한국대기환경학회지 제 15 권 제 4 호
J KOSAE Vol. 15, No. 4 (1999) pp. 441~455
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 종관 기상 특성

Characteristics of Surface and Synoptic Meteorology During High-Ozone Episodes in the Greater Seoul Area

오 현 선 · 김 영 성
한국과학기술연구원 환경연구센터

(1999년 4월 6일 접수, 1999년 8월 16일 채택)

Hyun Sun Oh and Young Sung Ghim
Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

(Received 6 April 1999; accepted 16 August 1999)

Abstract

Meteorological characteristics of three high-ozone episodes in the Greater Seoul Area, selected on the basis of morning-average wind direction and speed for the 1990~1997 period, were investigated. Three high-ozone episodes thus selected were seven days of July 3~9, 1992, nine days of July 21~29, 1994, and three days of August 22~24, 1994. Along with surface meteorological data from the Seoul Weather Station, surface and 850-hPa wind fields over the Northeast Asia around the Korean Peninsula were used for the analysis. In the July 1992 episode, westerly winds were most frequent as a result of the influence of a high-pressure system in the west behind the trough. In contrast, in the July 1994 episode, easterly winds were most frequent due to the effect of a typhoon moving north from the south of Japan. Despite different prevailing wind directions in the two episodes, the peak ozone concentration of each episode always occurred when a sea-land breeze developed in association with weak synoptic forcing. The August 1994 episode, selected as being representative of calm conditions, was another typical example in which peak ozone concentration rose to 322 ppb under the well-developed sea-land breeze. All three high-ozone episodes were terminated by precipitation, and subsequent rises in ozone concentrations were also suppressed by a series of precipitation afterwards. In particular, two heavy rainfalls were the main reason why the August 1994 episode, with the highest and second-highest ozone concentrations during the 1990~1997 period, lasted for only a few days.

Key words : high-ozone episode, synoptic wind, sea-land breeze, precipitation, Greater Seoul Area

1. 서 론

1995년부터 시작된 오존 경보제와 1997년부터 시작된 오존 예보제는 일반인들에게도 오존오염에 대한 경각심을 일깨워주는 중요한 계기가 되었다. 경보제 이후 서울에서 1시간 평균 120 ppb 이상 주의보 수준의 오존 발생사례는 1995년 7월 하루를 시작으로 1996년부터 1998년까지 각각 6일, 10일, 11일로 점차 증가추세이다. 그동안 주로 6월부터 8

월까지 여름철에 오존농도가 주의보 수준 이상으로 상승하였으나 1998년에는 5월과 9월에도 주의보가 발령되었다 오존 경보제가 실시되기 이전인 1994년 여름은 특히 고온의 날이 많아 서울에서만 17일이나 주의보 수준 이상의 오존농도가 나타났으며, 8월에는 300 ppb 이상 경보수준의 오존농도가 서울 광화문에서 발생하기도 하였다.

서울, 수도권의 오존 고농도 발생에 관하여 여러 가지 이론들이 제시되고 있으나 아직 정설은 없다. 정용승과 정재섭(1991) 이래 많은 연구들이 편서풍의 영향 아래 서쪽으로부터 오염물질이 이동하여 서울 동부에서 오존 농도가 높아지거나 지형적 여건으로 오염물질이 적체되는 지점에서 오존 농도가 상승할 수 있음을 이야기하고 있으나 구체적으로 입증된 사례는 오히려 많지 않다. 이와 같은 가운데 김영성(1997)과 김영성과 오현선(1999)은 각기 오존 농도의 빈도 분포와 오존 고농도일의 아침 풍속을 조사함으로써, 서울. 수도권의 오존 농도 상승에는 미국의 LA나 일본의 관동지방에서 관찰되는 오염물질의 이동보다(Chang *et al*., 1989; Blumental *et al*., 1978) 자체 배출의 영향이 중요함을 주장하고 있다. 서울, 수도권의 고농도 오존 발생에 관한 포괄적 조사가 이루어지지 않았기 때문에 이들의 주장은 모두 일부분의 사실을 반영한 것일 수 있다.

최근 김영성과 오현선(1999)은 오존 농도 상승에 직접적으로 중요한 당일 아침의 바람 자료를 이용하여 미국 EPA의 절차에 따라(USEPA, 1991) 1990년부터 1997년 사이 120 ppb 이상 고농도 발생일을 대상으로 고농도 오존 사례 셋을 선정하였다. 이들 고농도 사례들은 각기 아침 8방위 풍향과 풍속이 남서풍, 동풍, 그리고 정체(미국 EPA 기준 1.5 m/s 미만)로 다를 뿐 아니라 고농도의 수준과 범위, 지속성 등에서 그 동안의 고농도 발생을 대표할 만한 것들이다. 본 연구에서는 이들 사례의 발생과 진행, 소멸 과정을 서울 기상 관측소의 관측자료와 동북아시아를 포함한 한반도 주변의 상층 및 지상 일기도를 분석하여 조사하였다.

2. 고농도 사례의 전반적 특성

표 1은 본 연구에서 대상으로 하고 있는 고농도 오존 사례의 전반적 특성을 요약한 것이다 아침 남서풍 조건으로 분류된 1992년 7월 사례는 7월 3일부터 9일까지 7일간 계속되며, 7월 7, 8일의 아침 남서풍을 비롯하여 특히 오후에 서풍 계열의 바람이 많고 다른 두 사례에 비하여 오후 풍속이 빠르다. 초반 구름이 하늘을 덮고 강수가 있음에도 불구하고 오존 농도가 상승하기 시작하여 운량이 감소하면서 오존 농도는 240 ppb로 최고 농도를 기록한 후 다시 흐려지면서 강수와 함께 고농도 사례는 종결된다. 최고 기온은 30°C 안팎으로 아주 높지 않으며 오존 최고 농도는 주로 구로에서 기록되었다.

아침 동풍 조건으로 분류된 1994년 7월 사례는 7월 21일부터 29일까지 9일간 계속된다. 7월 25일부터 27일까지 아침 풍속이 1.5 m/s를 겨우 넘고 있으나 대부분 풍속이 1.5 m/s 이하로 낮고 이와 같은 경향은 머칠을 제외하고는 오후에도 크게 다르지 않다. 특히 아침에 동풍 계열의 바람이 많고 24일부터 28일까지는 오후에도 동풍 계열의 바람이 이어지며, 기간 내내 최고 기온이 35°C를 넘고 있다 운량이 점차 증가하며 기온이 32°C 수준으로 떨어지면서 고농도 사례가 종결된다.

8월 22일부터 24일까지 3일간의 1994년 8월 사례는 아침 풍속 1.5 m/s 미만의 정체 조건 사례로써 선택되었다. 그러나 앞의 두 사례에서도 정체 조건이 적지 않다는 점에서 실제로는 (1) 우리나라에서 공식적으로 오존 측정이 시작된 이후 가장 높은 2개 농도가, (2) 전형적인 국지 배출의 영향을 보이고 있는 광화문에서 관측되었다는 점이 사례 선정에 더욱 중요하게 작용하였다. 광화문에서 322 ppb가 기록된 8월 23일은 서울, 수도권내 13개 측정소에서 최고 농도가 100 ppb를 초과할 만큼 고농도 오존의 범위도 넓으나 표 1만으로는 이를 뒷받침할 만한 기상 현상을 발견하기 힘들다. 8월 25일 강수와 함께 영역 내 전체 측정소에서 오존 농도가 급감하며 고농도 사례가 종결된다.

3. 사례별 변화 분석

3.1 1992년 7월 사례 (1992. 7. 3~9)

그림 1은 1992년 7월 사례가 시작되기 하루 전인 2일과 오존 농도가 최고값을 기록한 6일, 그리고 서풍이 발달하였던 8일과 종료 직후인 10일의 1000 hPa과 850 hPa 높이에서의 지오포텐셜 고도와 바람

Table 1. Characteristics of three high-ozone episodes including the previous and next days for the period of 1990 and 1997.[a]

Date	Peak 1-h Concentration (ppb)	Station Name	Number of Stations (>100 ppb)	Mean Wind Direction Morning	Mean Wind Direction Afternoon	Mean Wind Speed (m/s) Morning	Mean Wind Speed (m/s) Afternoon	Maximum Temperature (°C)	Mean Cloud Cover (Fraction)	Precipitation (mm)
July 1992 Episode										
920702	87	Kuro	0	SSW	SW	2.7	5.1	25.4	1.00	6.5
920703	100	Kuro	0	NNE	SW	0.6	1.3	22.5	1.00	18.4
920704	157	Kuro	4	WSW	W	0.8	2.9	28.3	0.99	2.1
920705	190	Kuro	4	WSW	W	1.4	3.3	31.3	0.53	–
920706	240	Kuro	7	ENE	W	1.2	4.0	32.4	0.11	–
920707	133	Kuro	3	SW	WSW	2.2	4.5	30.6	0.23	–
920708	131	Mapo	6	SW	W	3.3	3.7	31.5	0.10	–
920709	120	Pangi	1	ENE	WSW	0.9	3.0	30.3	0.74	–
920710	70	Pyulyang	0	NE	NE	2.8	1.6	25.9	0.96	58.5
July 1994 Episode										
940720	97	Pangi	0	NW	NW	1.8	2.6	34.3	0.26	–
940721	119	Pangi	2	NNW	NW	1.2	3.2	35.5	0.40	–
940722	188	Kwonsun	6	E	WNW	1.1	2.4	35.5	0.40	–
940723	182	Nae	8	E	NNE	1.2	1.3	38.2	0.16	–
940724	175	Nae	7	E	ESE	1.4	0.9	38.4	0.08	–
940725	157	Nae	4	ESE	NE	1.7	1.3	36.8	0.08	–
940726	171	Sungok	2	ESE	E	1.7	2.1	37.1	0.28	–
940727	142	Simgok	1	E	E	2.3	1.5	36.0	0.59	0.0
940728	126	Nae	1	E	SE	1.6	1.0	35.9	0.40	0.0
940729	172	Sungok	1	ESE	SW	1.1	1.0	35.6	0.64	1.9
940730	72	Uijongbu	0	–[b]	W	0.1	1.6	32.5	0.81	0.8
August 1994 Episode										
940821	94	Simgok	0	E	E	2.3	2.0	31.6	0.0	–
940822	116	Nae	1	E	E	1.9	1.9	31.7	0.24	–
940823	322	Kwanghwamun	13	E	NW	1.2	2.7	31.6	0.39	–
940824	243	Kwanghwamun	7	ENE	NW	0.9	3.0	31.5	0.46	–
940825	40	Sillim	0	E	SSE	1.9	2.5	26.0	0.96	43.5
Average in July and August				E	W	1.9	2.9	29.4	0.65	18.6

[a] Meteorological conditions from the Korea Meteorological Administration in Seoul
[b] Wind speed less than 0.3 m/s

장 모습이다. 1000 hPa 지오포텐셜 고도는 지상 기압장 대신으로, 기간 중 지상 기압장 자료가 손실된 까닭에 이용하였다. 2일 한반도는 지상일기도에서 북동-남서로 뻗은 기압골의 경계면에 위치하여 강수와 함께 흐렸으며, 상층과 지상에서는 강한 서풍이 발달하였다. 표 1에서 4일까지 계속된 강수는 이러한 기압골의 영향이다. 2일에 한반도에 영향을 주던 저기압은 점차 북동쪽으로 물러나고 장마전선은 제주도 남쪽 해상에 정체되면서 한반도는 고기압의 영향을 받기 시작한다. 종관기상에 의한 서풍의 영향은 2일 이후 점차 약해지면서 5일까지 지속되며, 6일은 지상 일기도에 나타난 바와 같이 한반도와 중국 남부지역을 포함하여 등고선 간격이 넓고 풍속이 매우 약한 고기압대가 형성되어 우리나라는 기온이 높고 구름이 거의 없이 맑다. 6일의 상층 일기도에서는 시베리아 지역의 고기압이 점차 한반도를 향하여 확장되고 있으나 한반도는 풍속이 약한 고기압대에 속한다. 6일 이후, 8일 일기도와 같이 한

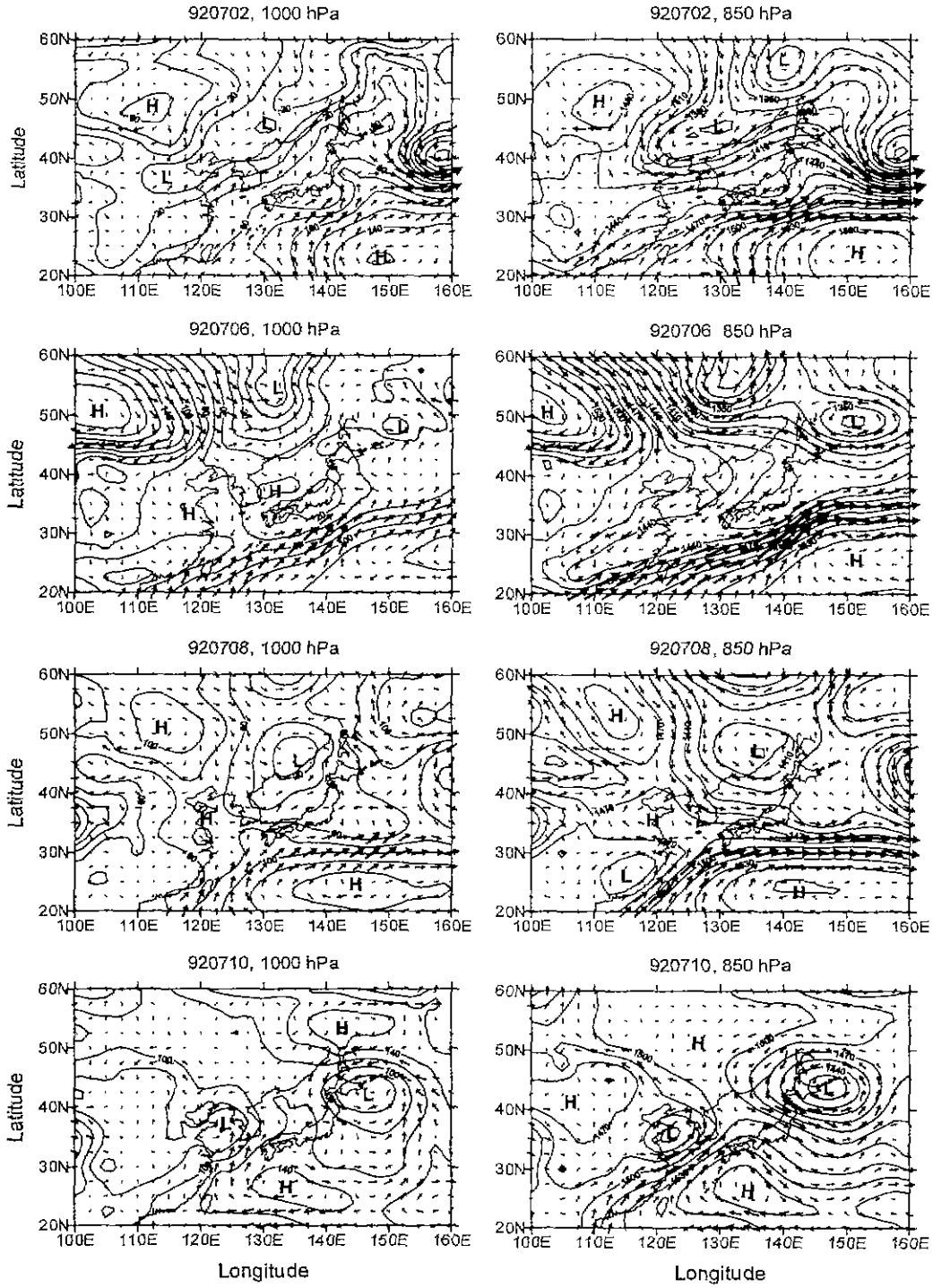

Fig. 1. Wind fields at 09:00 LST on July 2, 6, 8, and 10, 1992 at 1000 hPa and 850 hPa. The contours indicate the geopotential height in meters.

반도 서해 상에 약한 고기압이 있고 상층에서는 기압골 후면에 위치하여 강한 북서풍이 발생하며 지상에서도 다시 서풍이 강해진다. 10일에는 일본 남쪽에 있던 장마전선이 북상하고 서해 상에 저기압이 발달되면서 수도권 지역에 많은 양의 비가 내리고 남동풍이 발달되면서 풍향이 동풍계열로 바뀐다.

1992년 7월 사례는 장마전선이 제주도 남쪽 해상에서 수일간 정체되어 있는 동안 나타난 것이며, 장마전선의 북상과 함께 소멸된다. 기간 중 서풍은 8일 일기도와 같이 한반도 북동쪽 저기압과 서쪽 고기압 사이 서풍계열의 종관풍의 영향이다. 오존 농도가 가장 높은 6일은 한반도가 고기압의 후면에 위치하고 종관풍의 영향이 약할 때이며 표 1을 보면 오전의 동풍과 함께 최고 기온도 가장 높다. 그림 2는 7월 2일부터 10일까지 시간별 서울, 수도권 측정소의 오존 농도와 서울 기상청의 풍향, 풍속이다. 사례 초기 불규칙하던 오존 농도의 일변화가 모양을 갖추어가며 정형에 가까워진 5일과 6일 농도가 가장 높다. 5일까지는 남서풍이 우세하나 6일 한반도가 거의 고기압 후면에 들면서 6일 새벽 육풍인 동풍이 발달하며 해륙풍이 나타난다. 7일 이후 서풍이 강해지며 오존 농도가 아직 높으나 일변화의 모습이 흐트러지는데 7일 오후부터 계속되는 높은 풍속에 의한 오염물질 이동 효과를 의심할 수 있다(Wishinski and Poirot, 1998). 9일 다시 풍속이 낮아지며 오존의 일변화가 정형을 회복하나 10일 강수와 함께 고농도 사례는 종결된다.

7월 8일 새벽의 오존 고농도는 높은 풍속에 의한 이동의 효과를 의심할 수 있으나 표 1과 그림 2를 보면 1992년 7월 사례는 7월 3일 강수와 더불어 새벽 구로에서의 농도 상승과 함께 시작되고 있다. 이에 따라 그림 3에서는 구로의 오존 농도와 강수 및 운량 변화를 조사하였다. 표 1에도 나타나 있지만 7월 2일부터 4일까지 3일간은 구름이 완전히 하늘을 덮고 있고, 이 기간 중 특히 구로에서 새벽에 오존 농도가 높다. 2, 3일 구로의 오존 농도는 하루 한차례씩 강수와 함께 떨어질 뿐 새벽에도 여전히 높다.

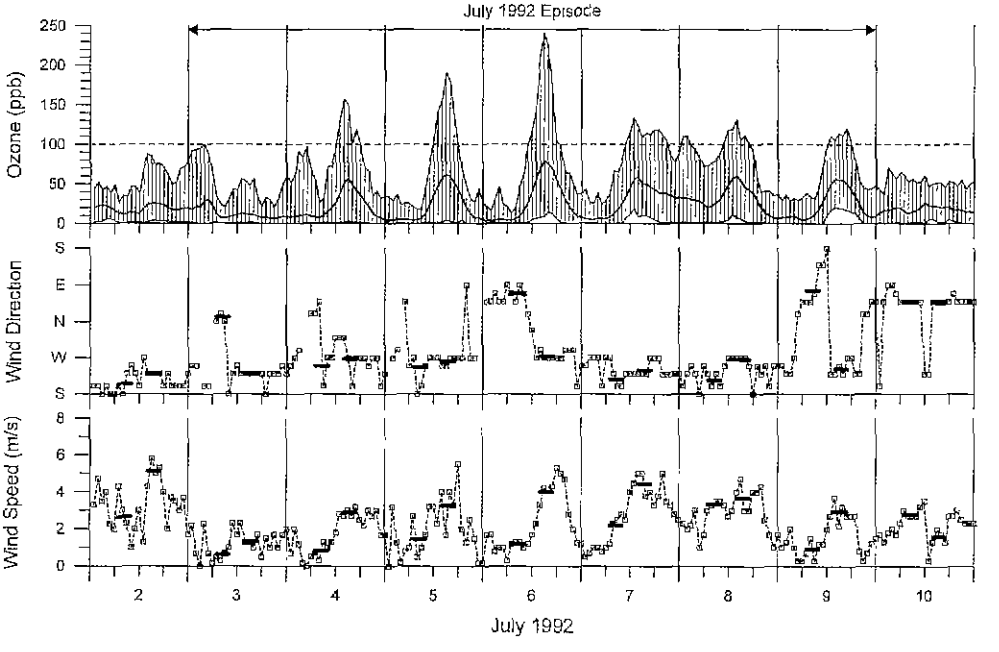

Fig. 2. Variations of ozone concentration, wind direction and speed during July 2 to 10, 1992 in GSA. The July 1992 episode lasts from July 3 to 9. Ozone concentration shows the upper and lower bounds along with mean value of concentrations from monitoring stations in GSA. Thick bars for wind direction and speed on each day represent morning (7 to 10 a.m.) and afternoon (2 to 5 p.m.) averages.

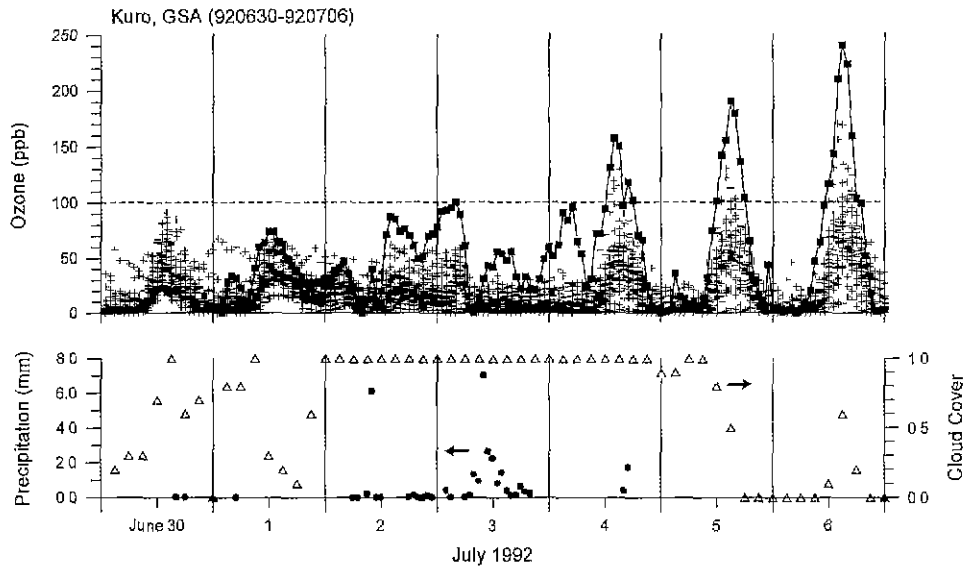

Fig. 3. Variations of ozone concentration at Kuro station along with precipitation and cloud cover measured at the Seoul Meteorological Administration during June 30 to July 6, 1992. Crosshairs on the background for ozone concentration indicate measurements from other stations in GSA.

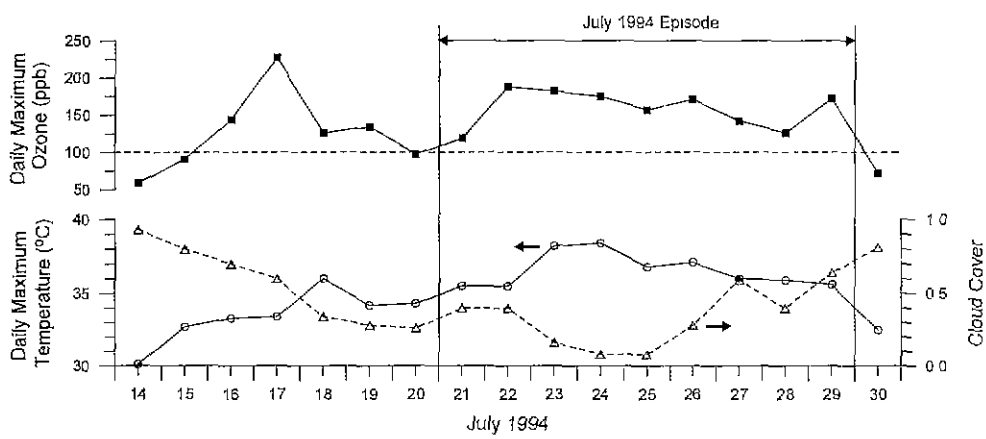

Fig. 4. Variations of daily maximum ozone concentration and temperature, and mean cloud cover during July 14 to 30, 1994 in GSA.

새벽의 농도 상승은 7월 1일과 5일도 동일하며 구름이 걷힌 6일에야 새벽 구로의 오존 농도가 0까지 떨어진다. 김진영(1995)은 여천, 동광양에서 강수가 있는 날 새벽의 오존 농도가 강수가 없는 날보다 높게 나타나는 경향을 관찰하였으나, 최근 김영성 등(1999)의 강수 영향에 관한 조사 결과나 그림 3을 보면 강수보다는 비구름이 덮인 날 새벽에 오존 농도가 높았을 가능성이 많다. 구름이 지표 오존 농도에 미치는 영향에 대하여서는 아직 연구가 충분치 않아 단정하기 어렵다. 그러나 적운이 발달할 경우 지표층과 대류권 상층의 수직 혼합을 촉진시켜 지표층의 1차 오염물질을 상층부로 이동시킴과 동

시에 대류권 상층의 고농도 오존을 지표 부근으로 이동시켜 지표 오존 농도를 높일 수 있다는 Liu 등(1997)의 연구 결과도 있어 검토가 필요하다.

3.2 1994년 7월 사례 (1994. 7. 21~29)

1994년 7월은 중부지방의 장마가 16일 공식적으로 끝나고 이후 무더운 북태평양 고기압의 가장자리에 들어 구름이 조금 끼거나 맑은 날이 지속된다(기상청, 1994). 그림 4를 보면 장마의 마지막 시기인 14일부터 운량이 점차 감소하며 오존농도가 상승하기 시작하여 16~19일 기간 중 100 ppb를 초과하게 된다. 20일에 오존농도가 감소하였다가 두 번째 사례로 선정된 21일부터 다시 상승하기 시작하여 29일까지 최고 기온이 35°C를 넘는 고온과 함께 고농도가 지속된다 1994년 7월 사례는 장마가 종료된 후 북태평양 고기압의 발달로 이례적으로 높은 기온과 함께 오존농도가 장기간 높았던 사례이다.

그림 5는 장마 끝 무렵인 14일과 오존 농도가 약간 감소하였던 19일, 그리고 고농도 사례 한가운데에서 기온이 가장 높았던 24일과 사례 마지막인 29일의 지상과 상층의 바람장 및 지상기압장, 850 hPa의 지오포텐셜 고도 분석 결과이다. 장마시기였던 14일 한반도에는 북동쪽의 저기압과 남쪽의 북태평양 고기압의 전선면에 위치하여 남서풍이 강하다. 14일 이후 장마전선이 소멸되면서 북태평양 고기압이 한반도에 영향을 미치기 시작하며 기온과 함께 오존농도가 상승하나, 19일 한반도 북쪽에 저기압이 발달하면서 북태평양 고기압과의 경계면에서 한반도 상층에 강한 서풍이 발달된다. 저기압이 북동쪽으로 이동되고 한반도는 다시 북태평양 고기압의 영향권에 들면서 대기는 매우 안정되고 단열하강에 의하여 기온이 더욱 높아진다. 사례 기간 중 동풍은 24일 지상 및 상층의 일기도에서와 같이 북태평양 고기압 가장자리에서 일본 남쪽에서 북상하던 태풍의 영향 때문이다. 24일 일본 남쪽에 있던 태풍이 점차 북상하여 26일경에 남해 동부 해상에서 열대성 저기압이 되어 남부지방은 강수와 함께 흐리나(기상청, 1994) 수도권 지역은 여전히 맑다. 고농도 사례의 종료시기인 29일은 지상 기압장에서는 잘 나타나지 않으나 상층 일기도에서는 고기압이 동해상에 약하게 남아있고, 서해 상에는 기압골이 형성되어 수도권 지역도 점차 흐려지고 강수와 함께 오존농도는 감소한다.

1994년 7월 사례는 기본적으로 북태평양 고기압이 한반도로 확장되면서 발생되었다. 그림 6은 7월 14일부터 30일까지 서울, 수도권 지역의 오존농도와 풍향, 풍속 변화이다. 14일 이후 고기압권에 들며 서풍이 약해지면서 해륙풍이 나타나며 오존 농도가 상승하고, 북쪽에 저기압이 발달하면서 서풍이 강해지며 오존 농도는 감소한다. 21일 이후 다시 고기압권에 들면서 풍속은 더욱 약해지고 기온이 상승하며 이후 9일간 오존 농도가 100 ppb를 훨씬 상회한다. 사례 초기에는 해륙풍이 형성되나 사례 후반 일본 남쪽 태풍의 영향으로 동풍계열의 바람이 지속된다. 고온과 낮은 풍속의 전형적인 고기압 조건에서 농도가 상승함에 따라 오존 농도의 일변화 모습도 비교적 균일하다.

3.3 1994년 8월 사례 (1994. 8. 22~24)

1994년 8월 사례가 시작되기 전 17일까지 저기압의 영향으로 약간의 강수가 있었으나(기상청, 1994), 이후 다시 북태평양 고기압의 영향으로 24일까지 강수는 없었다. 1994년 8월 사례는 우선, 강수현상이 종료되고 고기압의 영향을 받은 직후 오존농도가 상승하지 않고 수일이 지난 후에 상승하였다는 점에서 앞의 두 사례와 다르다. 그림 7은 고농도 사례 전인 21일과 사례 중의 23일, 종료 된 25일의 지상 및 상층일기도이다. 18일부터 날씨가 맑았음에도 불구하고 오존농도가 크게 상승하지 않은 것은 21일 지상 및 상층 일기도에 나타난 바와 같이 한반도 북동쪽으로부터 공기가 유입되었기 때문으로 추정되는데, Akimoto 등(1996)에 의하면 한반도 북동부는 대양만큼은 아니나 아시아 대륙의 배경 농도에 상응할 만큼 깨끗한 지역이다. 반면 고농도 오존이 발생하였던 23일 지상에서는 중국 남동부와 일본에 저기압이 위치한 반면 한반도는 상대적으로 고기압 중심부에 들어 종관풍이 약하다. 25일 중국 남동부의 저기압이 서해상으로 이동하면서 서울, 수도권 지역은 많은 강수와 함께 오존농도가 급격히 감소된다.

18일부터 오존농도 상승에 필요한 기상조건이 형성되기 시작하였음에도 북동부로부터 깨끗한 공기가 유입됨에 따라 오염물질의 농도가 낮아져 오존

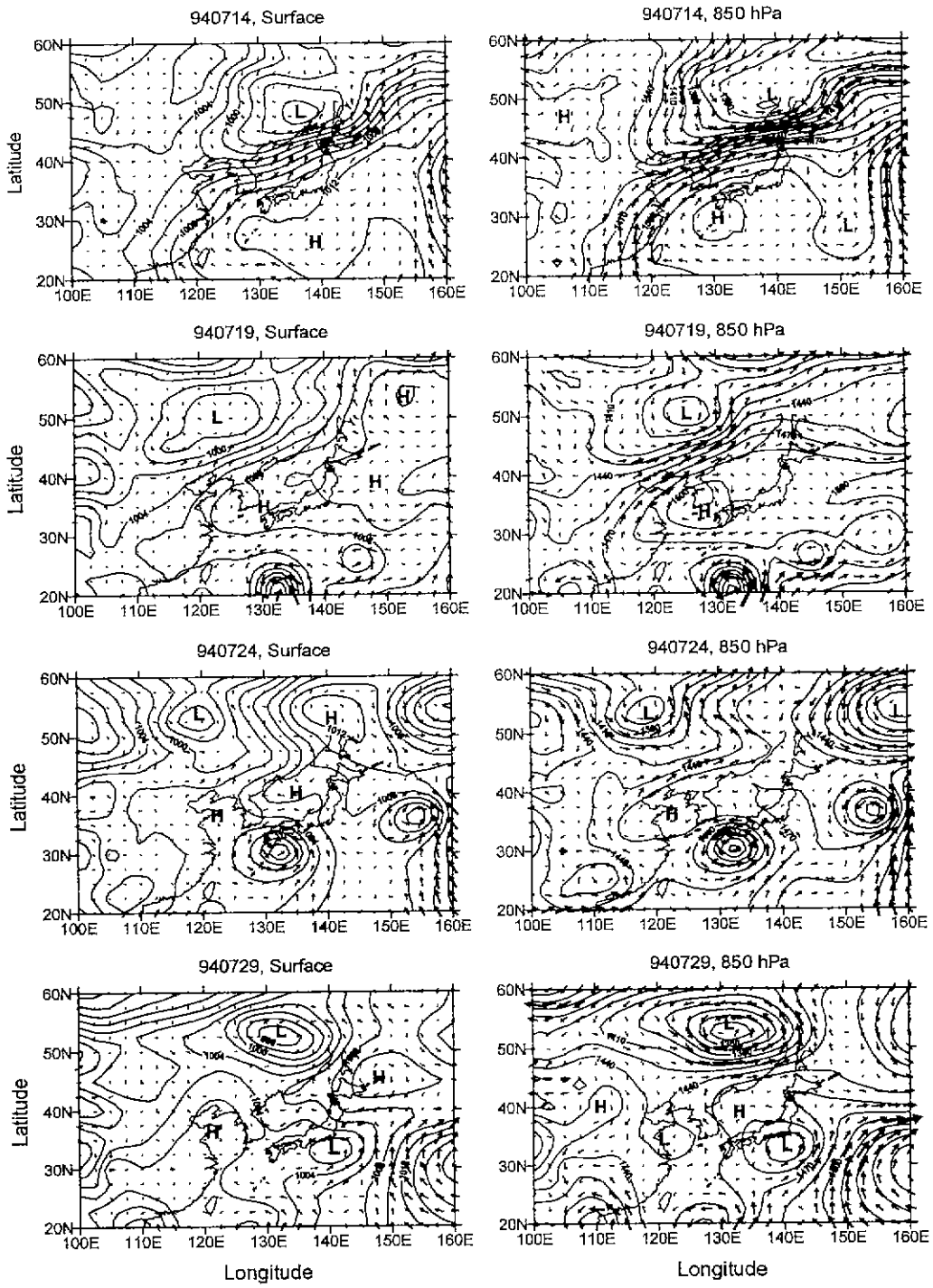

Fig. 5. Wind fields at 09:00 LST on July 14, 19, 24, and 29, 1994 on the surface and the level of 850 hPa. The contours on the surface indicate the pressure distribution (hPa) and those at 850 hPa indicate the geopotential height (m).

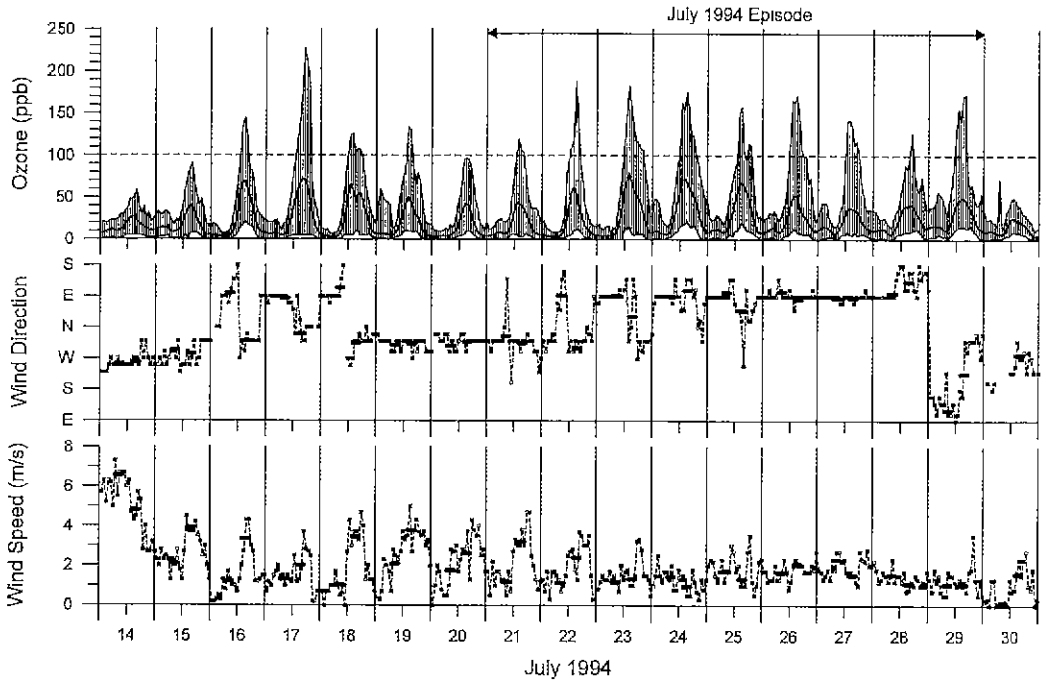

Fig. 6. Variations of ozone concentration, wind direction and speed during July 14 to 30, 1994 in GSA. The July 1994 episode lasts from July 21 to 29. Lines and symbols have the same interpretation as those in Fig. 2.

농도가 상승하지 못하였다면 광화학 오염물질 외에 다른 오염물질의 농도를 통하여서도 이와 같은 사실을 확인할 수 있어야 한다. 그림 8에서는 저기압에 의하여 미량의 강수가 있었던 17일 이후, 18일부터 25일까지 대표적 1차 오염물질로써 서울, 수도권 지역 평균 CO 농도 변화를 조사하였다. 유사한 기상 조건에서 배출이 이루어졌다면 일변화가 두드러질 뿐이나, 그림 8에서는 21일까지 낮은 농도가 유지되다가 고농도 오존 사례 기간 동안 농도 상승이 뚜렷하다. 마침 18일이 목요일이고 20, 21일이 토, 일요일, 22일이 월요일이기 때문에 차량 통행량 변화에 따른 주중(weekly) 변화의 가능성이 있어 7월 7일부터 8월 18일까지 6주간의 CO 농도 변화를 아울러 살펴보았다. 두가지 사실을 알 수 있는데, 우선 (1) 8월 18일부터 25일까지의 변화가 보편적 주중 변화일 가능성은 거의 없다는 점과 (2) 8월 10, 11일 이틀에 걸친 90 mm 가까운 강수로 일주일간 CO 농도가 낮았고 18일 상승하다가 19. 20, 21일 주춤하였다는 점이다.

그림 9는 같은 기간 동안의 오존 농도와 풍향, 풍속 변화이다. 19일부터 22일까지 동풍이 제속되어 그림 7의 21일과 같이 한반도 북동쪽에 위치한 고기압의 영향을 암시하고 있다. CO 농도가 낮았던 20일은 오존 농도도 낮으며 종관풍의 영향으로 종일 동풍이 불고 풍속도 비교적 높다. 21일부터 이틀간 동풍 이외의 풍향이 조금씩 많아지며 풍속이 낮아지고 CO와 같이 오존 농도도 높아진다. 23, 24일은 전형적인 해륙풍이 발달하고 있고, 20, 21일 높은 풍속과 함께 밤에도 높았던 오존 농도가 일변화 모습을 갖추며 상승한다. 결국 1994년 8월 사례는 짧은 기간 종관풍이 약해지면서 해륙풍의 발달과 함께 오존 농도가 급상승한 사례로 이해할 수 있다. 그러나 다른 사례와 달리 300 ppb 이상 농도가 상승하고 서울, 수도권내 13개 측정소에서 100 ppb를 상회할 만큼 광범위하게 오존 농도가 높았던 특별한 이유를 아직은 발견할 수 없다.

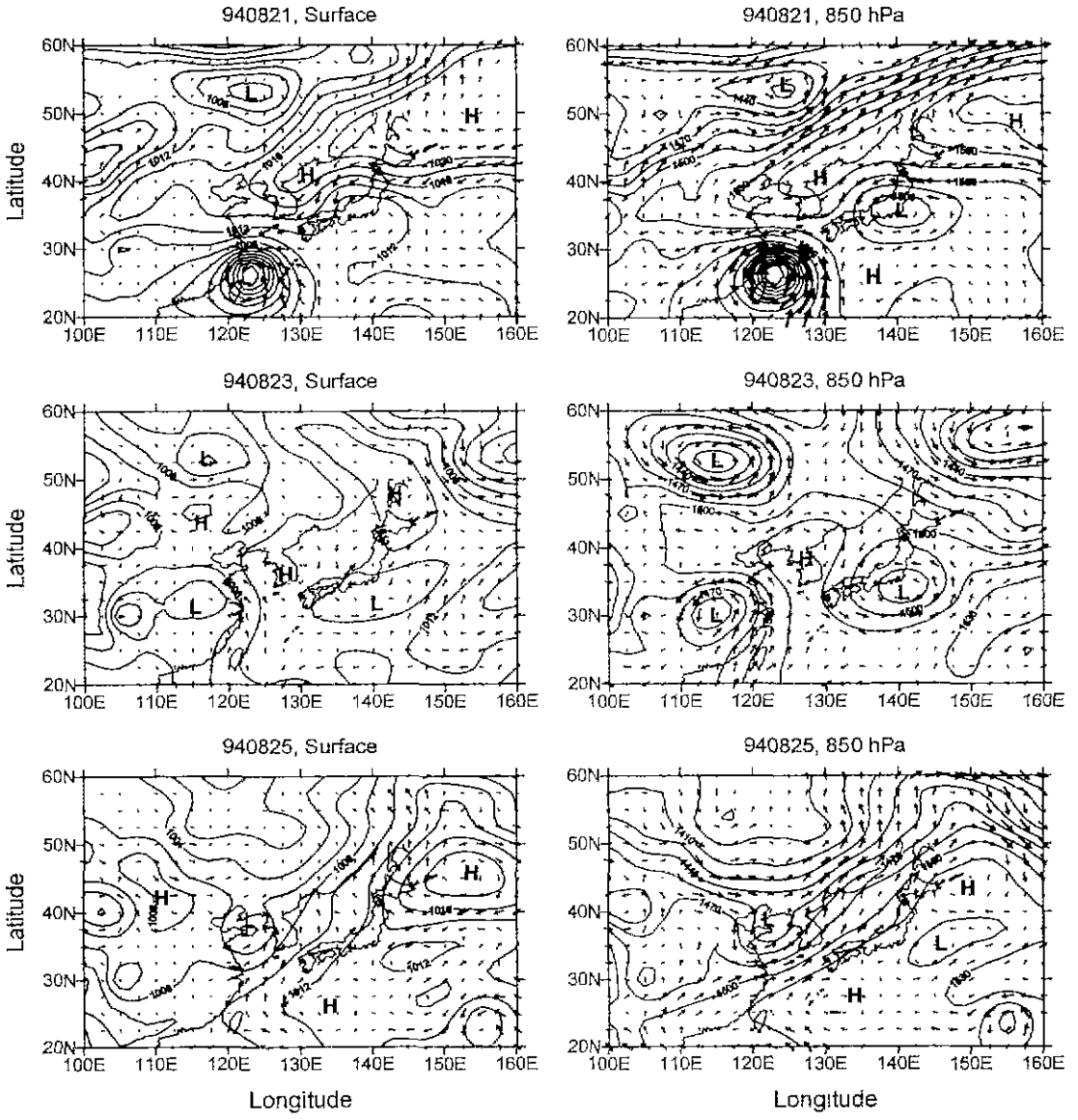

Fig. 7. Wind fields at 09:00 LST on August 21, 23, and 25, 1994 on the surface and the level of 850 hPa. The contours on the surface indicate the pressure distribution (hPa) and those at 850 hPa indicate the geopotential height (m).

4. 검 토

1992년 7월, 1994년 7월. 1994년 8월 등 3개 사례는 각기 남서풍과 동풍, 정체 조건을 대표하는 사례들이다(김영성, 오현선, 1999). 지금까지의 분석에 의하면 1992년 7월 남서풍은 기압골 후면, 고기압 전면에서 서풍계열의 종관풍의 영향이며, 1994년 7월 동풍은 일본 남쪽에서 북상하던 태풍의 영향이다. 그러나 94. 8. 23. 24 광화문의 322, 243 ppb 뿐 아

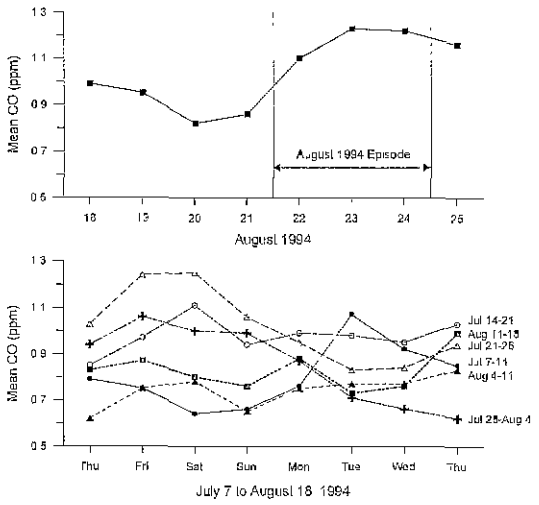

Fig. 8. Variations of mean concentration of CO, as a representative primary pollutant, in GSA during August 18 (Thu) to 25 (Thu) along with weekly variations from July 7 to August 18, 1994.

니라 92. 7. 6 구로의 240 ppb나 94 7 22 수원 권선의 188 ppb 등 어느 사례를 막론하고 가장 높은 농도는 종관풍이 약하여 해륙풍이 발달한 가운데 기록되고 있다. 아침 풍속이 1 5 m/s 미만으로 낮은 조건에서 오존 고농도 발생이 많은 이유는 주로 해륙풍 중 육풍이 약한 때문이다. 이와 같은 상황은 우리나라와 유사한 조건의 그리스 아테네에서도 동일하여, Kallos 등(1993)은 종관풍이 약할 때 바다와 육지 지형의 영향으로 정체 조건이 형성되어 오염물질의 농도가 급격히 상승할 수 있음을 지적하고 있다.

그림 10은 1990년부터 1997년까지 8년간, 평균일과 *100 ppb* 초과 고농도일, *60 ppb* 이하 저농도일의 평균 풍속과 가장 빈번한 풍향의 일변화를 비교한 것이다. 저농도일에는 풍속이 대체로 높고 풍향도 북동풍으로 일정하여 해륙풍의 모습을 찾기 어렵다. 평균일에도 북동풍의 비율이 높으나 고농도일에는 평균일에 비하여 서풍의 발생이 빠를 뿐 아니라

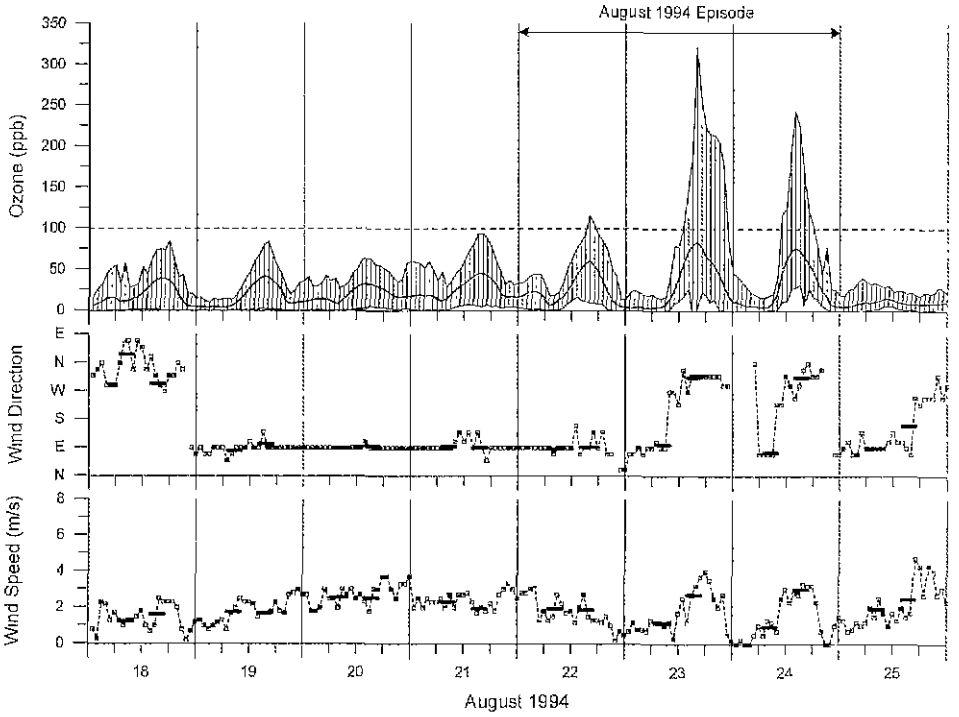

Fig. 9. Variations of ozone concentration, wind direction and speed during August 18 to 25, 1994 in GSA. The August 1994 episode lasts from August 22 to 24. Lines and symbols have the same interpretation as those in Fig. 2.

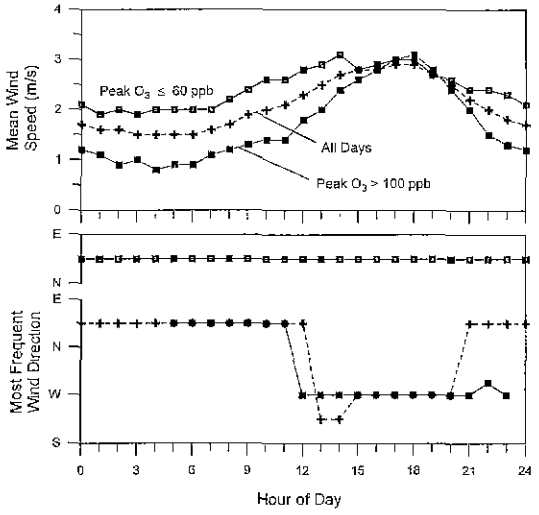

Fig. 10. Diurnal variations of mean wind speed and most frequent wind direction on high- and low-ozone days in comparison with those for all days in Seoul, July and August during 1990~1997. Here, high-ozone day means daily maximum ozone exceeds 100 ppb and low-ozone day means daily maximum ozone is 60 ppb or lower. The numbers of high- and low-ozone days are 118 and 159, respectively, in July and August for 8 years.

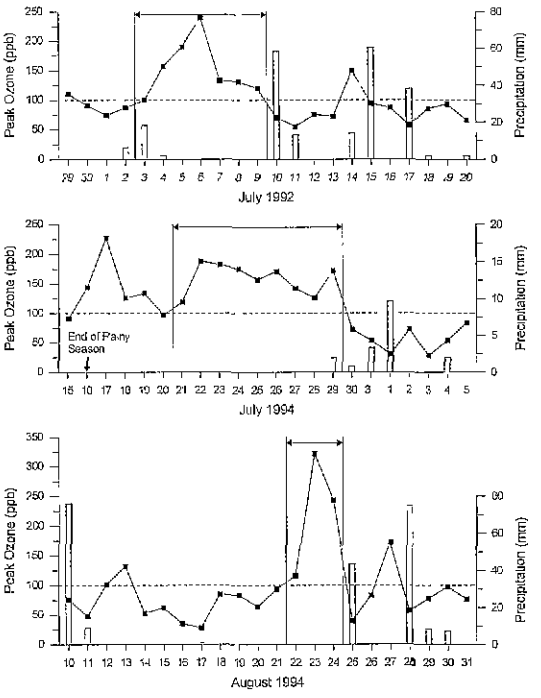

Fig. 11. Peak ozone in GSA and precipitation measured at the Seoul Meteorological Administration around the three high-ozone episodes. Each episode is marked by vertical lines and horizontal arrows. Shaded bar indicates precipitation.

늦게까지 지속되어 서풍의 비율이 높다. 고농도일에 서풍이 많은 것은 강한 일사로 육지의 온도가 높아 해풍이 발달한 때문으로 이해할 수 있다. 고농도일에 24시부터 5시까지 풍향이 표시되지 않은 것은 0.3 m/s 미만의 정체 비율이 가장 높기 때문이다. 평균일에 비하여 육지가 일찍 더워지고 늦게 식어 해풍의 지속시간이 길 뿐 아니라, 새벽에도 냉각이 충분치 않아 육풍이 발달하지 못하고 정체가 계속된다. 일출 전 육풍이 발생하여 오전 동안 지속되나 대부분 풍속이 1.5 m/s 보다 훨씬 낮다. 김영성 (1997)은 1990년부터 1995년까지 100 ppb 초과 고농도일에 서풍의 비율이 높음을 지적하였는데, 그림 10에 의하면 고농도일에 해륙풍의 발달과 함께 해풍의 지속시간이 길기 때문이다

표 1을 보면 고농도 사례 셋 모두 강수와 함께 종료된다. 김영성 등(1999)이 조사한 바에 의하면 1990년부터 1997년까지 서울, 수도권에서 강수의 영향이 직접적인 가운데 오존이 100 ppb 이상 상승한 경우는 없다. 그림 11은 고농도 사례를 전후한 기간의 서울, 수도권의 최고 농도와 서울 기상청의 강수량 변화이다 강수로써 고농도 사례가 종료되었을 뿐 아니라 사례 후에도 강수가 빈번하여 오존 농도의 추가 상승이 억제되고 있다. 특히 1994년 8월 사례의 경우 다른 사례와 달리 고농도가 지속되지 않고 단기간에 그친 데에는 25일과 28일의 많은 강수가 결정적 역할을 하였음을 알 수 있다. 8월 25일 강수와 함께 감소하였던 오존 농도가 27일 172 ppb까지 상승하다가 28일 70 mm가 넘은 강수와 함께 다시 감소하였는데, 25일 강수에 의한 농도 저하를 제외한다면 22일부터 27일은 동일 사례의 연속으로 볼 수 있다 실제 27일의 기상 특성을 살펴보면, 평균 운량이 0.85로 많을 뿐, 아침 풍향 ESE, 오후 풍향 NNW, 아침 풍속 0.9 m/s, 오후 풍속 2.8 m/s, 최고 기온 30.1°C로 23, 24일과 매우 유사하다.

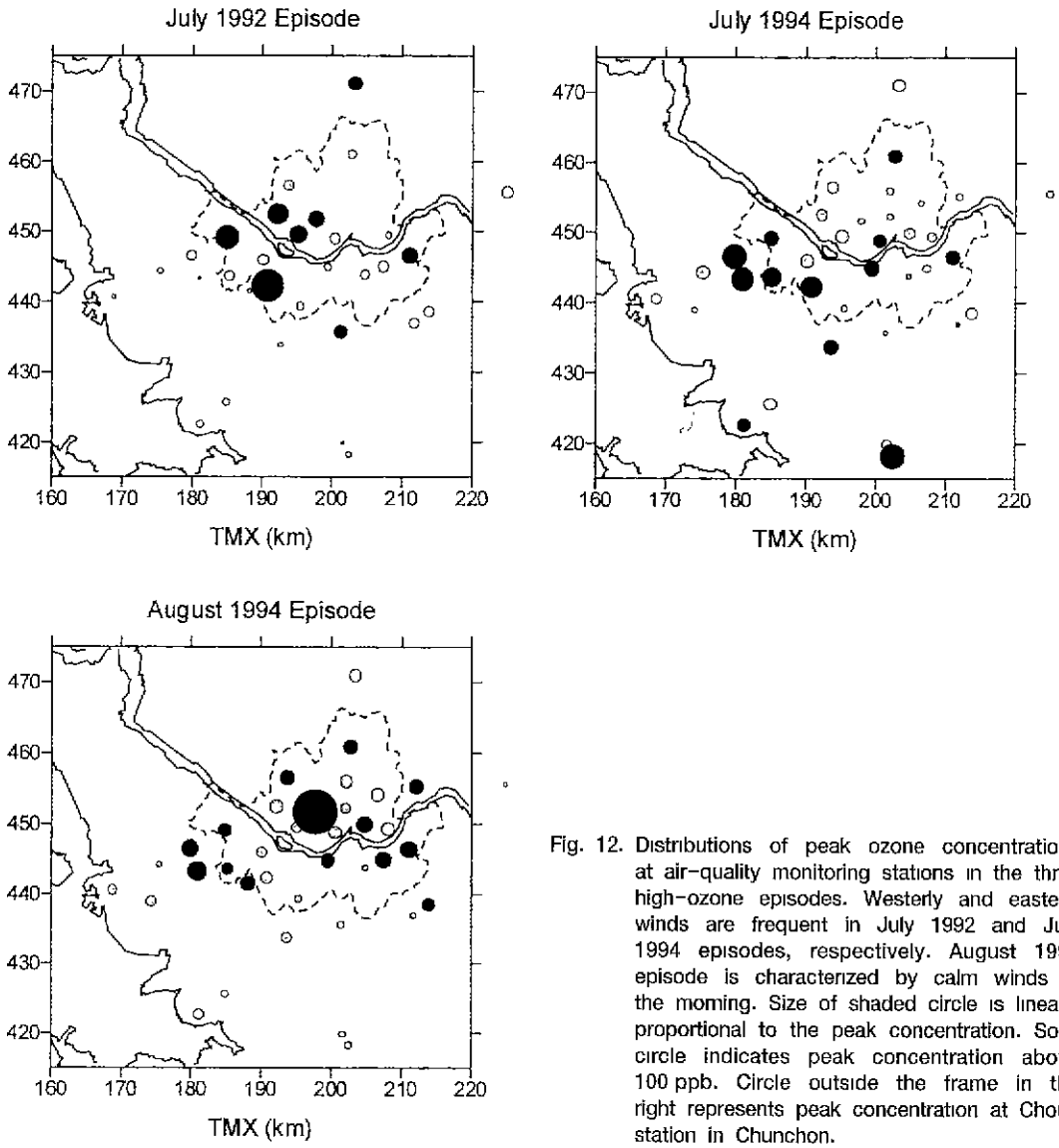

Fig. 12. Distributions of peak ozone concentrations at air-quality monitoring stations in the three high-ozone episodes. Westerly and easterly winds are frequent in July 1992 and July 1994 episodes, respectively. August 1994 episode is characterized by calm winds in the morning. Size of shaded circle is linearly proportional to the peak concentration. Solid circle indicates peak concentration above 100 ppb. Circle outside the frame in the right represents peak concentration at Choun station in Chunchon.

강수의 영향까지를 관찰할 수 있다는 점에서 1994년 8월 사례를 8월27일까지 연장하여 6일간의 변화를 관찰하는 방안을 검토할 수 있다.

마지막으로, 고농도 사례 중 최고 농도가 종관풍이 약하고 해륙풍이 발달되는 조건에서 나타난다 하여도 표 1과 그림 2, 6, 9를 보면 사례별 풍향 조건의 차이를 쉽게 구분할 수 있다. 그림 12는 각 사례기간 동안 측정소별 최고 농도 분포이다. 어느 사례를 막론하고 아침 정체 조건에서 농도가 상승한 비율이 작지 않아 풍향의 효과는 명확치 않다. 그럼에도 서풍이 빈번한 1992년 7월 사례보다 동풍이 빈번한 1994년 7월 사례 때 서울 서쪽 외곽의 농도가 높고, 대표적인 정체 사례로 분류한 1994년 8월 사례에서는 광화문의 최고 농도를 비롯하여 서울을 중심으로 인접지역까지 고루 농도가 높아 풍향의 효과를 짐작할 수 있다.

5. 결 론

김영성과 오현선(1999)이 미국 EPA의 절차에 따라 선정한 1990년부터 1997년 사이 세 개 고농도 사례의 기상 특성을 분석하였다. 1992년 7월 사례(7. 3~9)는 기압골 후면에서 서쪽 고기압의 영향으로 서풍계열의 바람이 많았고, 1994년 7월 사례(7. 21~29)는 북태평양 고기압의 영향으로 전형적인 고기압 조건에서 고농도가 장기간 지속되었으며 기간 중 동풍은 일본 남쪽에서 상승하던 태풍의 영향이었다. 이들 두 사례들에는 기본적으로 서풍과 동풍이 많았으나 사례 중 최고 농도는 종관풍이 약하여 해륙풍이 발달된 조건에서 발생하였다. 고농도 발생일의 해륙풍은 강한 일사로 육지의 온도가 높아 오후에 해풍이 잘 발달한 반면 한밤에도 육지의 냉각이 충분치 못하여 새벽에 정체가 많았고, 아침에 육풍이 약하여 미국 EPA 기준 정체에 해당하는 1.5 m/s 미만이었다. 1994년 8월 사례(8. 22~24) 중 23일과 24일은 전형적인 이와 같은 고농도일의 해륙풍 조건에서 오존 농도가 322 ppb와 243 ppb까지 상승하였다.

고농도 사례의 종료에는 세 차례 모두 강수의 역할이 중요하였다. 뿐만 아니라 강수는 고농도 사례 종료 후에도 반복되어 오존 농도의 추가 상승을 억제하였다. 특히 1994년 8월 사례에서는 25일 강수 후 27일 다시 한번 전형적 해륙풍 조건에서 172 ppb까지 오존 농도가 상승하였으나 28일 70 mm가 넘은 강수로 추가 상승이 억제됨으로써, 오존 농도가 가장 높이 상승하였음에도 다른 사례와 달리 사례가 짧은 기간에 종결되는데 결정적 역할을 하였다. 이는 고농도 오존에 관한 한 우리가 지금까지는 자연의 혜택을 받고 있음을 의미한다. 그러나 보다 치밀한 조사 연구 등 대응이 수반되지 않은 상태에서 이상 기후가 닥치는 등 상황이 변할 경우 전혀 다른 양상이 전개될 수 있다는 점에서 가장 유의하여야 할 부분이기도 하다.

1992년 7월 사례는 초기에 운량이 100%인 상황에서 새벽에 100 ppb까지 오존 농도가 상승하며 사례가 시작되었다는 점과 후반에는 높은 풍속과 함께 밤에도 오존 농도가 떨어지지 않아 오염물질의 이동에 의한 오존 농도 상승을 짐작하게 하고 있다는 점에서 추후 검토가 필요하였다. 세 사례 중 1994년 7월 사례는 강한 고기압에 의한 높은 기온, 낮은 풍속, 강한 일사 등 가장 전형적인 고농도 사례였다(NRC. 1991).

감 사

본 연구는 한국과학기술연구원 자체 지원 사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

기상청(1994) 기상월보, 1994년 7, 8월

김영성(1997) 1990~1995 서울 · 수도권 지역의 광화학 오염현상, 한국대기보전학회지, 13, 41-49

김영성, 오현선(1999) 1990~1997 기간 중 서울 · 수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15, 267-280.

김영성, 김영진, 윤순창(1999) 고농도 오존일의 강우와 운량, 한국대기환경학회지(심사중)

김진영(1995) 여천 동광양 지역 지상 오존 농도와 기상인자와의 상관성 분석, 서울대학교 대기과학과 이학석사 학위논문

정용승, 정재설(1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7, 169-179

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 I 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.

Blumenthal, D L , W H. White, and T.B. Smith(1978) Anatomy of a Los Angeles smog episode pollutant transport in the daytime sea breeze regime, Atmospheric Environment, 12, 893-907.

Chang, Y.S., G.R. Carmichael, H Kurita, and H. Ueda(1989) The transport and formation of photochemical oxidants in central Japan, Atmospheric Environment, 23, 363-393.

Kallos, G , P. Kassomenos, and R A. Pielke(1993) Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece, Boundary-Layer Meteorol., 62, 163-184.

Liu, X., G. Mauersberger, and D. Moeller(1997) The effects of cloud processes on the tropospheric photoche-

mistry. an improvement of the EURAD model with a coupled gaseous and aqueous chemical mechanism. Atmospheric Environment, 31, 3119-3135

NRC (National Research Council) (1991), *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution* National Academy Press, Washington, D C.

U.S. Environmental Protection Agency (1991) Guideline for Regulatory Application of the Urban Airshed Model, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC

Wishinski P R and R.L. Poirot (1998) Long-term ozone trajectory climatology for the Eastern US Part I Methods, A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14~18, San Diego CA, Paper No. 98-TP43.05