

고농도 오존일의 강우와 운량

Precipitation and Cloud Cover on High Ozone Days

김 영 성 · 김 영 진¹⁾ · 윤 순 창¹⁾

한국과학기술연구원 환경연구센터, ¹⁾서울대학교 대기과학과

(1999년 4월 6일 접수, 1999년 11월 13일 채택)

Young Sung Ghim, Young Jin Kim¹⁾ and Soon Chang Yoon¹⁾

Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University

(Received 6 April 1999; accepted 13 November 1999)

Abstract

Effects of precipitation and cloud cover on high ozone days are examined by investigating the precipitation and average cloud cover before the ozone peak time within a day. High ozone days above 100 ppb in the Greater Seoul Area (GSA) for the ozone season from May to September are chosen for the analyses in terms of the surface meteorological data during 1990~1997. The result shows that the effect of precipitation on the rise of ozone concentration is definitely negative so that ozone concentration could not rise above 100 ppb immediately after precipitation. But, the effect of cloud cover is associated with the variations of other meteorological parameters. The number of high ozone days with "zero" cloud cover is rather less than that with cloud cover of 1 to 4 since temperature is usually lower in "zero" cloud cover days. Furthermore, ozone concentration can rise above 100 ppb even with full cloud cover when the wind is weak and the temperature is high.

Key words : high ozone days, precipitation, cloud cover, ozone conducive conditions, data validation

1. 서 론

기온이 높고 바람이 약하며 햇빛이 강할 때 광화학 반응에 의하여 오염된 대기 중의 오존 농도가 상승함은 잘 알려진 사실이다(예를 들면, NRC, 1991). 오염이 심하지 않을 경우 우리 나라의 계절별 오존 농도는 보통 봄철 상승, 여름철 하락, 가을철 2차 상승의 이중 구조를 보이는데 비하여, 오염이 심하여지면 일 최고 농도가 상승하며 평균 농도를 높임으로써 여름철 하락의 폭이 점차 줄게 된다

(김영성, 1996). 오염되지 않은 북반구 벽지(remote site)의 계절별 변화가 봄철 상승, 가을철 하락의 단순 구조인데 반하여(Oltmans and Levy, 1994; Singh et al., 1980), 우리 나라의 계절별 변화가 보편적으로 이중 구조를 보이는 것은 오염의 결과로 아직 한낮에 기온이 높은 가을철에 광화학 반응이 잔존하기 때문이지만, 더욱 중요하게는 여름철 잦은 강우로 광화학 반응이 발달하지 못하는 날이 빈번하여 여름철의 평균 농도가 충분히 상승하지 못하는 경우가 많기 때문이다. 그러나 이와 같은 평균 농도의 하락에도 불구하고 서울, 수도권 지역 측정소의

100 ppb 이상 환경기준 초과 누적 시간 수는 역시 7, 8월이 가장 많다(김영성, 1999).

강우와 구름은 우리 나라 여름철 광화학 오존 농도를 결정하는 중요한 변수이다. 구름은 햇빛을 차단함으로써 자외선의 양을 줄일 뿐 아니라 구름 속 액상 반응이 오존 생성에 필요한 라디칼들을 소모시킬 수 있어 광화학 반응에 불리하다(Matthijssen *et al.*, 1997; Walcek *et al.*, 1997). 그러나 수 km씩 수직 발달하는 적운은 지표면 부근의 1차 오염물질을 대류권 상부로 이송하거나 대류권 상부의 고농도 오존을 지표면 근처로 이동시킬 수 있다(Liu *et al.*, 1997; Nicholls *et al.*, 1995). 광화학 반응에 1차적으로 중요한 기온에의 영향을 보아도 일반적으로 구름은 태양으로부터의 복사열을 막아 기온을 낮추는 것으로 인식되고 있지만 낮은 구름은 지표로부터 복사에너지 방출을 차단하여 기온을 상승시킬 수 있다. 실제 김영성과 오현선(1999)이 관찰한 바에 의하면, 1990~1997 기간 중 특징적 고농도 사례의 하나인 1992년 7월 사례의 처음 이틀은 운량이(십분율) 10과 9.9로 구름이 거의 완전히 하늘을 덮고 있는 가운데 오존 농도가 자기 100 ppb와 157 ppb까지 상승하여 주의를 끌고 있다.

강우는 수분의 증발에 필요한 잠열로 기온을 효과적으로 낮추고 동시에 오염물질의 세정까지도 가능하므로 강우가 기록된 가운데 오존 농도가 상승하기는 거의 기대하기 어렵다. 그러나 김영성(1997)이 1990년부터 1995년까지 6년간 7, 8월 서울, 수도권 지역에서 100 ppb를 초과하였던 84일에 대하여 서울 기상청에서 측정된 강우량을 평균하면 2.40 ± 10.68 mm로 편차가 크지만 강우가 기록되어 있다. 그러나 이와 같은 결과는 서울, 수도권에 분포된 30~40개 측정소에서 관측된 오존 농도 상승을 서울 기상청 한 곳의 기상 측정 결과를 토대로 살펴 보았다는 점에서 오존 농도 상승 지점의 실제 기상 특성을 반영하지 못한 것일 수 있다.

본 논문에서는 1990년부터 1997년까지 8년간 서울, 수도권 지역의 대기질 측정소에서 100 ppb를 초과한 고농도 오존 발생일의 강우와 운량을 조사함으로써 이 두 인자가 오존 농도 상승에 미치는 영향을 알아보려고 한다. 김영성(1997) 등 기존의 연구가 서울 기상청의 자료만을 이용한 대신, 서울, 수도권 내 인천과 수원 지역의 기상 관측 자료를 함께 이

용함으로써 기상 현상의 규모와 인접 측후소 간의 자료의 연관성을 검토하고자 한다. 아울러 오존 농도 측정에서 이상 현상들(anomalies)이 이미 지적되고 있는 만큼(김영성, 1999) 기상 특성에 비추어 오존 농도 상승의 모습이 쉽게 이해되기 어려울 때에는 이상 측정의 가능성을 점검한다

2. 조사 방법

1990년부터 1997년까지 우리 나라에서 오존 시준으로 인정되는 5월부터 9월을 대상으로 100 ppb를 초과하는 날에 대하여 오존 농도가 최고를 기록할 때까지 강우 여부와 평균 운량을 조사하였다. 강우는 매시간 측정하므로 당일 새벽 1시부터 오존 농도가 일 최고 농도에 도달할 때까지 강우 여부를 점검하였으며, 3시간 간격으로 측정하는 운량은 오전 3시부터 최고 농도 시간까지의 측정치를 평균하였다.

그림 1은 서울, 수도권 내 기상 측후소와 대기질

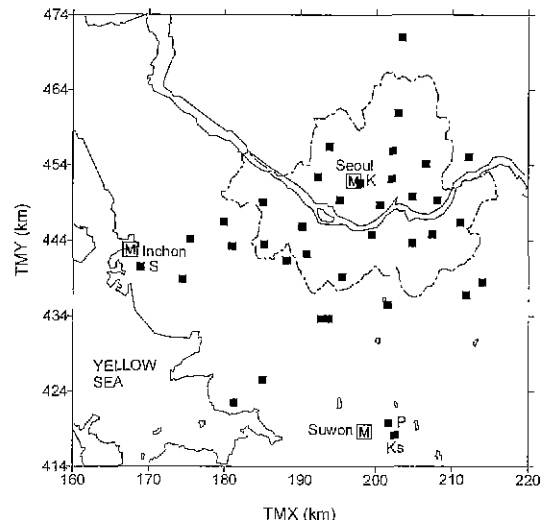


Fig. 1. Distribution of surface meteorological stations and air quality monitoring stations in the Greater Seoul Area, represented by **M**'s and solid rectangles, respectively. Kwanghwamun station (K) is near the Seoul meteorological station, Sungui station (S) is near the Incheon meteorological station, and Paldal (P) and Kwonsun (Ks) stations are near the Suwon meteorological station.

측정소이다. 서울 기상청과 광화문 측정소의 거리가 가장 가깝고, 인천 측후소 인근에는 송의 측정소가, 수원 측후소 인근에는 팔달과 권선 측정소들이 있다. 강우가 기록된 가운데 오존 농도가 100 ppb 이상 상승하기는 쉽지 않으므로 고농도일의 강우 여부는 그림 1 전 지역을 대상으로 조사하였으나, 고농도일의 운량은 거리가 가장 가까운 광화문 측정소와 서울 기상청을 묶어 광화문 측정소에서 농도가 초과하였을 때 서울 기상청의 기상 특성을 조사하였다

3. 결과 및 고찰

3.1 강우

1990년부터 1997년까지 8년간 서울, 인천, 수원 등 측후소에서 강우가 기록된 후 서울, 수도권 측정소에서 오존 농도가 100 ppb를 초과한 날은 모두 13일로 표 1과 같다. 13일 중 서울에서 비가 온 후 오존 농도가 상승한 날은 10일이며, 10 mm 이상은 4일에 불과하다. 이와 같은 사실은 김영성(1997)이

1990~1995 기간 중 서울 기상청에서 측정된 서울, 수도권 지역 고농도일 평균 강우량이 수 mm이었던 것과 비교할 때 매우 의외인데, 많은 서울 측후소의 강우가 서울, 수도권의 오존 고농도 상승 후에 기록되었음을 의미한다.

그러나 91. 6. 23 서울 기상청에서 15시에 강우가 기록되면서 같은 시각에 부천 내동에서 오존 농도가 106 ppb까지 상승하였고 한시간 후인 16시에는 한남에서 109 ppb까지 농도가 상승하였다거나, 97. 7. 25 비록 양은 0.1 mm에 불과하나 13시 강우가 있음에도 12시에 구의와 쌍문, 13시에 성수, 그리고 16시와 17시에 대치, 안양, 호계 등에서 차례로 오존 농도가 상승한 사실 등은 강우의 영향이 예상되는 상황에서 오존 농도가 상승할 수 있음을 보여주고 있다. 뿐만 아니라 90. 8. 10 등 4일은 서울, 수도권의 세 측후소 모두에서 강우가 측정되어 강우가 국지적이지 않음이 거의 확실함에도 고농도가 기록되었고, 특히 96. 7. 20과 96. 7. 27은 모든 기록이 맞는다면 비가 온 직후나 불과 몇 시간 뒤 오존 농도

Table 1. Precipitation in the Greater Seoul Area between 1990 and 1997 before 1-h average ozone daily maximum rose above 100 ppb.

Exceedance Day (yyymmdd)	Precipitation (mm) (hour or duration)			Daily maximum ozone (ppb) (Station, hour)
	Seoul	Inchon	Suwon	
900809	20.7(05~06)			106(Myonmok, 16)
900810 ^a	6.6(04~09)	6.7(06~07)	45.0(01~08)	124(Myonmok, 15)
910601		0.1(09)	3.3(08~10)	107(Kuui, 15)
910623 ^a	5.1(15)			106(Nae, 15) 109(Hannam, 16)
920904			0.4(02)	130(Kwanghwamun, 11)
930618 ^a	15.8(01~04)	13.0(01~03)	1.8(03)	108(Songsu, 15)
930728	0.1(01)		0.1(01)	108(Cholsan, 15)
930812			1.0(16)	102(Uijongbu, 17)
930819	4.8(04~05)		0.5(04~06)	105(Sinsol, 14) 106(Kuui, 16)
940829 ^a	6.2(01~03)		54.2(01~04)	113(Songnam, 05) ^b
960720 ^a	15.0(08~14)	3.6(09~10)	3.4(07~14)	104(Pyolyang, 15) ^b
960727 ^a	16.1(11~20)	6.5(13, 15~16)	3.7(04, 06, 15~16)	109(Pyolyang, 21) ^b
970725 ^a	0.2(03) 0.1(13)		35.2(01~02)	101(Kuui, 12) 102(Ssangmun, 12) 106(Songsu, 13) 112(Taechi, 16) 120(Anyang, 16) 102(Hogye, 17)

^a See Table 2 for other meteorological conditions on these days

^b Probably anomalies. See Fig. 2

가 100 ppb 이상 상승하였을 가능성이 크다.

표 2는 세 측후소 모두에서 강우가 측정된 4일과, 1, 2개 측후소라도 오존 농도가 상승하기 직전이나 수시간 전에 강우가 측정된 3일에 대하여 세 측후소에서 관측된 기상 특성을 조사한 것이다. 90. 8. 10은 수원 측후소에서 45 mm에 달하는 많은 비가 왔으나 서울과 인천의 강우량은 많지 않았고 뿐만 아니라 아침에 비가 그친 후 당일의 오존 농도 상승에 직접적인 아침 평균 풍속이 1 m/s에도 못 미치는 정체 상태에서 30°C 이상 혹은 가까이 기온이 올랐으므로 서울 기상청에 비교적 가까운 먼목 측정소에서 100 ppb를 초과하는 고농도는 충분히 가능할 수 있다. 또한 93. 6. 18은 강우가 한밤중이었고 오존 농도가 100 ppb를 넘어 상승할 때까지 평균 운량이 5~7로 절반을 약간 상회하는 정도였기 때문에, 기온은 30°C를 밀돌지만 아침 풍속이 미국 EPA에서 정체 조건으로 구분하는 1.5 m/s 이하인 상황에서 (USEPA, 1991) 성수의 108 ppb 정도 고농

도는 기대할 수 있다. 97. 7. 25도 비록 13시에 미량의 강우가 있었으나 수원의 많은 비는 한밤중이었고 전체적으로 운량 4~6, 기온 32~33°C. 아침 풍속 0.4~1.0 m/s의 이상적 조건에서 서울, 수도권 내 6개 측정소에서 100 ppb 이상 고농도가 기록된 것으로 해석할 수 있다.

그러나 96. 7. 20과 96. 7. 27은 특히 서울에서 오후 2시까지 15 mm와 16 mm라는 적지 않은 비가 상당 시간 계속되는 상황에서 100 ppb 이상 고농도는 아무래도 의심스럽다. 이에 따라 그림 2의 (a)와 (b)에서는 당일 고농도가 기록되었던 별양의 전, 후일을 포함하는 3일간의 일변화를 서울, 수도권 지역 여타 측정소의 일변화와 함께 살펴보았다. 그림 2(a) 별양의 이틀째 변화는 너무 빈번하여 시간적으로나 공간적으로나 다른 변화가 뒷받침되지 않는 상태에서 100 ppb를 초과하고 있고, 그림 2(b)의 이틀째 오후 9시의 급격한 농도 상승은 측정 중단 후 재개되는 과정에서 나타난 이상 변화로 추정된다. 사

Table 2. Meteorological conditions at three stations in the Greater Seoul Area where there was precipitation before ozone daily maximum rose above 100 ppb.

Exceedance Day (yyymmdd)	Meteorological station	Average cloud cover	Daily maximum temperature (°C)	Morning wind speed (m/s) ^a	Morning wind direction ^b
(a) Precipitation at all three stations before daily maximum ozone rose 100 ppb					
900810	Seoul	9	31.1	0.6	NE
	Inchon	7	29.4	0.9	SSE
	Suwon	8	30.9	0.6	ENE
930618	Seoul	6	27.6	1.4	NNE
	Inchon	5	24.9	1.0	NW
	Suwon	7	27.7	1.3	S
960720 ^a	Seoul	10	25.6	1.4	ENE
	Inchon	9	25.6	3.0	SSW
	Suwon	10	28.2	1.5	SE
960727 ^a	Seoul	10	26.3	1.6	SSW
	Inchon	10	29.4	4.7	SSW
	Suwon	9	30.8	0.8	ESE
(b) Precipitation at one or two stations a few hours before daily maximum ozone rose 100 ppb					
910623	Seoul	4	29.8	1.8	ENE
	Inchon	2	26.6	2.3	NNW
	Suwon	1	29.3	0.6	SE
940829 ^a	Seoul	10	26.4	1.5	SSW
	Inchon	10	27.2	3.1	SSE
	Suwon	10	28.1	1.5	SSE
970725	Seoul	5	32.8	0.5	NE
	Inchon	6	32.0	0.4	SSW
	Suwon	4	32.3	1.0	ESE

^a Probably false exceedances by anomalies. See Fig. 2.

^b From resultant wind velocities between 7 and 10 am.

실 그림 2(a)와 (b)의 이틀째 변화는 김영성(1999)이 오존 측정망 자료의 신뢰성을 검증하는 과정에서 이상 여부를 의심할 수 있는 유형으로써 분류하였던 것들이다. 그 중 그림 2(a)와 같은 하루 중 빈번한 변화를 이상 여부를 판단하기 가장 어려운 것으로 구분하였으나, 덥고 습한 날 분석기 인입선에 수분이 응축되면 나타날 수 있는 비정상적인 변동이란 지적도 있어(Maddy, 1998) 이상치일 가능성이 높다.

그림 2(c)는 서울 기상청에서 15시에 5.1 mm의 비가 오는 중에 부천 대동과 1시간 후 한남에서 100 ppb 이상 고농도가 기록된 91. 6. 23을 포함한 전, 후 3일간의 농도 변화이다. 앞의 (a), (b)와는 달

리 두 지점의 변화는 매우 정상적일 뿐 아니라 이틀째 15시 부근에서 어떠한 강우의 징후도 발견할 수 없다. 이와 같은 경향은 심지어 기상청과 인접한 광화문 측정소의 변화도 크게 다르지 않은데, 91. 6. 23 서울 기상청의 강우는 매우 국지적이었을 수 있다. 그림 2(d)는 한밤에 서울과 수원에서 비가 온 후 성남에서 고농도가 기록된 94. 8. 29을 포함한 전, 후 3일간의 농도 변화인데, 새벽 5시의 농도 상승은 이상치임을 한 눈에 알아볼 수 있다.

3.2 운량

그림 3은 측후소와 대기질 측정소의 거리가 가장 가까운 광화문과 서울 기상청에서 측정된 최고 농

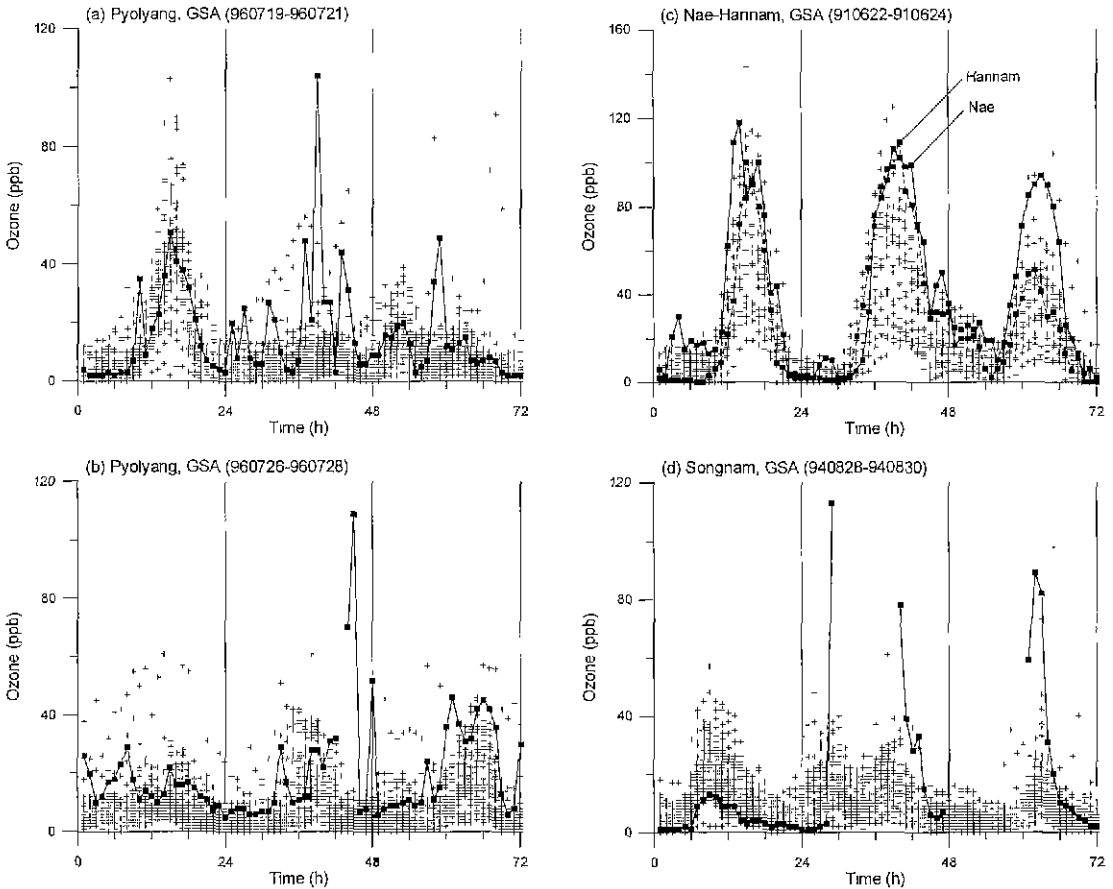


Fig. 2. Three-day diurnal variations of ozone at stations where daily maximum ozone rose above 100 ppb on the second day in spite of precipitation in the Greater Seoul Area. Crosshairs in the background indicate measurements from the other stations in GSA.

도 시간까지의 평균 운량과 이에 따른 일 최고 농도와 100 ppb 초과 일수 분포이다. 먼저 운량별 일 최고 농도를 보면 평균 운량 4까지 점차 높아지다가 5부터는 120~130 ppb 이하로 그리 높지 않다. 유사한 경향을 초과 일수 분포에서도 볼 수 있는데, 운량이 0일 때보다 1~3일 때 고농도일이 많고 4 이후는 다소 변화가 있으나 점차 줄고 있다. 운량 4는 초과 일수가 4일로 많지 않으나 일 최고 농도는 138, 197, 201, 322 ppb로 높은 농도가 많아 특이하다.

보통은 운량이 작을수록 일사가 많아 자외선이 풍부해지므로 광화학 반응에 유리하다고 생각할 수 있으나 그림 3에서는 운량이 3, 4일 때 각기 초과 일수가 가장 많거나 최고 농도가 높아 의외이다. 그러나 운량별 초과 일수는 일정 운량의 일수가 절대적으로 많을 경우 실제로는 고농도 발생에 불리하

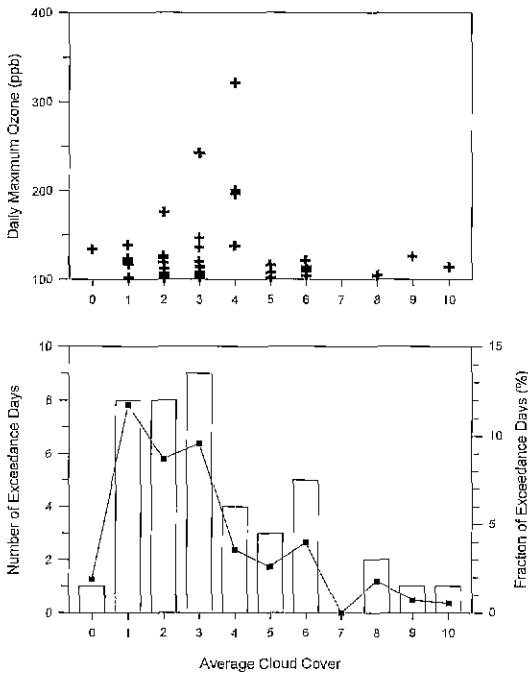


Fig. 3. Distributions of daily maximum ozone above 100 ppb and number of days exceeding 100 ppb as a function of average cloud cover measured at the Kwanghwamun station and the Seoul Meteorological Administration between 1990 and 1997. Fraction of exceedance days represented by a solid rectangle along the line is defined by (number of exceedance days)/(total number of days) at a cloud cover.

여 확률이 낮아도 다른 운량에 비하여 초과 일수가 많아질 수 있으므로 그림 3에서는 운량별로 전체 일수에 대한 초과 일수의 분율을 함께 조사하였다. 초과 일수 분율 역시 운량 1~3일 때 높은 등 초과 일수 분포와 거의 유사하다. 운량 1~3 중에서도 운량 1의 분율이 차이는 크지 않으나 가장 높고, 운량 0의 분율은 역시 많이 낮아 완벽하게 맑은 날은 100 ppb 이상 고농도 발생 가능성이 낮음을 보여주고 있다.

운량이 많을 때 고농도가 발생하기 어려움은 쉽게 이해할 수 있으나 운량이 0일 때 고농도 발생 확률이 낮아지는 것은 아무래도 일사 외에 운량 0의 기상 조건이 광화학 반응에 불리할 가능성이 높다. 따라서 그림 4에서는 일 평균 운량별로 일 최고 기온과 아침 풍속, 당일의 일사량, 강우량들을 살펴 보았다. 운량별 일 최고 기온은 변화가 심하여 일률적으로 말하기 어려우나 운량이 0일 때가 운량이 1~4로 다소 구름이 있을 때보다 일 최고 기온이 낮은 쪽에 위치해 있음을 볼 수 있다. 또한 운량이 7 이상에서는 최고 기온의 저하 현상이 분명하다. 아침 풍속은 어느 운량 조건에서나 하위 분율 풍속은 크게 다르지 않으나 운량이 6 이상에서는 상위 분율 풍속의 증가가 뚜렷하다. 즉, 구름이 적을 때 아침 풍속은 대체로 그리 높지 않고, 구름이 많을 때는 낮을 수도 있으나 운량이 증가할수록 높은 풍속이 나타날 수 있다. 운량이 0~2일 때는 일사량 차이가 크지 않으며 6 이상에서는 운량에 따른 일사량 감소가 명확하다. 강우량은 운량 6~7 이후 급격히 많아진다.

광화학 반응 관점에서 본 그림 4의 운량 0의 조건은 운량 1~2에 비하여 일사량이 비례하여 많지 않은 반면 일 최고 기온은(상위 5%값과 중간값은 운량 8일 때보다, 하위 5%값은 운량 6일 때보다 낮은 등) 구름이 절반 이상 많을 때보다도 전체적으로 낮은 범위에 위치하여 불리하다. 표 3은 상위 5%의 일 최고 기온이 35.5°C로 가장 높은 운량 1일 때 100 ppb 초과 고농도일의 일 최고 기온과 아침 풍속이다. 최고 농도 시간이 오후 3시부터 6시까지로 모두 전형적 시간대에 위치하고 있으나 일 최고 기온은 92.7, 6 32.4°C로 30°C를 넘었을 뿐 그리 높지 않다. 오히려 1 m/s를 겨우 넘거나 이에 못 미치는 아침 풍속이 인상적이다 표 3이 암시하는 한 고온

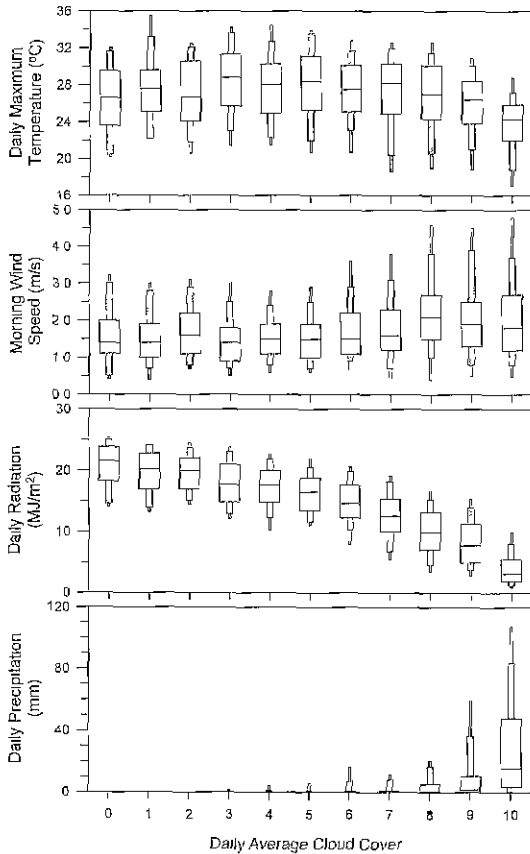


Fig. 4. Boxplots of daily maximum temperature, morning average wind speed between 7 and 10 a.m., daily total radiation, and daily total precipitation in terms of daily average cloud cover. Each box represents the 5th, 10th, 25th, 50th (median), 75th, 90th, 95th percentiles of the data.

이 직접적으로 오존 고농도와 연관되지는 않고 있으며, 표 3에는 표시하지 않았으나 다른 운량의 경우도 크게 다르지 않다. 결국 그림 4와 표 3은 기온이 중요한 인자이기는 하나 기상과 배출의 여러 인자가 복합적으로 작용하는 광화학 반응계에서 개개의 사례를 통하여 확인될 만큼 절대적이지는 않음을 보여주고 있다. 그럼에도 운량이 0일 때 일 최고 기온이, 구름이 조금 있을 때보다 낮아 오존 농도 상승이 제한될 수 있다는 해석은 많은 경우에 대한 보편적 관점에서 설득력이 있다.

운량이 0일 때 100 ppb 초과 고농도일이 구름이 어느 정도 있을 때보다 월등 적다는 사실 못지 않

Table 3. Daily maximum temperature and morning average wind speed measured at the Seoul Meteorological Station on exceedance days of Kwanghwamun station with average cloud cover of 1.

Exceedance day (yymmdd)	Peak hour	Daily maximum temperature (°C)	Morning wind speed (m/s) ^a
920505	17	27.3	1.1
920601	15	29.2	1.1
920706	15	32.4	1.2
920917	16	24.2	0.9
920930	17	22.2	1.3
930830	15	29.5	1.0
930905	17	28.9	0.9
930921	18	28.0	1.1

^a From resultant wind velocities between 7 and 10 am

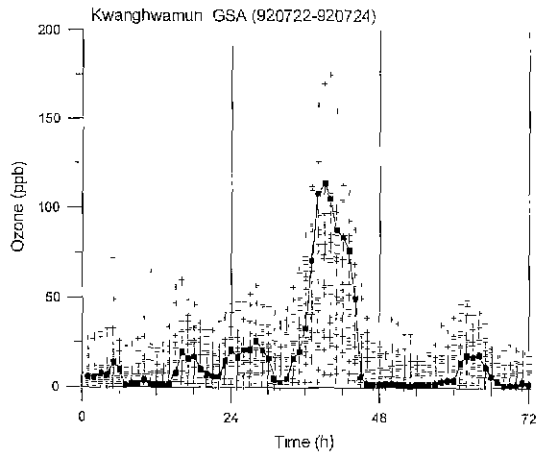


Fig. 5. Three-day diurnal variations of ozone at the Kwanghwamun station where daily maximum ozone rose above 100 ppb on the second day in spite of full cloud cover. Crosshairs in the background indicate measurements from the other stations in GSA.

게 운량이 8 이상이어서 일사가 절반 가까이 줄어드는 등 불리한 조건임에도 고농도가 기록되었다는 사실 역시 주목할 만하다. 이에 따라 표 4에서는 운량이 8 이상일 때 100 ppb를 초과하여 농도가 상승한 4일의 기상 특성과 함께 수도권 지역 다른 두 측정소의 평균 운량을 조사하였다. 먼저 평균 운량을 보면 97.7.28 인천이 6.0으로 다소 작을 뿐 서울 뿐 아니라 다른 지역의 운량도 8 이상으로 많아 비교적 광범위한 지역에 구름이 덮인 상황에서 오존 농도가 상승하였음을 보여주고 있다

Table 4. Meteorological conditions at the Seoul Meteorological Station, together with average cloud cover at other two meteorological stations in the Greater Seoul Area, on days when average cloud cover was 8 to full (10) before daily-maximum ozone concentration rose above 100 ppb at the Kwanghwamun station.

Average cloud cover			Exceedance day (yyymmdd)	Daily maximum temperature (°C)	Mean wind speed (m/s) ^a	Mean wind direction ^a
Seoul	Incheon	Suwon				
8	9	8	920918	26.3	0.5	NE
8	6	8	970728	34.1	1.1	NE
9	9	8	920908	25.9	0.2	NW
10	9	8	920723	30.3	2.5	SW

^a From resultant wind velocities between 7 and 10 am

다른 기상 변수를 살펴보면, 최고 기온이 30°C를 넘거나 최고 기온이 25~26°C의 그리 높지 않은 이들은 아침 풍속이 1 m/s를 훨씬 밑돌만큼 낮다. 아침 풍향은 오존 시즌에 전형적인 북동풍이 많으나(김영성과 오현선, 1999) 대체로 풍속이 낮아 큰 의미는 없다. 그림 5는 서울 기상청에서 운량이 10일 때 100 ppb를 초과한 92. 7. 23을 포함하여 22일부터 24일까지 사흘간 일변화를 서울, 수도권 지역 여타 측정소의 측정 결과와 함께 살펴본 것이다. 아침 풍속이 비교적 빨랐음에도 기온이 충분히 높아 광화학 측정소의 오존 농도는 여타 측정소의 측정치와 함께 상승하고 있다.

4. 결 론

1990년부터 1997년까지 8년간 5월부터 9월까지 오존 시즌을 대상으로 오존의 일 최고 농도가 100 ppb를 초과하였을 때 최고 농도 시간까지의 강우 여부와 오전 3시부터의 평균 운량을 조사하였다.

오존 농도 상승까지 강우가 있었던 날은 모두 13일이었으나 대부분 새벽이었고 강우량도 적었다. 새벽에 적지 않은 비가 내렸더라도 아침 풍속이 1 m/s 정도로 낮거나 기온이 30°C 이상 상승하는 등 광화학 반응에 이상적 상황이 조성되면 100 ppb를 초과하는 고농도를 관찰할 수 있었다. 낮에 비가 오는 가운데 혹은 비가 온 후 오존 농도가 상승하는 경우가 이들 있었으나 강우량이 아주 적거나 매우 극저적일 뿐, 구름의 영향도 크지 않아 측정소 오존 농도에 영향을 줄 정도는 아니었다. 13일 중 94. 8. 29 오전 5시 성남의 113 ppb 등 3건은 이상치로 판단되었으며 따라서 서울, 수도권 지역의 3 측후소에

서 강우가 기록된 가운데 오존이 100 ppb를 초과한 날 수는 총 10일이었다.

서울 기상청과 광화학 측정소를 연관지어 조사한 구름의 영향은, 하늘에 구름이 전혀 없는 쾌청한 날보다 운량 1~4 등 다소 구름이 있을 때 100 ppb 초과일이 많았다. 100 ppb 초과 고농도가 반드시 30°C 이상 고온에서만 발생하는 것은 아니므로 절대적 이유로 보기는 어려우나 평균적으로 살펴본 운량 0의 기상 특성은, 구름이 다소 있는 날에 비하여 일사량이 비례하여 증가하지 않은 반면 일 최고 기온은 대체로 낮아 광화학 반응에 불리하였다. 뿐만 아니라 92. 7. 23 등 4일은 서울 기상청 뿐 아니라 인천, 수원 측후소의 운량도 대부분 8보다 많아 구름이 서울, 수도권을 덮고 있었으나 기온이 30°C 이상 높거나 아침 풍속이 1 m/s보다 훨씬 낮아 오존 농도가 상승하였다.

결국 강우 후 광화학 반응에 유리한 조건이 조성되지 않는 한 강우의 영향이 직접적인 상황에서 오존 농도가 100 ppb 이상 상승하는 명확한 사례는 관찰되지 않았다. 그러나 운량 0인 상황이 평균적으로 기온이 낮아 오존 농도 상승에 불리한 반면, 운량이 8 이상 많아도 기온이 높거나 대기가 정체되는 등 광화학 반응에 유리한 조건이 조성되면 오존 농도가 상승하는 등 구름의 영향은 다른 기상 인자의 영향과 함께 제한적이었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 김영성 (1996) 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회지, 12, 55-66.
- 김영성 (1997) 1990~1995 서울·수도권 지역의 광화학 오염현상, 한국대기보전학회지, 13, 41-49
- 김영성 (1999) 오존 자동측정망 자료 중의 이상치 점검, 한국대기환경학회지, 15, 139-150.
- 김영성, 오현선 (1999) 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15, 267-280.
- Liu, X., G. Mauersberger, and D. Moeller (1997) The effects of cloud processes on the tropospheric photochemistry: an improvement of the EURAD model with a coupled gaseous and aqueous chemical mechanism, *Atmospheric Environment*, 31, 3119-3135.
- Maddy J.A. (1998) A test that identifies ozone monitors prone to anomalous behavior while sampling hot and humid ambient air. *A & WMA's 91st Annual Meeting & Exhibiton*, June 14-18, San Diego, CA, U.S.A., Paper No. 98-MPB 02P.
- Matthijsen, J., P.J.H. Builtjes, E.W. Meijer, and G. Boerssen (1997) Modelling cloud effects on ozone on a regional scale a case study, *Atmospheric Environment*, 31, 3227-3238.
- NRC (National Research Council) (1991) *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*, National Academy Press, Washington, D.C
- Nicholls. M.E., R.A. Pelke, I.L. Eastman, C.A. Finley, W.A. Lyons, C.J. Tremback, R.L. Walko, and W.R. Cotton (1995) Applications of the RAMS numerical model to dispersion over urban areas, in *Wind Climate in Cities*. Edited by J.E. Carmak, A.G. Davenport, E.J. Plate and D.X. Viegas, Kluwer Academic Publ. Dordrecht, Netherlands. pp 703-732.
- Oltmans, S.J. and H. Levy II (1994) Surface ozone measurements from a global network. *Atmospheric Environment*, 28, 9-24.
- Singh. H.B., W. Veeze, W.B. Johnson, and F.L. Ludwig (1980) The impact of stratospheric ozone on tropospheric air quality, *J. Air Pollution Control Assoc.*, 30, 1009-1017
- U.S. Environmental Protection Agency (1991) *Guideline for Regulatory Application of the Urban Airshed Model*, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC
- Walcek. C.J., H.-H. Yuan and W.R. Stockwell (1997) The influence of aqueous-phase chemical reactions on ozone formation in polluted and nonpolluted clouds, *Atmospheric Environment*, 31, 1221-1237.