

서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구

On Surface Ozone Observed in the Seoul Metropolitan Area during 1989 and 1990

정 용 승 · 정 재 섭

한국교원대학교 환경과학연구소
(원고접수: 1991. 10. 21)

Yong-Seung CHUNG, Jae-Sup CHUNG

Environmental Science Institute, Korea National University of Education, Chongwon, Choongbook 363-791
(Received 21, October 1991)

Abstract

Atmospheric O₃ in the biosphere is formed under the favourable meteorological condition, when the primary pollutants, such as NO₂, HC, CO, CH₄, etc., react with other constituents. Observed annual average concentrations for 1989 and 1990 were 11.8 and 10.4 ppb, respectively. The number of days measured ozone over 80 ppb in Seoul were 36 in 1989 and 39 in 1990. In general, monthly maximum values occurred in May and August.

In comparison with 1~2 maxima of O₃ distribution in large cities in other countries, it was found that there were 3~4 maxima in Seoul and its suburbs. Topographic effects, resulted by wind channelling in the Han River valley and by the blocking of air pollutants in the mountain, appeared to produce multiple centres of O₃ maxima in Seoul.

Surface O₃ values were low with decreasing solar radiation, when the cloudiness increased and precipitation occurred. According to 12 cases examined, 2 cases shown here, O₃ values exceeding 80 ppb were occurred when the Korean peninsular was under the influence of the backside (or west side) of an anticyclone. In this synoptic situation there were warm and moist southerly airflows with high intensity of solar radiation.

Occasionally, sea breezes were observed to occur in warm seasons, and the channelling effect of the Han River valley appeared to increase the general wind (speed) to the east side of Seoul. In this meso-scale situation O₃ maxima were observed in the downwind (east and southeast) side of Seoul.

The occurrence of surface O₃ in downwind is highly correlated with precursors. The sea breeze of 2~4 m s⁻¹ will take 3~5 hours to transport photochemical precursors for 20~50 km. In turn the areas of maximum O₃ occurrence in Seoul are in the range of meso-scale transport of air pollutants.

1. 서 론

서울, 인천, 안양, 성남, 부천을 포함하는 서울 수도권 지역(Seoul Metropolitan Area: SMA)은

인구 약 1,400여 만명으로 한국 전체 인구의 1/4 이상을 점하는 최대 인구 밀집지역이다. 이 지역은 황해로부터 약 20 km 내륙에 이르기까지 인천, 부평 및 구로 등 수도권 공단에는 약 35,000여개의 공장이 밀집되어 있다.

또한 각종 차량과 산업시설의 수도권 집중으로 대기오염이 중요한 환경문제로 대두되고 있다. 이에 따른 NO_x와 NMHC(non-methane hydrocarbons)의 대량 배출은 다른 광화학 산화물(photochemical oxidants)의 발생을 초래한다. 광화학적으로 발생되는 오존(O₃)은 도시대기 오염물질 속에 많이 포함되어 있다. 안개와 연기의 합성어인 smog에는 광화학 산화물질들이 포함되며, 특히 오존이 자주 관측된다.

오존은 일반적으로 생물권의 자연대기에 20~30 ppb 정도 존재한다(Yap and Chung, 1977). 오존농도 250 ppb에서 천식이 발생하며, 100~1000 ppb의 농도에서 시각장애와 폐기능장애를 유발하고 1500~2000 ppb의 농도에서 2시간 이내에 인체에 해를 끼친다. 또한 심장질환, 안과질환 및 정신능력을 저하시키며(Dix, 1981), 체내 효소계를 교란시켜 DNA, RNA에 작용하여 유전인자에 변화를 일으키기도 한다.

오존은 식물의 성장과 결실에도 해를 끼쳐, 1965년 Canada의 Ontario 지방에서 담배잎과 흰콩의 수확량을 감소시켰으며, 식물의 성장기에 오존 농도가 30 ppb 이상일 때 농작물의 성장과 수확량이 감소했다는 연구보고가 있다(Mukammal, 1965). 또한 시금치, 소나무 등에 피해를 주며 미국 캘리포니아와 독일 등에서 오존의 피해가 큰 것으로 알려졌다. 오존은 무생물에도 피해를 주어 고무와 플라스틱 제품을 연화시키며, 페인트와 섬유제품의 색상을 퇴색시킨다(Tonneijck, 1989).

오존은 대류권 상부에서는 태양복사의 흡수체로서 대류권 하부와 지면에서는 적외선 복사의 흡수체인 CO₂, CH₄과 더불어 기후변화를 초래하는 온실효과 기체로서 주목을 받고 있다(Houghton, 1990).

중국의 Taipei 시에서 차량 및 산업시설에 의해 배출되는 NO_x 및 NMHC와 아열대 기후로 인해 광화학 산화물이 생성되어, 지면 부근의 O₃ 값이 120 ppb인 날이 1986년과 1987년에 각각 127회와 60회에 달했다. 여름철에 해륙풍이 오염물질을 Taipei 도심으로 이동시켜 오존 농도를 증가시켰다는 연구보고가 있다(Chung *et al.*, 1990).

1988년 여름 미국 전역에서는 과거 10년 이래 가장 높은 지면 O₃ 값을 기록했으며, New York에서는 80 ppb를 초과한 날수가 34일, Los Angeles에서는 172일에 이르렀다. 같은 해 Mexico는 O₃ 허용기준치(110 ppb/hr)를 초과한 날이 연간 300일이었다. 이렇듯이 세계각국의 인구, 산업, 차량 밀집 지역인 대도시에서 지면부근의 O₃는 높은 값을 나타내고 있

다(Lester, 1989).

서울도 예외는 아니어서, Table 1과 같이 지면 오존농도가 80 ppb/hr을 초과한 날이 1989년에 36일이었으며, 1990년에는 3, 4, 5, 6월의 잦은 강수에도 불구하고 39회를 기록하였다. 또한 1989, 1990 2개년 간의 80, 100, 120 ppb를 초과한 날수는 Table 2와 같다.

Table 1. The occurrence numbers of surface ozone concentrations over 80 ppb in the Seoul Metropolitan Area (SMA) for 1989 and 1990.

yr/month	3	4	5	6	7	8	9	total
1989	3	5	3	4	10	8	3	36
1990	0	0	2	10	4	18	5	39

Table 2. The occurrence numbers of surface ozone concentrations between 80~150 ppb in the SMA.

yr/conc.	≥80 ppb	≥100 ppb	≥120 ppb	≥150 ppb
1989	36	13	4	0
1990	39	18	8	3*

*1990. 8. 2. 15:00 잠실 1동 206 ppb
1990. 8. 12. 17:00 방이동 169 ppb
1990. 8. 30. 15:00 방이동 173 ppb

본 연구의 목적은 서울을 중심으로 하는 수도권에서 지면 부근 오존의 공간적, 시간적 분포 및 사례 연구를 통한 대기과학적 현상을 조사하는데 있다.

2. 오존의 생성

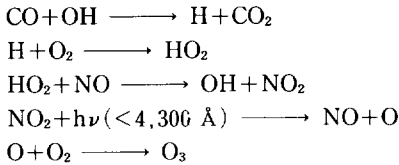
광화학 대기오염은 주로 기체상으로 일어나고, 반응 메커니즘도 매우 복잡하다. 또한 여러가지 다른 화학원소를 포함하며, 그 원인은 아직 명확하게 밝혀지지 않고 있다. NO_x는 대개중의 HC의 산화촉매로서 중요하며, 근자에 급증하는 자동차는 HC와 NO_x의 중요한 배출원이다.

Blacet (1952)와 Haagen-Smit (1953)은 오존 생성과정에서 각각 태양복사, NO_x와 유기물의 역할에 관하여 밝혔고, 반응하는 동안 오존 및 다른 2차 오염물질이 생성된다고 언급한 바 있다.

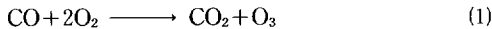
오존을 발생시키는 화학반응은 다양하며 NO_x의 농도는 대류권에서 화학반응과 오존형성을 결정하는 중요한 요소이다. 그리고 CO가 산화하는 과정

에서 O₃가 생성 소멸되며, CH₄의 산화과정에서도 NO의 농도에 따라 O₃가 생성되기도 한다. 대기중에 CO와 CH₄의 산화제로 알려지고 있는 것은 hydroxyl radical이며 그 반응 과정에서 NO_x는 중요한 역할을 한다.

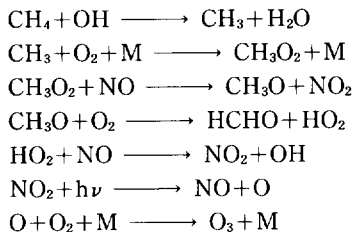
CO는 OH와 CH₄의 산화에 의한 오존 생성과정은 다음과 같다.



이상을 간단히 하면 (1) 식과 같다.



CH₄도 OH와 반응하여 O₃를 생성시킨다.



이상을 간단히 하면 (2) 식과 같다.



3. 자료처리

3.1 자료

본 연구에 이용된 O₃ 및 NO_x 데이터는 서울 및 수도권의 33개 관측소와 부산 3, 대구 3, 울산 3, 총 42개 지점에서 1989년 1월에서 1990년 12월까지 관측된 2년치 자료를 사용하였다. 서울, 인천 및 수원 등 수도권에 분포된 관측소의 위치는 Fig. 1과 같다.

풍향, 풍속, 일 최고온도 및 일사량을 포함하는 기상 데이터는 기상청 관측자료를, 그리고 지상일기도는 일본기상청 자료를 사용했다. 특히 오존의 서울 대표값으로 관측된 성수, 오류, 방이의 위치는 각각 S, O, B로 표시하였다.

3.2 연간 오존 관측치

Table 3은 1989, 1990 2년간의 서울, 인천, 성남, 부천, 안산 등의 수도권과 부산, 울산, 광주 지역의 연간 월평균 오존 농도를 나타낸다.

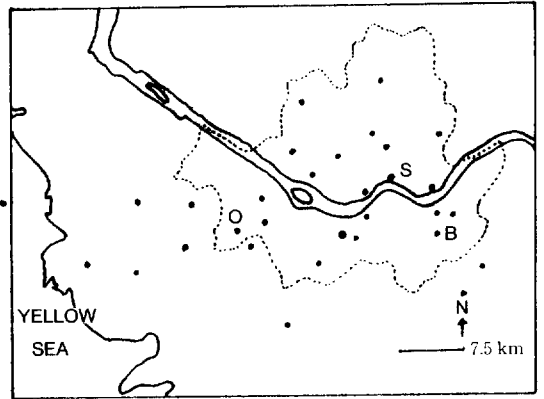


Fig. 1. Monitoring sites of ozone concentrations in the Seoul Metropolitan Area (SMA).

Table 3. Annual average concentrations of surface ozone (in ppb).

yr/city	서울	인천	수원	성남	부천	안산	부산	울산	광주	mean
1989	10	11	12	11	10	16	12	15	9	11.8
1990	11	8	9	10	7	10	16	12	11	10.4

Fig. 2는 서울과 수도권에서 오존의 연간 월평균치를 나타낸 것이다. 월평균 최대치는 일반적으로 5월에 나타나며, 8월에 두번째 최대값이 나타난다. 이것은 북반구 중위도에 위치한 다른 대도시의 경향과 일치한다.

6, 7월에는 장마로 인한 잦은 강우, 즉 오염물질의 washout으로 그 값이 적게 나타난다. 공업단지인 인천, 부천, 안산 등지에서 높은 값을 나타내는 것은 산업활동으로 인한 NO_x와 HC의 다량 배출에 기인한다고 여겨진다.

1990년에는 4월에 최대치를 보이며 일반적으로 그 값이 1989년 보다 작게 나타나는 것은 1990년이 예년보다 강수 현상이 잦았기 때문이다(Table 4).

3.3 월 평균 오존 관측치

3.3.1 수평분포

Fig. 3은 1989년 수도권 지역에서 5월과 8월의 월평균 지면 오존값의 수평분포이다. 월간 10~25 ppb의 분포를 보이고, 서론에서 언급한 바와 같이 인구, 교통, 산업의 밀집지역인 인천직할시 부평동, 영등포구 오류동, 용산구 한남동, 성동구 성수동, 서대문구 불광동, 송파구 잠실동, 부천, 안양과 성남지역에서 20~25 ppb의 높은 지면 오존분포를 보

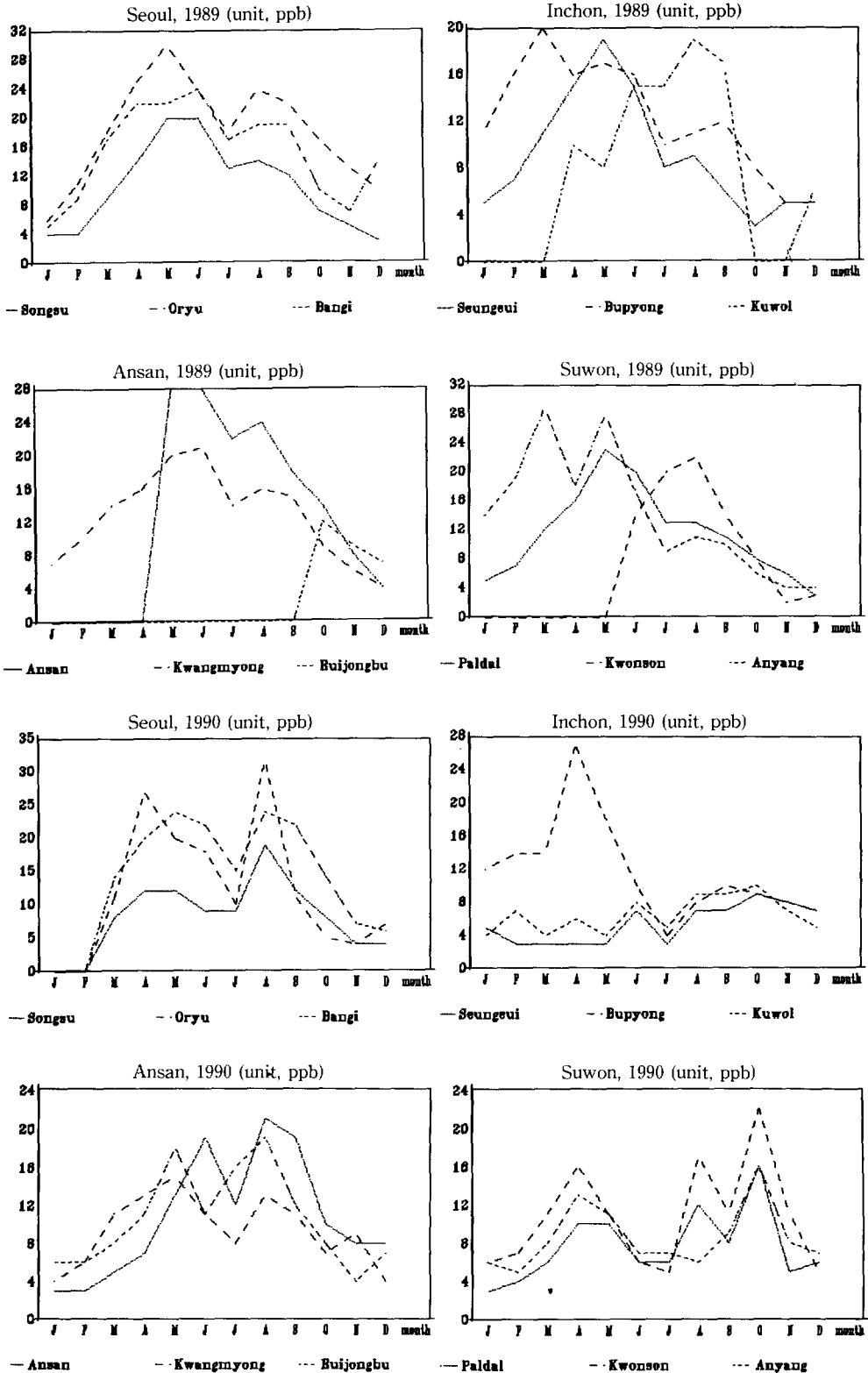


Fig. 2. Annual average concentrations of ozone in the SMA for 1989, 1990.

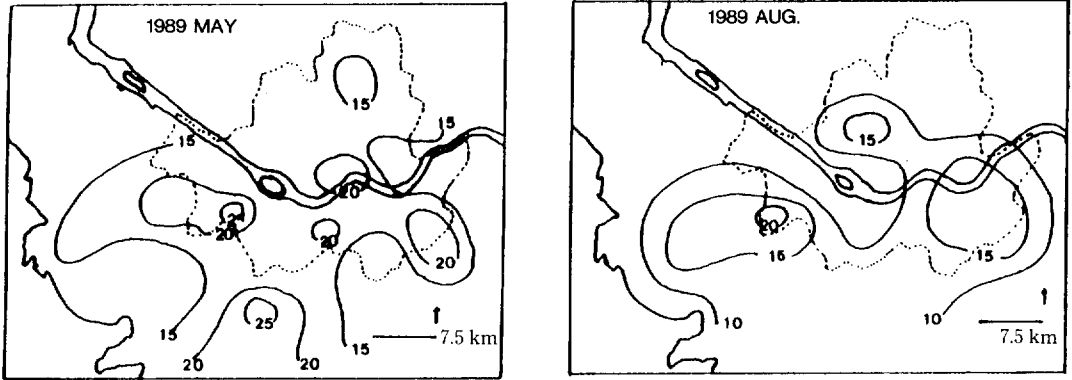


Fig. 3. The horizontal distribution of monthly mean concentrations of surface ozone in the SMA for 1989.

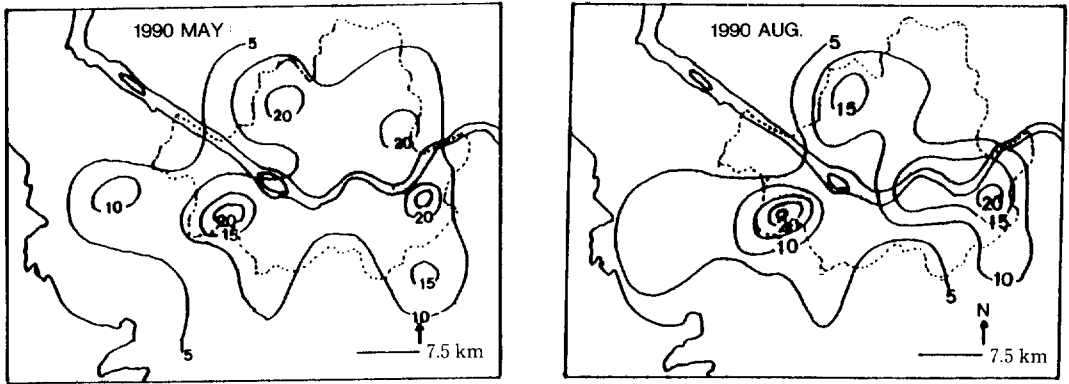


Fig. 4. The horizontal distribution of monthly mean concentrations of surface ozone in the SMA for 1990.

이고 있다.

Fig. 4는 1990년의 수도권 지역에서 5월과 8월의 월평균 지면 오존값의 수평분포이다. 월간 10~25 ppb의 분포를 보이고, 오존농도의 집중지역은 1989년과 동일하게 부평, 오류, 잠실, 불광동과 성남지역이며, 특히 공업지역인 부평, 오류지역과 해풍의 풍하측인 서울의 동부 잠실, 방이 지역에 20~25 ppb의 평균값을 보인다.

3.3.2 월간 오존 변동 분포와 기상요소

Fig. 5는 1989년 5, 8월의 일 최고기온, 일사량 및 지면 오존의 일 최고치를 나타낸 그래프이다. 연간 기온과 일사량이 높은 경우 오존관측치가 증가했으며, 강수나 구름으로 인해 일사량이 낮은 경우에는 오존관측치도 감소함을 보여주고 있다.

특히 5월 5일, 19일, 27일에는 서울 전역에서 각각 80, 90, 120 ppb의 높은 지면 오존값을 보였으며, 이때의 기온과 일사량 역시 높은 값을 보이고 있다.

이것은 오존 생성에 높은 기온과 강한 일사가 필요한 조건이라는 Chung(1977)의 선행 연구와 잘 일치한다. 그러나, 강수현상이 나타나면 washout으로 오존값은 감소한다.

Fig. 6은 1990년 5, 8월의 일 최고기온, 일사량 및 지면 오존의 일 최고치를 나타낸 그래프이다. 1990년은 Table 4와 같이 4, 5, 6, 7월의 잦은 강수현상에도 불구하고 비교적 높은 값을 기록했다.

5월에는 서울 전역에서 10, 22, 28일에 80~100 ppb의 오존값을 보이고, 8월에는 2, 7, 15, 26, 30일에 100~140 ppb의 높은 지면오존값이 관측된다. 이때

Table 4. The number of rainy days in the SMA for 1989 and 1990.

yr/mon.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	total
1989	15	7	0	2	6	8	10	9	11	8	7	13	96
1990	15	14	8	10	16	20	26	11	9	1	9	14	153

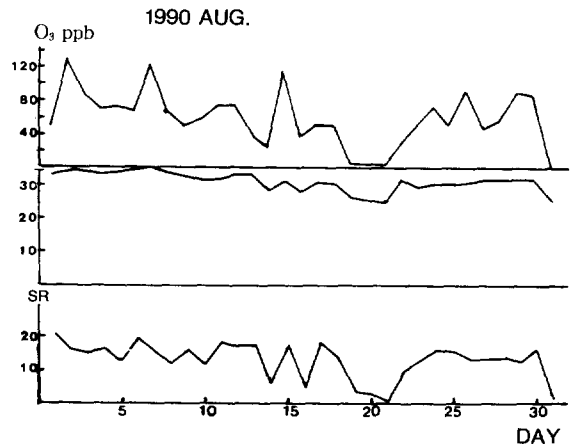
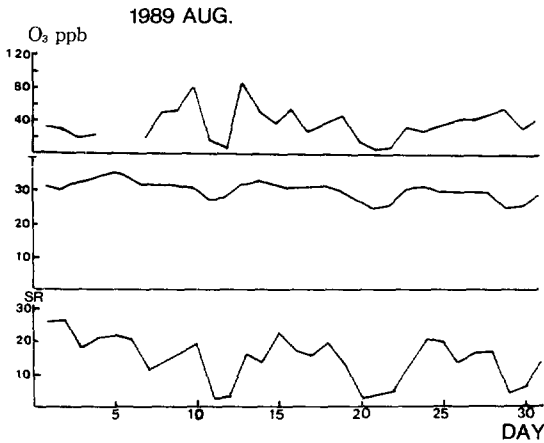
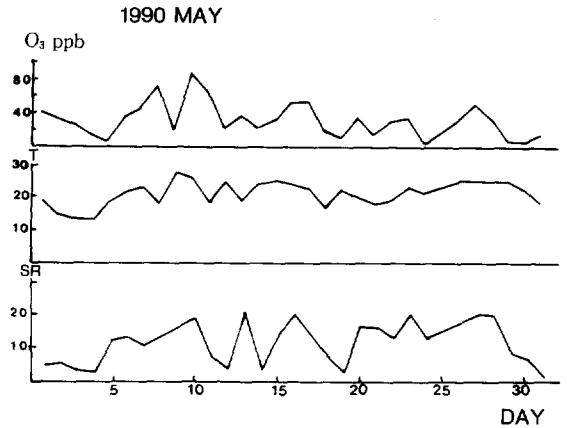
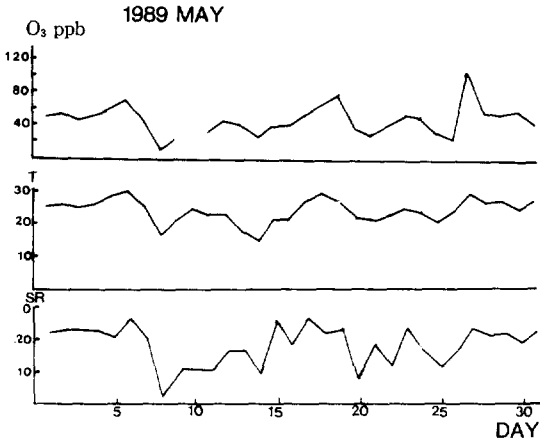


Fig. 5. The monthly variations of daily maximum of hourly surface ozone (O_3 : ppb), maximum temperature (T : $^{\circ}C$), solar radiation (SR: MJ/m^2) in the SMA for May and August of 1989.

Fig. 6. The monthly variations of daily maximum of hourly surface ozone (O_3 : ppb), maximum temperature (T : $^{\circ}C$), solar radiation (SR: MJ/m^2) in the SMA for May and August of 1990.

역시 높은 기온과 일사량을 기록했다.

4. 논 의

4.1 사례연구

서울 지역에서 80 ppb/hr의 높은 지면 오존값이 관측된 날 중 1989년 5월 27일, 6월 3일과 29일, 7월 14일, 8월 6일과 13일의 6 case와 1990년 6월 6일, 7월 30일, 8월 7일, 15일, 26일, 30일의 6 case를 포함한 총 12 case에 대한 오존의 수평분포, 지상 일기도, 서울의 기온, 일사량, 풍향, 풍속과 성수, 오류, 방이동에서 관측된 오존 관측치의 시간 변화량을 분석하였다.

12 case의 분석 결과, 한반도에 난기가 유입하여 높은 기온과, 일사량에 의해 오존이 생성되며, 이것은 한반도가 기압골 전면, 고기압 후면에 위치하고 (Chung, 1977), 특히 남서-남동 기류가 수렴 유입되면 높은 지면오존값을 나타냈다. 12 case 중 1989, 1990년의 각각 1 case를 Fig. 7과 8에 나타냈다. 나머지 10 case도 거의 동일한 양상을 나타냈다.

4.1.1 1989. 6. 3

이날 발해만 내륙에 990 mb 저기압이, 일본 동부에 1020 mb 고기압이 위치하였고, 한반도는 기압골 전면, 고기압 후면에 위치하여, 남서기류에 의한 난기가 유입되어 15시에 31 $^{\circ}C$ 의 기온을 기록했다. 전

날인 6월 2일 21시 850 mb 일기도도 남-남서풍의 유입을 보였으며, 이때 불광동에 60 ppb 성수, 구의에 100 ppb의 오존 농도를 나타냈다. 서울 지방은 해풍의 영향으로 11시부터 2~6 ms⁻¹의 서풍이 불었고, 최대 오존값은 14시에, 2차 최대 오존값은 오전 10시경에 나타났다(Fig. 7). 대기중에 09:45분 부터 15:00시까지 haze가 관측되었고 일중 7~9 km의 시정을 나타냈다.

오류동에 60 ppb, 불광동에 80 ppb, 쌍문동에 100 ppb, 잠실에 160 ppb, 방이동에 173 ppb의 오존농도를 나타냈다(Fig. 8).

4.2 해륙풍 효과

따뜻한 계절 서울로부터 30~50 km 서쪽에 있는 황해의 영향으로 수도권 지역에서 낮에는 서풍인 해풍이, 밤에는 육풍인 동풍이 불 수 있다. 일반적으로 낮에는 4~6 ms⁻¹의 해풍이 10~11시부터 20~21시까지 관측된다.

풍하측인 인천, 부평, 오류동의 산업지역에서 방출되는 NO_x, HC가 서풍에 의해 풍하측인 서울 동부(성수, 잠실, 면목동)로 운반되는데 약 2시간이 걸린다. 따라서 14~15시를 전후해서 풍하측인 서울 동부지역에서 높은 지면 오존값을 기록한다.

특히 1990년 8월 2일 잠실 1동에서 206 ppb를, 8월 30일 방이동(황해안으로부터 45 km)에서 173 ppb를 기록했다. 한강의 서부지역인 강서구와 여의

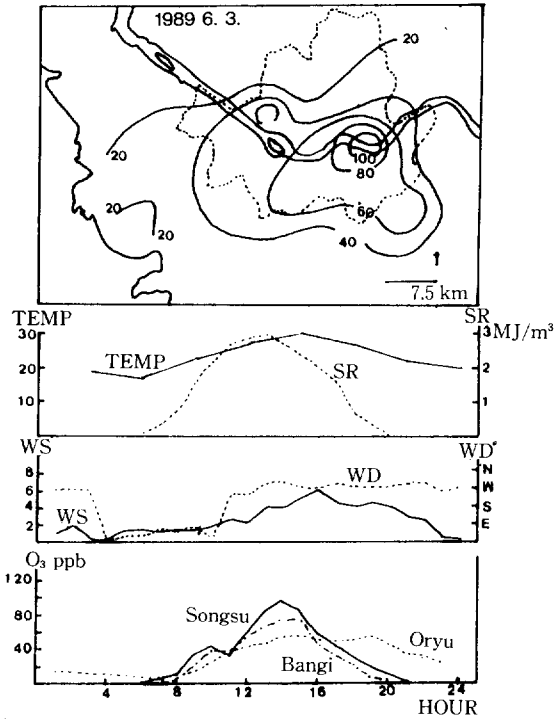


Fig. 7. The horizontal distribution of daily maximum of hourly surface ozone concentrations (upper), diurnal variations of temperature (Temp.), solar radiation (S.R), wind direction (W.D), wind speed (W.S) and surface ozone concentrations in the SMA (lower).

4.1.2 1990. 8. 30

이날 한반도는 북만주에 위치한 저기압으로부터 동지나해에 위치한 열대성 저기압의 전면, 북태평양 고기압의 후면에 위치하여 고온 다습한 남동-남서 기류가 한반도 전역에 유입되었다. 이러한 기압 배치는 한반도가 "col"에 위치하여 대기 오염농도가 매우 높게 나타났다. 서울 지방은 10시경 부터 2~4 ms⁻¹의 서-남서풍이 불었고, 인천, 부평, 구로동,

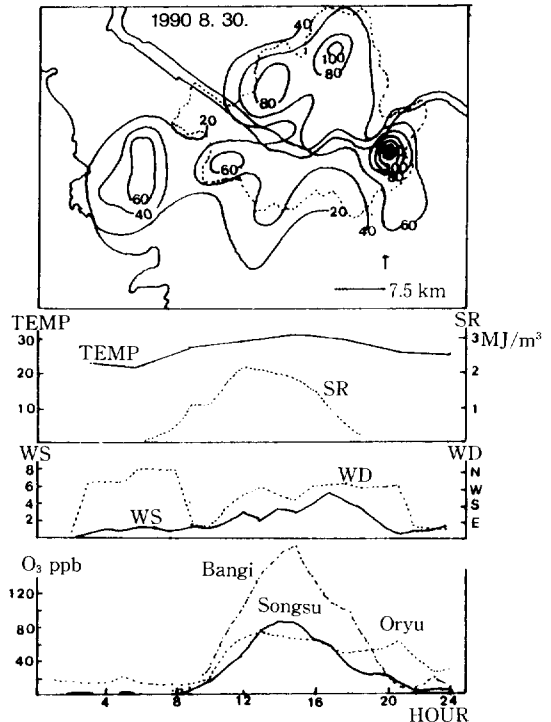


Fig. 8. The horizontal distribution of daily maximum of hourly surface ozone concentrations (upper), diurnal variations of temperature (Temp.), solar radiation (S.R), wind direction (W.D), wind speed (W.S) and surface ozone concentrations in the SMA (lower).

도 일대의 낮은 지면오존값에 비해서, 해풍풍의 풍하측인 서울 동부의 잠실, 성수, 성남지역은 높은 오존값을 보인다.

서울 중심을 관류하는 한강은 해풍의 wind channel 역할을 하여, 풍상측의 NO_x와 HC 등과 같은 대기 오염물질을 풍하지역으로 운반하는 통로가 된다. 이렇게 운반된 대기오염물질들은 sink 지역인 동부에서 광화학 반응에 의해 오존의 최대값을 나타내게 한다.

4.3 일 변화

Table 5는 1989년 8월 성수의 지면오존 최대치 발생시간 빈도표이다. 지면 오존의 일 최대치는 일 최고 온도가 나타나는 1~2시간 후인 13~15시 경에 나타난다. 어떤 경우에는 15~17시 경에도 나타나는데 이것은 서울 서쪽의 공업지대로부터 오존의 precursor와 오존의 이동이 있음을 의미한다. 반면 지면 오존의 최소치는 오전 7~8시 경에 나타난다. 2차 최대치는 때에 따라 2~4시 경에 나타나며 겨울철에는 그 값이 작거나 나타나지 않는 경우도 있다.

Table 5. The frequency of maximum surface ozone concentrations in Aug. 1989.

yr/hr	12	13	14	15	16	17	18	19	total
1989	0	6	12	7	2	2	1	1	31
1990	1	11	7	3	3	2	1	0	28

낮 동안에 오존의 precursor는 강한 난류혼합으로 수직 상승 이동을 하기도 하며 낮의 평균 혼합고는 1.2 km가 넘는다. 혼합고가 낮은 경우 낮은 고도에서 오존의 수직교환은 경계층 내로 제한된다. 밤에 혼합고는 0.4 km 이내로 낮아질 수 있으며 일반적으로 낮다(Chung, 1977). 2~4시 경에 2차 최대치가 나타나는 것은 대류권 하부의 혼합고 높이가 지면 부근으로 낮아진 데에 원인이 있다.

따라서 서울에서 해풍의 영향, 인위적으로 발생하는 precursor 및 혼합고의 높이는 광화학적 오존생성에 중요한 요인이 된다.

4.4 대기 오염물질 이동에 의한 풍하측의 영향

4.4.1 단거리 이동(~10 km)

NO₂ 농도가 클 때는 오존 농도는 일반적으로 낮고, NO₂ 농도가 작을 때는 오존농도가 높다. 도시 지역에서 지역적으로 배출되는 NO_x에 의해 O₃가 생

성된다. 약한 바람과 낮은 혼합고가 나타나는 경우, 도시에서 NO_x 값은 대개 오전에 높은 값을 나타낸다.

오류동에서(부평 공단으로 부터 10 km 내외) 오존농도의 시간 변화는 인천 및 부평 공단으로 부터 높은 NO_x 공기를 갖는 해풍이 불어올 때 증가한다. NO_x 및 오염물질의 유입은 이미 존재해 있던 오존과 빠른 반응을 일으켜(~1 hr) 저고도에 있던 오존을 소모시킨다.

4.4.2 중거리 이동(10~100 km)

서울과 수도권 33개 관측소의 데이터를 분석한 결과, 인천, 부평, 오류동 및 영등포로 부터 35~50 km 풍하측에 위치한 성수, 구의, 잠실, 방이 등에서 1990년 8월 30일 오후 3시경 120~160 ppb의 오존이 관측되었다. 이것은 Canada Toronto에서 수행되었던 Chung(1977)의 관측결과와 잘 일치한다. 보통 풍하측 기류에서 ~60 ppb의 오존이 생성될 것으로 추측된다(Chung, 1977). 이것은 공업단지, 주거 밀집지역, 교통량이 많은 곳에서 지역적으로 배출되는 오존의 precursor인 대기 오염물질들과, 풍하측으로의 이동의 중요성을 시사한다. 서울 동부지역에도 오존생성 원인 물질들이 많이 존재하며, 이에 부가적으로 영등포 및 인천지역에서 유입되는 precursor가 성수, 잠실 등에 높은 오존농도를 발생시킨 것으로 해석된다.

HC와 NO_x의 광화학 반응으로 인한 오존 농도의 최대치는 전술한 바와 같이 보통 오후에 오염 배출 지역으로 부터 멀리 떨어진 곳의 풍하측 수 10 km에서 일어난다. 대기 오염물질의 존재하에 오존생성 시간은 오존의 소멸시간 보다 느리다. 여름철 기상학적 최적 조건일 경우라도 오존의 생성은 최소한 수 시간 걸린다. 해풍의 풍속이 4 ms⁻¹라면 인천, 부평공단에서 20~50 km인 풍하측까지 오염물질의 이동속도는 3~4시간 정도임을 알 수 있다.

4.4.3 기타

오존값은 역전층 상부에서 감소하거나 변화가 없다. 비록 지면 오존값이 크더라도 오전의 지면 오존농도는 상공 1~2 km에 걸쳐 균일하며, 강한 태양복사와 이동하는 저기압 온난전선 후면의 온난한 남풍은 오존 최대치 발생과 관계가 크다. 한냉한 겨울철에는 여름철과는 달리, 지면에서 높은 오존값이 나타나지 않는다. 그러나 경계층에서 나타나는 높은 오존농도는 성층권 오존과 직접적인 관계가 있다는 학자도 있으나(Dütch, 1969), 경계층 내의 높은 오존은 주로 인위적으로 배출되는 활성 precursor인

NO_x, HC의 10~100 km의 중거리 이동에 의한 광화학적 반응에 기인한다.

4.5 종관 기상 운동계와 지면오존

4.5.1 1989년 6월 29일의 경우

1989년 6월 28일 21시, 29일 9시, 21시, 30일 9시의 지상일기도를 통해 종관상태를 살펴보면 북만주와 발해만 내륙에 각각 998 mb 저기압이 위치하여 북만주에서 발해만 내륙에 걸쳐 기압골이 형성되어 있다. 한반도는 기압골 전면에 위치하여 고온의 난기류가 유입되어 일 최고기온 28℃를 기록했다. 이때 오류, 성수, 방이동은 각각 27 ppb, 49 ppb, 69 ppb의 지면 오존값을 기록했다.

29일에도 28일과 같은 종관상태에 원산만 앞에 1010 mb 고기압이 생성되어 30일까지 정체해 있었다. 이때 역시 온난한 남서기류가 한반도에 유입되어 32℃의 높은 기온과 23.6 MJ/m²의 높은 일사량과 더불어 오류, 성수, 방이에서 각각 80 ppb, 103 ppb, 113 ppb 등 서울 전역에서 80~110 ppb의 지면 오존값을 기록하였다(Fig. 9). 이날 오전에는 3~4 km 이하의 시정이 관측되었고, 12시 전후에서는 0.6 km 정도의 악시정을 보였다.

이상과 같이 한반도가 저기압 전면에 위치하여 고온의 남서기류가 유입되고 해안의 약한 고기압의 영향으로 기단이 정체될 때, 기온과 오염물질의 농도가 증가하여 오존 생성량을 증가시켰을 것으로 생각된다. 또한 오존 증가와 더불어 시정 감소현상도 나타났다.

4.5.2 기상 요소와의 관계

오존발생과 기상요소와의 관계를 보면, 기압이 하

강하기 시작할 때, 즉 저기압이 한반도에 접근할 때, 지면 오존값이 증가한다. 새로운 고기압이 한반도에 접근할 때 오존값은 기압계의 전면에서 현저히 감소했다(Chung, 1977).

한냉전선 통과후 상층으로부터 하강기류에 의해 기압이 증가하고 한기가 이루하는 곳에 맑은 날씨가 나타났다. 이때 관측되는 낮은 오존농도는 주로 상층대기로부터 수직 하강했음을 암시한다.

기압이 증가하고 기온이 감소할 때, 높은 태양복사에도 불구하고 지면 오존값은 낮다(Chung, 1977). 이것은 지면 오존 생성기구에서 태양복사가 그리 중요하지 않음을 의미한다. 강한 한냉 북서기류가 발달할 때 새로운 고기압의 침강에 의해 오존농도는 감소하기 시작한다.

기온과 복사량이 높을 때 지면 오존값은 항상 높다. 야간에 오존 농도가 낮은 것은 NO_x와의 화학반응 때문이다. 대규모 운동계가 난기를 이루시킬 때 기온이 증가하는 반면, 다른 방향에서 강한 바람이 불 때 오존 농도는 현저히 감소한다.

고온의 난기류가 유입된 후 기단이 정체될 경우 오염물질 농도와 기온이 증가하여 오존값이 증가하며, 전술한 1989년 6월 29일의 경우에도 같은 양상을 보이고 있다.

5. 분석 및 토의

1989~90년 2개년의 자료를 분석한 결과, 대도시 서울에서 지면오존의 일별, 월별 최대치 분포의 중심지는 3~4개임을 알게 되었다. 최대치 중심은 대개 영등포, 성동, 잠실 부근에 분포되어 있다. 이것은 1차 대기 오염물질이 풍하측으로 이동하여 발생된 것으로 해석된다.

외국 대도시의 오존 최대치 분포는 풍하측에서 1~2개 지점에서 발생하는 것으로 보고되었다(Chung, 1977). 외국의 대도시는 대개 평지에 분포되어 있으나, 서울은 남부와 북부의 북한산, 도봉산, 관악산과 남산 그리고 도심 중앙을 관류하는 한강 수계 및 분지상의 복잡한 지형 분포로 기류 및 오염체의 이동과 build-up에 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

한편 수도권 경기도 일대의 오존 측정치도 때때로 높은 값이 기록되었다. 1차 대기오염 물질은 생물권 대기에 의해 운반되어, 풍하측 10~50 km 지점에서 오존 최대치가 관측되었다.

겨울철의 일별, 월별 오존농도는 매우 낮으며, 겨울의 적은 일사량과 한냉한 대기조건은 광화학 오존

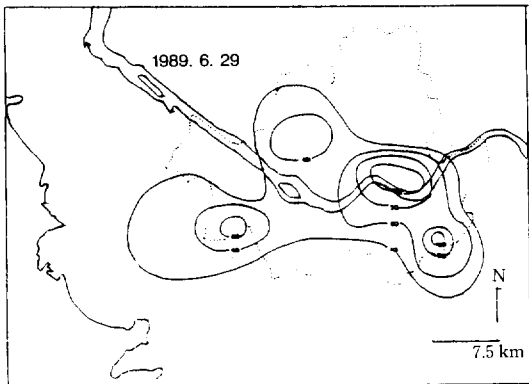


Fig. 9. The distribution of daily maximum of hourly surface ozone on 29 June 1989.

을 크게 발생시키지 않는다. 겨울철의 대기오염은 영국의 London형 스모그와 유사하다고 사료된다.

또한 늦은 봄, 한여름, 초가을에 발생하는 스모그는 높은 기온과 일사량 등 기상조건이 양호할 때, 1차 오염물질(precursor)이 2차 오염물질인 오존 등으로 변환되는 광화학스모그이다. 이는 Los Angeles형 스모그로서 많은 배기가스가 기온이 높고 일사량이 많은 고온 건조한 기상 조건하에서 빈번히 발생하는 것이다. 한편 여름의 대기는(예를 들어 mT 기단) 수분을 많이 포함하고 있으며, 수분은 오존형성에 도움이 된다. 그러나 상대습도가 95% 이상인 안개나 강수는 오존의 습윤 침전을 초래케 한다(Chung, 1977).

최근 일본 기상청의 관측자료에 의하면, 지면으로부터 대류권 하층과 중층(0~6 km)까지의 오존량은 지난 18년간 약 20~30% 증가하였으나, 35~45 km 상공 오존층의 농도는 대류권에 비해 약 1.7~3.0% 감소된 것으로 관측 보고되었다(일본기상청, 1991).

오존은 이동성고기압의 전면에서 최소치가 나타나며, 이 경우 일반적으로 한냉전선이 통과한 후이다. 지면오존은 고기압의 중심이 한반도에 접근하기 시작하면서 증가하기 시작한다. 한편 지면 오존최대값은 한반도가 고기압 후면에 위치할 때와 저기압 온난구역의 고온다습한 기단에 위치할 때 나타난다. 이와 같은 지면 오존 최대농도 발생 개념은 Chung (1977)의 연구결과이며 Fig. 10에 설명되어 있다.

오존은 성층권의 오존층에 밀집되어 분포하고 간

혹 대류권으로 이동한다. 오존은 지상까지 하강될 수 있으며 발원지인 성층권을 떠나 지면에 내려오면 매우 불안정하여 곧 소멸된다(Chung and Dann, 1985).

6. 결론 및 제언

서울을 비롯한 전국의 42개소에서 1989과 1990년 2년 동안 관측된 오존 자료를 분석하였다. 특히 높은 지면 오존값을 보인 12 case에 대한 사례 연구를 통하여 오존 농도분포와 기상요소와의 관계, 대기 오염물질의 이동에 따른 풍하층의 영향 및 해풍 효과와 그에 따른 일변화를 살펴 보았으며, 본 논문에서는 2 case에 대한 사례를 예시하였다.

1. 서울을 비롯한 수도권에서 지면오존 농도 80 ppb/hr를 초과한 날수가 1989년에 36일, 1990년에 39회이었으며, 100 ppb/hr를 초과한 날수는 1989, 1990년에 각각 13일, 18일이었으며, 1990년에는 150 ppb/hr를 초과한 날도 3일이나 되었다.

2. 서울, 부산, 울산, 광주를 포함하는 오존농도의 연평균치는 1989, 1990년에 각각 11.8 ppb, 10.4 ppb의 분포를 보였다.

3. 서울과 수도권의 봄, 여름철의 지면오존 농도는 10~25 ppb의 분포를 보였다.

4. 지면 오존농도 80 ppb/hr 이상을 기록했던 1989년의 6 case, 1990년의 6 case 총 12 case의 조사결과, 한반도가 기압골 전면, 고기압 후면의 남서-남동풍의 난기 유입 수렴대에 위치할 때 지역적으로 80~160 ppb의 높은 오존값을 나타냈다. 특히 서울 동부의 풍하층의 높은 지면오존값은 주간의 해풍(서풍)에 의해 서울의 서부에 위치한 공장지대로부터 배출되는 HC, NO_x 등과 같은 대기 오염물질의 풍하층 이동에 기인한다고 사료된다.

5. 12 case에 대한 사례연구에서 공장지대인 인천, 부평, 오류동으로부터 30~40 km 풍하층에 위치한 성수, 구의, 잠실, 방이동에서 15시경 120~160 ppb의 높은 지면 오존값이 관측되었다. 이것은 Canada Toronto에서 수행되었던 Chung (1977)의 선행연구와 잘 일치된다.

6. 여름철 2~6 m/s의 해풍(서풍)이 11시부터 20~21시 까지 관측되었다. 이것은 풍상층의 높은 대기 오염물질을 풍하층으로 이동시키는 것으로 사료되며, 향후 해륙풍, 혼합고 및 한강의 channeling 역할과 관련된 대기 오염물질의 분포와 이동 및 오존생성에 관한 보다 정량적인 연구가 요구된다.

7. 풍속이 낮고 작은 기압경도를 나타내며, 기온

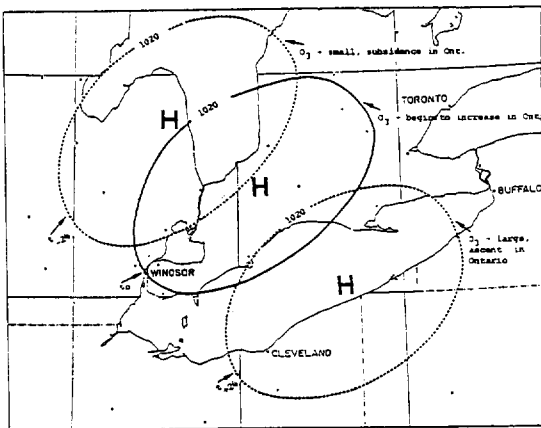


Fig. 10. A schematic diagram showing an increasing trend of low-level ozone with time (t_{-24} , t_0 , t_{24}) for a migratory anticyclone (Chung, 1977).

과 태양복사량이 높을 때, 고온의 난기류가 유입된 후 기단이 정체될 경우 오염물질의 농도와 기온이 증가하여 높은 지면오존값을 나타냈다.

8. 높은 농도의 오존은 따뜻한 계절에 나타나며, 고기압 중심과 후면에서 발생하고, 무풍 내지 약한 바람과 고온일 때 발생하며, Los Angeles 형 광화학 스모그와 비교될 수 있다.

참 고 문 헌

- 일본기상청, 일기도(1989년~1990년).
 일본기상청(1991) 최근에 발생하는 세계의 이상 기상과 기후변동(그 실태 및 견해).
 중앙기상대, 기상월보(1989년 1월~1990년 12월).
 중앙기상대, 기상연보(1989년, 1990년).
 Blacet F.E. (1952) Photochemistry in the lower atmosphere, *Indust. Eng. Chem.* 44, 1339 — 1348.
 Chung M.L., Shaw C.L. and Shen S.H. (1990) A study of Taipei ozone problem. *Atmos. Environ.* 24A, 1461 — 1472.
 Chung Y.S. (1977) Ground-level ozone and regional transport of air pollution. *J. Appl. Meteor.* 16, 1127 — 1135.
 Chung Y.S. and T. Dann (1985) Observations of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada. *Atmos. Environ.* 19, 157 — 162.
 Dix H.M. (1965) *Environmental air pollution*, John Wiley, New York, 286 p. (see p. 65).
 Dütch H.U. (1969) Atmospheric ozone and ultraviolet radiation. *World Survey of Climatology* 4, 383 — 432.
 Haagen-Smit A.J., Bradley C.E. and Fox M.M. (1953) Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances. *Indust. Eng. Chem.* 45, 2086 — 2087.
 Houghton J.T. (1990) Climate change, The IPCC scientific assessment. 338 p. (see p. 28-30).
 Lester R.B. (1990) *State of World 1990*. (지구 환경보고서 한국어 번역판), 도서출판 따님, 167 p.
 Mukammal E.I. (1965) Ozone as a cause of tobacco injury. *Agricu. Met.* 2, 145 — 165.
 Pitts B.J.F. and Pitts J.N. Jr. (1986) *Atmospheric Chemistry*, John Wiley, New York, 1098 p. (see p. 43-44).
 Tonneijck A.E.G. (1989) Evaluation of ozone effects on vegetation in the Netherland. In atmospheric ozone research and its policy implications. 251 — 260 p.
 Yap D. and Chung Y.S. (1977) Relationship of ozone to meteorological conditions in southern Ontario. Preprints 70th Annual Meeting Air Pollution Control Assoc., Toronto, No 77-20.4, 16 p.