

# 부산 지역의 오존 농도 특성과 기상 인자에 관한 연구

## On Characteristics of Surface Ozone Concentration and Important Meteorological Parameters in Pusan, Korea

전 병 일 · 김 유 근 · 이 화 운

부산대학교 대기과학과

(1994년 8월 29일 접수, 1995년 1월 28일 채택)

Byung-II Jeon, Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee  
*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

### Abstract

We considered that characteristics of surface ozone continuous and important meteorological parameters from the data measured 7 air quality continuous monitoring stations during 2 years(1990, 1993) in Pusan.

The diurnal ozone variation showed a primary peak near 1500LST and a secondary peak in early morning(0100~0500LST). The nocturnal vertical mixing according to strong surface wind may be responsible for occurrence of the secondary peak of the DP(double peaked) pattern.

The episode day was defined when an ozone peak higher than 60 ppb was observed at least one station.

The frequency of episode day was 100(298 hours, 69 days).

The frequency of the episode day was higher at Meongryundong and Daeyeondong than other sites and highest in August under control of Pacific subtropical high. The high temperature, low wind speed, low cloud amount and high duration of sunshine were important meteorological parameters accompanying the high episode days.

The favorable synoptic environment accompanying ozone episode was distributed to 7 different pattern. These pattern can be taken as a necessary but not an absolute indicator for predicting the occurrence of an episode.

### 1. 서 론

과거의 대기오염은 SO<sub>2</sub>와 같은 1차 오염 물질이 문제가 되었다. 그러나 저황 연료유의 공급 확대와 청정 연료의 사용 의무화로 인해 점차 줄어드는 추세에 있는 반면, 최근에는 급속한 산업화와 소득의 증대로 기하급수적으로 늘어나는 자동차와 산업 시설에서 배출되는

질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 탄화수소류(HCs) 그리고 휘발성 유기화합물(VOC)를 포함하는 다양한 천연, 인공 물질이 태양광과 반응(광화학반응)하여 2차적으로 생성된 O<sub>3</sub> 등에 의한 대기 오염이 심각해 지고 있다.

Spicer et al.(1979)는 O<sub>3</sub>의 발생 원인으로 자연적이거나 배경 대류권의 O<sub>3</sub>, 국지적인 인공 오염 물질로부터 생성된 O<sub>3</sub>, 장거리 수송과 고기압계에서 축적된 O<sub>3</sub>, 도시 plume의 풍하측에서 형성된 O<sub>3</sub>, 그리고 성층

권에서 대류권으로 침입하거나 대류 혼합에 의해 지표로 침입한  $O_3$ 으로 나누어서 제시하기도 하였다.

$O_3$ 은 광화학 스모그의 원인이 되는 강한 산화력을 가진 물질로서 높은 농도에 장기간 노출되면 점막의 자극, 호흡기 질환 등 인간의 건강과 농작물이나 식물에도 심각한 영향을 미치며, 또한,  $O_3$ 은 이산화탄소보다도 훨씬 강력한 온실 효과를 일으킨다고 알려져 있기도 하다 (Coffin and Stokinger, 1977 ; 일본 환경백서, 1993).

오염된 도시 대기에서  $O_3$ 농도의 기존 연구를 살펴보면,  $O_3$ 농도의 정상적인 일변화는 아침에 증가해서 정오경에 최대 농도가 나타나고, 저녁에 감소하는 경향을 보이며(Lynn, 1978), 때때로 산업화된 도시의 풍하측에서는 오염된 공기의 수송에 의해서 14~16시 근처에 2차 오염 peak를 일으키는 현상이 나타나는데, 지역적으로 형성된  $O_3$ 농도보다 높을 때도 종종 있다(Ball and Bernard, 1978 ; Isaksen et al., 1978). 야간에는 광화학 반응이 일어나지 않기 때문에 낮동안에 형성된  $O_3$ 은 밤에 감소된다. 그러나 밤에  $O_3$ 농도가 배경 농도보다 높은 경우가 종종 나타난다(Chatfield and Halstead, 1977 ; Stewart et al., 1976 ; Anlauf et al., 1975 ; Steinberger and Ganor, 1980). 대류권에서의  $O_3$ 농도는 계절, 일사량, 풍속, 기온, 습도에 따라서 변한다는 연구가 있다(Schjoldager, 1979 ; Shreffler and Evans, 1982). 그리고  $O_3$ 농도의 연직적인 분포에 대한 연구로는 Lalas(1987)가 그리스 아테네의  $O_3$ 농도를 해륙풍 순환과 관련하여 연직으로 관측했으며, Seto(1992)는 일본 seto 섬 연안에서 옥시탄트의 연직 분포를 통하여 성층권 오존의 유입으로 야간에 고농도  $O_3$  peak가 발생한다고 하였다.

우리 나라에서의  $O_3$ 에 대한 연구로는 정용승과 정재섭(1991)에 의한 수도권 지역의 광화학  $O_3$ 에 대한 연구가 있으며, 부산 지역에 대한 연구로 박옥현(1986), 박옥현과 김필홍(1986)에 의해 광화학 스모그 제어를 위한 통계학적인 접근으로서 기인 물질의 분포와 관계, Oxidant오염의 시간 변화 특성에 대한 연구와 고농도  $O_3$ 일의 특성에 대해서 연구한 바 있다.

본 연구에서는 부산 지역의 7개 대기오염 측정망에서 관측한 시간별  $O_3$ 농도를 사용하여  $O_3$ 농도의 일변화와 지역별 농도 특성을 고찰하고, 60ppb를 넘는 고농도  $O_3$ 발생에 대한 시간별, 월별, 지역별 빈도 등을 살펴보고, 고농도  $O_3$ 발생일에 대한 기상학적 분석을 행하였다. 앞으로 이 연구는 대기오염 예보체제를 구축하는데 좋은 기초 자료가 되리라고 생각한다.

## 2. 자 료

본 연구에서 사용한 자료는 크게 대기오염 농도 자료와 기상 자료로 나눌 수 있다. 대기오염 농도 자료는 부산 지역의 환경저 산하 7개 대기질 자동 측정망(주거지역: 명륜동, 대연동, 덕천동, 상업지역: 광복동, 범천동, 공업지역: 신평동, 감전동)에서 관측된 시간별  $O_3$ 농도이다. 측정 자료의 선택은 24시간 중에서 70%(18시간) 이상 측정된 자료를 유효한 자료로서 취급하였으며(전병일 등, 1994), 최근 몇 년간의 자료를 검토한 결과 부산의 모든 지역에서 유효하다고 판단되는 1990년과 1993년의 자료를 선택하였다. 부산 지역의 대기질 측정망의 위치와 지형은 그림 1과 같으며, 부산의 지형을 살펴볼 때 시청으로부터 서면, 연산동, 동래의 도심지를 지나는 골짜기와 신평동에서 하구언, 사상, 구포를 잇는 낙동강을 따라가는 골짜기로 크게 두 갈래로 나눌 수 있다. 도

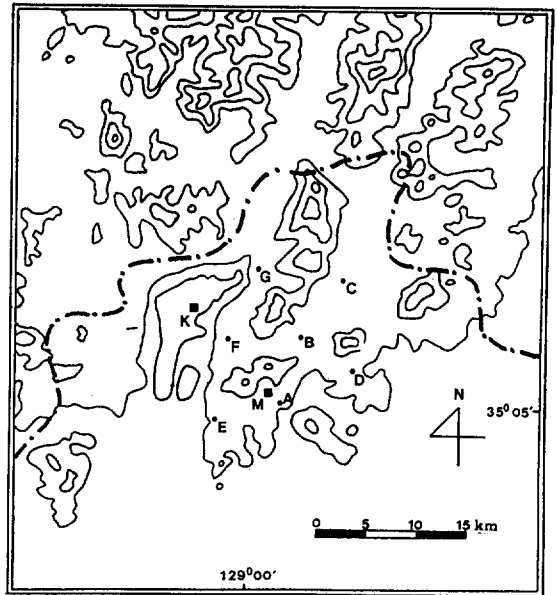


Fig. 1. Map of Pusan area. The air quality monitoring stations marked as A~G are operated by the Environmental Protection Administration (A: Kwangbokdong, B: Beomecheondong, C: Meongryundong, D: Daejeondong, E: Sinpyeongdong, F: Gamjeondong, G: Deokcheondong). Station K and M are Kimhae air force meteorological station and Pusan meteorological administration, respectively. The contour interval of topography is 200m.

Table 1. Number of data unmeasured at each station, during 2 years(1990, 1993).

yr./sta.	Kwangbok	Beomcheon	Meongryun	Daeyeon	Sinpyeong	Gamjeon	Deokcheon	unmeasured rate(%)
1990	28	191	111	68	125	96	79	27.3
1993	25	7	9	63	23	27	11	6.3
Total	53	208	120	131	148	123	90	16.8

심지를 지나는 곳에는 광복동, 범천동, 명륜동 측정소가 있으며, 낙동강을 지나는 골짜기에는 신평동, 감전동, 덕천동 측정소가 위치해 있다고 볼 수 있다.

각 지점별 유효 자료수는 표 1과 같으며 1990년은 명륜동과 신평동의 결측율이 높으나, 1993년에는 모든 지역에서 결측율이 낮았다. 1990년과 1993년의 결측율은 각각 27.3%와 6.3%로서, 2년간의 평균 결측율은 16.6%로 부산 지역의 O<sub>3</sub> 농도를 분석하는데는 무리가 없다고 사료된다. O<sub>3</sub>농도와 관련되는 기상 상태를 분석하기 위해서 부산지방기상청의 일평균 기상 자료(일최고 기온, 상대습도, 풍속, 운량, 일조시간)와 김해공군기상대의 바람 자료(풍향, 풍속)를 이용하였다.

### 3. 부산 지역의 O<sub>3</sub>농도의 일반적 특성

#### 3.1 O<sub>3</sub>농도의 일변화와 지역별 특성

그림 2는 부산 지역의 7개 지점에서 1990년과 1993년의 2년동안 측정된 O<sub>3</sub>농도의 일변화를 분석한 것으로서, 모든 지역에서 15시를 전후하여 최고 농도를 나타내었으며, 19시를 지나면서 농도는 낮아지고, 다시 새벽 2시에서 5시 사이에 두번째로 높은 농도가 나타나고, 아침 7시와 8시 사이에 O<sub>3</sub>농도가 급격히 낮아지는 현상이 나타났다. 그러나 2~5시의 2차 peak는 시청과 서면 그리고 동래를 잇는 부산 도심지를 통과하는 지역(광복동, 범천동, 명륜동, 대연동)은 뚜렷하나, 부산의 서부 지역인 낙동강을 잇는 지역(신평동, 감전동, 덕천동)에서는 2차 peak가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이러한 일변화 형태의 차이는 배출원 활동, 기상 조건의 차이 및 오염물질의 생성 속도와 1, 2차 오염 물질 소비 속도에 의해 영향을 받는 것으로 생각된다. 그러나 박옥현과 김필홍(1986)은 범천동 주위의 이 현상을 고공으로 이동했던 공기 중에서 생성된 O<sub>3</sub>이 NO배출량이 감소하는 야간에 대기가 거의 중립일 때 육풍 내지 계곡풍을 따라 지상으로 이동하여 NO산화 및 지표면 흡수로 인한 감쇄량을 초과하는 양의 O<sub>3</sub>를 공급했기 때문이라고 하였다. 그리고 Stewart et al.(1976), Anlauf et al.(1975) 그리

고 Steinberger와 Ganor(1980)는 야간의 2차 O<sub>3</sub>농도 peak가 나타나는 이유를 다른 지역으로부터 수평 수송과 성층권 침강 그리고 역전층에 갇혀진 O<sub>3</sub>의 침강이라고 하였다.

8시부터 O<sub>3</sub>농도가 저하되는 이유로서는 고공으로부터 O<sub>3</sub>공급이 제한되는 상황에서 지표부근 O<sub>3</sub>가 NO, NO<sub>2</sub>의 산화에 의해 소모되기 때문이며, 아침 9시와 11시에 걸쳐 O<sub>3</sub>농도가 급상승하는 이유는 아침에 발달하는 혼합층내의 대류에 의해 하층의 대기와 고농도 O<sub>x</sub>를 포함한 상층의 대기와 역직혼합(수직교환)에 기인하는 상층 공기의 유입에 의한 O<sub>3</sub>농도의 증가와 인공적으로 생성된 NO, HC 등에 의한 광화학 반응에 의해서 증가되며, 오후의 낮동안은 혼합층내에서는 모든 대기가 균질하게 혼합되기 때문에 O<sub>3</sub>농도는 큰 변화가 없다. 18시이후는 접지 역전층의 형성과 퇴근 시간이 겹쳐 지표 부근의 오염농도는 증가하나, O<sub>3</sub>농도는 증가하는 NO의 산화에 의한 소모와 O<sub>3</sub>이 지표면으로부터 건성 침적(육풍에 의해 증대되는 경향)이 됨으로써 채빨리 파괴되면서 감소한다(Seto, 1992).

1990년과 1993년의 O<sub>3</sub>농도를 비교해 보면, 광복동, 범천동, 감전동은 1990년이 1993년보다 높은 농도를 나타내었고, 명륜동, 신평동은 1993년이 높았으며, 대연동과 덕천동은 비슷한 농도값을 나타내었다. 특히 명륜동의 1993년의 증가와 광복동과 감전동의 감소는 뚜렷하였는데 이는 자동차 통행량의 증가에 의한 지역적인 특성에 의한 것으로 생각된다.

비교적 해안가인 광복동의 O<sub>3</sub>농도가 내륙인 명륜동보다 낮은 이유는 중간에 풍상층에 기인 물질 배출원이 없고, 측정소 주변에서 배출된 기인 물질들은 해풍을 따라 내륙쪽으로 이동해 가기 때문에 관측소 주변에서 광화학 반응을 하는데 소요되는 시간을 갖지 못하며, 마지막으로 야간에 육풍을 따라 해상으로 이동해 간 낮은 농도의 O<sub>3</sub>이 바다위의 공기와 희석되거나 흡수(wet deposition)에 의해 감소하고 비교적 낮은 농도의 NO<sub>x</sub>와 NMHC 역시 희석으로 인해 O<sub>3</sub>이 잘 농축되지 않기 때문이며(박옥현과 김필홍, 1986), 감전동보다 덕천동의

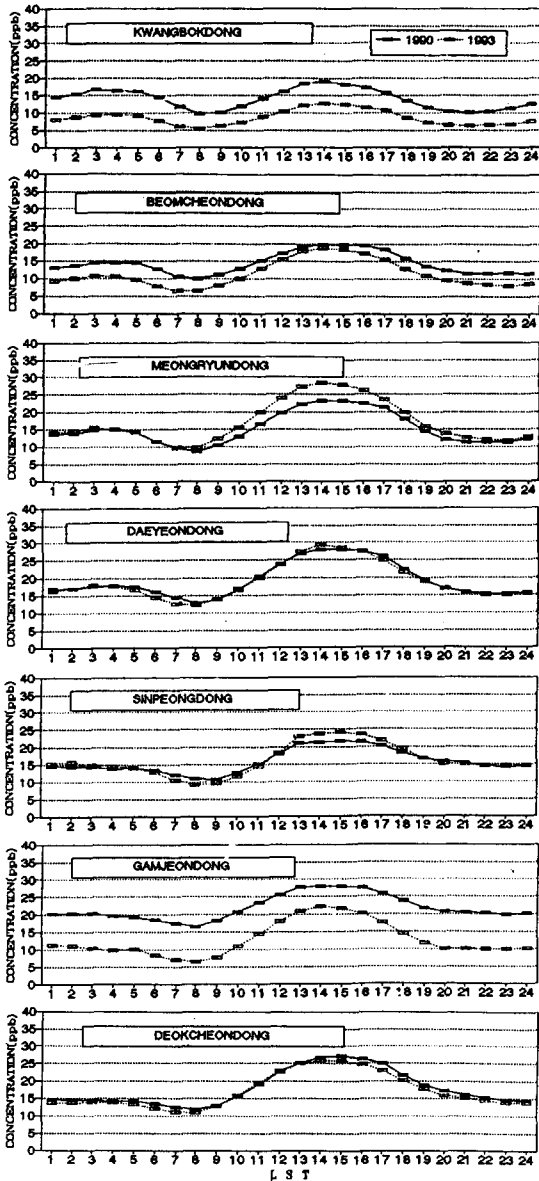


Fig. 2. Diurnal variation of surface ozone at Pusan, during 2 years(1990, 1993).

농도가 비슷하거나(1990년) 높은 것은(1993년) 위에서 언급한 것과 같이 설명할 수 있겠다. 특히 1993년의 경우, 도심지를 지나는 골짜기와 낙동강을 지나는 골짜기에서 내륙으로 갈수록 O<sub>3</sub>농도가 현저하게 증가되는 것을 볼 수 있다. 그러나 최대 농도가 발생하는 시각이 15시부근으로 거의 동일한 시간대이므로 농도 상승이 해풍에 의한 수송이라고 단정하기는 무리가 따르며, 상세

한 국지 관측과 분석이 뒤따라야 할 것이라고 사료된다.

### 3.2 Secondary peak의 기상학적 원인

위에서 언급한 새벽 2~5시 사이의 O<sub>3</sub>의 2차 peak가 어떠한 원인에 의해서 발생되는지를 바람에 의해서 기상학적으로 상세히 알아보았다.

먼저 부산 도심지를 통과하는 골짜기에 위치하면서 농도가 높게 나타나는 명륜동과 낙동강 골짜기에 있는 감전동을 선택해서 정오경이나 오후에 단 한번의 peak가 나타나는 것을 SP(Single-Peaked)라고 하고, 두 번의 peak를 가지며 두번째의 peak는 새벽에 일어나는 것을 DP(Double-Peaked), 10시와 18시사이의 농도가 20ppb미만의 낮은 농도를 나타내는 것을 LO(Low-Ozone)로 하여, 명륜동과 감전동에서의 자료를 이용하여 분류한 결과를 표 2에 나타내었다. DP는 1990년과 1993년에 각각 45%, 38%였으며, SP와 LO는 1990년에는 12%와 43%, 1993년에는 33%와 29%를 각각 나타내었으며, 전반적으로 DP가 SP와 LO보다 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 SP의 발생은 1990년과 1993를 발생율의 차이가 심하게 나타났으며, SP와 LO는 서로 반비례 관계가 있었다.

그림 3은 명륜동과 감전동에서의 1990년과 1993의 SP와 DP를 도식화한 것이다. 그림에서 보듯이 SP는 새벽 시간에서 낮은 농도를 나타내고 9시이후부터 급격히 상승하여 15시를 전후하여 최대 정점을 나타내고 있다. DP는 새벽 2~5시사이에 약간의 정점을 보이고, 7~8시에 아주 약한 농도를 나타내며, 그 이후부터 급속하게 상승하는 경향이 있다. 그리고 1990년의 명륜동의 경우를 제외하고 SP의 최고농도(15시부근)가 DP의 최고 농도보다 높은 값을 나타내고 있다. 특히 새벽 시간에 나타나는 2차 정점의 발생 원인을 규명하기 위해서 풍향, 풍속의 기상 인자를 이용하기로 하였다. 비교적 감전동과 인접해 있으면서 자료의 수집이 용이한 김해 공군 기상대에서의 기상 자료를 이용하여 감전동에서의 SP와 DP에 대해서 조사한 것이 Figs. 4~5 이다.

Table 2. The percentage of the single-peaked(SP), double peaked(DP), and low ozone(LO) diurnal pattern occurring at Meongryundong and Gamjeondong during 2 years (1990,1993).

year\pattern	SP(%)	DP(%)	LO(%)
1990	12	45	43
1993	33	38	29

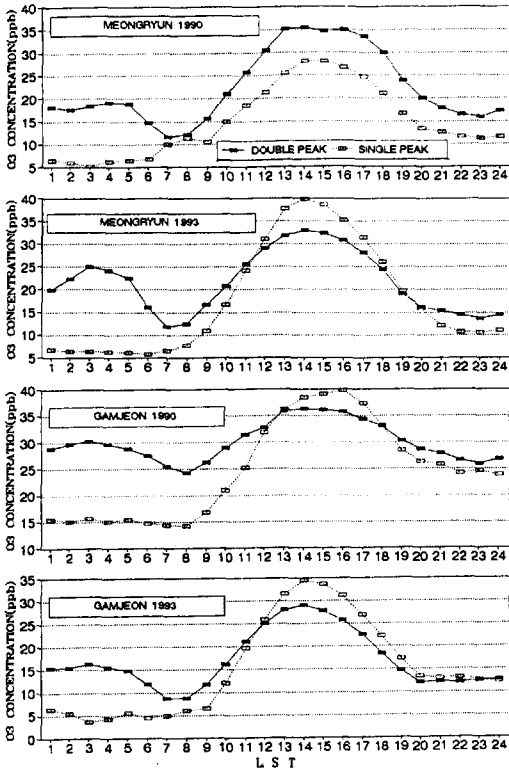


Fig. 3. Diurnal variation of O<sub>3</sub> concentration SP, DP at Meongryundong and Gamjeondong during 2 years(1990,1993).

우선 풍향(그림 4)을 살펴 보면 SP의 경우에 오전 11시부터 남풍의 계열의 바람 즉 해풍의 빈도가 우세하게 나타나다가 21시부터 다음날 오전 10시까지 북동풍 계열의 바람 즉 육풍이 탁월하게 나타나고 있다. DP의 경우는 주간의 남풍 계열의 해풍의 빈도가 낮고, 18시 이후의 북동풍 계열의 발생 빈도가 높으며, 전 시간에 걸쳐 북동풍이 탁월하게 나타나고 있으며, 새벽과 아침의 북서풍의 빈도도 어느 정도 발생하고 있으며, 전반적으로 내륙에서 연안쪽으로 부는 바람이 우세하게 나타났다(그림 4 참조). SP의 경우는 풍향의 변화가 낮과 밤의 구분이 뚜렷한 데 비해서, DP는 뚜렷한 풍향의 구분이 보이지 않는 특징이 있다.

풍속의 경우를 살펴 보면(그림 5), SP의 경우에 12시에서 18시 사이의 주간에는 4~7m/s 정도의 바람이 불고 야간과 새벽에는 1~2m/s의 약풍의 빈도가 우세하게 나타나는 것으로 보아 해륙풍이 우세한 상태인 것으로 보인다. 그러나 DP의 경우를 보면 주간과 야간에 걸쳐 4m/s 이하의 비슷한 풍속을 나타내고 있다. 이는 2

차 정점이 나타나는 새벽에도 풍속이 강하다는 것을 나타내는데, 이는 2차 정점이 나타나는 원인을 간접적으로나마 시사하는 것이라 하겠다

새벽 1~5시 사이에서 발생하는 2차 정점은 오존이 풍부한 상층 공기의 난류 혼합과 오존의 발생원이 야간 시간에는 없기 때문에 오존의 감소가 덜한 이웃 지역으로부터의 수평이류에 의한 것이라고 사료되며, Samson (1978)에 의하면 2차 고농도 O<sub>3</sub>의 연직 혼합이 원인이며, Liu(1990)는 대만의 타이베이에서 야간의 2차 정점의 존재를 밝히면서 계절적인 원인이 아니라 야간의 강한 바람으로 연직 혼합에 의해 발생한다고 하였다. 따라서 감전동에서 DP의 2차 정점은 강한 풍속에 의한 연직 혼합에 의한 것이라고 사료되며, 향후 이러한 야간의 오염 정점을 규명하기 위해서는 연직 방향과 수평 방향의 3차원 국지 기상과 대기 오염 물질의 성상에 대한 대규모의 관측이 수반되어 정확한 생성 기구가 규명되어야 한다고 생각한다.

#### 4. 부산 지역의 고농도 O<sub>3</sub>일의 특성

O<sub>3</sub>은 기상 조건에 의해 영향을 가장 많이 받는 대기 오염 물질로서 기상학적 접근이 매우 중요하다고 생각된다. 고농도 O<sub>3</sub>일의 선정 기준은 목적에 따라 여러 기준을 사용할 수 있다(Apling et al, 1977 ; Ashmore, 1984 ; Rombout, 1984 ; McKendry, 1992). 일본의 1시간 평균 Oxidants 농도와 WHO 기준치는 60ppb이라 정하였으며, 우리나라의 1시간 기준치는 100ppb로 규정하고 있다. 본 연구에서는 고농도 O<sub>3</sub>일을 60ppb 이상이라 선정하고 그에 대한 분석을 행하였다.

표 3은 본 연구에서의 고농도 O<sub>3</sub>일로 선정된 세계보건기구(WHO)에서 권장하는 대기질 기준인 60ppb(WHO, 1987), 우리나라에서 연중 3회이상 초과해서는 안 되는 1시간 평균 농도 100ppb를 선택해서 각 지점별로 1990년과 1993년을 조사한 결과 60ppb 이상을 기록한 것이 총 298시간이었으며, 100ppb를 넘는 경우가 5시간 있었으며, 부산 지역 총 관측 시간의 0.24% 정도가 60ppb 이상의 농도값을 가지는 것으로 나타났다. 특히 1993년보다는 1990년이 모든 계급에서의 발생율이 4배 이상이나 되었는데, 이는 1990년과 1993년의 월평균 기온을 비교한 표 4에서 비교해 볼 때, 1993년 여름철이 1990년보다 저온 현상(8월의 경우 6°C 이상 낮은 기온)이 우세한 것과 관련이 있는 것으로 사료된다.

1990년과 1993년의 2년에 걸쳐 부산 지역의 모든 대기 오염 관측소에서의 시간별 O<sub>3</sub> 농도를 분석한 결과

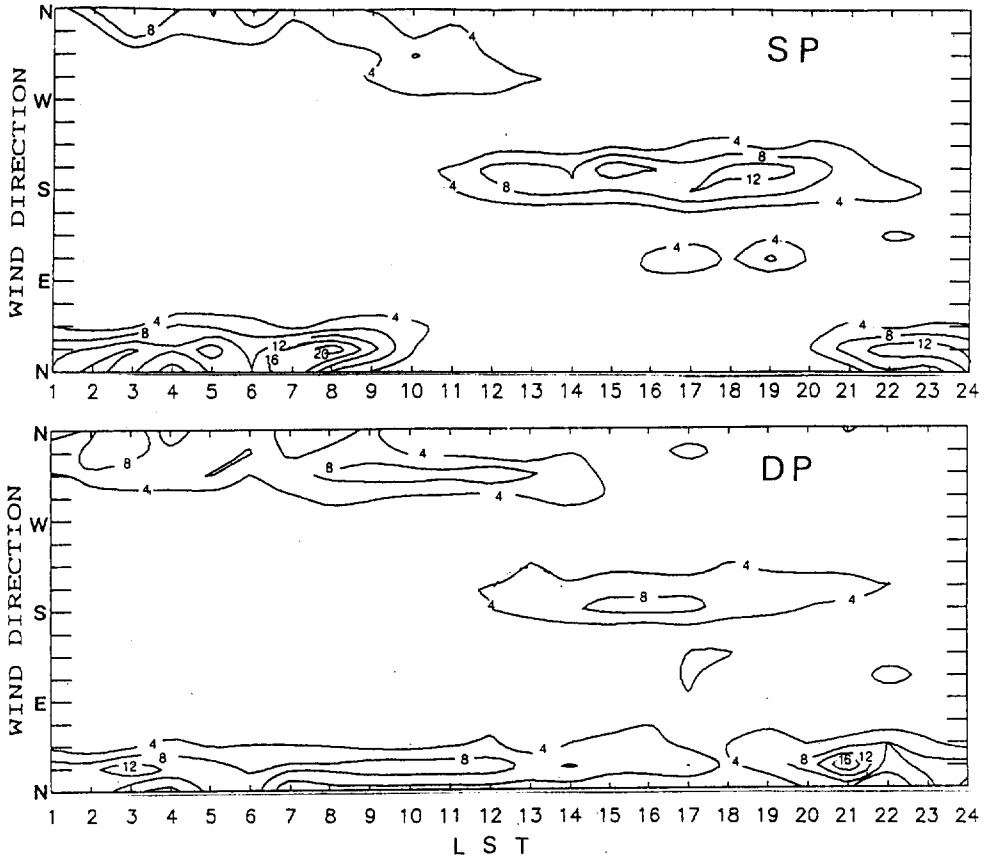


Fig. 4. The percentage of surface wind direction at Kimhae air force meteorological station in 24 hr for the SP-case and DP-cases.

표 5와 같이 각 지점에서 60ppb이상을 나타낸 회수는 총 100회이었으며, 무더운 북태평양 기단이 우리나라에 매우 큰 영향을 미치는 8월이 33회로서 가장 많이 발생하였고 두번째로 6월이었다. 7월은 우리나라가 장마 전선의 영향으로 강수일이 많기 때문에 고농도 O<sub>3</sub>일 발생이 적었다. 계절별로는 광화학반응이 일어나기 쉬운 계절인 여름철(6, 7, 8월)이 전체의 54%를 차지하였으며, 가을철(9, 10, 11월)이 27%, 봄철(3, 4, 5월)이 21%였으며, 일조시간이 작고 야간 역전층의 형성 시간 연장으로 인한 O<sub>3</sub>의 파괴가 많아지기 쉬운 계절인 겨울철(12, 1, 2월)은 한번도 발생하지 않았다.

지역별로는 내륙 지역이면서 교통량이 증가하는 추세에 있는 명륜동(31회)과 비교적 해안 지역에 위치하고 교통량이 많은 대연동(28%)이 전체의 59%를 차지해 고농도 O<sub>3</sub> 발생 지역이라고 할 수 있다. 다음으로 공업 지역인 감전동과 신평동이 각각 12%와 11%였으며, 해

안 지역인 광복동이 4회로 가장 낮은 발생율을 보였다. 그림 6에서와 같이 고농도 O<sub>3</sub>발생은 대류 활동과 기존의 광화학 반응에 영향을 미치는 일사량의 강도가 가장 높은 시간인 15시에 가장 발생 빈도가 높았고, 12시

Table 3. The numbers of measured hourly ozone concentrations higher than the standards in Pusan, during 2 years(1990, 1993).

Total hours measured	Numbers hours higher than the standards			
	≥ 60ppb (WHO)	≥80ppb	≥100ppb (Korea)	
1990	1857	241	50	5
1993	2394	57	7	0
Total	4251	298	57	5

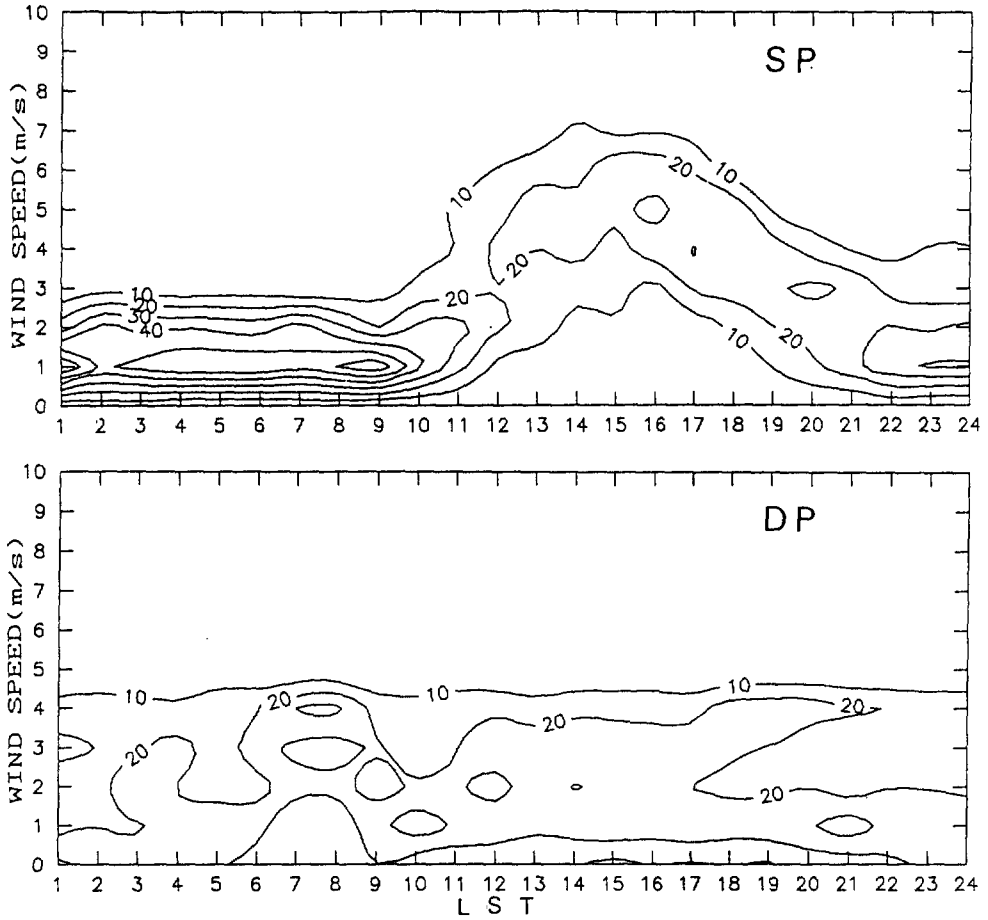


Fig. 5. Same as Fig. 4. except for surface wind speed.

Table 4. Comparison of daily maximum temperature(°C) of 1990 and 1993.

Year\Month	6	7	8	9
1990	24.3	28.5	32.1	26.4
1993	23.5	24.9	25.9	25.5

와 18시사이의 전체의 83%를 차지하였다. 그러나 야간 시간대의 발생율은 아주 미약하였다. 9시부터의 가장 낮은 빈도는 오존 세정이 주요한 과정이 될 때의 아침 러시아워와 일치한다.

O<sub>3</sub>의 농도가 얼마인지도 중요하지만 고농도가 얼마나 지속되는가하는 것은 인간이나 식물 등에 대단히 중요한 의미를 지니게 된다(McKendry, 1992). 부산 지역에서 고농도 O<sub>3</sub>이 발생한 날 중에서 60ppb이상 되는 시

간이 얼마나 지속되었는지를 조사해 보았다(그림 7). 1시간만 지속된 경우가 전체의 35%로 가장 많았고, 2시간이 24%, 3시간이 11%였으며, 5시간이상 지속된 것이 24%나 되었다. 고농도 O<sub>3</sub>이 오랜 시간 지속될 때를 대비하여 이에 상응하는 긴급 조치가 취해질 수 있도록 대기 오염 경보 체제를 확립하는 것이 중요하다고 하겠다.

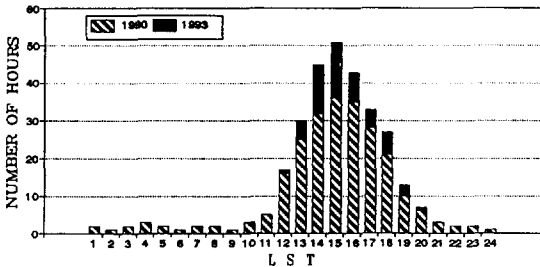
고농도 O<sub>3</sub>발생일에 대한 기상 상태를 알아보는 것은 앞으로 대기 오염 기상 예보를 위한 준비 과정으로서 매우 중요한 의미를 가질 수 있다.

본 절에서는 1990년과 1993년 2년동안 60ppb이상의 고농도가 한지점 이상에서 발생한 69일에 대해서 부산 지방 기상청에서 관측한 일최고 기온, 상대습도, 일평균 풍속, 운량, 일조시간과의 관계를 그림 8과 같이 고찰해 보았다.

먼저 일최고 기온을 살펴 보면 18°C부터 35°C까지

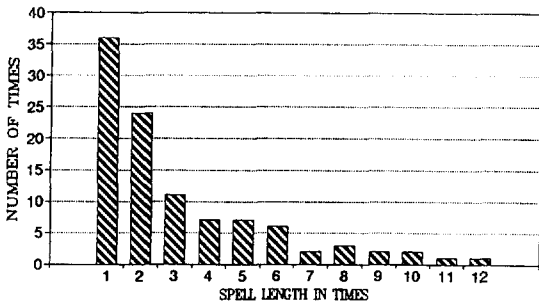
**Table 5. The monthly variation of the frequencies of ozone episode days( $\geq 60\text{ppb}$ ) in air quality monitoring station in Pusan, during 2 years(1990, 1993).**

Station	Month												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Kwangbok								3			1		4
Beongryun					1			2	2				5
Meongryun				3	2	1	1	8	7	4	5		31
Daeyeon			1	2	8	6		8	1	2			28
Sinpyeong				3		1	1	6					11
Gamjeon					1	5		3		3			12
Deokcheo						2	2	3	1	1			9
Total			1	8	12	15	4	33	11	10	6		100



**Fig. 6. Diurnal frequency higher than 60ppb standards for all Pusan stations, during 2 years(1990, 1993).**

넓은 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, 22°C 이상이 전체의 90% 정도로서 고농도 O<sub>3</sub>이 발생하기 위해서는 22°C 이상의 기온이 되어야 한다고 생각되며, 31°C를 넘는 날도 23%나 발생하였다. 상대습도를 살펴 보면 70%에서 85%이하가 전체의 68%로서 가장 높은 빈도를 보였으



**Fig. 7. Spell length in times higher than 60ppb standards for all Pusan stations, during 2 years(1990, 1993).**

며, 특히 65%에서 85%에 많이 분포됨으로써, 85%이하에서 고농도 O<sub>3</sub>이 발생할 수 있는 조건이라고 볼 수 있다. 일평균 풍속을 살펴 보면 대체로 2~5m/s 사이에 높은 빈도를 차지하고, 풍속이 아주 약한 1m/s 이하인 경우가 전혀 나타나지 않는 것도 재미있는 것이라 할 수 있으며, 고농도 O<sub>3</sub>이 발생하기 위해서는 5m/s 이하일 때 라고 할 수 있겠다. 운량은 하늘 전체를 10으로 보았을 때, 5이하가 전체의 72%를 차지하며, 쾌청한 날도 13일이나 되며, 고농도 O<sub>3</sub>이 발생하기 위해서는 운량이 5이하라고 할 수 있다. 일조시간은 인위적으로 배출된 오염 물질이 광화학 반응을 할 수 있는 최적의 상태를 나타내는 척도라고 할 수 있는 것으로 9시간 이상이 80%를 차지하고 있다.

부산 지역에서의 고농도 O<sub>3</sub>이 발생하기 쉬운 기상 조건으로 일최고기온이 22°C 이상, 상대습도 85%이하, 일평균 풍속 5m/s 이하, 운량 5/10 이하, 일조시간 9시간 이상으로 보면 타당하다고 생각된다.

**5. 고농도 O<sub>3</sub> 발생일과 관련된 종관 기상학적 접근**

기상 조건과 관계된 O<sub>3</sub> 농도 변화의 고찰은 O<sub>3</sub> 농도 변화가 앞으로 어떻게 일어나는가를 아는데 새로운 통찰력을 제시할 수 있으며, Weston(1989)은 고농도 O<sub>3</sub>이 발생하기 위한 기상학적 조건으로서 공기 덩어리의 유적선이 폐쇄된 높은 오염원 지역을 가져야 하고, 오염 물질이 재반응할 수 있도록 풍속이 약해야 하며, 연직으로의 확산이 제한되도록 경계층 깊이가 낮고, O<sub>3</sub>의 연직 수송을 억제하도록 지표 가까이 야간의 강한 역전층이 발달하며, 마지막으로 강한 일사가 있어야 한다고 하였다. 이러한 것이 동시에 일어나기 위한 조건은 정상적인 고기압과 관계가 있다고 볼 수 있다.



따라서 이러한 종관적인 특성을 살펴보는 것은 고농도 O<sub>3</sub>이 발생할 수 있는 기상 조건(대기오염 potential)을 사전에 파악한다는 점에서 중요하다.

Heidorn와 Yap(1986)은 캐나다의 남부 온타리오에서 1976~1981년 사이의 80ppb가 넘는 날을 선택해 기압 형태를 8개로 분류해서 봄, 여름, 가을, 겨울로 나누어 고농도 O<sub>3</sub>과 기압 배치를 연구한 바 있으며, Liu et al.(1994)은 대만의 타이베이에서 고농도 O<sub>3</sub>일을 동반하는 유용한 종관 환경을 구별하기 위해 1986~1989년 사이의 269일에 대해서 7개의 종관 조건으로 구별하였다.

Zurita와 Castro(1983)는 이베리아반도의 기압장 구조와 위치 그리고 지표에서의 탁월풍의 방향을 기준으로 종관기상을 8개로 분류한 바 있다.

부산 지역에서의 고농도 O<sub>3</sub>일을 동반하는 의미있는 종관 환경을 구별하기 위해서 1990년과 1993년의 60ppb 이상의 날인 69일에 대해서 일본기상청 발행의 일기도(일본 기상청, 1990, 1993)를 주의 깊게 분석한 결과 그림 9와 같이 7개의 형태로 분류하였다.

(I) 이동성 고기압형(북서쪽으로부터 접근): 고기압 중심이 40°N 북쪽의 화북지방에 위치하면서 남동쪽으로 이동하는 형태

(II) 이동성 고기압형(서쪽으로부터 접근): 고기압 중심이 화중지방이나 서해상에 위치하면서 동쪽으로 이동.

(III) 이동성 고기압형(남서쪽으로부터 접근): 고기압 중심이 30°N 이남의 화남지방에 위치하면서 북동쪽으로 이동

(IV) 대상 고기압형: 고기압 중심이 화중지방이나 서해상에 위치하고 또 다른 고기압이 동해나 일본쪽에 있으면서 전형적인 맑은 날씨를 보이는 형태

(V) 남고 북저형: 북태평양 고기압이 우리 나라를 덮고 있을 때

(VI) 기압 경도(북동-남서): 등압선이 북동에서 남서로 기울어 있으면서 우리 나라에 북동 기류가 유입

(VII) 동해안 고기압형: 우리 나라의 동해상에 고기압이 위치하고 있으며 서해쪽으로 저기압이 존재

일반적으로 위와 같은 기압 형태는 종관 흐름은 약하고 국지적인 흐름에 의해 지배된다. 따라서 태양열과 야간 복사 냉각에 의한 지역적인 순환이 국지 기후를 지배하는데, 이런 현상은 낮의 해풍과 밤의 육풍이다. 낮은 습도의 육풍은 일출후의 강한 일사에 의해 맑은 날씨의 원인이 된다. 반면 높은 습도의 해풍은 오후의 대류계의 형성을 강화시킨다. 육풍 순환과 해풍 순환의 전이 시간대인 8시부터 10시 사이에는 강한 일사에 의해 고농도의 오존을 생성시킬 수 있다.

표 6은 총 69일의 고농도 O<sub>3</sub>일을 각 기압 형태에 따라 분류한 것이다. V형(남고 북저형)이 북태평양고기압의 최성기인 8월에 집중적으로 발생하면서 모든 형태 중에서 최대 발생 빈도를 나타내었다. 이동성 고기압이 서쪽과 남서쪽에 위치하면서 우리 나라로 다가오는 II, III형이 봄철과 가을철에 12회와 11회로 높은 발생율을 기록하였고, 고기압이 동해상에 위치하는 VII형은 5월에서 8월에 걸쳐 12회로 높은 빈도를 기록하였다. 그러나 북쪽에서 이동하는 고기압과 대상고기압, 기압경도가 북동에서 남서로 기울어진 I, IV, VI형은 5~6회로서 낮은

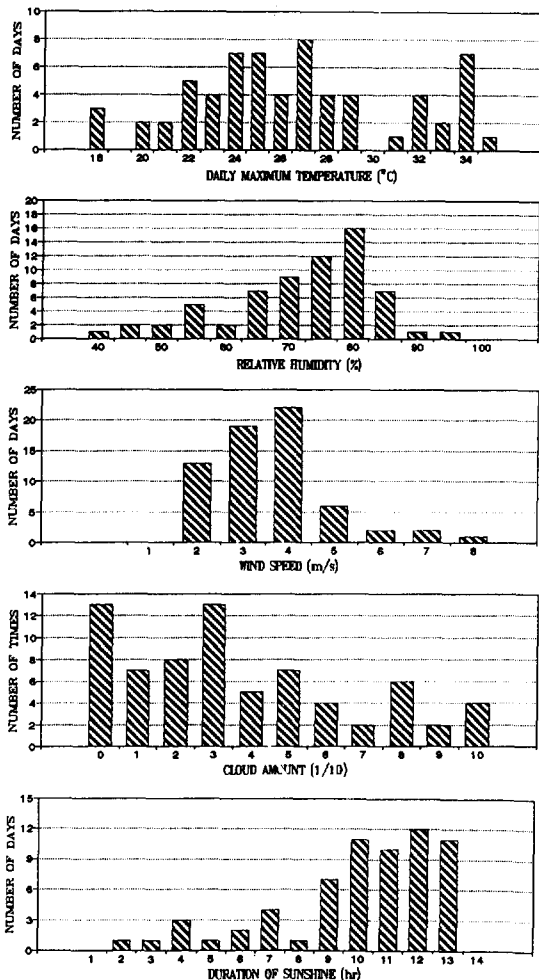


Fig. 8. Meteorological patterns associated with 69 days(1990, 1993) during episode day( $\geq 60$ ppb) at Pusan.(daily maximum temperature, relative humidity, wind speed, cloud amount, duration of sunshine).

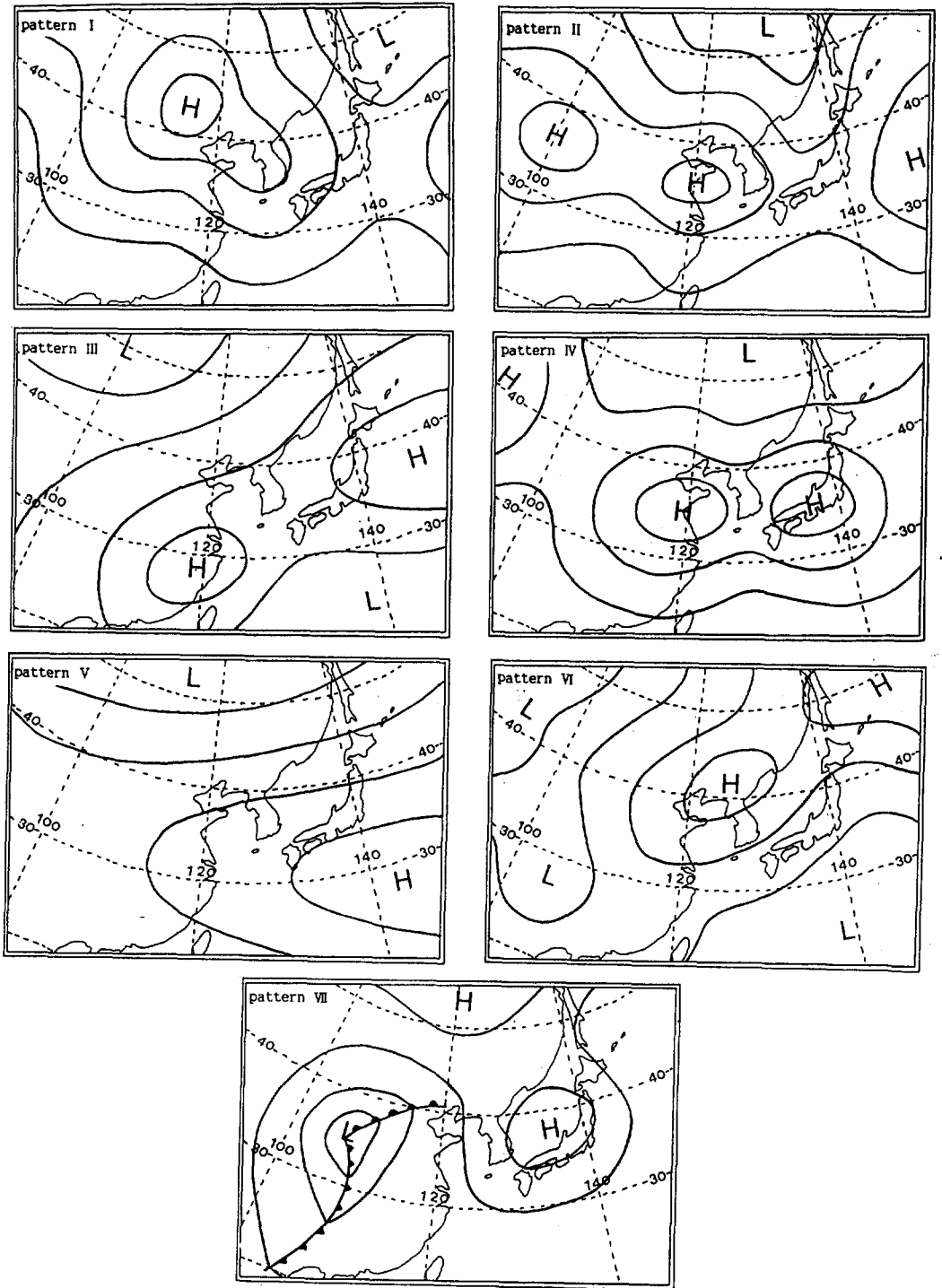


Fig. 9. Seven different synoptic weather pattern(I-VII) favorable for ozone build-up at Pusan.

**Table 6. The monthly variation of the frequencies of ozone episode days( $\geq 60\text{ppb}$ ) with different synoptic weather pattern(I-VII, defined in Fig. 9).**

Pattern	Month												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
I				1	1				2	1			5
II				2	6	1			1		1		12
III				2		6				3	2		11
IV			1				1	1	2				6
V								14	3	3			17
VI											3		6
VII					2	4	4	1			1		12
Total			1	5	9	11	5	16	8	7	7		69

발생율을 나타내었다.

고농도 O<sub>3</sub>발생을 기록한 날의 기압 형태는 고농도 O<sub>3</sub>일을 예측하는 절대적인 인자로서 작용하는 것은 아니지만 중요한 것이라고 할 수 있겠다. 예를 들어 Liu et al.(1994)은 대만의 타이베이에서 7개의 다른 종관 환경으로서 고농도 O<sub>3</sub>발생일을 54.5% 정도 예측할 수 있었다고 하였다.

**6. 결 론**

부산 지역의 7개 대기 오염 자동 측정망의 1990년과 1993년의 시간별 O<sub>3</sub>농도 자료를 이용해 부산 지역 O<sub>3</sub>농도의 시간별, 지역별 농도 특성과 60ppb이상인 고농도 O<sub>3</sub>일을 선정해 고농도 O<sub>3</sub>일의 발생 특성과 기상 조건 그리고 종관기상학적 분석을 행하였다.

부산 지역의 O<sub>3</sub>은 오전 9시부터 급상승을 하기 시작하여 15시를 전후하여 최고 농도를 나타내며, 18시 이후 급속히 농도는 낮아지며, 새벽 2~5시 사이에 2차 peak가 나타나기도 한다. 특히 부산 도심을 지나는 골짜기에 해당하는 측정소(광복동, 범천동, 명륜동)는 낙동강을 잇는 골짜기에 있는 측정소(신평동, 감전동, 덕천동)보다 2차 peak의 모양이 뚜렷하게 나타나는 경향이 있었다. 이러한 2차 peak는 감전동 자료를 김해 공항 기상대의 바람(풍향, 풍속)으로 분석해 본 결과, 해륙풍보다는 일반적인 기압계의 바람에 의한, 특히 야간에 강한 풍속에 의한 연직 혼합에 의한 것으로 사료된다.

부산 지역의 고농도 O<sub>3</sub>일( $\geq 60\text{ppb}$ )은 1990년과 1993년에 100회였으며, 시간수로는 298시간, 발생일수로는 69일이었다. 지역으로는 명륜동과 대연동에서 발생 빈도가 높았고, 월별로는 무더운 북태평양 고기압의 최성

기인 8월이 가장 발생 빈도가 높았다. 고농도 O<sub>3</sub>발생이 용이한 기상 조건은 일최고기온이 22℃ 이상, 상대습도 85%이하, 일평균풍속 5m/s이하, 운량 5/10이하, 일조시간 9시간이상이면 고농도 O<sub>3</sub>이 발생할 수 있는 조건이라 할 수 있었다.

그리고 고농도 O<sub>3</sub>발생일의 종관기상학적인 형태는 북태평양 고기압이 우리 나라에 영향을 미치는 남고 북저형일 때가 가장 우세하였고 서쪽과 남서쪽에서 다가오는 이동성 고기압일 때가 그 다음으로 높았다. 따라서 고농도 O<sub>3</sub>이 발생했을 때의 국지 기상과 종관 기상을 파악하므로써 향후 대기 오염 기상 예보 체계를 구축하는데 있어 중요한 기상 인자를 밝힌다는 점에서 대단히 의미있는 일이라고 할 수 있겠다.

**참 고 문 헌**

박옥현(1986) 부산에 있어서의 광화학스모그오염의 제어를 위한 통계학적 접근(I)-기인물질들의 분포 및 관계, 화학공업과 기술, 4(1), 62-70.  
 박옥현, 김필홍(1986) 부산에 있어서의 광화학스모그 오염의 제어를 위한 통계학적 접근(II)-Oxidant 오염의 시간변화 특성- 대한환경공학회지, 8(2), 33-42.  
 전병일, 김유근, 이화운(1994) 해풍이 부산 지역의 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.  
 정용승, 정재섭(1991), 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.  
 日本氣象廳, 日氣圖(1990, 1993)  
 日本 環境白書(1993) 總說, 290pp,  
 Anlauf, K., et al.(1975) High ozone concentration measured in the vicinity of Toronto, Canada, Atmos. Environ., 9, 1137-1139.

- Apling, A.J., et al.(1977) Ozone concentration in South East England during the summer of 1976, *Nature*, 269, 569-573.
- Ashmore, M.R.(1985) Effect of ozone on vegetation in the U. K., In *Ozone, Proc. of an Int. Workshop*. February 1984, Goteberg, Sweden, 92-104.
- Ball, D.J. and R.E. Bernard(1978) An analysis of photochemical pollution incidents in the Greater London area with particular reference to the summer of 1976, *Atmos. Environ.*, 12, 1391-1401.
- Chatfield, R. and H. Halstead(1977) Tropospheric ozone-I. Evidence for higher background values, *J. geophys. Res.*, 82, 5965-5968.
- Coffin, D.L. and H.E. Stokinger(1977) Biological effects of air pollutants, In *Air Pollution*(edited by A. Stern), Vol.II, Academic Press, pp231. World Health Organization, 1978, WHO photochemical oxidants, *Environmental Health Criteria*, No. 7, Geneva, Switzerland.
- Harrison, R.M. and C.D. Holman(1982) Ozone pollution in Britain, 563-570.
- Heidorn, K.C. and D. Yap(1986) A synoptic climatology for surface ozone concentration in southern ontario, 1976-1981, *Atmos. Environ.*, 20(4), 695-703.
- Isaksen, I.S., et al.(1978) Ozone generation over rural areas, *Envir. Sci. Technol.*, 12, 1279-1284.
- Lalas, D.P., et al.(1987) An experimenral study of the horizontal and distribution of ozone over Athens, *Atmos. Environ.*, 21(12), 2681-2693.
- Liu, C.M. and S.C. Liu(1990) A study of Taipei ozone problem, *Atmos. Environ.*, 24A(6), 1461-1472.
- Liu, C.M., et al.(1994) Important meteorological parameter for ozone episodes experienced in the Taipei basin, *Atmos. Environ.*, 28(1), 159-173.
- Lynn, D.A.(1978) *Air pollution treat and response*, Addison Wesley, Reading, MA, 58.
- McKendry, I.G.(1992) Ground-level ozone in Montreal, Canada, *Atmos. Environ.*, 27B(1), 93-103.
- Rombout, P.J. A.(1985) Short term health effects of ozone and nitrogen dioxide in experimental animals in relation to measurement and monitoring of air pollution. In *Ozone, Proc. of an Int. Workshop*. February 1984, Goteberg, Sweden, 92-104.
- Samson, P.J.(1978) Nocturnal ozone maxima, *Atmos. Environ.*, 12, 951-953.
- Schjoldager, J.(1979) Observation of high ozone concentration in Oslo, Norway, during the summer of 1977, *Atmos. Environ.*, 13, 1689-1696.
- Seto, S.(1992) Case study on the vertical profile of oxidant concentration at the coastal region of Seto Inland Sea, *Tenki*, 39(6), 347-354.
- Shreffler, J.M. and R.B. Evans(1982) The surface ozone record from regional air pollution study 1975-1976, *Atmos. Environ.*, 16, 1311-1321.
- Spicer, C.W., et al.(1979) Ozone sources and transport into the northeastern United States, *Envir. Sci. Technol.* 13, 975-985.
- Steinberger, E.H. and E. Ganor(1980) High ozone concentrations at night in Jerusalem and Tel-Aviv, *Atmos. Environ.*, 14, 221-225.
- Stewart, H.N., et al.(1976) Ozone levels in central London, *Nature*, 263, 582-584.
- Weston, K.J. et al.(1989) Mass budget studies of photochemical ozone production over the U. K., *Atmos. Environ.*, 23, 1349-1360.
- WHO(1987) *Air quality guidelines for Europe*, WHO regional publications, European series, No. 23, Copenhagen.
- Zurita. E. and M. Castro(1983) A statistical analysis of mean hourly concentrations of surface ozone at Madrid(Spain), *Atmos. Environ.*, 17(11), 2213-2220.