

제주지역 지표 오존 농도의 시·공간적 분포 특성

이 기 호 · 김 대 준 · 허 철 구
제주대학교 해양과학부 토목환경공학전공
(2004년 3월 25일 접수; 2004년 4월 23일 채택)

The Characteristics of Temporal and Spatial Distribution of Surface Ozone Concentration in Jeju Island

Ki-Ho Lee, Dae-Joon Kim and Chul-Goo Hu

Department of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
(Manuscript received 25 March, 2004; accepted 23 April, 2004)

This study has been performed to clarify the characteristics of temporal and spatial distribution of surface ozone concentration over Jeju Island, one of the cleanest areas in Korea with low emissions of air pollutants.

Ozone data are monitored at four sites in Jeju Island. These monitoring sites are located at two urban area(referred to Ido and Donghong), coastal area(Gosan site) and forest site(Chuna site). Ozone data has been routinely collected at these sites for the late four years.

The patterns of seasonal cycle of ozone concentrations at all stations show the bimodal with the peaks on spring and autumn and a significant summer minimum. However, the patterns of diurnal variations at rural station, i.e., Gosan and Chuna sites are considerably different to those at urban stations such as Ido and Donghong sites. The patterns of ΔO_3 variations are very similar with those of monthly mean ozone concentrations and ΔO_3 values are exceeded 30 ppb, at urban stations. This may be that urban stations are more influenced by local photochemical reactions rather than rural stations.

In order to assess the potential roles of meteorological parameters on ozone formation, the meteorological parameters, such as radiation, temperature, and wind are monitored together with ozone concentrations at all stations. The relationships of meteorological parameters to the corresponding ozone concentration are found to be insignificant in Jeju Island. However, at Gosan and Donghong stations, when the sea breeze blew toward the station, the ozone concentration is considerably increased.

Key Words : Surface ozone, Temporal distribution, Spatial distribution, ΔO_3 value, Meteorological parameters, Jeju Island

1. 서 론

우리나라에서 이루어진 지표 오존의 변동 특성에 관한 연구는 대부분이 대도시 지역 또는 그 인접 지역에서 관측된 자료를 이용하여 오존 농도에 영향을 주는 요인들을 밝히려고 시도해 왔으며¹⁻³⁾, 우리나라의 주요 대도시 지역의 지표 오존 농도는 매년

지속적으로 증가하고 있고, 특히 오존의 평균농도 상승보다는 고농도 발생일의 증가가 뚜렷하다. 또한, 오존 농도의 시공간적 변화는 일정하지 않고 지역적 환경이나 배출원의 농도 수준, 기후, 지질학적 위치에 따라 상당한 차이를 보이는 것으로 보고되고 있다⁴⁾. 이러한 연구 사례들을 종합해 보면, 대도시에서의 오존 농도 변동이 도시 지역 내에서의 생성과 소멸에만 기인하는 것이 아니라 대기 운동과 관련된 수평 및 수직 수송에 의한 영향도 중요한 요소로 작용하고 있음을 알 수 있다. 따라서 특정 지역의 오존의 시공간적 분포 특성 및 그 변동원인을

Corresponding Author : Chul-Goo Hu, Department of Civil and Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone : +82-64-754-3443
E-mail : huchulgo@cheju.ac.kr

파악하기 위해서는 인위적 요인의 기여가 최소화 된 청정한 대기 상태를 보이는 배경농도 특성에 관한 연구가 필요함을 알 수 있다⁵⁻⁷⁾.

우리나라에서 청정한 대기 상태를 지닌 대표적인 지역 중의 하나로 알려진 제주도 지역의 지표 오존 연평균 농도는 31.1~44.0 ppb 수준으로서 이는 제주도 서부지역의 해안가에서 운영되고 있는 국가 배경농도 측정망인 고산리에서 측정된 것으로 대도시 지역인 서울, 부산, 대전, 울산 등의 지역에 비해 훨씬 높은 오존농도 수준이다. 그런데 제주도는 남북으로 제주시와 서귀포시가 위치하고 이들 도시를 중심으로 동서로는 대부분 농경지역으로 이루어져 있을 뿐 아니라 해발 1,950 m의 한라산을 중심으로 중산간 지역에는 전반적으로 산림이 잘 발달된 지역적 특성을 갖고 있기 때문에 고산리 측정 자료가 제주 지역의 대기질을 대표한다고 보긴 어렵다. 특히 오존은 2차 광화학 오염물질로서 농도의 변화는 주로 NOx 및 HC와 같은 1차 오염물질의 농도와 일사량, 기온, 풍속, 대기안정도 등의 기상인자에 영향을 받는 것으로 알려져 있을 뿐 아니라³⁾ 지리적 위치 및 해발고도에 따라 농도변화가 심하기 때문에^{5,6)} 고산리의 자료만을 가지고 설명하기에는 한계가 있다.

최근에 한라산 남쪽에 위치한 서귀포시 도심 주거지역에 대기질 관측소가 새로이 구축되어 운영됨에 따라 제주도에는 해안변의 고산리 지역과 제주시와 서귀포시의 도심 지역에 각각 1개소의 측정소가 가동됨에 따라 제주지역의 대기질을 보다 구체적으로 파악할 수가 있게 되었다. 그리고 제주 지역에서 비교적 높은 고지대에 삼림지역이 많이 분포함에 이러한 지리적 여건을 반영하기 위해 해발 700m 삼림지역내에 별도로 대기질 관측소를 설치 운영하기에 이르렀다.

이 연구에서는 제주도 전역을 대상으로 지표 오존 농도의 분포 및 변동 특성을 보다 구체적으로 해석하여 청정한 제주지역의 대기 중 오존의 거동을 파악하여 배경 농도 특성을 밝히고자 하였다. 이를 위해 제주에서 도시지역이라 할 수 있는 이도동과 동홍동, 해안지역인 고산리, 삼림지역인 천아오름의 4개 측정소로부터 지표 오존 농도 관측 자료를 수집하여 지표 오존 농도의 지역별 분포 특성 및 시간적인 변동 특성을 분석하였다.

2. 자료 분석 및 연구 방법

2.1. 연구대상 기간 및 지점

제주지역은 생활환경의 관리 차원에서 제주시와 서귀포시내에 상시 대기질 자동 측정망을 설치하여 운영하고 있으며, 국가의 배경 농도를 관측할 목적으로 제주도 고산리의 해안변에서 대기질 측정이 이

루어지고 있는 실정이다. 현재 이도동과 동홍동의 2개 지점은 제주도에서 운영하고 있다. 또한 본 연구를 수행하기 위하여 천아오름에 대기질 자동 측정소를 새로이 구축하였다.

Fig. 1은 제주도 내에 설치되어 운영 되고 있는 대기질 자동측정소의 위치를 나타내고 있다. 이도동 측정소(Ido)는 제주시 상업지역에 위치하고 있으며, 측정소 주변으로 자동차와 사람의 왕래가 가장 많은 곳이다. 동홍동 측정소(Donghong)는 서귀포시 주거지역에 위치하고 있다. 이 두 측정소는 모두 제주지역의 도시 지역에 대한 대기질을 파악하고 평가할 수 있는 지점이라 할 수 있다. 고산리 측정소(Gosan)는 제주도 서부 지역의 끝단인 고산리 수월봉의 해안가 절벽 위에 위치하고 있으면서 측정소의 서쪽 방향으로는 바다가 임해있고, 동쪽으로는 농경지가 위치하는 전형적인 해안가의 전원지역이라고 할 수 있다. 천아오름 측정소(Chuna)는 제주시 서측 경계부의 천아오름 기슭에 위치하고 있으며 해발고도 700 m인 삼림으로 둘러싸여 계곡으로 이루어진 인적이 거의 없는 곳이다.

제주지역의 대기질 변동특성을 파악하기 위해 제주시 이도동과 고산리에서의 최근 4년간 (2000년 1월부터 2003년 11월) 측정자료를 대상으로 분석하였

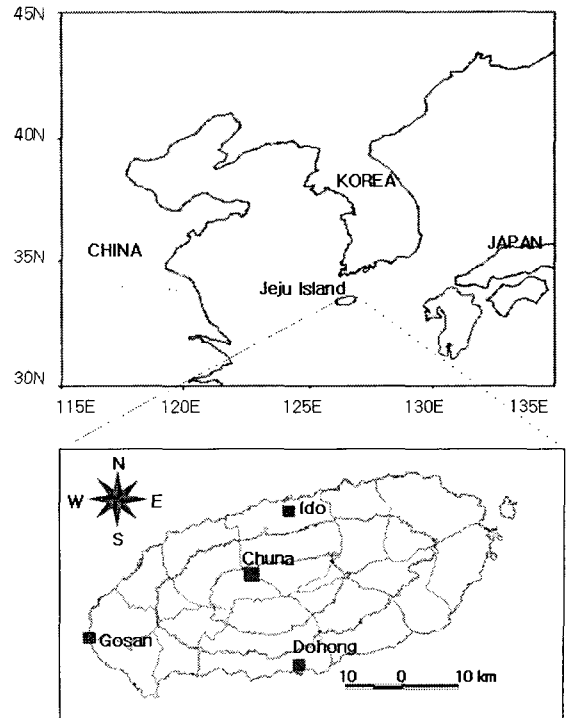


Fig. 1. The location of air quality monitoring station in Jeju Island.

다. 그리고 동홍동 측정소는 2002년 3월부터, 천아오름 측정소는 2003년 1월부터 측정이 시작되었다.

2.2. 자료수집

2.2.1. 오존 농도 자료

본 연구에서 수집하여 사용한 농도 자료는 1시간 평균 농도자료이며, 측정기간 동안의 유효자료 처리 비율은 원칙적으로 75% 이상인 경우를 대상으로 하였는데, 즉 유효 측정 일은 하루 18시간 이상 측정된 경우이며 유효 측정일은 월 중 측정시간이 540시간(31일인 경우 558시간, 28일인 경우 504시간)이상인 경우를 선정하였다.

2.2.2. 기상 자료

자료해석에 사용된 기상자료는 일사량, 기온, 강우량, 풍향, 풍속으로 이도동, 동홍동, 고산리의 경우에는 제주지방 기상청에서 제공하는 일기상 통계자료의 일평균 자료와 자동기상관측장치(AWS)의 1시간 평균 자료를 사용하였고, 천아오름의 경우는 측정지점에서 별도로 측정되는 AWS의 1시간 평균 자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존 농도의 시공간적 변화 특성

3.1.1. 지역별 오존 농도 수준

Table 1은 각 측정지점에 대한 오존의 1시간 평균 농도와 8시간 평균 농도를 연도별로 정리한 것이다. 오존의 1시간 평균과 8시간 평균 농도의 연평균을 보면 제주도내 각 측정점에서 측정된 두 항목의 연평균 값은 대체로 비슷한 수준임을 알 수 있다. 그러나, 이도동과 동홍동은 2002년 연평균에 비해 2003년에는 약 4 ppb 정도 상승한 것으로 나타난 반면, 고산리의 경우에 12 ppb 정도 하락한 것으로 나타났다. 일반적으로 오존 농도의 변동은 기상의 영향을 크게 받지만 연간 평균 농도와 percentile 농도는 기상 인자의 영향을 어느 정도 배제할 수 있기 때문에 추세 분석 등에 유용하게 사용된다⁸⁾. 고산리에서 측정된 오존 농도는 95, 75, 50, 25 percentile의 값에서도 2002년과 2003년의 사이에 큰 폭으로 하락하여 이도동과 동홍동의 농도 수준보다 낮아졌는데, 이는 2003년 고산리의 오존 농도 수준이 과소평가 되었을 확률이 큰 것으로 판단된다.

2003년의 고산리 측정 자료를 제외한 나머지 전체 자료를 보면, 연평균 농도 뿐 아니라 고농도 수준을 예측할 수 있는 95 percentile 농도 값에서도 2003년에 조금씩 상승하는 것으로 보아 제주 지역에서 고농도 오존 발생이 점차 많아지고 있음을

Table 1. Statistical summary of 1-hr and 8-hr average ozone concentration measured from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island(unit: ppb)

Item	Site	Year	percentile				Max	Min	AVG.	STD.
			95	75	50	25				
1-hr average	Ido	2000	49	36	27	18	86	1	27	13
		2001	52	39	31	21	100	0	31	14
		2002	47	36	29	20	74	0	28	11
		2003	54	41	32	23	81	0	32	14
	Gosan	2000	66	54	45	37	94	2	45	13
		2001	63	49	40	34	91	5	41	13
		2002	65	51	41	27	102	0	41	15
		2003	44	35	30	24	74	0	29	10
	Donghong	2002	59	41	31	19	93	0	31	16
		2003	63	46	35	25	94	0	35	16
	Chuna	2003	59	44	36	26	97	0	35	14
	8-hr average	Ido	2000	47	35	26	20	69	1	28
2001			50	39	31	23	83	3	31	11
2002			44	35	29	23	62	0	29	9
2003			52	40	32	25	72	2	32	12
Gosan		2000	65	54	45	37	89	6	45	13
		2001	62	49	41	34	82	8	41	13
		2002	65	51	42	28	93	7	41	15
		2003	43	35	30	24	70	2	29	9
Donghong		2002	57	41	32	22	83	1	32	14
		2003	61	46	36	27	87	3	36	15
Chuna		2003	58	44	37	28	93	4	36	13

시사해 준다. 8시간 기준의 경우 1시간 기준치 보다 인체에 미치는 유해성을 보다 더 잘 평가 할 수 있는 지표로서 사용되는데⁹⁾ 제주 지역의 경우 1시간 평균과 8시간 평균 농도는 거의 비슷한 값을 보였다.

3.1.2. 오존 농도의 시간적 변화 특성

3.1.2.1. 월변화

Fig. 2에는 2000년 1월에서 2003년 11월까지의 기간동안에 오존 농도의 월변동을 나타냈다. 그림에서 보면 전반적으로 제주지역은 봄철 상승, 여름철 하락, 가을철에 재상승하는 패턴을 보였다. 오염되지 않은 북반구의 외딴 지역(remote site)에서는 오존 농도의 계절별 변화가 봄철 상승, 가을철 하락의 단순 구조를 보이는데 비해^{10,11)} 제주지역에서의 계절

변화는 봄철 상승, 여름철 하락, 가을철 재상승의 bimodal 형태를 보였다. 이러한 계절적 변동은 일본의 지역에서도 보고 된 바 있는데⁵⁾, 아시아 동부지역에서 가을철에 오존 농도가 상승하는 원인은 가을철에 오존이 풍부한 대륙성 기단의 유입에 의한 것이라고 알려지고 있다. 그리고 우리나라의 경우 전 지역이 6월 말에서부터 7월 까지 발생하는 장마가 지속되는 몬순기후에 속하기 때문에 여름철에 오존을 비롯한 대기오염물질의 농도가 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

그리고 해안지역에 위치한 고산리에서 측정된 농도 수준을 보면 2002년 까지는 제주지역 내에서 가장 높은 농도 수준을 보였으나 그 이후에는 농도가 크게 낮아져 타 측정소에 비해 오히려 낮은 농도를 나타냈다. 한라산 삼림지역 내에 위치한 천아오름 측정소에서 오존 농도 변동을 보면, 제주지역 내 타 측정소에서는 봄철에 농도 증가 추세를 보이는데 반해 천아오름의 경우에는 오히려 하강하는 경향을 보이면서 2003년 5월에는 가장 낮은 농도를 보였다. 더욱이 다른 3개 측정소의 오존 농도가 하강하는 6월 중에는 가장 높게 관측되었다. 이는 아직 확실하게 밝혀진 바 없지만 산악 및 삼림지역이 갖고 있는 기상과 지리적인 차이에 의한 것으로 판단되므로 삼림지역에서 배출되는 자연적인 오존 생성 전구물질과 기상인자와의 상세한 분석이 수행되어야 할 것으로 생각한다.

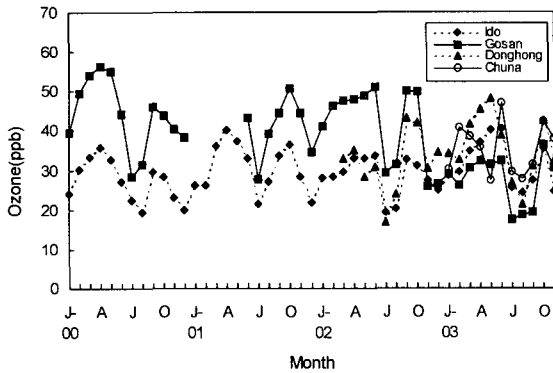


Fig. 2. Monthly variations of 1-hr average ozone concentrations from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island.

3.1.2.2. 일변화

Fig. 3은 계절별 오존 농도의 일변화 패턴을 지역

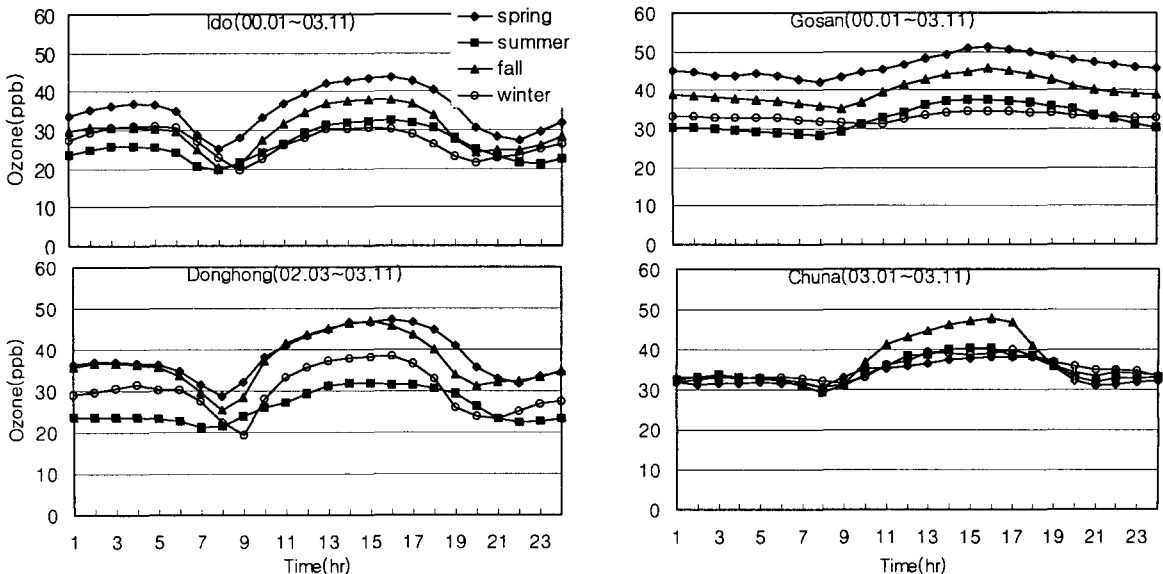


Fig. 3. Diurnal variations of ozone concentrations in Jeju Island.

별로 나타낸 것이다. 이도동과 동홍동 같은 도심지역에서의 일변화 형태는 아침 8시를 전후로 하여 최저 농도를 보인 후에 농도가 증가하여 15시에서 16시 사이에 최고농도를 보이고 21시 전후까지 다시 감소하였다가 새벽녘에 다시 증가하는 양상을 보였고, 최고 농도와 최저 농도 사이에 대략 15에서 20 ppb 정도의 비교적 큰 농도차이를 보였다. 도시지역에서의 이른 아침에 낮은 농도를 보이는 것은 지표 역전이 완전히 해소되지 못한 상태에서 차량 운행이 집중되어 NO 배출량이 증가되므로 인해 대기 중에서 오존 적정 효과로 인해 오존 소멸이 집중적으로 이루어지기 때문이며, 오후의 농도 상승은 활발한 광화학 반응으로 인한 오존 생성 때문으로 해석할 수 있다^{13,14}.

해안지역인 고산리와 삼림지역인 천아오름은 도심 지역과는 달리 오후 시간대에만 농도가 증가하는 경향을 보였고, 일중 최고 농도와 최저 농도 사이의 차이가 10 ppb 내외 수준으로 일변동이 작은 특징을 보였다

또한 이도동의 경우에는 밤 10시부터 아침 9시 이전까지의 야간에는 봄, 가을, 겨울, 여름철의 순으로 농도가 나타났고, 아침 9시부터 22시 사이의 낮 시간 동안에는 봄, 가을, 여름, 겨울철의 순으로 농도가 높게 나타났다. 그렇지만 동홍동에서는 광화학 반응이 활발하게 일어나는 오후 시간대의 농도 수준은 가을철과 봄철이 비슷한 수준으로 나타났다. 천아오름의 경우에 고산과 비교하여 보면 고산리에서는 시간대별 농도 수준이 계절에 따라 차이가 있

는데 반해 천아오름은 가을철을 제외하고 계절에 따른 농도 변화가 거의 나타나지 않았다.

따라서 제주지역에서도 도심지역과 전원지역간에 오존 농도 차이를 보일 뿐 아니라 일변화 형태에 있어서도 차이가 있음을 알 수 있었다.

3.1.2.3. ΔO_3 의 변화 특성

Fig. 4는 월 평균 오존 농도와 ΔO_3 월평균 값을 비교하여 나타낸 것이다. ΔO_3 는 일중 광화학 오존 생성량을 추정하기 위하여 사용되는 지표중 하나로서 일중 최고 농도와 최저농도의 차이를 말한다. ΔO_3 값이 크고 ΔO_3 월평균 값의 변동 패턴이 월평균 농도 변동패턴과 유사한 경향을 보이면 광화학 반응으로 생성된 오존으로 인해 평균 농도가 증가한 것으로 평가할 수 있다. 오 등⁴⁾이 서울 지역 등 우리나라 대도시에서 이 지표를 적용한 결과를 보면 서울의 경우 ΔO_3 값과 월평균 값과의 차이가 최고 30 ppb로 크게 나타나고 있다. 이는 오존월예 광화학 반응을 통한 오존 생성량이 많고 단기간의 고농도 오존 발생 횟수가 많음을 보여주는 것으로 오후에는 활발한 광화학 반응으로 인해 단기간 유지되는 고농도가 자주 발생하지만 야간에는 다량의 NO에 의한 오존 소멸작용이 일어나기 때문에 오존 농도는 거의 0에 가까운 수준으로 상당 시간 지속된다. 따라서 궁극적으로는 평균 농도가 감소하게 된다고 주장했다. 제주지역을 보면, 도심지역인 이도동과 동홍동은 봄과 가을철의 ΔO_3 값이 30 ppb를 웃도는 수치를 보이는 동시에 평균 농도와 유사한

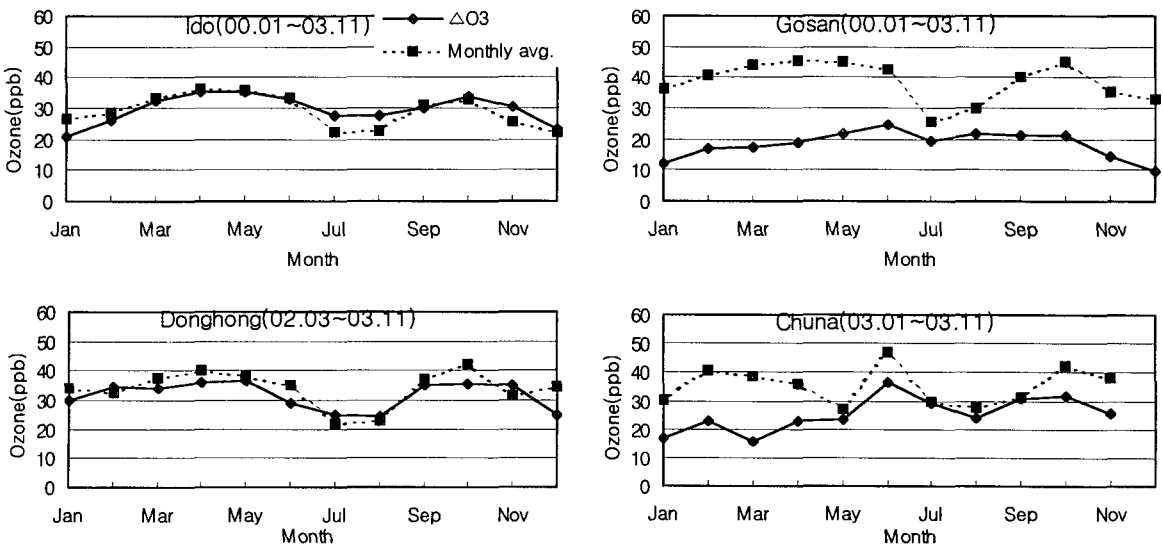


Fig. 4. Monthly variations of 1-hr average ozone concentrations and ΔO_3 from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island.

변동 경향을 보이는데 비해 고산과 천아오름의 전 원지역에서는 ΔO_3 값이 대체로 30 ppb를 넘지 않고 오존 평균 농도와 격차도 많이 벌어짐을 볼 수 있었다. 이는 이도동과 동홍동의 경우는 고산과 천아오름에 비하여 오존 생성 전구물질의 배출에 따른 광화학 반응으로 인한 오후 시간대의 오존농도 상승효과가 상대적으로 크다고 할 수 있다. 그렇지만 고산과 천아오름의 전원지역의 경우는 광화학 반응에 의한 오존 농도 상승 효과는 도시지역에 비해 낮고, 외부로부터의 공기 유입에 의해서 농도 수준이 거의 일정하게 유지되므로써 주야간 변동 폭도 크지 않은 것으로 생각된다.

3.1.3. 오존 농도의 출현 특성

3.1.3.1. 오존 농도의 계급별 출현 빈도

Table 2에는 최근 4년간 제주지역에서 측정된 농도 계급별 오존 출현빈도를 나타냈다. 표에서 보면, 제주지역 대기 중 O_3 농도의 출현 빈도는 20~60 ppb 사이에서 평균 78% 수준을 나타냈다. 제주지역 대기 중 O_3 농도가 20 ppb에서 60 ppb 사이에 가장 빈번하게 출현하는 것은, 우리나라 대도시 지역인 서울지역에서 10 ppb 이하의 오존 출현 빈도가 40~60% 정도인 것과는 큰 차이를 보이지만¹⁵⁾, 동북아시아 대륙 배경농도 수준과 유사한 농도 범위¹⁶⁾이며, 또한 세계 청정지역의 전형적인 농도 수준인 20~80 ppb 범위¹⁷⁾에 포함된다고 볼 수 있다.

그리고 도시지역인 이도동과 동홍동은 전원지역인 고산리와 천아오름에 비해 20 ppb 이하의 낮은 농도 수준의 출현빈도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 반면에 60 ppb 이상 농도에서의 출현빈도를 보면, 전반적으로 도시지역에 비해 전원지역인 고산리

와 천아오름에서 높음을 알 수 있다.

도심지역인 이도동과 동홍동을 서로 비교하면 도시규모가 작은 서귀포시 동홍동에서의 고농도 출현 빈도가 제주시 이도동에 비해 오히려 높음을 알 수 있다. 이로써 보면 제주지역의 고농도 수준의 오존 출현은 국지적 배출의 영향 이외의 요인이 지배하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 농도 계급별 오존 출현빈도를 계절별로 구분하여 나타낸 것으로 50 ppb 이상 농도의 출현 빈도를 보면 전 지역에 걸쳐 봄과 가을에 빈도가 높는데 비해 상대적으로 여름과 겨울철에는 출현 빈도가 떨어짐을 알 수 있다. 그리고 여름철에 이도동과 동홍동에서는 고산리와 천아오름에 비해 10 ppb 이하의 저 농도 출현 빈도가 약 15%로 높게 나타나고 있는데 비해 그 외 계절에서는 제주지역 전 측정소에서의 출현 빈도가 거의 비슷함을 알 수 있다.

60 ppb 이상의 고농도 출현 빈도는 천아오름을 제외하면 봄철과 가을철에 높은 것을 알 수 있다. 천아오름의 경우는 여름철에 60 ppb 이상 고농도가 10% 이상 출현하고 있는 것으로 나타나 삼림지역의 경우에 식물의 생육이 활발한 여름철에 고농도 오존 현상이 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.1.3.2. 오존 고농도일의 출현 특성

Table 3은 고농도일의 발생일수를 연도별 및 계절별로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 8시간 평균 농도가 60 ppb 이상을 기록한 날을 고농도일로 정의하였다. 표에서 고농도일의 발생 빈도를 보면, 고산리의 경우에 전체 측정 일수에 대한 고농도일의 출현빈도가 15.4%로 가장 높았고, 다음으로 동홍동이 12.9%로 높게 나타났다. 고산리의 경우 2000년에

Table 2. The occurrence frequency of 1-hr average ozone concentration from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island

Year	Station	Ratio of missing data(%)	Frequency (%)				
			0~20	20~40	40~60	60~80	≥80
2000	Ido	3.34	28.56	55.19	15.10	1.11	0.05
	Gosan	9.15	4.26	30.41	52.88	12.01	0.44
2001	Ido	2.64	20.98	54.13	23.09	1.65	0.15
	Gosan	31.83	6.38	40.46	45.01	7.77	0.39
2002	Ido	0.35	22.83	61.74	15.02	0.41	0.00
	Donghong	1.46	25.69	45.96	23.52	4.53	0.30
	Gosan	5.23	8.28	35.76	45.70	9.68	0.58
2003	Ido	0.38	17.69	51.94	28.23	2.13	0
	Donghong	0.72	17.17	45.30	30.28	6.46	0.79
	Gosan	19.22	13.73	76.37	9.89	0	0
	Chuna	5.44	15.88	50.12	29.32	4.24	0.44
Total		7.79	16.92	50.70	27.96	4.13	0.29

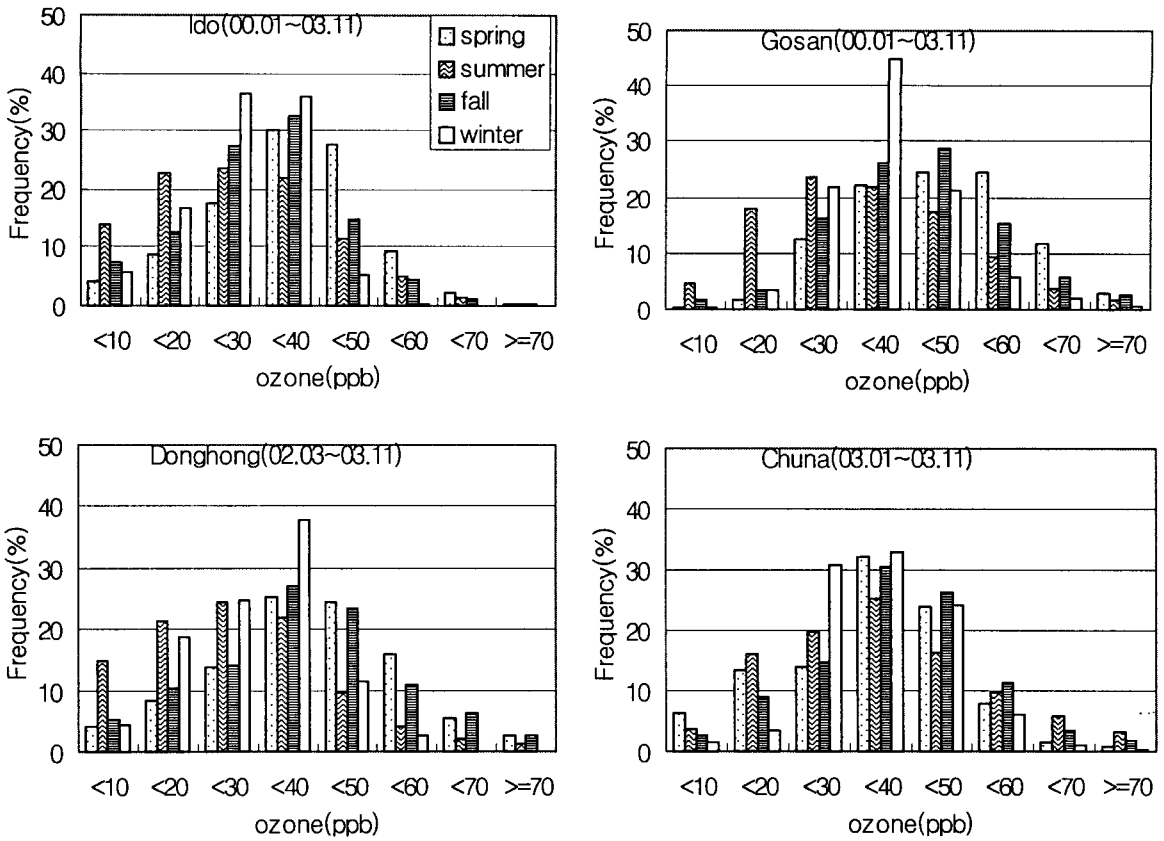


Fig. 5. Frequency distribution of 1-hr average ozone concentration according to each season from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island.

Table 3. Number of days exceeded the 8-hr average ozone concentration of 60 ppb from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island

Site	Year	Total measured day	No. of days exceeded 60 ppb				Total	ratio (%)
			spring	summer	fall	winter		
Ido	2000	351	5	1	0	0	6	1.7
	2001	355	10	2	1	0	13	3.7
	2002	363	1	1	0	0	2	0.6
	2003	331	2	3	5	0	10	3.0
	total	1400	18	7	6	0	31	2.2
Gosan	2000	331	44	10	11	9	74	22.4
	2001	211	0	13	22	0	35	16.6
	2002	343	25	11	22	7	65	19.0
	2003	267	0	0	3	0	3	1.1
	total	1152	69	34	58	16	177	15.4
Donghong	2002	300	2	6	24	0	32	10.7
	2003	334	29	11	10	0	50	15.0
	total	634	31	17	34	0	82	12.9
Chuna	2003	312	3	13	11	1	28	9.0
	total	312	3	13	11	1	28	9.0

서 2002년 까지는 고농도 발생 일의 빈도가 20%를 넘을 정도로 높게 차지했으나 2003년에는 고농도일이 1.1%로 상당히 낮게 나타났다. 이도동은 고농도일의 출현빈도가 4개 지점 중 가장 낮아 2.2%에 불과했다.

계절적으로 보면, 천아오름을 제외한 전 지역이 봄과 가을철에 고농도일이 가장 많이 발생함을 보였고, 2000년 고산리에서는 봄철 기간동안에 거의 절반이 고농도일이었다. 따라서 제주지역에서는 도시지역이 아닌 전원지역에서도 고농도 오존 발생이 빈번하게 나타남을 알 수 있다.

3.2. 오존 농도에 미치는 국지기상 인자의 영향

대기 중 오존은 다양한 인자에 의하여 생성하고 소멸함으로써 그 농도가 변화한다. 특히 기상인자는 오존의 변동에 매우 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 기상 인자 중에서도 기온과 일사량은 오존의 생성에 매우 중요한 영향을 주는 인자로 확인되면서 이들 인자와 오존과의 관계를 규명하려는 연구가 많이 이루어졌다^{18,19}. 앞에서 언급했듯이 오존 계절 동안에는 오존 생성에 적절한 기상조건으로 말미암아 오존의 생성이 활발하게 일어나기 때문에 오존 계절을 중심으로 국지 기상 인자와의 영향을 파악하는 것이 필수적이다.

3.2.1. 일사량의 영향

일사는 대류권내에서 오존이 생성되기 위한 필수 조건이며, 전 등¹⁸에 의해 오존 농도에 독립적으로 영향을 미칠 수 있는 기상 요소는 일사량뿐이며, 다른 기상요소들은 모두 일사량과 종속적인 관계에 있다고 보고 되었을 만큼 오존 농도와 가장 큰 상관성을 갖는다고 할 수 있다.

Fig. 6은 이도동, 고산리, 천아오름에서 2000~2003년의 오존계절 동안에 일 최고 오존 농도와 일중 1시간 누적 최고 일사량과의 관계를 나타낸 것인데, 그림에서 보듯이 제주지역은 일 최고 오존 농도와 일중 1시간 누적 최고 일사량이 유의한 상관성을 갖지 못한 것으로 나타났다. 이런 결과를 보이는 원인은 일사가 주간 시간대에 오존 농도 변화에 영향을 미치는 인자라는 것은 잘 알려진 사실이지만 제주 지역은 사면이 해양으로 둘러싸여 오존을 비롯한 각종 오염물질의 순간적인 변동이 용이한 지역이기 때문에 일사량 자체만으로서 제주지역에서 발생하는 오존 농도 변화 특성을 분명하게 설명할 수 없음을 의미하는 것이다.

3.2.2. 기온의 영향

Fig. 7은 일 최고 기온과 일 최고 오존 농도와의 상관성을 4년간의 오존계절을 대상으로 이도동, 동

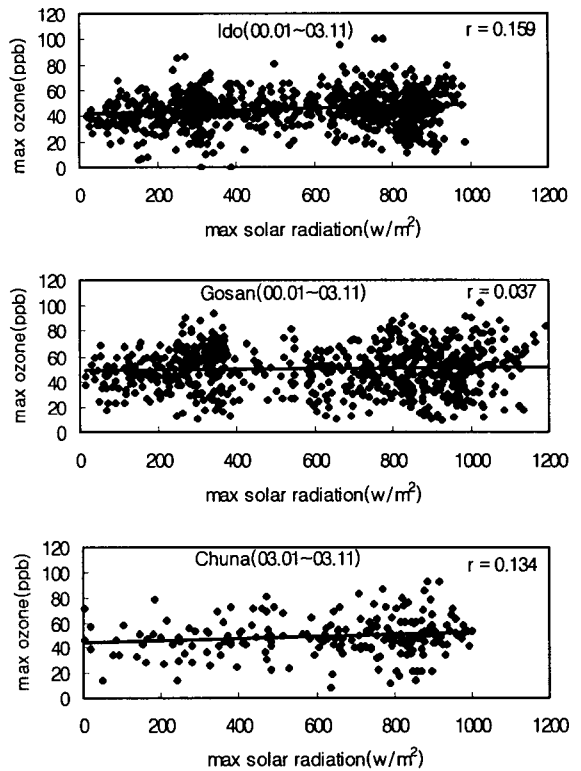


Fig. 6. Daily maximum ozone concentration vs daily maximum solar radiation during ozone season, from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island.

홍동, 고산리, 천아오름을 비교하여 분석한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 제주지역에서는 이들간의 뚜렷한 상관성을 찾을 수가 없었는데, 이는 우리나라 대표적인 대도시인 서울의 상관계수가 0.438²⁰ 수준인 것과는 대조적임을 알 수 있다. 대도시 지역에서 기온과 오존 농도간에 양의 상관성을 보이는 것은 광화학 반응을 통한 국지적인 오존 생성에 있어서 기온의 역할에 의해 상당 부분이 결정된다는 것을 의미한다. 그러나 우리나라의 대표적인 해안 도시인 부산에서 이들간의 상관계수는 0.056²⁰으로 유의한 상관성을 갖지 못하고 있음을 미루어 볼 때, 상관계수만으로 평가하기에는 다소 무리가 있지만, 제주지역도 역시 전체적으로 오존의 생성과 축적에 기온의 영향이외에 외부로부터의 수송에 의한 영향이 나타날 가능성도 크기 때문에 단순히 국지기상 인자만으로 그 상관성을 밝히는데 한계가 있다고 판단된다.

3.2.3. 국지풍의 영향

Fig. 8은 2003년 1월에서 2003년 11월 동안의 이도동, 고산리, 동홍동, 천아오름에서 측정된 1시간 기상자료를 이용한 풍향빈도와 풍향에 따른 오존농도의 농도변화를 나타낸 것이다.

제주지역 지표 오존 농도의 시·공간적 분포 특성

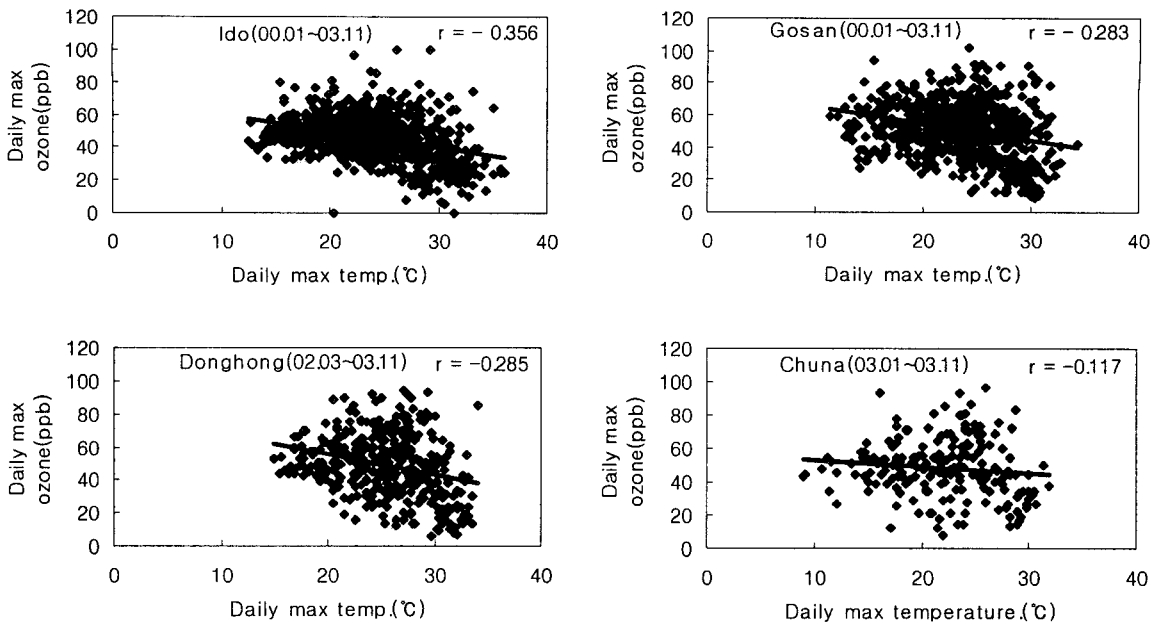


Fig. 7. Daily maximum 1-hr ozone concentration vs daily maximum temperature during the ozone season, from Jan., 2000 to Nov., 2003 in Jeju Island.

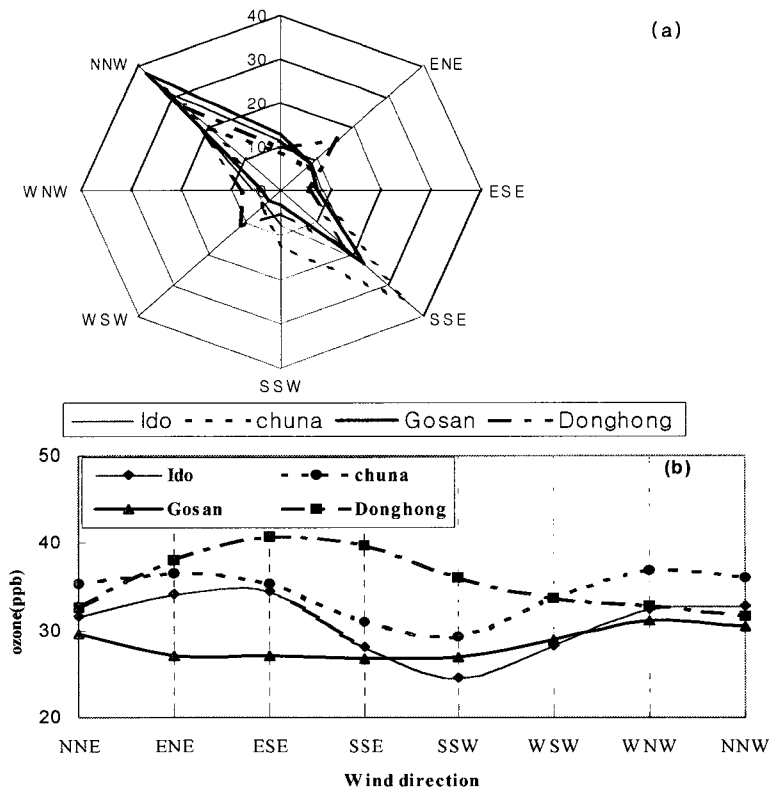


Fig. 8. (a) Frequency of wind direction and (b) yearly average ozone concentrations according to wind direction with 1-hr mean data from Jan., 2003 to Nov., 2003 in Jeju Island.

Fig. 8(a)에서 풍향빈도를 살펴보면, 제주지역은 사계절에 걸쳐 북서풍과 남동풍 계열이 가장 지배적이었고, 동홍동의 경우에는 타 지역에 비하여 북동풍과 남서풍 계열의 빈도도 비교적 높게 나타났다. 위치적으로 보았을 때 고산리와 동홍동은 이도동과 천아오름에 비하여 해안에 보다 인접하여 있는 지역이므로 풍향과 풍속에 따른 오존 농도의 변화를 보이기에 유리 할 것으로 판단된다. 따라서 풍향에 따른 각 측정소별 오존 농도의 변동 특성을 보면, 이도동과 천아오름은 풍향에 따른 오존 농도 변화가 거의 유사한 형태를 보였다. 즉, 남풍 계열의 바람이 불 때 오존 농도가 가장 낮게 나타났고, 북풍 계열이 지배적일 때는 농도가 높게 나타났다. 이는 제주도를 중심으로 보면 북쪽 방향에는 중국과 한반도 대륙이 위치하고, 남쪽으로는 태평양이 위치하여 각각의 계절에 따른 기단의 영향에 의한 농도 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그러나 고산리와 동홍동은 이도동과 천아오름과는 조금은 다른 양상을 보였다. Fig. 8(b)에서 보듯이 고산리에서 오존의 농도는 남동풍(ESE, SSE)이 불 때 보다는 북서풍(WNW, NNW) 계열의 바람이 지배적일 때 상대적으로 높은데 비해, 동홍동의 경우는 남동풍이 우세할 때 오존의 농도가 오히려 높게 나타나는 특성을 보였다.

고산리와 동홍동은 이도동과 천아오름에 비하여 비교적 해안에 인접해 있는 지역으로서 해풍의 영향이 오존 농도 변화에 영향을 미치고 있다고 판단된다. 지리적 위치를 보면 고산리의 경우는 북서 또는 남서풍 계열이 해풍이고, 동홍동은 남동 또는 남서풍 계열이 해풍이므로 고산과 동홍동 모두 해풍이 부는 주간 시간대에 걸쳐 오존 농도가 상승한 것으로 짐작해 볼 수 있다. 일반적으로 해풍이 발생할 때는 기압경도가 완만하여 대기가 안정하고 역전층 고도가 낮으며²¹⁾, 혼합층의 고도가 낮아 대기확산이 어려워지는 경향이 있는 것으로 알려져 있다²²⁾. 우리나라의 대표적인 해안 도시인 부산에서 연구한 결과에 따르면 해풍 발생이 고농도 오존 생성에 큰 영향을 주는 것으로 밝혀진 바 있다²³⁾.

4. 결 론

제주지역에서의 지표 오존 농도의 분포 및 변동 특성을 구체적으로 해석하여 청정한 제주지역의 대기 중 오존 거동을 파악하고자 제주지역 4개 지점(이도동, 고리산, 동홍동, 천아오름)에서 2000년 1월부터 2003년 11월까지 측정된 오존 농도를 분석한 결과를 요약하였다.

제주지역에서의 월평균 오존 농도는 전반적으로 봄철 상승, 여름 철 하락, 가을철 재상승하는 일반적

인 패턴을 보였으며, 일변화 특성에서는 이도동과 동홍동이 전형적인 도시형 오존 변동 패턴을 따르며, 고산리와 천아오름은 청정지역의 농도 변화 경향을 보여 제주지역에서도 도심지역과 전원지역 간에 농도차이를 보이는 것으로 파악되었다. 이도동과 동홍동은 오존계절 동안에 최고 농도와 최저 농도의 차이(ΔO_3)가 30 ppb를 초과하는 동시에 월 평균 농도 변동 패턴과 유사하게 변동하여 고산과 천아오름에 비하여 광화학 반응에 의한 국지적인 오존 생성이 비교적 활발하게 일어나고 있음을 알 수 있었다.

최근 4년 동안에 오존 출현 특성에서 오존 고농도일은 전체 측정 일수에 대하여 고산이 15.4%로 가장 많았고, 동홍동 12.9%, 천아오름 9.0%, 이도동 2.2% 순으로 파악되었으며 계절적으로 봄과 가을철에 고농도일이 가장 많이 출현하였다.

국지 기상이 오존 농도에 미치는 영향을 분석한 결과 제주 지역의 오존 농도는 국지적인 오존 생성에 필수 조건인 기온과 일사량에 의한 상관성은 보이지 않았으나 해풍계열의 바람이 부는 경우 오존 농도가 상승하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 제주대학교 BK21과 제주지역환경기술개발센터의 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 김민영, 강희곤, 이완종, 이상철, 장봉훈, 박성배, 1989, 오존농도의 동태 및 영향인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(2), 55-71.
- 2) 정용승, 정재섭, 1991, 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
- 3) 신찬기, 한진석, 김윤신, 1992, 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 213-220.
- 4) 오인보, 김유근, 2002, 한반도 주요 대도시지역의 지표오존특성: 추세, 일변화, 월변화, 수평분포, 한국대기환경학회지, 18(4), 253-264.
- 5) Sunwoo, Y., G. R. Carmichael and H. Ueda, 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan, Atmos. Environ., 28, 25-37.
- 6) Muller, S. F, 1994, Characterization of ambient ozone levels in the Great Smoky Mountains National Park, J. Appl. Meteorol., 33, 465-472.
- 7) Tateishi, H., J. W. Bottenheim, A. Sirois, K. A. Brice and A. J. Gallant, 1994, Five years of

- continuous observations of PAN and ozone at rural location in eastern Canada, *J. Geophys. Res.*, 99, 5333-5352.
- 8) National Research Council, 1991, Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution, National Academy Press, Washington, D. C.
 - 9) Wolff, G. T., 1996, The scientific basis for a new ozone standard, *Environmental Manager, Sep.*, 27-32.
 - 10) Oltmans, S. J. and H. Levy II, 1994, Surface ozone measurements from a global network, *Atmos. Environ.*, 28, 9-24.
 - 11) Singh, H. B., W. Viezee, W. B. Johnson and F. L. Ludwig, 1980, The impact of stratospheric ozone on tropospheric air quality, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 30, 1009-1017.
 - 12) Ghim, Y. S. and Y. S. Chang, 2000, Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
 - 13) McKendry, I. G., D. G. Steyn, J. Lundgren and R. M. Hoff, 1997, Elevated Ozone Layers and Vertical Down-Mixing Over the Lower Fraser Valley, BC. *Atmos. Environ.*, 31(14), 2135-2146.
 - 14) Lal, S., 2000, Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in india, *Atmos. Environ.*, 34(17), 2713-2724.
 - 15) 윤성철, 박은우, 장영기, 1999, 한계농도 누적 오존지표로 본 1990~1997년의 수도권 오존농도의 변화, *한국대기환경학회지*, 15(4), 429-439.
 - 16) Husar, R. B., 1998, Spatial pattern of 1-hour and 8-hour daily maximum ozone over the OTAG region, A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14-18, San Diego, CA, paper 98-MA2A. 01.
 - 17) Fynlason-pitts, B. J. and J. N. Pitts Jr., 1986, Atmospheric chemistry, Fundamentals and experimental techniques, John Wiley & Sons, New York USA, 140-149pp.
 - 18) 전의찬, 우정현, 1999, 오존 농도에 영향을 미치는 주 기상요소의 도출 및 예측모형 수립, *한국대기환경학회지*, 15(3), 257-266.
 - 19) Vukovich, F. M., 1994, Boundary layer ozone variations in the eastern United states and their association with meteorological variations: Long term variations, *J. Geophys. Res.*, 99, 16839-16850.
 - 20) 김유근, 문윤섭, 오인보, 황미경, 2002, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표 고농도 오존 발생에 미치는 영향, *한국기상학회지*, 38(4), 319-331.
 - 21) Lalas, D. P., D. N. Asimakopoulos, D. G. Deligiorgi and C. G. Helmis, 1983, Sea-breeze circulation and photochemical pollution in Athens, Greece, *Atmos. Environ.*, 17(9), 1621- 1632.
 - 22) Mantis, H. T., C. C. Pepapis, C. S. Zerefos and J. C. Ziomas, 1992, Assessment of the potential for photochemical air pollution in Athens: A comparison of emissions and air-pollutant levels in Athens with those in Los Angeles, *J. appl. Meteor.*, 31, 1467-1476.
 - 23) 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 1996, 부산 연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, *한국환경과학회지*, 5(3), 265-275.