

대구시의 고농도 오존 발생 일에 나타나는 기상학적 특성

손임영¹ · 윤일희^{1,*} · 김희종²

¹경북대학교 교육대학원 지구과학교육전공, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

²경북대학교 천문대기과학과, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

Meteorological Characteristics of High-Ozone Episode Days in Daegu, Korea

Im-Young Son¹ · Ill-Hee Yoon^{1,*} · Hee-Jong Kim²

¹Earth Science Education Major, Graduate School of Education,

²Department of Astronomy and Atmospheric Sciences,
Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea

Abstract : This study analyzes the surface ozone and meteorological data in Daegu for a period from 1997 to 1999. It also investigates the meteorological characteristics of high ozone episodes. For this study the high ozone episode has been defined as a daily maximum ozone concentration higher than 100ppb in at least one station among six air quality monitoring stations in Daegu, Korea. The frequency of episodes is 13 days. The frequency is the highest in May and September. The average value of daily maximum ozone concentration is 81.6ppb, and 8-hour average ozone concentration is 58.6ppb for the high episodes. This shows that ozone pollution is continuous and wide-ranging in Daegu. The daily maximum ozone concentration is positively correlated to solar radiation and daily maximum temperature, but negatively correlated to relative humidity, wind speed and cloud amount. The maximal correlation coefficient to solar radiation is 0.45. The differences between high ozone episode day's daily mean meteorological value and monthly mean value are +1.58hPa for sea level pressure, +3.45°C for maximum temperature, -5.69% for relative humidity, -0.46ms⁻¹ for wind speed, -1.79 for cloud amount, and +3.97MJm⁻² for solar radiation, respectively. This shows that strong solar radiation, low wind speed and no precipitation between 0700~1100LST are favorite conditions for high ozone episodes. It is related to the morning stagnant condition.

Keywords : surface ozone concentration, ozone episode day, meteorological characteristics

요약 : 이 연구에서는 1997년부터 1999년 3년 간 대구광역시의 시간별 O₃ 농도 자료와 기상자료를 분석하여, 대구시의 고농도 오존 발생 일에 나타나는 기상학적 특성을 알아보고자 한다. 고농도 오존 발생 일의 선정은 우리나라 환경기준치인 1시간 평균 오존 농도 100ppb를 초과한 지점이 대구시의 6개 측정 지점 중 한 지점이라도 있는 경우로 정했다. 고농도 오존 발생 일은 13일이었으며, 5월과 9월이 가장 그 빈도가 높았다. 고농도 오존 발생 일의 하루 평균 최대 오존 농도는 81.6ppb이었으며, 8 시간 평균 농도는 58.6ppb이었다. 이는 대구의 오존 오염이 연속적으로 그리고 광범위하게 일어났고 있음을 의미한다. 하루 최고 오존 농도는 일사량, 최고 온도와 양의 상관성을 보였으며, 상대 습도, 풍속, 구름양과는 음의 상관성을 보였다. 일사량과의 상관계수가 0.45로 가장 높았다. 고농도 오존 발생 일의 기상 값과 그 날을 포함하는 월 평균 값과의 차이를 보면, +1.58hPa(해면 기압), +3.45°C(최고 기온), -5.69%(상대 습도), -0.46ms⁻¹(풍속), -1.79(구름양), +3.97MJm⁻²(일사량)을 각각 보였다. 이는 0700~1100LST 사이의 높은 일사량, 낮은 풍속, 무강수가 고농도 예측의 중요 특징임을 나타낸다. 이는 이 시간의 정체와도 연관이 있다.

주요어 : 지상 오존 농도, 고농도 오존 발생 일, 기상 특성

서론

지표면 부근의 오존은 국지적인 광화학 스모그로 생성된 옥시단트(oxidants)의 지표물질이다. 이는 차량 및 산업시설에 의해서 배출되는 질소산화물(NOx), 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 탄화수소류(Hydro-Carbons, HCs) 등의 1차 오염물질이 복잡한 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성되며 광화학적 스모그에 포함되어 도시의 시정 감소를 가져온다. 또한 오존은 인체와 식물에도 심각한 피해를 주는 것으로 알려져 있다(Dix, 1965; Heath and Taylor, 1997). 이러한 오존의 광범위한 피해는 오존에 대한 관심을 고조시켜 국내에서도 1990년대 초 오존 문제가 등장된 후 빠르게 사회 현안으로 부각되고 있다.

지상 오존은 인공적인 오염물질의 광화학 반응의 결과로 생성되며, 기상조건이 강하게 영향을 미친다. 그러므로 많은 국내외의 연구들도 오존 고농도를 유발할 수 있는 특징적인 기상을 파악하고자 주력하고 있다. 질소산화물, 탄화수소와 기상변수 사이의 복잡한 상호작용은 오존오염 사건의 위치와 강도, 기간을 결정한다(Seinfeld, 1989; Comrie, 1990). Chung (1977)은 캐나다 온타리오 주 남부의 오존 고농도가 기온, 기압, 일사량, 풍향, 풍속과 상관이 높으며, 지표에서 따뜻한 공기의 이류가 일어날 때 발생한다고 했다. Vito(1990)는 미국의 뉴욕과 아틀란타 그리고 뉴저지 등에서의 기후와 계절별 오존오염도의 상관관계 연구에서 지속적인 높은 온도가 만성적인 높은 오존오염도와 관계가 있음을 보고하였다. 한편 Liu et al.(1994)는 타이페이 분지의 고농도 오존발생일의 분석을 통하여 정오의 고농도 오존 발생은 아침의 낮은 풍속, 적은 구름양, 무강수, 강한 일사 등의 정체상황이 중요한 변수임을 밝혔다.

국내에서는 120ppb를 초과하여 오존 주의보가 발령된 날의 82%가 오전 풍속 1.5ms^{-1} 미만의 정체조건에서 발생했다는 연구 보고가 있다(김영성과 오현선, 1999a). 부산지역에서는 60ppb 이상 고농도 오존이 일 최고 기온 22°C 이상, 상대습도 85% 이하, 일 평균 풍속 5ms^{-1} 이하, 구름양 5/10 이하, 일조시간 9시간 이상에서 발생이 용이하며, 북태평양 고기압이 가장 우세하고 그 다음으로 서쪽과 남서쪽에서 다가오는 이동성 고기압의 종관 기상학적 형태가 많다고 했다(전병일 외, 1995). 또한 김유라 외(2001)는 5개

대도시(서울, 부산, 대구, 광주, 대전)의 고농도 오존이 발생하는 날의 종관 기상 패턴이 고기압과 관련 있음을 보고하였다.

고농도 오존 현상은 국지적인 기상 특성의 영향을 많이 받고, 오존 예보의 대상 지역이 각 도시 별로 이루어지므로, 도시별로 그 지역의 오존 오염에 영향을 미치는 요인을 분석하는 것이 매우 필요하다. 그러므로 이 연구에서는 대구시의 1997년부터 1999년 3년간 대구광역시의 환경부 산하 대기오염 측정망에서 관측한 시간별 오존 농도 자료와 대구 기상대에서 관측한 기상자료를 분석하여, 대구시의 고농도 오존 발생 일에 나타나는 기상학적 특성을 알아보고자 한다.

분석자료 및 분석방법

이 연구의 대상지역은 대구광역시로 환경부 산하 6개 대기질 측정망이 있으며 그 위치와 지형은 Fig. 1에 나타내었다. 이 연구에서 사용한 자료는 오존 농도 자료와 기상자료이다. 오존 농도 자료는 6개 대기질 자동 측정망 자료(주거지역: 대명동·산격동·만촌동, 상업지역: 삼덕동, 공업지역: 이현동·노원동)에서

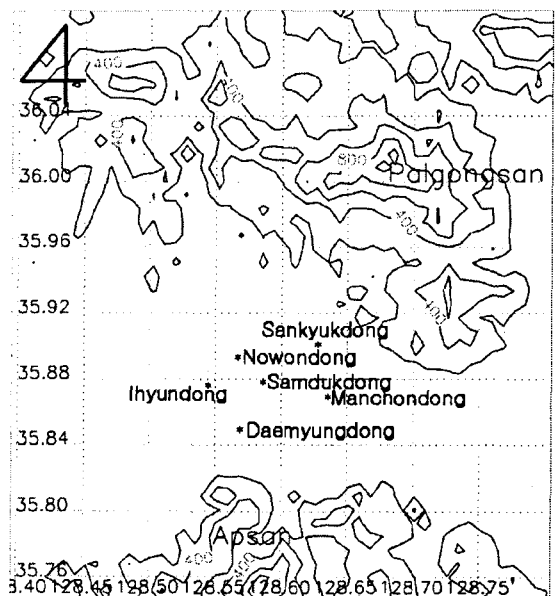


Fig. 1. Map of monitoring stations in Daegu City. The air quality monitoring stations are operated by the Environmental Provincial Management Department. The contour interval of topography is 200m.

관측된 시간별 오존 농도를 이용하였다. 대상기간 중 측정지점이 삼덕동에서 수창동으로, 산격동에서 북한동으로 이동되었으나 인접한 지역임으로 기존 자료에 포함시켰다.

측정자료의 선택은 24시간 중에서 20시간(83%) 이상 측정된 자료를 유효자료로 취급하였다. 20시간 미만 측정된 경우라 하더라도 일최고 오존 농도가 100ppb 이상 발생한 날은 유효자료에 포함시켰으며 결국 시간의 농도는 내삽으로 구하였다.

오존농도와 관련되는 기상자료를 분석하기 위해서 기상청에서 발간하는 기상일보(기상청, 1997~1999)에서 일 평균 기상자료를 이용하였으며 종관 기상을 파악하기 위해 일기도(기상청, 1997~1999)를 이용했다. 기상의 일 변화를 파악하기 위해서는 대구기상대에서 관측한 시간별 기온, 상대습도, 구름양, 풍향, 풍속 자료를 이용했다.

이 연구에서는 고농도 오존 발생 일의 선정 기준을 우리나라 환경기준치인 1시간 평균 오존 농도 100ppb를 초과한 지점이 대구시의 6개 측정지점 중 한 지점이라도 있는 경우로 정했다.

분석결과

일 최고 오존농도와 일 평균 기상인자와의 관련성

Fig. 2는 1997년부터 1999년 3년 동안 5월에서 9월까지의 일 최고 오존농도(6개 측정지점의 일 최고 농도 중 가장 높은 농도)와 그 날의 일 평균 기상요소를 비교한 것이다.

비가 오는 날은 강우에 의한 오염물질의 세정효과로 오존농도가 전반적으로 낮아 고농도 오존 일은 일반적으로 비가 오지 않는 날이 많으므로 비가 오는 날의 기상요소는 통계 자료에 포함시키지 않았다. 그 결과, 100ppb 이상인 날 일 평균 기상의 범위는 일 최고 기온 27~36.4°C, 일 평균 상대습도 46~68%, 일 평균 풍속 0.7~2.8ms⁻¹, 일 평균 구름양 2.4~6.8, 수평면 일사량 13.17~23.2MJm⁻²로 나타났다.

고농도 오존 형성은 높은 기온에서 유리하나 기온이 너무 높을 때는 오히려 대기의 불안정으로 인한 활발한 대류의 영향으로 고농도 오존의 빈도수가 낮아짐을 알 수 있다(박옥현과 장은숙, 1987). Fig. 2의 일 평균 풍속 그래프에서 80ppb 이상으로 일 최고 오존농도가 높은 날은 일 평균 풍속이 3ms⁻¹ 이하로 현저히 낮게 분포함을 보여주고 있는 반면, 일 평균

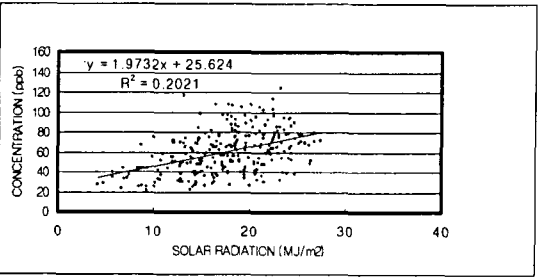
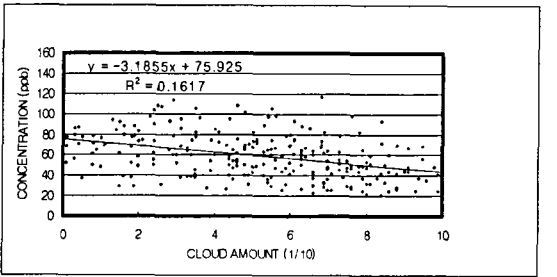
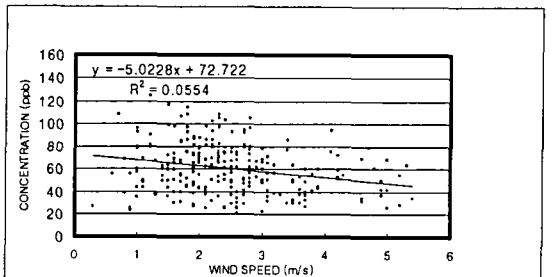
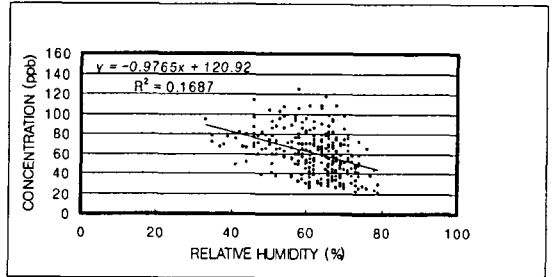
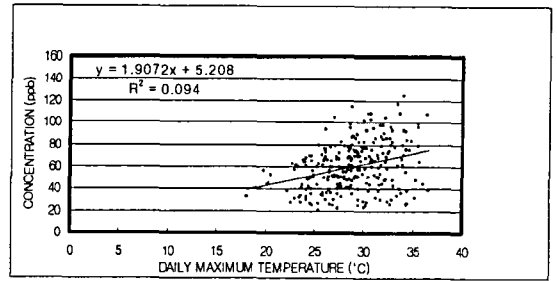


Fig. 2. The daily maximum ozone concentrations measured at air quality stations versus the daily average meteorological parameters during May through September (from 1997 to 1999).

Table 1. Correlation coefficient (r) between daily maximum ozone concentration and daily mean meteorological factor from 1997 to 1999 (May~September) in Daegu.

Meteorological factor	r	r ²	p (significance)
Solar radiation	0.4495	0.2021	0.0001
Relative humidity	-0.4107	0.1687	0.0001
Cloud amount	-0.4022	0.1617	0.0001
Maximum temperature	0.3067	0.0940	0.0001
Wind speed	-0.2354	0.0554	0.0018

풍속이 3ms⁻¹ 이상 일 경우는 80ppb 이상의 고농도가 발생하지 않았다. 이는 풍속이 수평방향의 오염물질의 이동뿐 아니라 이미 생성된 오존 혹은 전구물질의 확산 및 혼합에 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

Fig. 2의 일 평균 구름양 그래프에서 80ppb 이상으로 일 최고 오존농도가 높은 날은 구름양이 대체로 6/10 이하의 분포를 보였고, 구름양이 8/10 이상이 될 때는 80ppb 이상의 고농도가 거의 발생하지 않았다.

Fig. 2의 일사량 그래프에서 80ppb 이상으로 일 최고 오존농도가 높은 날은 최소 13MJm⁻²의 일사량이 필요함을 알 수 있는데 이는 광화학 반응에는 태양 빛(자외선)의 강도가 결정적인 역할을 하기 때문이다. 반면 강한 일사는 수직방향의 대류를 일으켜 오존농도를 희석시키는데도 기여하므로 25MJm⁻²에서는 오히려 오존농도가 낮아짐을 볼 수 있다.

Table 1은 일 최고 오존농도와 일 평균 기상요소와의 상관계수를 구한 것이다. 일 최고 기온과 일사량은 양의 상관, 일 평균 상대습도와 일 평균 풍속, 구름양은 음의 상관을 보였으며 일사량의 경우가 가장 높았다. 그리고 일최고 오존농도와 일평균 기상변수와의 상관계수가 절대값 0.5를 넘지 않는다. 이들의 유의도는 0.0018보다 작아 모두 유의한 관계를 보인다. 또한 결정계수 R²의 값이 0.2보다 전반적으로 낮아 기상변수에 의한 일최고 오존농도의 변화는 설명력이 낮은 편이다. 이는 오존이 광화학 반응과 산화 반응 등 여러 반응에 의해 생성, 소멸되는 2차 오염물질임으로 기상 요소 뿐 아니라 다른 오염물질의 양 등의 다양한 변수에 의해서 결정되기 때문이다(김유근·홍정혜, 1998).

앞의 결과는 이기원(1993)의 서울 광화문 지점의 오존농도가 상대습도(-0.59)와 일사량(0.49)과 가장 상관성이 높으며 일사량에 의해 오존 농도 변화의 21%를 설명할 수 있다는 보고와 유사한 결과이다.

전의찬과 우정현(1999)의 오존농도에 영향을 미치는 주 기상요소가 일사량이며, 이는 독립적으로 오존 농도에 영향을 미치고 다른 기상요소들은 일사량과 종속적인 관계에 있다는 연구결과도 있다. 이들 결과는 오존 농도와 기상요소의 일변화 특성을 분석하여 상관을 구한 것이나, 본 연구에서 일평균 기상값의 차이에 따른 하루 중 최고 오존 농도 변화의 상관 분석 결과와 유사하다.

일반적으로 광화학 반응에 필수적인 태양 빛의 강도가 일사량이 많으며 상대습도가 낮은 맑은 날에 높을 것이라는 예상을 할 수는 있으나, 오존 농도는 단지 이들 뿐 아니라 풍향, 풍속, 구름양, 기온 등의 여러 기상변동에 의한 복합적인 영향을 받으며, 1차 오염물질의 양에 의해서도 영향을 받는다. 또한 이 연구의 기상값은 대구기상대에서 관측한 값을 전 대기오염 측정지점에 동일하게 적용하여 오존농도와와의 상관성을 보는 것이므로 측정소 주변의 기상변화를 상세히 반영하기 어려운 것이 더욱 설명력이 낮은 이유이며 연구의 한계점이 된다.

오존 농도에 영향을 주는 기상변수는 일사량이 독립적인 변수로 중요하게 작용하지만 이와 더불어 여러 가지 기상변수가 상당히 복합적으로 작용함으로 고농도 오존 발생 일에 나타나는 기상학적인 특성이 구체적으로 어느 정도 범위에 나타나고 다른 날과 어떤 차이를 갖는지를 이해하는 것이 오존농도를 예측하는데는 도움이 될 것으로 보인다.

고농도 오존 발생 일의 일 평균 기상과 해당 월 평균과의 편차

Fig. 3은 100ppb를 초과한 고농도 오존 발생 일의 일 평균 기상과 해당 월의 평균과의 편차를 나타낸 것으로, 고농도 오존 발생 일이 발생한 달의 월 평균 값에 비해 고농도 오존 발생 일은 양, 또는 음의 편차를 고르게 보여주고 있다. 평균 해면기압은 해당

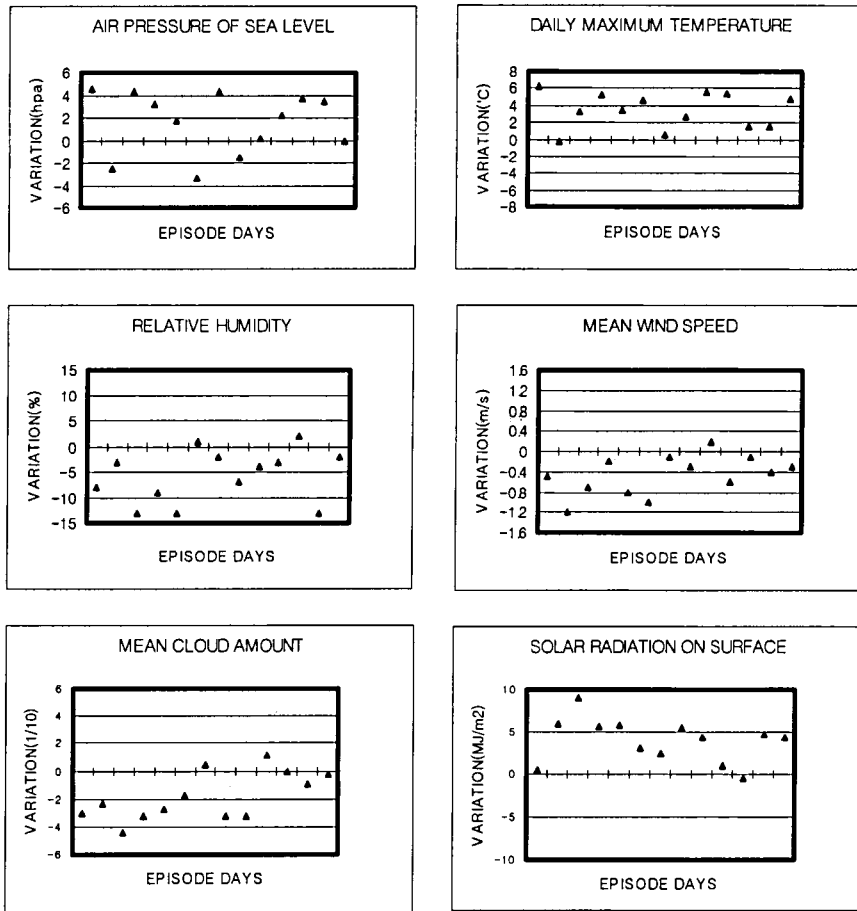


Fig. 3. Difference between daily mean and monthly mean of high ozone episode day (air pressure of sea level, daily maximum temperature, relative humidity, mean wind speed, mean cloud amount and solar radiation on surface), for the period from 1997 to 1999.

월의 평균값보다 1.58hPa 높게 나타났으며, 일 최고 기온은 해당 월의 평균값보다 3.45°C 높았고, 일 평균 상대습도는 해당 월의 평균값보다 5.69% 낮게 나타났다. 또한 일 평균 풍속은 해당 월의 평균보다 0.46ms⁻¹ 낮게 나타났고, 일 평균 구름양은 해당 월의 평균보다 -1.79 낮고, 일사량은 해당 월의 평균보다 3.97MJm⁻² 높았다. 이것은 고농도 오존 발생일이 다른 날에 비해 높은 기온과 일사량, 낮은 상대습도, 평균 풍속 그리고 구름양 등과 같은 기상특성을 잘 반영하고 있다. 다음날의 기상예보를 참조하여 오존농도를 예측 시 고농도를 나타낼 수 있는 기상의 문턱 값으로 적절히 이용할 수 있을 것이다.

고농도 오존 발생 일의 기상 일 변화 특성

고농도 오존 발생 일(≥100ppb)의 기온, 상대습도

그리고 일사량의 일 변화를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. Fig. 4에서 고농도 오존 발생 일의 기온의 일 변화폭은 해당 월 평균에 비해 크며, 오전(0700~1100LST)의 기온 상승률은 1.68°C로 해당 월의 평균값 1.48°C보다 0.2°C 높았다. 또한 일 최고 기온과 일 최저기온의 차이는 12.84°C로 해당 월의 평균값 7.43°C보다 5.41°C 높았다.

Fig. 5의 고농도 오존 발생 일의 상대습도의 일 변화 폭은 해당 월 평균에 비해 크며, 오전(0700~1100LST)의 상대습도 감소율은 -6.90%로 해당 월의 평균 감소율 -3.36%보다 약 2배 정도 감소율이 컸다. 특히 일 최고 오존 농도를 나타내는 1500LST 부근에서 상대습도의 최저치가 나타나는데 이때 해당 월의 평균값과의 차이가 가장 많이 났다.

Fig. 6의 고농도 일의 일사량의 일 변화 폭은 해당

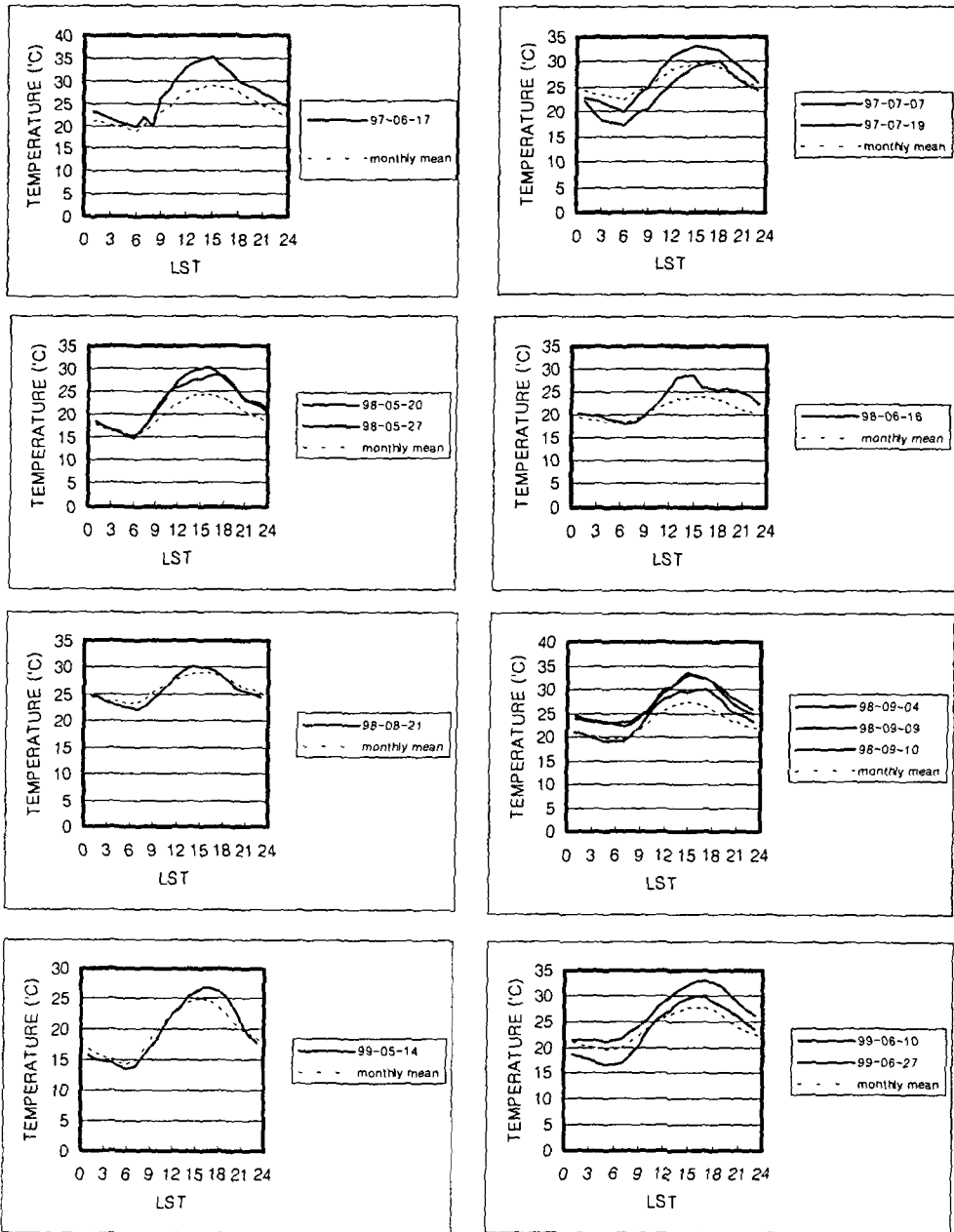


Fig. 4. Diurnal variation of Temperature of the episode day (solid line) and of the monthly mean (dashed line).

월의 평균 보다 크며, 0700~1100LST의 누적일사량은 $6.0MJm^{-2}$ 으로 해당 월의 평균값 $1.3MJm^{-2}$ 보다 4.5배나 높은 값을 나타내었다.

또한 고농도 일 0700~1100LST의 풍속은 $1.4ms^{-1}$ 로 해당월의 평균값 $2.1ms^{-1}$ 보다 $0.7ms^{-1}$ 낮다. 이는 미국 환경보호청에서 제시한 대기가 정체되는 기준이

되는 풍속 $1.5ms^{-1}$ 보다 낮은 풍속이다(USEPA, 1989).

Fig. 7은 시간별 평균 강수량의 변화를 나타낸 것으로 고농도 오존 발생 일과 대상기간 중 비가 온 날을 비교한 그림이다. 강수일의 시간별 강수량은 고르게 분포하는 반면, 고농도 오존 발생 일의 경우는 0700~1100LST에 강수가 전혀 기록되지 않았고

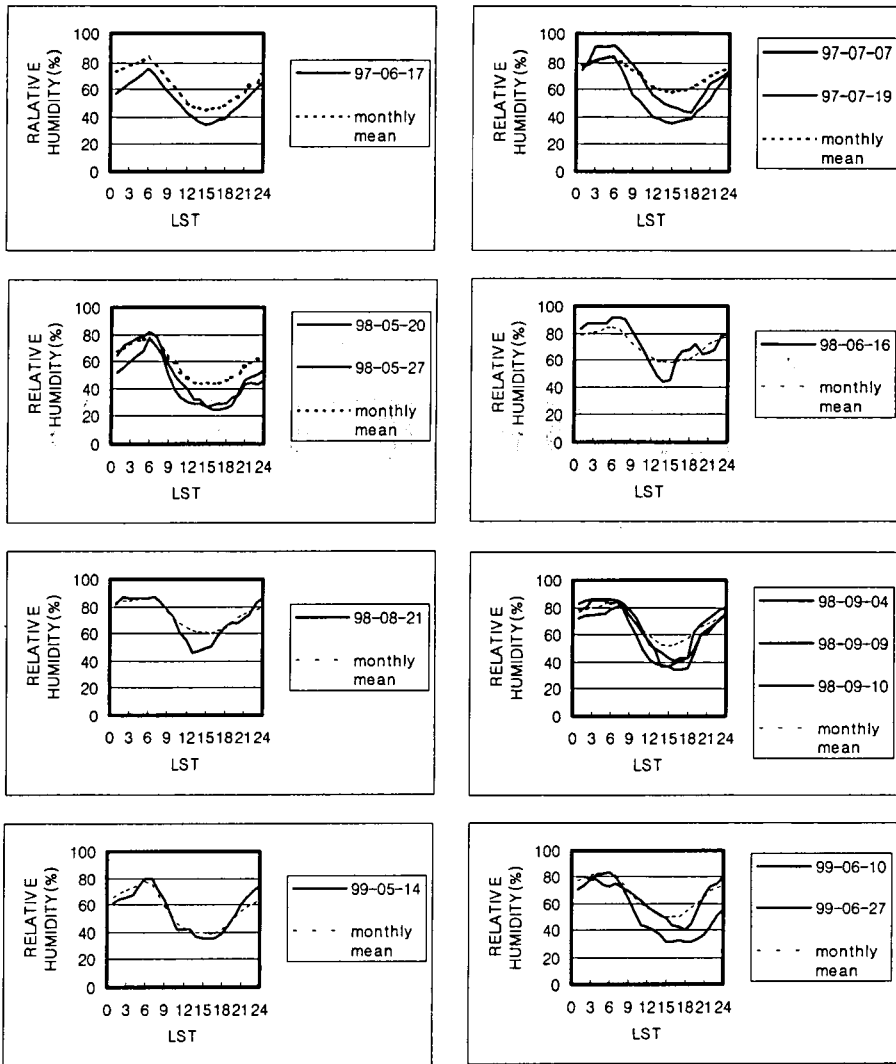


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for relative humidity.

1600LST 이후 단시간에 비가 내렸다. 이는 고농도 오존이 발생하는 맑은 날 오전의 강한 일사가 오후의 강한 대류를 유발하여 생긴 국지적인 순환과 관련이 있으리라 사료되어진다.

실제로 고농도 오존 발생 일로 선정된 13일 중 비가 온 경우($\geq 0.1\text{mm}$)는 2일(1998년 6월 16일, 1998년 8월 21일)로 일 평균 강수량은 2.9mm가 내려, 대상기간(5월~9월, 1996~1999) 중 비가 온 날 총 180일의 일평균 강수량 15.8mm에 비교하면 적은 양의 비가 내렸다.

이러한 결과는 맑은 날 일수록 기온의 일교차가 크고, 상대습도가 낮으며, 일사량이 높아 광화학 반

응에 유리해질 것이기 때문이다. 특히 오후에 오존 일 최고 농도가 100ppb를 초과할 정도라면, 오전의 높은 일사와 낮은 상대습도, 높은 기온, 낮은 풍속이 동반되는 정체 상황이 선행되어야 하며 오전의 무강수의 뚜렷한 특징 또한 동반됨을 잘 보여주고 있다. 그 중에서도 오전의 높은 일사와 낮은 풍속, 무강수가 오존 에피소드 일의 예보에 가장 뚜렷한 조건임을 알 수 있다.

고농도 오존 발생 일의 종관적 특성

1) 종관 기상 특성

100ppb 이상의 고농도가 발생한 날의 기상특성을

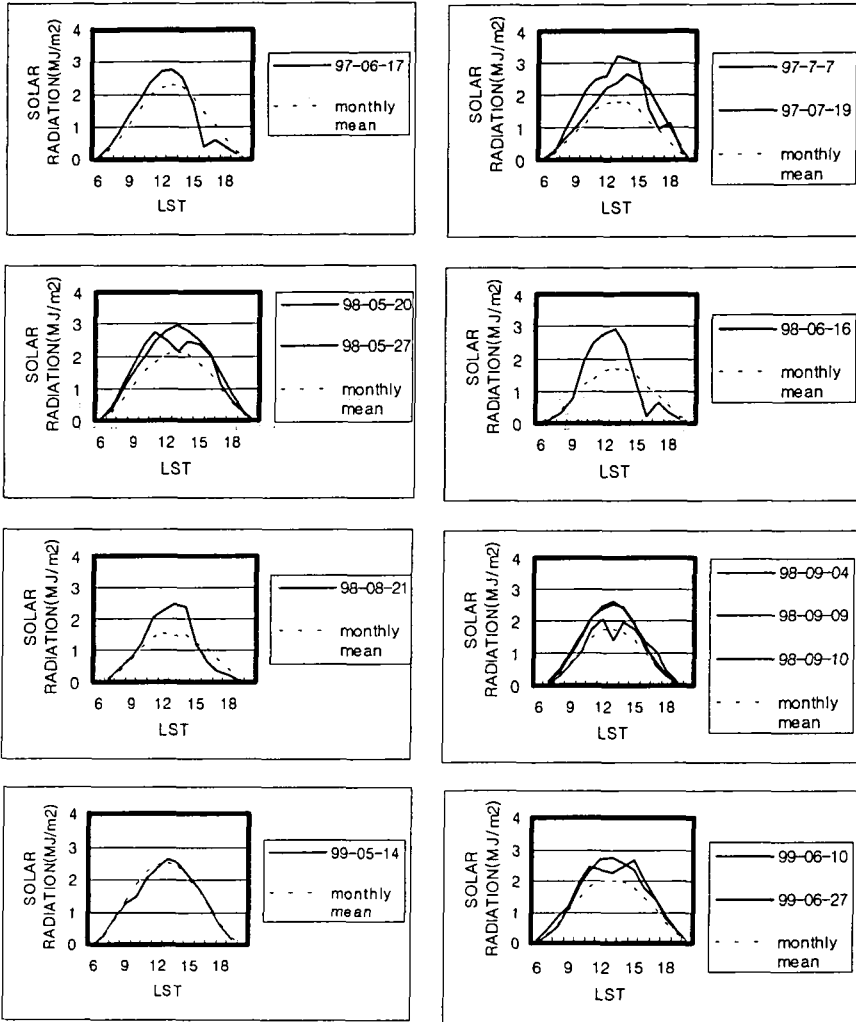


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for solar radiation.

살펴본 결과 특징적으로 전국적인 고온현상이 발생한 날과 일치하고 고기압의 영향권에 들어가 맑은 날씨를 보이는 공통점을 띄고 있다.

고농도 오존 발생 일의 고기압의 형태는 우리나라의 서쪽과 남서쪽에서 이동해 오는 이동성 고기압의 경우가 5일이며, 북태평양의 영향을 받은 경우가 8일이다. 이는 부산의 고농도(≥ 60 ppb) 오존 발생 일의 종관 기상학적인 형태가 북태평양 고기압이 우리나라에 영향을 미치는 남고 북저형이 가장 우세하고, 서쪽과 남서쪽에서 다가오는 이동성 고기압 일 때가 그 다음으로 높다는 선행 연구와 일치된다(전병일 외, 1995).

Weston *et al.*(1989)은 고농도 오존이 발생하기 위한 기상학적 조건으로서 공기덩어리의 유적선이 폐쇄된 높은 오염원 지역을 가져야 하고, 오염물질이 재반응 할 수 있도록 풍속이 약해야 하며, 연직으로의 확산이 제한되도록 경계층 깊이가 낮고, 오존의 연직 수송을 억제하도록 지표 가까이 야간의 강한 역전층이 발달하며 마지막으로 강한 일사가 있어야 한다고 하였다. 이러한 것이 동시에 일어나기 위한 조건은 정상적으로 고기압과 관계가 있으므로 고농도 오존 일의 기압 형태는 고농도 오존일을 예측하는 절대적인 인자는 아니나 밀접한 연관성을 갖는 조건으로 고려해 볼 수 있다.

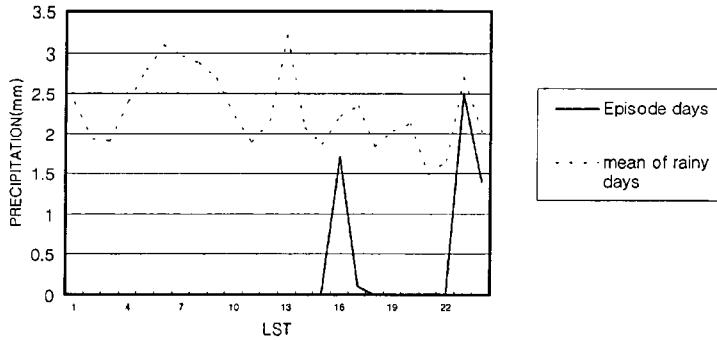


Fig. 7. Diurnal variation of mean precipitation during episode days (solid line) and rainy days (dashed line) May through September from 1997 to 1999.

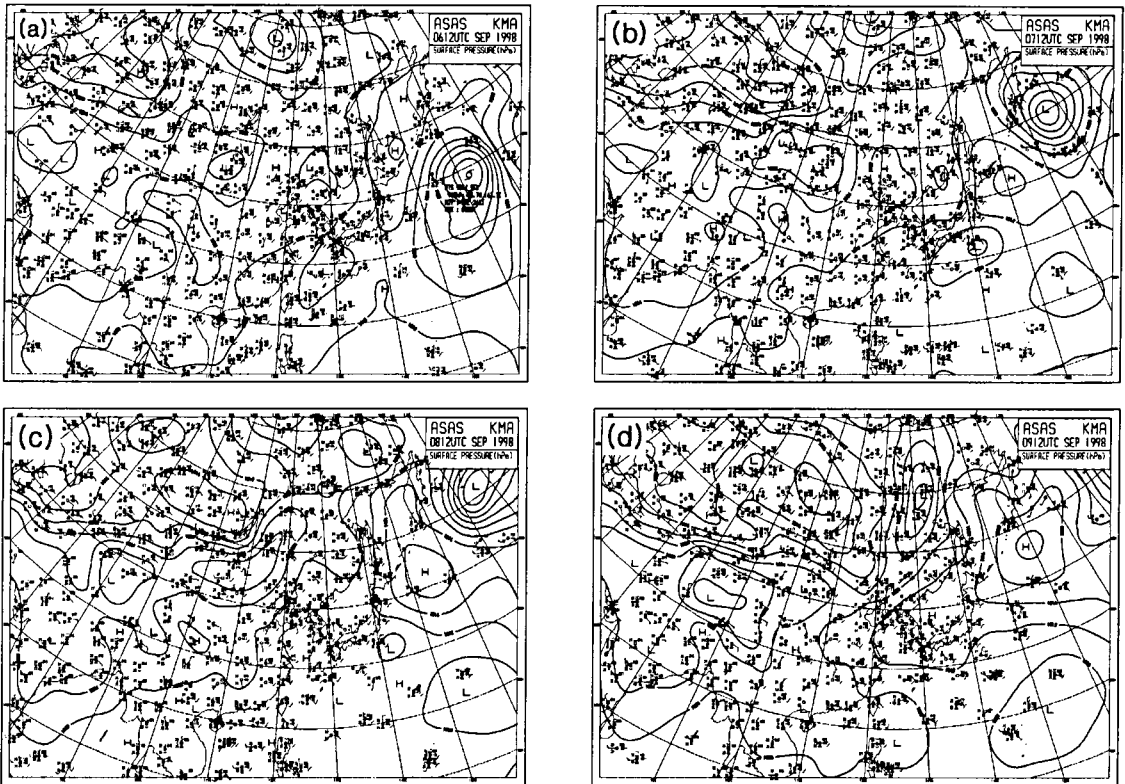


Fig. 8. Surface weather chart at 1200LST September for (a) 6, (b) 7, (c) 8 and (d) 9 of 1998.

2) 일기도

고농도가 발생한 날의 일기도를 살펴 본 결과 우리나라가 전체적으로 북태평양 고기압이나 이동성 고기압의 영향권에 들어가는 날들이다. 그중 1998년 9월 9일의 경우 에피소드일 중 대구시 전체 6개 측정 지점 중에서 4개 지점이 100ppb 이상을 초과한 날로 대상기간 중 가장 고농도 오존의 발생 범위가 넓게

나타난 날이다.

이날을 기준으로 3일전부터 에피소드일 까지 포함하여 4일간의 일기도를 비교해 보면(Fig. 8), 고농도 오존 발생 일의 3일전인 9월 6일의 일기도는 우리나라가 기압골의 영향권에 있으며, 다음날 기압골이 통과한 후, 9월 8일 서쪽에서 다가오는 이동성 고기압이 9월 9일 우리나라에 위치하는 중관적인 기상 호

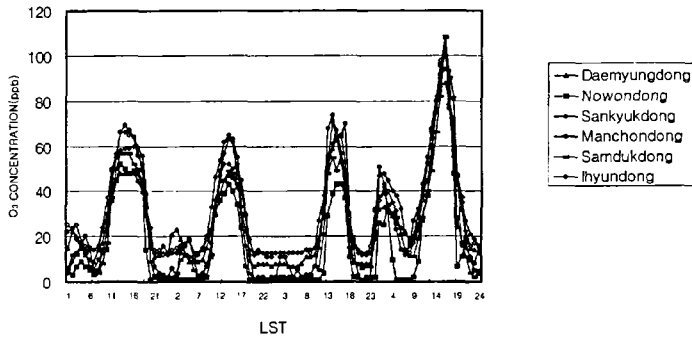


Fig. 9. Variation of ozone concentration during four specified days (September 6 through 9 of 1998).

름을 잘 보여주고 있다.

2~3일 전인 9월 6일과 7일은 기압골의 영향으로 서울, 경기, 충남지역이 10~80mm의 비가 내렸고, 하루전인 8일부터는 이동성 고기압의 영향으로 전국에서 30°C를 웃도는 날씨를 기록하여 9월중 일 최고 기온의 극값을 갱신한 곳이 여러 곳이라고 기록되어 있다(기상청, 기상월보 1998년 9월).

고농도 오존 발생 일인 9월 9일 대구의 일 최고 기온은 33.6°C로 한여름같이 높은 기온을 보이고 있다. 이날의 일교차는 11.3°C, 일 평균 상대습도는 64%, 일 평균 풍속 2.3ms⁻¹, 일 평균 구름양 2.5/10, 수평면 일사량 16.51MJm⁻²로 광화학 오염이 높게 나타나는 전형적인 아주 맑은 날씨를 보였다. 또한 이날의 0700~1100LST의 풍속은 2.2ms⁻¹로 풍속이 약해, 타이페이 분지의 고농도 오존 일이 저 농도 오존 일에 비해 0700~1100LST 풍속이 1~2ms⁻¹ 높은 빈도를 보여, 11시 되기 전의 정체 상황이 광화학 반응과 산화물의 축적에 매우 필요하다는 Liu *et al.* (1994)의 선행연구와도 일치한다. 이날의 일기도는 이동성 고기압이 우리 나라 전역에 영향을 주어 전국적인 고온현상을 유발하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 9는 이들 4일 동안의 오존 농도의 일변화를 나타낸 그림으로 기압골의 영향을 받는 9월 6일, 7일은 65ppb 정도의 오존 최고 농도를 보이다가, 고기압의 영향권에 들어가는 8일부터 오존 농도가 증가하여 고기압이 통과하는 9일날 대구지역 전 측정지점이 100ppb 정도의 높은 오존 최고 농도를 보여주고 있다. 9일 날의 대구 전 지역이 100ppb 이상의 높은 오존농도를 보이는 것은 9일 날의 일기도에서 대구를 비롯한 전국이 이동성 고기압의 영향권에 들어갈 때임을 알 수 있다. 특히 9일 새벽의 오존 농도가

50ppb 정도로 상당히 높게 나타났다. 야간의 오존 농도가 30ppb 이상으로 높은 값이 나타나는 것은 강한 바람에 의한 풍속의 증가로 상하층 공기의 혼합을 유발해서 상층의 오존을 하층으로 내려오게 하여 지표 오존을 상승시키고, 대기의 강제 대류에 의해 대기 경계층 상부의 오존을 포함한 공기가 하층으로 내려왔다는 것을 시사한다고 했다(전병일, 1999).

4일간의 연속적인 일기도와 그 기간동안 대구 전 측정지점의 오존 농도의 일변화를 비교해보면, 기압 배치와 같은 종관적 특성이 오존 생성에 어떤 영향을 미치고 있는지를 잘 보여준다. 대구시의 고농도 오존 발생 일의 종관적 특성은 맑은 날씨를 보이는 고기압의 영향권에 들어갈 때이며, 이는 광화학 반응에 의한 오존 생성에 적당한 날씨로 볼 수 있다.

토의 및 결론

1997년부터 1999년까지의 3년 간 대구시의 6개 대기질 자동 측정망에서 측정된 오존농도자료를 분석한 결과 100ppb를 초과한 고농도 오존 발생 일은 13일이며 이날의 기상자료를 해당 월의 월 평균과 비교하여 고농도 발생일의 기상요소 특성을 분석한 결과에 대한 토의는 아래와 같다

오존농도가 60ppb와 80ppb를 초과한 빈도 수는 5월과 6월에 많이 나타났으며, 100ppb를 초과한 빈도 수는 5월과 9월에 많이 나타났다. 그러나 전병일 외 (1995)에 의하면 부산 지방에서는 고농도 발생 일이 여름에 집중하고 있음을 보여주고 있다. 이는 대구와 부산의 국지 기상 특성이 다름을 보여주는 것으로 생각된다(김유라 외, 2001).

고농도 발생 일의 일 평균 기상요소와 해당 월의

평균기상과의 편차는 일 평균 해면기압 +1.58hPa, 일 최고 기온 +3.45°C, 일 평균 상대습도 -5.69%, 일 평균 풍속 -0.46ms^{-1} , 일 평균 구름양 -1.79 , 일사량 $+3.97\text{MJm}^{-2}$ 의 값을 보였으며, 이는 고농도 오존 일을 발생할 수 있는 기상 문턱 값으로 이용될 수 있으리라 본다.

고농도 오존 발생 일의 기상요소의 일 변화를 해당 월의 평균 일 변화와 비교해 본 결과, 기온, 상대습도, 일사량의 일변화폭은 해당 월 평균에 비해 크게 나타났다. 오전의 누적일사량은 해당 월의 평균보다 4.5배나 높은 값을 나타내었다. 오전의 풍속은 1.5ms^{-1} 보다 낮은 정체 상황을 나타내었고, 오전의 강수는 전혀 기록되지 않았다. 부산 지방의 경우(전병일 외, 1995), 고농도 오존 발생일의 기상 조건과 거의 일치하나 국지적인 특성에 의해서 그 변화 폭은 차이가 났다.

고농도 오존 발생 일인 13일의 종관적 특성을 일기도 유형으로 분류해보면, 북태평양 고기압이 8일, 서 또는 남서쪽에서 이동해 오는 이동성 고기압의 영향권에 들어가 있는 날이 5일이며, 일 최고 기온이 특히 높아 전국적인 고온 현상이 나타난 날과 대체로 일치하였다. 이에 대한 결과는 김유라 외(2001)의 결과와 거의 일치하고 있다.

대구 지역은 다른 지역과는 다르게 남과 북이 산으로 막혀 있는 분지 지형을 형성하기 때문에 대기질의 일변화가 국지적인 특성으로 상이하게 나타나고 있다(서기수 외, 1997). 그러므로 대구 지역의 결과가 다른 지역에도 그대로 적용되기는 어려울 것으로 생각된다. 이에 대해서는 다른 지역과 지속적인 비교연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

결론적으로 대구시의 고농도 오존 발생은 우선 종관 기상계가 고기압의 영향권에 들어가며, 오전의 강수가 없고, 강한 일사가 동반되어야 한다. 오전의 평균 풍속은 대기의 정체 기준인 최대 1.5ms^{-1} 를 넘지 않는 특성을 보이고 있다. 그러나 이 결과들은 대구 기상대에서 관측한 기상 요소의 값을 대구 전 측정지점에 기상 요소 값으로 적용한 것임으로 측정소 주변의 국지적인 기상변동이 오존 농도에 어떻게 영향을 미칠 것인가에 대해서는 충분히 반영되지 않을 수 있다. 대기오염 측정망에서 기상 관측도 같이 측정한다면, 지점별로 국지적인 기상 조건이 오존 농도에 어떤 영향을 주는지 상세한 고찰이 이루어질 것임으로 보다 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- 기상청, 1997-1999, 기상월보.
 기상청, 1997-1999, 지상일기도.
 김영성, 오현선, 1999a, 1990~1997 기간 중 서울 수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15(3), 267-280.
 김유근, 홍정혜, 1998, 야간 지표 고농도 오존에 관한 연구, 한국 대기보전학회지, 14(6), 545-554.
 김유라, 윤일희, 김희중, 2001, 고농도 오존이 발생하는 날의 종관 기상 패턴과 도시별 농도 변화, 한국환경과학회지, 10(6), 437-444.
 박옥현, 장은숙, 1987, 부산에서의 고농도 오존 일의 기상 특성, 대한환경공학회지, 9(3), 55-67.
 서기수, 윤일희, 안병호, 문영수, 1997, 국지 기상 특성에 따른 군산, 대구, 및 포항의 대기질의 일변화, 한국환경과학회지, 6(6), 613-628.
 이기원, 권숙표, 정용, 1993, 서울시 대기 중 오존오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석-광화문 지점을 중심으로, 한국대기보전학회지, 9(1), 107-115.
 전병일, 김유근, 이화운, 1995, 부산지역의 오존 농도 특성과 기상인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(1), 45-56.
 전병일, 1999, 부산 연안역의 야간 고농도 오존 발생 특성과 기상학적 관련성, 한국 환경과학회지, 8(3), 287-292.
 전의찬, 우정현, 1999, 오존 농도에 영향을 미치는 주기상 요소의 도출 및 예측 모형 수립, 한국대기환경학회지, 15(3), 257-266.
 Chung, Y.S., 1977, Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. Atmospheric Environment, 16(11), 1127-1136.
 Comrie, A.C., 1990, The climatology of surface ozone in rural areas: a conceptual model. Progress in Physical Geography, 14, 295-316.
 Dix, H.M., 1965, Environmental Air Pollution, John Wiley, New York, 286 p.
 Heath, R.L. and Taylor, G.E., 1997, Physiological processes and plant responses to ozone exposure, in Forest decline and ozone: A comparison of controlled chamber and field experiments. Edited by R. L. Heath, Springer-Verlag, New York, 317-368.
 Liu, C.M., Huang, C.Y., Shien, S.L., and Wu, C.C., 1994, Important meteorological parameter for ozone episodes experienced in the Taipei basin, Atmospheric Environment, 28(1), 159-173.
 Seinfeld, J.H., 1989, Urban air pollution: state of the science, Science, 243, 745-752.
 U. S. Environmental Protection Agency, 1989, Procedures for Applying City Specific EKMA, EPA-450/4-89-012, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
 Vito, P., 1990, Seasonal Ozone Levels and Control by Seasonal Meteorology. The Journal of the Air & Waste

Management Association, 40(2), 206-210.
Weston, K.J., Kay, P.J.A., Fowler, D., Martin, A., and
Bower, J.S., 1989, Mass budget studies of photochemi-

cal ozone production over the U. K., Atmospheric Envi-
ronment, 23, 1349-1360.

2002년 3월 7일 원고 접수
2002년 5월 23일 수정원고 접수
2002년 5월 25일 원고 채택