로 대략 III, II 구역은 오염도가 높고, IV, I 구역은 청정한 지역으로 판단하였다. 그러나 지역별 오염은 구역별 영향과 함께, 자체 배출과 지역의 기상 등 다양한 요소에 의하여 결정되므로 일면 당연하지만, 그림 5에서는 특정 사례를 다룬 이전의 연구와 같이 구역별 영향이 명확하지 않다. 따라서 그림 3, 4에 지역별로 나타난 전반적인 구역 영향의 기초 위에서 그림 5에서 볼 수 있는 특징적 현상을 가능한대로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 그림 3과 4(a)를 보면 서울은 II 구역의 영향이 지배적인 가운데 여름에 I, V 구역의 영향이 크다. 그림 5를 보면 일산화탄소 농도가 높을 때 II,

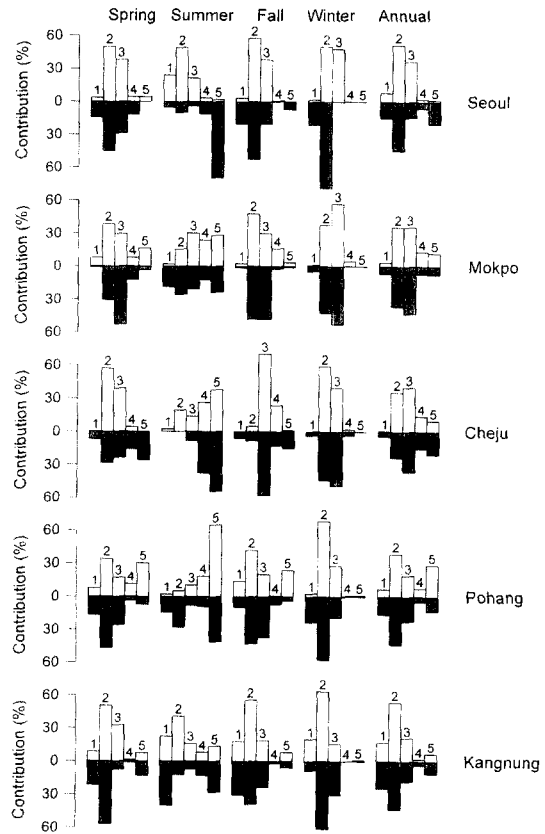


Fig. 5. Contribution of each sector to the upper and lower 20% of areawide daily-average concentrations of carbon monoxide in the target area. Open bar is for the upper 20%; shaded bar is for the lower 20%. Figure above the bar denotes the reference number for the sector.

III 구역의 영향이 큰 반면 농도가 낮을 때 대개는 I 구역의 영향이 크나 여름에는 V 구역의 영향이 크다. 강릉도 전체적 모습은 유사하나 서울에 비하여 I 구역의 영향이 크고 특히 여름에는 농도가 낮을 때 I 구역의 영향이 가장 크다. 그러나 겨울에는 농도가 높을 때 I 구역의 영향이 크고, 농도가 낮을 때 III 구역의 영향이 크게 나타나는 등 다른 경우와 양상이 다르다.

(2) 목포와 제주는 전체적으로는 III, II 구역의 영향이 지배적인 가운데 여름에 V, IV 구역의 영향이 큰 지역이다. 그림 5의 목포는 여름에 농도가 낮을 때 I 구역의 영향이 큰 것을 제외하고는 농도가 높

을 때와 낮을 때 구역별 기여율의 차이가 크지 않다. 반면 제주의 경우는 전반적으로 농도가 높을 때 II, III 구역의 영향이 큰데 비하여 농도가 낮을 때에는 이들 구역의 영향이 감소하는 대신 I 구역과 IV, V 구역의 영향이 커지는 경향을 볼 수 있다.

(3) 포항은 전체적으로 II 구역의 영향이 크나 다른 지역에 비하여 V 구역의 영향이 큰 지역이다. 농도가 높을 때 V 구역의 영향이 두드러지게 큰데, 농도가 낮을 때 V 구역의 영향이 컸던 서울과는 반대되는 현상이며 특히 여름에 그러하다. 그러나 농도가 낮을 때 I 구역의 영향이 큰 것은 다른 지역과 유사하다.

요약하면, 특히 연단위 변화를 중심으로 II, III 구역의 영향이 클 때 농도가 높고 이들의 영향이 감소하는 대신 I 구역 등의 영향이 클 때 농도가 낮아지는 경향을 볼 수 있다. 서울에서는 III 구역의 영향이 클 때 농도가 높아지기도 하나, 보편적으로는 김용표 등(1996a, 1998)의 사례별 연구에서와 같이 II 구역보다 III 구역의 오염이 심하여 농도가 높아지는 현상은 찾기 어렵다. 청정구역인 IV 구역의 영향 역시 대부분 두드러지지 않고, 일본이 위치한 V 구역의 영향도 인접한 포항에서는 농도가 높을 때 크고 서울, 제주 등에서는 농도가 낮을 때 크게 나타나 등 일률적이지 않다.

3.3 국지배출의 영향

지금까지 시도된 역계적 분석에 의한 구역별 영향 조사가 특정 사례를 대상으로 하였는데 비하여 그림 5는 강수일을 제외하기는 하였으나 1999년 1년간 자료를 대상으로 하였다는 점에서 근본적으로 다르다. 특정 사례가 아닌 연간 자료에서, 그것도 국지배출의 영향이 상당할 것으로 예상되는 도시지역의 오염도 변화에서 일부라도 일관된 양상의 장거리 이동의 영향을 구분할 수 있음은, 우리나라 전반에 걸쳐 오염물질 장거리 이동의 영향이 예상보다 크고 지속적임을 의미하는 것일 수 있다. 그러나 장거리 이동의 영향은 대상 지역의 국지 배출의 강도에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 우리나라 상공의 바람장이 비교적 균일하여 우리나라를 향하는 기류의 이동 궤적이 평행에 근접할 때 즉, 같은 방향으로부터 영향을 받아 지역별로 유사한 조건에 있을 때 지역별 장거리 이동과 국지 배출의

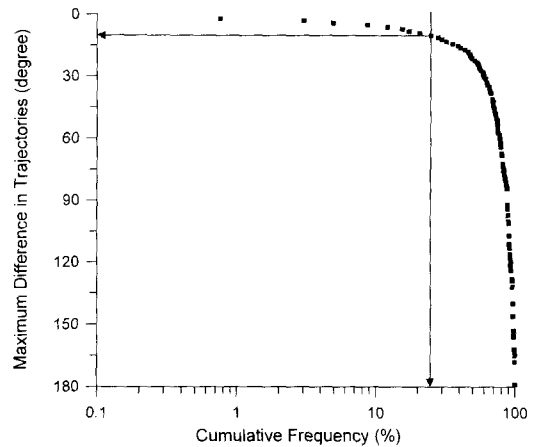


Fig. 6. Cumulative frequency distribution of maximum difference in trajectories estimated by the lines connecting the starting and ending points. When the maximum difference was 10 degrees or less (25% of the total number of trajectories), it was considered that the whole country was uniformly influenced from the same direction.

영향을 조사하였다.

그림 6은 그림 1의 어느 지역에서도 강수가 없었던 날을 대상으로, 역계적의 출발 지점과 도착 지점을 연결한 후 서울에서 출발한 직선에 대하여 다른 지역에서 출발한 직선과 +/- 어느 쪽이든 각이 작은 쪽으로 각도를 산출하여 그 중 차이가 가장 클 때의 각도 분포를 나타낸 것이다. 궤적의 각도 차이는 가장 클 경우 180도에 근접하는데, 보편적으로 여름이나 저기압이 발달하였을 때 각 지역에 이르는 궤적의 각도 차이가 큰 반면, 종관풍이 강한 겨울에 차이가 작다. 본 연구에서는 지역별 궤적의 최대 각도가 10도 이하인 66일을 먼저 선택하였다. 66일은 계절별로 겨울이 29일로 가장 많고 봄 17일, 가을 16일, 여름 4일 순이다. 겨울과 봄, 가을의 궤적은 지역의 위치에 따라 약간의 차이가 있으나 모두 II 구역 혹은 III 구역을 지나며, 여름의 4일에는 모든 궤적이 V 구역을 지나고 있다.

앞 절의 분석에 의하면 우리나라의 지역별 일산화탄소 농도는 II, III 구역의 영향을 받을 때 대체로 높으나 V 구역의 영향은 일률적이지 않다. 따라서 본 연구에서는 V 구역의 영향을 받는 4일을 제외하고 62일에 대하여 외부로부터 오염물질이 이동한다

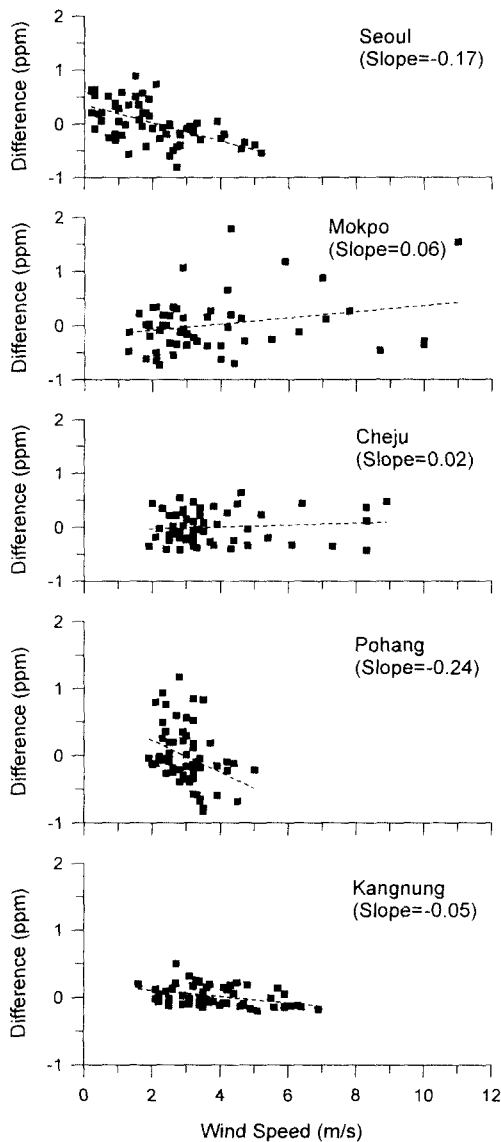


Fig. 7. Variations in areawide daily-average concentrations of carbon monoxide with wind speed by regions when the maximum difference in trajectories arriving in the target areas was 10 degrees or less. The concentration of carbon monoxide is expressed by the difference from the seasonal average. The slope in the parentheses is for the best-fitted line.

는 전제 아래, 그림 7에서 지역별로 풍속에 따른 일산화탄소 농도 변화를 역시 계절 평균과의 차이로

써 조사하였다. 이와 같은 경우 만일 국지배출의 영향이 크다면 풍속이 강할수록 확산이 원활하여 오염물질의 농도는 떨어지나, 장거리 이동의 영향이 크다면 주로 외부에서 오염물질이 유입되므로 풍속이 강할수록 오염물질의 농도는 증가되거나 최소한 농도 감소가 뚜렷하지 않다(김영성과 오현선, 1999).

포항은 대부분의 풍속이 2~4 m/s 범위에 있는데 비하여 제주는 12 m/s 가까운 풍속이 나타나는 등 풍속의 변화 범위가 달라 같은 조건에서 비교가 어려운 측면이 있다. 그럼에도 서울, 포항은 국지 배출의 영향이 뚜렷한 반면 목포, 제주에서는 오염물질의 유입에 따른 농도 상승을 볼 수 있다. 목포와 제주의 경우 풍속에 따라 외부로부터 오염물질이 이동할 수는 있지만 그 영향이 일정하지 않아 농도 분포의 분산이 크다. 강릉은 목포와 제주만큼 장거리 이동의 영향이 크지는 않으나 풍속이 높아짐에도 농도 감소가 거의 없어 역시 장거리 이동의 영향을 나타내고 있다. 그러나 한편으로 목포, 제주, 강릉 등에서 장거리 이동의 영향이 관찰되는 것은 이들 도시지역에서 배출이 상대적으로 작은 때문일 수 있다. 또한 강릉에 비하여 목포와 제주에서 장거리 이동의 영향이 큰 것은 지리적으로 II, III 구역에 가까운 때문일 수 있다. 이와 같이 본다면 서울에서 국지배출의 영향이 포항보다 작은 사실 역시 장거리 이동의 영향이 포함된 결과로 해석할 수 있다.

4. 결 론

1999년 1년간 서울, 목포, 제주, 포항, 강릉 등 해안을 따라 분포된 5개 지역에 도달하는 기류의 궤적을 역궤적 분석 방법에 의하여 조사하였다. 한반도 인근 지역을 북동부 I 구역, 중국 북부 II 구역, 중국 남부 III 구역, 북서태평양 VI 구역, 일본 V 구역 등 5개 구역으로 구분하였다. 구역별 오염물질 이동이 지역의 대기환경에 미치는 영향을 조사하기 위하여 도시지역에서 상시 측정되고 있는 기준 오염물질 중 반응성이 가장 작은 일산화탄소의 농도 변화를 살펴보았다. 일산화탄소는 불에 대한 용해도가 높지 않아 강수의 영향은 크지 않았으나 장거리 이동의 영향을 효과적으로 살펴보기 위하여 지역별로 약 20%를 차지하는 강수일은 분석 대상에서 제외

하였다.

다음은 주요 결과이다.

(1) 계절 분포로 살펴본 구역의 영향은, 지역에 관계없이 II, III 구역의 영향이 컸으며, 서울, 강릉은 II 구역의 영향이 특히 큰 반면, 목포, 제주 등에서는 III 구역의 영향도 못지 않게 컸다. 계절별로는 겨울에 특히 중국의 영향이 큰데 비하여, 여름에는 각각 북쪽은 I 구역, 남쪽은 IV 구역, 동쪽은 V 구역의 영향이 컸다.

(2) 지역별, 계절별로 일평균 농도가 상, 하 각 20%인 날을 구분하여 구역별 영향을 비교하였다. 대체로 II, III 구역의 영향이 클 때 농도가 높고 I 구역의 영향을 받을 때 농도가 낮아지는 경향을 관찰할 수 있었다. 청정지역의 특정 사례에서 볼 수 있었던 것과 같은 현저한 차이는 나타나지 않았으나(김용표 등, 1996a, b, 1998), 국지 배출의 영향이 큰 도시지역의 연간 자료를 대상으로 한 분석에서 어느 정도 일관된 형태의 장거리 이동의 영향을 구분할 수 있었다는 사실은 주목할 만하였다.

(3) 우리 나라 전역이 비교적 균일하게 II 혹은 III 구역의 영향을 받는 것으로 추정되는 날들에 대하여 지역별로 국지배출과 장거리 이동의 영향을 조사하였다. 국지배출이 작고 지리적으로 II, III 구역에 가까운 목포와 제주에서 장거리 이동의 영향이 컸으며, 강릉에서도 장거리 이동의 영향이 비교적 컸다. 서울과 포항에서 국지 배출의 영향이 컸으나 II, III 구역으로부터 먼 포항에서 국지배출의 영향이 더욱 뚜렷하였다.

현재의 연구 결과를 서론에서 언급한 우리 나라의 오존 농도 분포와 연결시켜 볼 때 일단 지역별 오존농도 변화의 한 원인으로써 외부의 영향을 지목하기에는 충분하다. 이와 같은 사실은 특히 오존 농도가 높아지는 여름철에 지역에 따라 구역별 영향이 다양하다는 점에서 더욱 그러하다. 또한 1990년대 초반 중국의 영향으로 여수 지방의 일평균 농도가 높았을 가능성 역시 설득력이 있는데, 목포, 제주와 같이 중국에 인접해 있을 뿐 아니라 당시 여수 지방의 국지 배출 역시 이를 뒷받침할 만큼 높지 않았기 때문이다(김영성, 1999; 김영성 등, 1998).

그러나 I 구역의 영향으로 강릉에서 오존 농도의 연중 변화 폭이 작을 뿐 아니라 농도가 낮다는 추정은 강릉에 대한 I 구역의 영향이 다른 지역보다

크고 특히 여름에 크게 나타남으로써 개연성은 다시 한번 확인할 수 있으나 여전히 충분치 않다. 강릉은 오존뿐 아니라 연평균 일산화탄소 농도 역시, 최근 오염이 심화된 제주의 절반에 불과하였고 이에 따라 계절별 상, 하위 20%의 농도 폭도 매우 작았다. 상, 하위 20% 등 제한된 경우를 토대로 하였다 하더라도 연간 자료를 대상으로 한 본 연구의 장거리 이동 영향 분석에서도 명확치 않은 많은 내용들은 해당 지역을 포함한 인근 지역의 국지 변화와 연관되었을 가능성이 높다. 지역 규모부터 국지 변화까지를 포괄할 수 있는 중첩 격자를 이용한 모델 분석을, 특정 사례가 아닌 장기 특성을 살필 수 있도록 계획하여 시도한다면 본 논문에서 미흡하였던 부분의 해석에 유용할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 자체 지원으로 수행되었습니다. 관측 및 측정자료를 제공하여 주신 기상청과 환경부 관계자 분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- 강동근, 김선태, 김정옥(1993) 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9, 329-339.
- 기상청(2000) 지구대기감시, http://www.kma.go.kr/kma09/id_31012_15_2.htm(2000년 12월 접속).
- 김영성(1999) 산업단지 대기질 관리, HAP인가 VOC인가?, 한국대기환경학회지, 15, 513-517.
- 김영성(2000) 우리나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자, 한국대기환경학회지, 16, 607-623.
- 김영성, 오현선(1999) 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15, 267-280.
- 김영성, 송철한, 심상규, 김용표, 문길주(1998) 여천 공업단지 봄, 가을 대기 중 휘발성 유기화합물 농도 비교 연구, 한국대기보전학회지, 14, 153-160.
- 김영성, 오현선, 김진영, 조규탁, 강성대, 홍지형(2001) 삼차원 수치모델을 이용한 점오염원의 대기환경영향 평가, 한국대기환경학회지, 17, 331-345.
- 김용표(1999) 동북아시아지역 대기오염 현황: 중국을 중심으로, 한국대기환경학회지, 15, 211-217.

- 김용표, 박세욱, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희 (1996a) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구: (I) 입자상 오염물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12, 79-90.
- 김용표, 김성주, 진현철, 백남준, 이종훈, 김진영, 심상규, 강창희, 허철구 (1996b) 제주도 고산에서의 1994년 여름 측정: (I) 입자 이온 조성, 한국대기보전학회지, 12, 297-305.
- 김용표, 이종훈, 문길주, 김희강, 이종범 (1998) 우리나라 배경농도지역의 1996~1997년 미세입자상 탄소성분 측정 결과, 한국대기보전학회지, 14, 621-630.
- 오현신, 김영성 (1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 종관 기상 특성, 한국대기환경학회지, 15, 441-455.
- 이상인, 조석연, 심상규 (1995) STEM II를 이용한 한국과 중국동부 지역의 대기오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11, 163-170.
- 이시혜, 김영성, 김진영, 문길주, 김용표 (2001) 1990년대 전국의 시정 추이, 한국대기환경학회 추계학술대회, 11월 9-10일, 광주과학기술원, 논문 번호 BB2.
- 장광미, 이호근, 서명석, 박경윤, 강창희, 허철구, 심상규 (1996) 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO₂ 농도변화 특성, 한국대기보전학회지, 12, 541-554.
- 전영신, 조하만, 권원태 (1994) 한반도 중부지방에서 관측된 1992-1993년 산성비의 특성과 공기 이동 경로 분석, 10, 175-182.
- 정용승, 김태근 (1991) 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적 연구, 한국대기보전학회지, 7, 203-207.
- 환경부 (2000) 환경통계연감.
- Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.-M. Liu, M. Buhr, K.J. Hsu, D.A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T. Merrill, and R.E. Newell (1996) Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, *J. Geophys. Res.*, 101, 1999-2010.
- Chameides, W.L. (2000) China-MAP Project, 7th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality and Exhibition and Workshop on Air Quality Modeling Challenges, October 31-November 2, Taipei, Taiwan.
- Draxler, R.R. (2000) HYSPLIT_4 User's Guide (Online Version), NOAA Technical Memorandum ERL ARL-230, Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Ghim, Y.S. and Y.-S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
- Hajari, N. (1999) A litany of ills: China's 10 top ecological problems, *Time (Asian Edition)*, http://www.time.com/time/asia/asia/magazine/1999/990301/sick_man2.html (accessed in April 2001).
- Hoell, J.M., D.D. Davis, S.C. Liu, R. Newell, M. Shipham, H. Akimoto, R.J. McNeal, R.J. Bendura, and J.W. Drewry (1996) Pacific Exploratory Mission-West A (PEM-West A): September-October 1991, *J. Geophys. Res.*, 101, 1641-1653.
- Hoell, J.M., D.D. Davis, S.C. Liu, R. Newell, M. Shipham, H. Akimoto, R.J. McNeal, and R.J. Bendura (1997) Pacific Exploratory Mission-West Phase B: February-March 1994, *J. Geophys. Res.*, 102, 28,223-28,239.
- InterMet (2001) Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS), <http://www.magma.ca/~intermet/modrdaps.htm> (accessed in February 2001).
- Lide, D.R. and H.P.R. Frederikse (Eds.) (1993) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 74th Edition, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Mukai, H. and M. Suzuki (1996) Using air trajectories to analyze the seasonal variation of aerosols transported to the Oki Islands, *Atmospheric Environment*, 30, 3917-3924.
- Poster, D.L. and J.E. Baker (1997) Mechanisms of atmospheric wet deposition of chemical contaminants, In *Atmospheric Deposition of Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*, Edited by J.E. Baker, SETAC Technical Publications Series, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, FL, Chap. 4.
- Roser, D.J. and A.J. Gilmour (1995) Acid Deposition and Related Air Pollution: Extent and Implications for Biological Conservation in Eastern Asia and the Western Pacific, <http://www.panda.org/resources/publications/sustainability/acidrain/arhtm/> (accessed in April 2001).
- Streets, D.G. (2000) Emissions to support modeling, 7th International Conference on Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality and Exhibition and Workshop on Air Quality Modeling Challenges, October 31-November 2, Taipei, Taiwan.