

碩士學位論文

# 청정지역 대기질 특성의 평가

- 제주지역을 중심으로 -



濟州大學校 大學院

環境工學科

吳 泰 權

2003 年 12 月

# 청정지역 대기질 특성의 평가

- 제주지역을 중심으로 -

指導教授 李 起 浩

吳 泰 權

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2003 年 12 月



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

吳泰權의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 木 印

委 員 甘 相 奎 印

委 員 李 起 浩 印

濟州大學校 大學院

2003 年 12 月

The Assessment of Ambient Air Quality in  
Clean Region  
- in the case of Jeju Island -

Tae-Gwon Oh  
(Supervised by professor Ki-Ho Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirement for the degree of Master of Engineering

2003 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Mock. Hu, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Sang-Kyu. Kam, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Ki-Ho. Lee, Prof. of Environmental engineering

*December. 2003*

Department of Environmental Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

I. 서론 .....	1
II. 문헌 고찰 .....	3
2.1 배경농도 .....	3
2.2 대기오염물질의 거동 .....	4
2.2.1 황산화물 .....	5
2.2.2 질소산화물 .....	7
2.2.3 오존 .....	10
2.2.4 일산화탄소 .....	11
2.3 지역대기환경기준 .....	13
2.4 식생보호를 위한 오존지표 .....	14
III. 연구 방법 .....	18
3.1 측정점 위치 .....	18
3.2 자료 수집 .....	20
3.2.1 대기질 .....	25
3.2.2 오존 지수 산정 .....	23
3.2.3. 평균상대표준편차(오존 청정도 지수)산정 .....	23
3.2.2 기상 .....	23
IV 결과 및 고찰 .....	25
4.1 대기질의 시·공간적 분포특성 .....	25
4.1.1 기상 및 연변화 .....	25
4.1.2 월변화 .....	29



가. O <sub>3</sub> 의 변동 .....	29
나. SO <sub>2</sub> 의 변동 .....	30
다. NO <sub>2</sub> 의 변동 .....	31
라. CO의 변동 .....	32
4.1.3 일변화 .....	35
가. O <sub>3</sub> .....	36
나. SO <sub>2</sub> .....	38
다. NO <sub>2</sub> .....	40
라. CO .....	42
4.2 대기질 평가 .....	44
4.2.1 환경기준 초과수준 .....	44
가. O <sub>3</sub> .....	44
나. NO <sub>2</sub> .....	49
4.2.2 오존관련 지수 분석 .....	51
가. 오존 청정도지수 .....	51
나. 식물보호를 위한 오존지수(AOT40, SUM06) .....	52
4.2.3 기상인자의 단순상관분석 .....	54
V. 결론 .....	57
VI. 참고문헌 .....	59

## List of Figures

Fig. 1. The location of air quality monitoring site in Jeju .....	18
Fig. 2. Monthly variation of O <sub>3</sub> concentration in Jeju area .....	30
Fig. 3. Monthly variation of SO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	31
Fig. 4. Monthly variation of NO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	32
Fig. 5. Monthly variation of CO concentration in Jeju area .....	33
Fig. 6. Monthly meteorological parameters and SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> concentrations .....	34
Fig. 7. Diurnal variation of O <sub>3</sub> concentration in Jeju area .....	37
Fig. 8. Diurnal variation of SO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	39
Fig. 9. Diurnal variation of NO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	41
Fig. 10. Diurnal variation of CO concentration in Jeju area .....	43
Fig. 11. Annual trend of O <sub>3</sub> exceedance pattern was compared with Jeju area(Ido, Gosan, Donghong, Chuna), 2000.1~2003.11 .....	46
Fig. 12. Cumulative number of days exceed the 8-hr ozone average concentration of 60 ppb in Jeju area from Jan. 2000 to Nov. 20031 .....	47

## List of Tables

Table 1. Air Quality Standard in Korea .....	14
Table 2. The location of ambient air quality monitoring station .....	19
Table 3. Instruments used in the monitoring stations .....	20
Table 4. Number of available date in Jeju area .....	21
Table 5. The mean values of meteorological parameters in Jeju areas .....	26
Table 6. Yearly variation of gaseous air pollutant in Jeju area .....	28
Table 7. Comparison of air pollutant concentrations between with and without the precipitation phenomena in Jeju area .....	37
Table 8. The occurrence frequency of 1-hr average ozone concentration in Jeju area during 2000.1 to 2003.11 .....	45
Table 9. Comparison of air pollutant concentration and meteorology parameters between excess day and normal day base on 8-hr average air quality standard of Korea .....	48~49
Table 10. Number of excess days and Frequency of 24-hr NO <sub>2</sub> standard in Jeju area(2000~2003.11) .....	50
Table 11. Air pollutants and meteorological parameters for excess-day and normal-day of NO <sub>2</sub> .....	50
Table 12. Mean relative standard deviations for O <sub>3</sub> concentrations in Jeju area(2002.3~2003.11) .....	52
Table 13. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Jeju area .....	54
Table 14. Correlation coefficient between concentration of pollutant and meteorological parameter .....	56

## Summary

This study was carried out to assess the air quality over Jeju Island considered as the one of the cleanest sites in Korea. For this purpose, the measurement data of four major gaseous air pollutants and meteorological parameters were collected at four air quality monitoring stations located in Jeju Island. In this study, the four monitoring stations were also classified into two geographical groups, such as urban and rural areas.

It can be found that, except O<sub>3</sub>, the concentration of the gaseous pollutants at Idodong and Donghongdong stations located in urban area were higher than those at Gosan and Chuna stations in the rural area. However the concentration levels of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and CO were extremely low throughout Jeju Island, compared with the other larger cities in Korea.

There were only two gaseous air pollutants, that is, O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>, exceeded the air quality standards of Jeju Island. At all stations in Jeju Island, the NO<sub>2</sub> exceeded the standard only at Idodong station in urban area.

When the concentration of ozone exceeded the air quality standard over Jeju Island, the other gaseous pollutants were also increased together, and the meteorological parameters such as temperature, solar radiation and diurnal range of temperature were higher, but humidity was lowered. However there were little relationship between concentrations of pollutants and meteorological parameters in Jeju Island.

In this study, two ozone indices were also estimated. In urban area AOT40(Accumulated exposure Over a Threshold of 40ppb) and SUM06(SUM of hourly concentration at or above 0.06ppm) appeared to be ranged from 1.64 to 8.59 ppm · hr and from 0.13 to 12 ppm · hr, respectively. In rural areas



AOT40 was 5.3~11.09 ppm · hr and SUM06 was 5.9~14.4 ppm · hr. The level of these ozone indices in Jeju Island were not low, comparing with those of Seoul area in Korea.

Although the level of O<sub>3</sub> concentration was significantly high over the entire area of Jeju Island, it can be found that, based on the value of mean relative standard deviation, the air quality was cleanly maintained.



# I. 서론

대도시 또는 대도시 인접지역을 중심으로 대기질의 특성 및 변동에 관련된 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 연구로부터 대도시에서의 대기질 변동 특성 그리고 기타 오염물질과 또는 기상요소 등과의 관계 등에 대한 많은 자료가 축적되어왔다. 어수미 등(1997)은 서울지역에서 기상인자가 대기오염에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 김영성 등(2001)은 역궤적 분석을 통한 우리나라 주요도시의 일산화탄소의 농도변화를 연구하였다. 이종범 등(1989)은 도시지역 대기질 개선에 관한 연구에서 풍속이 낮고 고기압 상태일수록  $\text{SO}_2$ 는 고농도로 나타나며, 기압과 운량의 정도에 따라서도 농도 상승효과를 일으킨다고 하였고 이덕길 등(1990)은 풍속과 대기오염농도는 역 비례관계가 있고, 특히 풍속 1.5 m/s 이하 일 때 고농도  $\text{SO}_2$ 가 나타나는 경우가 많다고 보고하였다. 전병일(1994)은 부산지역의  $\text{SO}_2$  농도 변화의 특성을 분석하고,  $\text{SO}_2$  고농도일의 특성과 기상인자와의 관계를 조사하였다. 김시완 등(1997)은 종관기상장에 따른 기체상 물질의 농도변화에 대하여 연구하였으며, 정영진 등(1998)은 기상조건에 따른 부산지역 대기오염물질 농도 변화예측에 관한 연구를 수행하였다. 전병일(1999)은 부산 동삼동지역의 시간별 대기질 농도 자료를 이용하여 빈도분포로 나타내어 대기질의 변화특성을 파악하고, 청정지역(태하동)의 대기질 변화와 비교 분석하였다. 이화운 등(1999)은 부산광역시에서의  $\text{NO}_2$  농도 특성 및  $\text{NO}_2$  고농도일에 영향을 미치는 기상인자를 분석하였다.

그렇지만 대도시의 대기질 농도가 대도시내에서의 생성 및 소멸에만 국한되어 있는 것이 아니라 대기운동과 관련된 수송과도 밀접한 관련이 있다고 밝혀짐에 따라 청정한 대기상태에서 배경농도 특성에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 청정대기에서 오존을 비롯한 각종오염물질의 배경농도에 대한 정보와 이해는 대기질 예측 뿐 아니라 허용기준의 설정에 있어서도 필요한 것이다(Lin 등, 1992; Eder 등, 1993; Sunwoo 등, 1994).

우리나라에서 청정한 대기상태를 유지하고 있는 대표적인 지역중의 하나인 제주지역의 대기질에 관한 연구를 보면, 홍민선 등(1992)은 1992년 2월과 3월에

고산에서 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>를 측정 한 결과를 토대로 SO<sub>2</sub> 농도는 일변화가 거의 없고 강우 여부와 바람 방향에 따라 주로 변하는 것으로 나타나, 이 지역에 산성물질이 존재하고, SO<sub>2</sub>는 외부로부터 유입되는 양이 상당한 것으로 추정하였다. 서명석 등(1995)은 청정지역인 고산과 도시지역인 서울과 부산의 오존 농도를 비교하여 그 특성을 연구한 바 있고, 박경운 등(1994)은 1992년 2~12월 까지 SO<sub>2</sub>, NO<sub>y</sub>, O<sub>3</sub>를 측정하였는데, 이들 기체의 농도는 우리나라 주요도시에서 측정 한 값들보다 훨씬 낮았고, 외국에 청정 지역에서 측정 한 값들과는 유사한 것으로 나타났다. 그리고 장광미 등(1996)은 제주도 고산에서의 SO<sub>2</sub>농도변화 특성에 대하여 중국에서의 장거리 수송에 의한 외부의 유입이 크다는 것을 연구했으며, 김용표 등(1996) 고산에서 기체상 대기오염물질의 특성에 관하여 연구하였고, 김용표 등(1999)이 고산 배경농도 측정 정도·관리에 대해 검토하였다.

이처럼 제주지역의 대기질에 관한 연구는 제주도 서부의 해안가에 위치한 고산지역에서 측정된 대기질 자료에 한정되어 왔음을 알 수 있다. 그렇지만 제주지역은 섬 중앙부에 위치한 해발 1950m의 한라산 정상부를 중심으로 북측 중앙부에는 인구 약 29만명의 제주시와 한라산 정상 남측 중앙부에는 인구 약 8만5천명의 서귀포시가 위치하고 좌우로는 주로 전원지역으로 이루어진 군 지역이 위치하고 있다. 따라서 이러한 지리적·지형적 특성에 따른 대기질의 차이를 파악할 필요가 있다.

제주지역에서는 대기질을 관측하고 있는 곳은 제주도 서부 해안가에 위치한 국가 배경농도 관측소(고산측정소) 이외에도 제주시 상업지역에 위치한 이도동 관측소, 서귀포시 주거지역에 위치한 동홍동 관측소가 있다. 그리고 한라산 중턱의 해발 700m, 삼림지역에 위치한 천아오름 관측소가 2003년부터 가동되고 있다. 이처럼 제주지역에서의 대기질의 시간적·공간적 변동 상황을 보다 구체적으로 파악할 수 여건이 마련됨에 따라 본 연구에서는 제주지역의 대기질 모니터링 자료를 이용하여 제주지역내 지역별 특성에 따른 대기질 변동특성을 구체적으로 파악함과 동시에 제주지역 대기질의 특성을 평가하고자 하였다.

## II. 문헌 연구

### 2.1. 배경농도(background concentration)

현재 지구 대기의 조성은 초기 지구 대기의 조성과는 완전히 다르다. 초기의 지구 대기는 다소 환원성이 있는 혼합물로 구성되었는데 반해 오늘날의 지구 대기는 주로 질소, 산소 그리고 아르곤 가스로 구성되어 있으면서 초기 대기에 비해 크게 산화되어 있다고 할 수 있다.

오늘날의 대기구성은 생물권에 의해서 그 양이 지배되고 있다. 수증기도 아주 풍부한 구성성분으로서 주로 저층 대기에서 발견되며 그 농도 변동이 심하여 최고 3% 정도까지 이를 수 있다. 그리고 증발과 강수에 의해서 대기 내의 양이 제어되고 있다. 이 이외의 나머지 기체 성분들을 미량 기체(trace gases)라고 부르는데, 대기의 1% 이하를 차지하고 있다. 이들 미량 기체는 지구의 복사 균형 그리고 대기의 화학적 특성에 결정적인 역할을 한다(Seinfeld와 Pandis, 1998). 그리고 지난 두 세기 동안에 걸쳐 미량기체의 양은 급격하게 그리고 현저하게 변화되어 왔다.

우리 인간은 수천 년 동안 대기를 오염시켜 왔기 때문에 오염되지 않은 대기의 조성을 엄밀한 의미에서는 정확하게 알 수가 없다. 다시 말하면 인간이 처음 존재하였을 때 인간은 그것을 측정하지 않았고, 시간이 흘러 인간이 대기 중의 오염물질 농도를 측정하기 시작했을 때는 수백만 년 동안 지구상에 있었던 물질들에 의해 대기는 이미 오염된 이후인 것이다. 아주 멀리 떨어진 외딴 곳, 해양, 극지방 그리고 사막이나 산에서조차도 오염되지 않은 공기에 아주 가깝더라도 오래되고 크게 희석된 인위적인 오염의 흔적을 어느 정도 지니고 있어 오염되지 않은 공기와는 다를 것이다. 따라서 우리는 실제 자연이 가진 배경농도는 결코 알 수 없다. 그렇지만 대기의 자연배경농도를 파악하기 위해서 할 수 있는 최선의 방법은 바다 한 가운데나, 극지방, 산 정상과 같이 인간 활동영역에서 멀리 떨어진 지역에서의 대기는 실제 배경농도에 가장 근접하다고 가정하고 측정하는

것이다(Boubel 등, 1994).

따라서 배경농도 값으로 측정된 경우에도 인위적으로 발생된 오염물질이 함유될 가능성이 있으며, 자연적인 것과 인위적인 것을 구별한다는 것은 불가능하다고 할 수 있다(森口實, 1990). 그래서 현재로서는 자연계에 있어서 대기 중 오염물질의 배경농도는 화산이나 해변 중으로부터 자연적으로 발생된 것과 대기 중에서 제거되는 것과의 균형(balance)에 의해서 나타난 것이라고 볼 수 있다.

대기오염물질의 정의나 대기오염은 특정한 일련의 환경에 의한 영향과 시간적 및 공간적 배경에 의존하기 때문에 그 지역의 배경농도를 파악하는 것은 대기질관리 대책 수립에 있어 가장 기본적인 요소일 뿐 아니라 배출원 오염물질의 생성과 소멸의 관계, 즉 물질 순환을 파악 할 수 있게 된다. 그렇지만 대기는 끊임없이 순환하는 동적인 계이기 때문에 특정지역에 대한 배경농도를 구체적으로 파악할 수는 없는 실정이다. 따라서 국지적 오염원의 영향과는 거리가 먼 청정한 지역에서의 대기질을 구체적으로 파악하여 이를 배경농도로서 기준을 삼을 수 밖에 없는 실정이다.



## 2.2. 대기오염물질의 거동

대기 중의 각종 기체농도는 오랜 동안 마치 불변인 것처럼 거의 변함없이 유지되고 있다. 그렇지만 대기는 대기를 구성하는 기체상 성분들이 식물, 해양 그리고 생물체와 함께 끊임없이 변화하고 있기 때문에 실제로 역동적인 시스템일 뿐 아니라 대기는 질소와 산소와 같은 비교적 불활성 분자들로 구성되고 있기는 하지만 실제로는 자유 라디칼이라고 불리는 아주 반응성이 큰 분자 파편(reactive molecular fragments)들을 미량 함유하기 때문에 보다 효과적인 산화성 매개체로서 역할을 한다. 예를 들면 대류권 화학에서 가장 중요한 자유 라디칼은 OH(hydroxyl) 라디칼인데, 이는 대기에서 거의 모든 종류의 분자들과 반응을 한다. 또한 대기는 자유 라디칼보다 반응성은 떨어지지만 대기 중에 존재하는 다양한 화합물을 공격하기에는 충분한 반응성을 지닌 미량의 화학종들을 포함하고

있다. 오존은 하나의 중요한 산화제인데, 이는 OH 라디칼의 생성에도 관여한다.

그러므로 대기 기체의 순환(cycle)은 수많은 물리적 그리고 화학적 과정이 관련되어 있다. 기체들은 대기 자체 내의 화학적 과정, 생물의 활동, 화산 폭발, 방사선의 붕괴 그리고 인간의 산업활동 등에 의해 생성된다. 그리고 이들 기체는 대기에서의 화학 반응, 생물작용, 대기의 물리적 과정, 그리고 해양과 지구에 의한 침적과 흡수에 의해서 제거된다. 따라서 대기 중으로 유입된 기체 분자의 평균 수명은 제거 과정의 유효성에 따라서 몇 초에서 수백만 년까지 다양한 범위를 지니다. 대기의 자연 배경 농도 수준을 실질적으로 초과하는 농도를 지닌 물질, 즉 대기오염물질로 생각되는 대부분의 화학종들은 인위적인 배출원 뿐만 아니라 자연적인 배출원을 지니고 있다.

그러므로 이들 물질의 순환을 평가하기 위해서는 자연적인 배출원과 인위적인 배출원 그리고 지배적인 제거 과정을 포함하여 미량기체의 대기 순환 즉, 거동을 이해하는 것이 필요하다.

### 2.2.1. 황산화물(SO<sub>x</sub>)

황 함유 화합물은 지구 대기에서는 총 부피기준 혼합비도 1 ppm 이하인데, 대기화학에 큰 영향을 미치고 있다. 대기에서 주요 황 화합물로는 H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>, CS<sub>2</sub>, OCS 및 SO<sub>2</sub>를 들 수 있다.

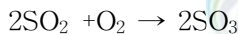
황은 대기 중에서 산화상태가 -2에서 +6의 범위로서 산화 형태와 환원 형태로 모두 존재하고 있다. 대기의 산화 분위기에 황이 일단 배출되면 일반적 경향은 환원된 황 화합물의 형태이고, 이는 산화상태 +4인 SO<sub>2</sub>와 CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H (MSA; methane sulfonic acid)로 산화되고, 궁극적으로 +6 상태인 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 전환된다. +6 상태는 열역학적으로 산소 존재 하에서 안정한 형태이다. 이처럼 대기 내 황 화합물의 화학적 반응성은 그들의 황 산화상태에 역으로 관련된다. 환원된 황 화합물은, 산화 상태 -2 혹은 -1을 지니는데, OH 라디칼에 의해서 재빠르게 산화된다. 황 화학종의 물에 대한 용해도는 산화상태에 따라 증가한다. 환원된 황 화학종은 기체상에서 잘 나타나는 반면에 S(+6) 화합물은 입자 혹은 수적에서 발견되는 경향이 있다. S(+6) 상태인 화합물로 전환되기만 하면 황 화학종의 체류 시간은 습성 및 건성침적으로 제거됨으로서 결정된다(Seinfeld와 Pandis, 1998;

Brasseur, 1999).

SO<sub>2</sub>는 화석 연료의 연소에서 배출되는데, 대기 중 SO<sub>2</sub>는 약 30%가 황산염으로 전환되고 평균 체류시간은 1~4 일 정도로 짧기 때문에 온실가스와 같이 지구규모의 환경오염 문제보다는 산성비와 같은 국지적 오염에의 기여가 큰 것으로 알려져 있다.

그렇지만 SO<sub>2</sub>는 농도 수준이 100 pptv 이하로 아주 낮게 나타나는 외딴 지역의 대류권에서 신뢰도 높은 측정을 하기 아주 어려운 황 기체인데, SO<sub>2</sub>의 반응성이 크기 때문인 것도 한 원인이다. 해양에서 대기시료를 채취할 때 유입구 표면이 습할 경우에 특히 어렵다. 이러한 어려움에도 불구하고 대기 내 황의 산화 및 침적을 이해하고 황 화합물의 배출원으로부터 멀리 장거리 수송을 밝히는데 외딴 해양 대기에서의 SO<sub>2</sub> 측정은 대단히 중요하다. 예를 들면 대륙에서 멀리 떨어진 Bermuda에서의 산성침적은 북미대륙으로부터 질소와 황 화합물의 장거리 수송에 의해서 일어난다고 생각되고 있다(Moody 등, 1995).

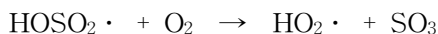
열역학적인 관점에서 보면 화학 양론적 변동에 의해서 SO<sub>2</sub>는 공기 중에서 산소와 반응하려는 경향이 강하다.



이의 반응속도는 기체상에서 촉매가 없으면 아주 느리기 때문에 대기 내 SO<sub>2</sub>의 기원으로서 무시된다. SO<sub>2</sub>는 대류권 내에서는 기체상과 액체상 과정을 거쳐서 반응하고 건식과 습식을 거쳐서 물리적으로 제거될 수 있다. 기체상 반응(gas-phase reaction)에 대해서 보면, OH radical과의 반응이 우세하다고 알려져 있다(Stockwell과 Calvert, 1983).



이어서 HO<sub>2</sub>· 라디칼의 재생성이 따르게 된다.



SO<sub>3</sub>는 수증기의 존재하에서 황산으로 빠르게 전환된다.



OH 라디칼과의 반응에 근거한 SO<sub>2</sub>의 수명은 약 1 주일 정도이며, SO<sub>2</sub>는 건성 침적에 의해서 대기로부터 합리적이고 효율적으로 제거되는 기체의 하나인 것이다. 구름이 존재할 때 SO<sub>2</sub> 제거는 건성 침적에 의한 것을 넘어서까지도 크게 증

진될 수도 있다.

대륙 배경 공기에서  $\text{SO}_2$ 의 혼합비는 20 ppt~1 ppb 이상의 범위를 지니며 오염되지 않은 해양경계층 수준에서는 20~50 ppt의 범위를 지니는 것으로 알려지고 있다.

### 2.2.2 질소화합물

화학적으로 대단히 안정하며 대류권이나 성층권 화학의 어디에도 관여하지 않는  $\text{N}_2$ 를 제외하고, 대기에서 중요한 질소 함유 미량 화학종으로는  $\text{N}_2\text{O}$  (nitrous oxide),  $\text{NO}$  (nitric oxide),  $\text{NO}_2$  (nitrogen dioxide),  $\text{HNO}_3$  (nitric acid) 그리고  $\text{NH}_3$  (ammonia)가 있다. 그리고  $\text{NO}_3$ 와  $\text{N}_2\text{O}_5$ 와 같은 기타 질소 산화물은 대기 중에 상대적으로 낮은 농도로 존재하지만 그럼에도 불구하고 대기 화학에 중요하게 참여한다.  $\text{HNO}_3$ 는 대기에서  $\text{NO}_2$ 가 산화된 생성물이다.  $\text{NH}_3$ 는 자연적 발생원에서 1차적으로 배출된다. 끝으로, 질산염과 암모늄염(nitrate and ammonium salts)은 어떤 상당한 양으로 방출되는 것은 아니지만 대기중에서 전환되면서  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , 및  $\text{NH}_3$ 가 생성된다.

$\text{HNO}_3$ 는 대기에서  $\text{NO}_x$ 의 주요 산화 생성물인데, 물에 대한 용해성이 대단히 크기 때문에  $\text{HNO}_3$ 는 표면과 물방울에 빠르게 침적된다. 또한  $\text{NH}_3$ 가 존재하게 되면,  $\text{HNO}_3$ 는  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (ammonium nitrate) 에어로졸을 생성할 수 있다. 그리고  $\text{NO}_3$  (nitrate radical)는 대류권 화학에서 중요한 요소인데, 특히 야간에 중요하다.  $\text{NO}_3$ 는 야간에 경계층내에 300 ppt 정도까지의 혼합비(mixing ratio)로 존재한다.

대기에서  $\text{NO}_x$ 의 농도에 대한 자료가 상당히 있지만 이러한 측정 자료에서 어떤 결론을 이끌어내는데 주의해야 한다.  $\text{NO}_x$  측정은 대부분이  $\text{NO}_2$ 를  $\text{NO}$ 로 전환시켜서 화학적 형광을 측정하여 이루어진다. 보다 엄밀한 기술을 이용하여 측정된 결과들을 보면,  $\text{NO}_2$ 를  $\text{NO}$ 로 전환시킬 수 있는 표면전환장치(surface converters)는 PAN과 같은 다른 산화성 질소 산화물 화학종들도  $\text{NO}$ 로 전환시키게 되므로 측정에 방해가 주는 것을 알 수 있다. 그러므로 도시지역에서는 국지  $\text{NO}$  배출이 많기 때문에  $\text{NO}$ 와  $\text{NO}_2$ 가 총 반응성 질소 ( $\text{NO}_y$ ) 중에서 가장 우점적인 성분일 것이므로 PAN이나 다른 질소 산화물의 방해가 상대적으로 작을 것



으로 생각된다. 그렇지만 전원 지역이나 외딴 지역에서는 이들의 방해가 실제적 일 수 있을 것이다. 이런 이유로 인해 표면전환장치를 이용하여 비도시 지역에서 NOx를 측정함에 있어서는 상한치(upper limits)를, 다시 말해 측정치가 높아지는 쪽으로 편향될 수 있음을 염두에 두어야 한다.

대기 중 NOx 수치(budget)에서는 인위적인 배출의 역할이 우세하며 이들 배출원이 도시 지역 근교에 위치하는 경향이 있다는 사실로 인해, NOx의 농도 증가는 이러한 지역에서 예상할 수 있으며 이는 NOx 관측으로서도 확인되고 있다. 수많은 실측 연구에서, NOx가 다른 NOy 종으로 전환되는데 필요한 특성화 시간(characteristic time)은 4~20 시간이라고 추정되고 있다. NOy에 대한 NOx의 비율로서 NOx가 초기에 유입된 후에 공기 중에서 일어나는 화학적 과정을 반영할 수 있는데 도시 지역에 대규모 NOx 배출 그리고 NOx가 다른 NOy 화합물로 전환되는데 몇 시간이 걸리기 때문에 도시지역에서 NOy 농도는 일반적으로 NOx가 우세하게 된다.

미국에서 고립된 전원지역에서 이루어진 NOx 측정을 보면 고립이 안된 전원 지역에서 측정된 농도보다 상당히 낮은 경향이 있고 대체로 1 ppb 이하의 범위를 보였다.

외딴 해안 지역에서 저층 자유 대류권과 대기경계층에서 이루어진 NOx 측정에서는 대체로 0.02에서 0.04 ppb의 혼합비를 보이고 있다. 아직까지 측정 사례가 흔하지는 않지만 외딴 열대 삼림(식물을 태우는 직접적인 영향을 받지 않는 곳)에서의 혼합비는 0.02~0.08 ppb의 범위를 보이고 있다. 이처럼 외딴 열대삼림에서 다소 높은 수준임을 알 수 있는데, 이는 외딴 해안 지역과 비교해 볼 때 토양으로부터 생물에 의해 배출되는 NOx 영향 때문일 것으로 추정된다.

NOy를 측정할 수 있는 능력이 아주 최근에야 개발되었기 때문에, 도시와 외딴 지역에 대한 NOy 측정사례가 NOx에 비해 아주 제한되어 있으나 NOy 분포에 대한 대략적인 지표를 설정할 수는 있다. 미국의 여러 지역에서 관측한 평균 NOy 농도는 아주 비슷한데, 혼합비의 중앙치 (median mixing ratio)는 3~10 ppb 범위이다. 보다 외딴 지역으로 갈수록 NOy에 대한 NOx의 기여도가 점차로 감소한다. NOy는 NOx로서 대기 중으로 유입되기 때문에 보다 외딴 지역으로 갈수록 NOy에 대한 NOx의 비가 감소하는 것은 주요 인위 배출원으로부터 거리

가 멀어짐에 따라서 NO<sub>x</sub>가 유기 질산염 (organic nitrates, 대표적으로 PAN)이 나 무기 질산염(주로 HNO<sub>3</sub>)으로의 화학적 전환이 증가하는 것으로 이해될 수 있다. 가장 외딴 곳에서는 가장 낮은 NO<sub>x</sub>/NO<sub>y</sub> 비를 보인다. 그리고 고도가 높은 곳에 위치한 외딴 곳에서는 PAN/NO<sub>y</sub> 비가 최대를 보인다. 실제로 PAN은 외딴 자유 대류권에서 가장 풍부한 NO<sub>y</sub> 화학종이다.

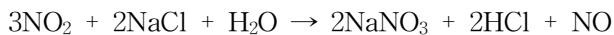
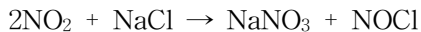
HNO<sub>3</sub>를 포함하여 기체상 NO<sub>x</sub>의 평균 대류권 체류시간은 1~4일, 입자상 질산염 (particulate nitrate)는 3~9일 정도의 범위이다. 이러한 비교적 짧은 대기내 수명으로 인해 질소산화물의 배출에 의한 주요 영향은 본질적으로 지구적인 규모라기보다는 국지 혹은 지역적 규모라고 예상할 수 있다.

NO의 소멸은 대기 중에서의 직접 산화되거나 O<sub>3</sub>, RO<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub> 등과의 광화학 반응에 의하여 NO<sub>2</sub>로 전환됨으로서 이루어지는데, 이 NO<sub>2</sub>는 광화학 반응으로 생성된 OH 라디칼의 다음 반응하며 다음 반응을 거쳐 질산으로 전환되는 과정이 중요하게 된다.



여기에서 M은 N<sub>2</sub> 또는 O<sub>2</sub>와 같이 에너지 흡수체이다.

또한 해안 지역에서는 NO<sub>2</sub>가 해양입자와 반응하여 질산염을 생성함으로써 대기 중에서 제거되기도 한다.



대기 중에서의 체류시간은 NO와 NO<sub>2</sub>가 2~5일, N<sub>2</sub>O가 20~100년으로 추정되고 있다(Urone, 1986).

N<sub>2</sub>O는 대부분 토양과 수체에서 생물학적 배출원에 의해서 방출되는 중요한 대기 기체이지만 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O에 비해 그 농도가 아주 낮다. 그렇지만 N<sub>2</sub>O의 긴 체류시간과 분자당 에너지 흡수력이 비교적 크기 때문에 가장 영향력이 큰 온실 효과기체로 알려져 있다.

NH<sub>3</sub>는 대기에서 주요한 염기성 기체이며, 대기중에서 N<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 다음으로 가장 풍부한 질소함유화합물이다. NH<sub>3</sub>의 중요한 배출원으로는 동물사체, 부식토의 ammonification, 토양에서 NH<sub>3</sub> 비료의 소실 그리고 산업체 등을 들 수 있다. 암모늄 이온 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)은 대륙에서 대류권 에어로졸의 중요한 구성성분이다. NH<sub>3</sub>는

물이나 토양과 같은 표면에 쉽게 흡수되기 때문에 저층 대기에서 체류시간이 10 일 정도로 대단히 짧은 것으로 알려져 있다.  $\text{NH}_3$ 의 습성 및 건성 침적은  $\text{NH}_3$ 의 주요 대기제거과정이다. 사실 대기 중  $\text{NH}_3$ 와  $\text{NH}_4^+$ 의 침적은 그 지역에 생물권에 중요한 영양염이 될 것이다.  $\text{NH}_3$ 의 대기 내 농도는 대단히 변화가 심하고, 대륙에서  $\text{NH}_3$  혼합비의 범위는 0.1~10 ppb 정도인 것으로 알려져 있다.

### 2.2.3. 오존( $\text{O}_3$ )

오존( $\text{O}_3$ )은 산소 원자 3개로 이루어져 있으며, 무색의 반응성이 강한 기체로서 강한 산화제이다. 대부분 대기 중에서 자연적으로 생성되며, 자연적으로 생성될 수 있는  $\text{O}_3$ 의 농도는 대략 10~20 ppb 정도인 것으로 알려져 있다.

대기권 전체  $\text{O}_3$ 의 약 90%는 지상 10~50 km사이에 있는 성층권에 밀집되어 있으며(윤마병과 정용승, 1995), 나머지 10%는 지구의 지표면으로부터 10 km이내의 대류권에 있는데 사람의 호흡기나 눈을 자극하는 등 인체에 해를 미칠 뿐만 아니라 농작물의 성장에도 피해를 주게 된다(Tilton, 1989).

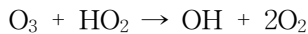
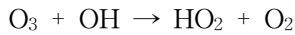
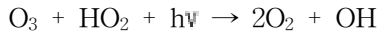
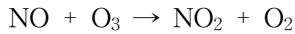
강한 태양광선과 역전층이 형성된 상태 하에서 탄화수소와 NO가 대기중에 방출되면 대기에는 산화물이 생성된다. 이때 생성된 광화학 산화물을 옥시던트라고 부르는데, 요오드이온을 요오드로 산화시킬 수 있는 물질로 정의 된다.

대류권의  $\text{O}_3$ 은 국지적인 광화학반응으로 생성된 옥시던트의 지표물질이며, 대류권 오존농도의 변화요인은 성층권에서의 유입, 대류권내 기체성분의 광화학 반응에 의한 생성, 오염된 지역으로부터의 유입 등이 있다(홍민선 등, 1992).

태양빛의 존재 하에서 일반적으로  $\text{O}_3$ 의 생성은 질소산화물의 광해리에 의해서 생성된다고 알려져 있다. 그렇지만 때로는 도시지역이나 전원지역에서  $\text{NO}_2$ 의 광분해에 의한 생성보다  $\text{O}_3$ 농도가 더욱 높은 경우가 나타나는데 이는 대기중에 탄화수소가 존재하면서 산화되어 과산화기( $\text{RO}_2$ )를 생성시키면  $\text{O}_3$ 를 소멸시키지 않고도 NO가  $\text{NO}_2$ 로 산화 될 수도 있기 때문이다.

따라서  $\text{O}_3$ 의 생성율은  $\text{RO}_2$ 의 농도와 관계가 깊다.  $\text{RO}_2$ 는 탄화수소, 산소원자, OH,  $\text{HO}_2$ 에 의하여 생성된다. 오염된 대기 중에서  $\text{O}_3$  농도에 영향을 주는 것은 태양빛의 강도,  $\text{NO}_2/\text{NO}$  비, 반응성 탄화수소의 농도, 기타 알데히드와 CO 및  $\text{RO}_2$ 를 생성하는 오염물 등이다.

대류권에서의 광화학반응과 성층권에서 생성된 O<sub>3</sub>은 지표면에서의 침착과 광화학적 소멸반응에 의하여 대기 중에서 제거된다. 광화학반응에 의한 O<sub>3</sub>의 소멸에는 NO와의 반응에 의한 파괴 및 H<sub>2</sub>O, OH, HO<sub>2</sub> 등과의 반응이 관여한다.



또한 야간에는 NO<sub>2</sub>와 반응하여 O<sub>3</sub>이 소멸되며, 이어서 일어나는 반응에 의하여 HNO<sub>3</sub>가 생성된다.

그러므로 오존의 생성에는 오존 전구물질의 농도와 일사량, 온도, 풍향, 풍속 등 기상조건 및 지역 환경인자 등이 밀접하게 관련되어 있다(Vukovich, 1995).

#### 2.2.4. CO

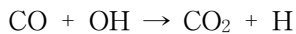
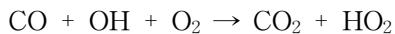
대기 중 CO의 농도 수준에는 자연적인 및 인위적 배출이 모두 기여하고 있다. 자동차 배기 및 불완전 연소에 의한 배출 가스내에 CO가 존재함은 잘 알려져 있다. CO가 대기의 자연적 미량 성분이라는 사실은 1949년에 알려졌는데, 1972년 이전에는 CO의 자연 배출에 대한 연구는 거의 없었다. 1972년 이후 수행된 연구에서 실제 자연적으로 배출된 CO는 인위적으로 배출되는 것보다 클 뿐 아니라 양적으로도 10 배는 된다고 알려져 있다.

자연적 대기 CO의 77% 이상이 메탄에 의한 것으로 알려져 있는데, 이 메탄은 습지, 열대 지방 중에서 수중 유기물의 분해로 인해 나오는 것으로 알려져 있다. 대기 중 메탄은 OH 라디칼이나 산소 원자와 반응하여 CH<sub>3</sub> 라디칼을 생성한다. 여기서 생성된 CH<sub>3</sub> 라디칼이 더욱 반응을 진행하여 결국 CO를 생성한다고 본다. OH 라디칼과 O 원자는 초기에 CH<sub>4</sub> 산화를 일으키는데 필요하다. 따라서 대기 중 CO의 주요 배출원으로서는 대기 중으로 방출되는 과정보다는 대기 내에서 CO가 생성되는 과정임을 알 수 있다.

해양이 대기 중 CO의 두 번째 발생원이다. 표면수는 대기와 접촉되어 있기 때문에 대기로부터 흡수된 용해된 CO를 함유할 수 있을 것으로 보았으나 해양에서 실제로 발견된 용해 CO 양은 그러한 흡수에 근거하여 예상한 양보다 10~

40 배 이상 더 크게 나타났다. 이는 algae와 다른 생물학적 발생원이 표면수의 CO 양에 실제로 기여한다고 보고 있다. 이 CO가 실제로 대기로 방출된다.

CO는 토양 박테리아에 활동에 의해 CO<sub>2</sub>로 산화됨으로서 대기 중에서 제거된다. 미국의 경우 전 토양에 의하여 제거되는 CO의 양은 약 500×10<sup>6</sup> ton/year 정도로 추정되며, 전 지구상의 인위적 발생원에서 배출되는 양과 비슷할 정도로 토양의 CO제거능력은 매우 크다(Godish, 1991). 이 외에 대류권 및 성층권에서의 광화학 반응에 의해 대기 중에서도 제거된다.



그러나 CO는 물리, 화학적 특징에 의해 다른 오염물질과는 대기 중에서의 거동이 다르게 나타난다. 즉 물에 난용성이기 때문에 수용성 가스와는 달리 강우에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 대기 중에서도 이산화탄소로 산화되기도 어렵다. 또한 대기 중에서 자외선을 흡수하거나 가시도를 저하시켜, 대기 중에서 다른 오염물질과 유해한 화학 반응을 일으키지도 않고, 다른 물질에 흡착현상도 나타나지 않는다.

CO의 대기질 배경농도는 북반구에서 0.1~0.2 ppm, 남반구에서 0.44~0.66 ppm 정도라고 알려져 있다(Urone, 1986). 그리고 대기 중에서 CO의 평균 체류시간은 발생량과 대기 중 평균농도로서 추정하면 대략 1~3개월 정도인 것으로 알려져 있다.

도시대기 중의 CO 농도가 높은 것은 연소 등에 의하여 배출량이 많아지고 토양면적의 감소 등에 따라 제거 능력이 감소하기 때문이다. 도시지역에서 CO의 주발생원은 자동차이며, 풍속이 약하고 (0.5~1 m/s) 교통량이 많은 지역에 기온 역전 현상이 일어났을 때 농도가 급격히 상승하게 된다(안전공학협회편, 1982).

도시 대기 중의 CO농도는 외국의 경우 과거에 매우 높게 관측되었다. 런던의 경우 1956년 말부터 1957년에 걸쳐 360 ppm이라는 높은 농도를 기록한 일이 있으며 1967년 시카고에서는 8시간 평균치 44 ppm을 기록하였다 (吉田忠雄, 1981).

우리나라는 대기오염 측정망과 함께 대도시에서 자동차 배출가스 측정망을 설치, 운영하고 있으며 대도시 도로변 CO 농도는 0.7~1.4 ppm 수준인 것으로 나타나고 있다(환경부, 2002).

### 2.3. 지역 대기환경기준

환경기준이란 일반적으로 특정한 지역에서 요구되는 일정한 환경상태를 유지하기 위한 기준이라고 말할 수 있다. 즉, 개별오염원에 대한 배출규제만으로써는 유해한 결과를 초래할 수 있으므로, 그 지역에 거주하는 사람들의 건강을 보호하고 생활환경을 보전하기 위하여 설정하는 것이 환경기준이다. 외국에서는 생활환경의 질을 인간 생존에 적절한 수준으로 유지하기 위한 환경기준의 하나로서 1970년대부터 대기환경기준을 설정하여 환경의 질을 평가하고 환경정책을 계획, 실행하는 지표로 삼고 있다(전미경, 1999).

우리나라의 대기환경기준은 대기오염에 의한 피해로부터 국민을 보호하기 위한 행정목표치로서 환경정책기본법 제10조 제1항 및 제2항의 규정에 의거하여 1978년 처음으로 SO<sub>2</sub>에 대한 기준을 설정한 이후, 1983년에는 CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, 먼지, HC에 대한 환경기준을 설정하고 1990년에는 Pb를 추가하였다. 그 후, 1994년에는 SO<sub>2</sub>, CO 등의 기준을 강화시키고 PM-10을 추가하였으며 HC는 항목에서 제외하였다(환경부, 2003).

다음 표는 우리나라 주요 도시별 지역 대기환경기준을 나타낸 것으로서 1999년도에 제정된 제주도의 지역환경기준은 청정한 자연환경과 우수한 문화적 자원의 보전을 위해서 유럽환경기준과 동일한 수준으로 환경기준을 대폭 강화시킨 것이 특징이다. 실제로 제주도는 근래 들어 무분별한 개발과 도시화로 인한 대기오염의 심화와 더불어 한국 뿐 만 아니라 중국으로부터의 대기오염 영향도 크다는 것이 밝혀졌다(장광미 등, 1996; 김용표 등, 1999; 김영성, 2001).

Table 1. Air Quality Standard in Korea

Pollutant	Seoul (‘97.12)	Kyonggi (‘01.8)	Daejeon (‘97.12)	Jeju (‘99.1)	Incheon (‘00.11)	Korea (‘01.1)
SO <sub>2</sub> ppm	0.01/yr	0.015/yr	0.02/yr	0.01/yr	0.015/yr	0.02/yr
	0.04/day	0.04/day	0.06/day	0.04/day	0.04/day	0.05/day
	0.12/hr	0.12/hr	0.13/hr	0.1/hr	0.12/hr	0.15/hr
CO ppm	9/8-hr	7/8hr	9/8hr	5/8hr	7/8hr	9/8hr
	25/hr	15/hr	25/hr	13/hr	20/hr	25/hr
NO <sub>2</sub> ppm	0.04/yr	0.04/yr	0.05/yr	0.027/yr	0.04/yr	0.05/yr
	0.07/day	0.075/day	0.08/day	0.04/day	0.07/day	0.08/day
	0.14/hr	0.14/hr	0.15/hr	0.1/hr	0.140/hr	0.15/hr
TSP μg/m <sup>3</sup>	-	-	90/yr 230/day	150/yr 300/day	-	-
PM10 μg/m <sup>3</sup>	60/yr 120/day	70/yr 140/day	50/yr 100/day	60/yr 120/day	60/yr 120/day	70/yr 150/day
	O <sub>3</sub> ppm	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr
Pb μg/m <sup>3</sup>	1/3month	0.5/year	1/3month	0.5/3month	0.5/3month	0.5/yr

#### 2.4. 식생보호를 위한 오존지표(ACT40과 SUM06)

오존은 대류권에서 물리화학적 과정에서의 중요한 역할을 하는 것 이외에도 오존 그 자체가 강한 산화력을 지니고 있기 때문에, 특정 농도에서는 인간, 동물, 식물 그리고 물질에 대해서 피해를 줄 수 있다. 오존에 노출되면 여러 경로를 거쳐 호흡기도의 구조와 기능에 영향을 받게 된다. 식물에 대한 오염의 영향으로

가시적인 잎 손상, 식물성장 감소, 경제적 생산량 감소 그리고 농작물 품질의 저하를 들 수 있다. 그리고 오존은 대기오염원들 중에서 식물에 가장 독성이 강한 것으로 보고 되고 있다(USEPA, 1996, 1986). 오존은 식물에 대한 광화학 독성물질로 낮은 농도로도 식물의 잎 표면에 반점을 생기게 하고, 노화현상을 야기 시켜 광합성 작용을 방해하며 식물의 성장력을 감소시킨다(Lefohn, 1997). 1940년 중반 LA에서 농작물에 대한 광범위한 피해는 오존 또는 PAN과 같은 광화학 독성물질 때문으로 밝혀졌으며, 미국에서 연간 10억 달러 농업수확량 감소도 오존의 영향 때문이라고 보고 된 바 있다(Showmann, 1991)

이러한 이유로 인해서 대기 중 오존 기준치 혹은 지침을 제시하거나 또는 WHO와 같은 국제적인 기구에서 그 기준을 마련하고 있다. 오존의 인체에 대한 영향을 고려하여 WHO에서는 76~100 ppb (1-hr 평균) 그리고 50~60 ppb (8-hr 평균)의 지침을 두고 있으며, 식물 보호를 위해서 1-hr 평균으로 100 ppb 및 24-hr 평균으로 33 ppb를 제시하고 있다. 미국에서는 국가적으로는 120 ppb (시간최대농도)로 설정하고 있으나 California에서는 90 ppb로 강화하여 설정하고 있다. EU에서는 인간건강보호를 위해 WHO의 지침을 따라 55 ppb(8-hr 평균)을 설정하고 있다.

오존에 의한 식물의 피해는 오존의 농도, 기간 그리고 식물의 오존에 대한 민감도 및 생육조건에 따라 달라지는데 수 시간 또는 수일 정도의 단기간에 걸친 고농도 노출에 의한 반응은 식물의 생리적, 생화학적 과정의 급격한 변화에 따른 잎의 가시적 피해현상으로 나타난다(윤성철 등, 1999). 그렇지만 식물의 생육기간 전체에 걸쳐서 보면 비교적 낮은 농도의 오존 노출에 의해서도 생육저해, 조기낙엽, 화기형성 지연, 식물의 중량감소, 수확량감소 등의 피해가 나타난다고 보고 되고 있다(Denise L, 2003; Lefohn, 1997; USEPA, 1996). 때로는 고농도 오존에서 단기간 노출보다는 저농도 오존에서 장기간 노출될 경우에 인체에 더 위해하다는 보고도 있다(Lefohn, 1997; Spektor 등, 1990). 그리고 잎의 피해증상을 볼 수 없는 비교적 낮은 농도에서도 광합성의 억제, 탄소 동화물질의 뿌리로의 이동저해가 발생됨으로써 수년에서 수십년에 걸쳐 누적된 다년생 수목의 만성적 오존피해로 인해 삼림이 쇠퇴되는 결과를 초래하기도 한다(Health와 Taylor, 1997)

최근 여름철의 잦은 오존주의보 발령으로 우리나라의 대류권에서 발생되는



고농도의 오존에 대한 우려가 높아지면서 환경기준치보다 낮은 수준에서의 피해에 관심이 고조되고 있으나, 오존의 고농도 수준에 대한 정의가 연구자의 관점에 따라 60ppb, 80ppb, 100ppb 등으로 다양하게 제시되고 있다(윤성철 등, 1999). 오존으로 인한 만성적인 식생피해를 파악하려면 피해가 시작되는 상당히 낮은 수준에서부터 고려되어야 한다. 특히 낮은 농도의 장기간 노출에 따른 식물의 만성적인 피해는 눈에 띄지 않게 서서히 발생하기 때문에 이에 따른 식생의 피해를 평가하는데 있어서 오픈탑 챔버를 사용한 직접적인 노출실험을 전 생육기간에 걸쳐 수행해야하므로 많은 비용과 시간이 소요되게 된다(윤성철 등, 1999).

따라서 오존의 영향에 따른 식물의 생산량 감소를 평가하는 척도로서 미국에서는 SUM06을 이용하고 유럽에서는 AOT40을 이용하고 있다.

AOT40 지표는 UN-ECE (The United Nations Economic Commission for Europe)에서 제정된 잠재적인 생태계 영향을 경계하기 위한 유럽기준이다(Skarby와 Karlsson, 1996; Fuhrer, 2000). AOT40은 주간 시간대에 농도 한계치 40ppb를 초과하는 오존 농도에의 누적 노출값을 의미하는데, 식물의 성장기에 따라 3개월 또는 6개월 동안에 계산된다. 나무에 대해서는 가장 민감한 성장시기인 4월부터 9월까지 6개월 낮시간 동안 AOT40을 10000 ppb·hr로 정하고 있다. 그리고 농작물인 경우 농작물이 5% 감소하는 수치로 식물의 성장기간인 3개월(5~7월)동안 3000 ppb·h로 설정하여 그 이상의 수준이면 심각한 것으로 판단하고 있다(WHO, 1996; Beck 등, 1998). 그리고 가시적인 피해가 나타나는 급성 영향에 대한 기준은 증기압손차(Vapor pressure deficit, VDP)가 1.5 kPa이상일 때 연속 5일 동안 500 ppb·hr 혹은 VDP<1.5 kPa일 때 5일 동안 200 ppb·hr으로 설정하고 있다(Donev 등, 2002).

반면에 SUM06은 AOT40을 비교할 목적으로 NCLAN/USEPA(The Nation Crop Loss Assessment Network/US Environmental Protection Agency)에서 제정한 지수이다 곡식생산량을 10%이상 감소시킬 수 24hr-SUM06의 수준을 15-25 ppm·hr로 파악하고 있다(Chameides 등, 1999). Lefohn와 Liroy(1994)와 Musselman 등(1994)은 미국에서 10% 곡물이 감소되는 3개월 동안의 SUM06 값은 26.4ppm·hr로 제시한 바 있다. 그 후 Hogsett 등(1995)이 NCLAN 자료를 바탕으로 분석한 결과 SUM06이 23.4ppm·hr 이상일 때 전체 작물의 수량 감소가

약 10% 정도 된다고 보고하였다.

이상 지표들을 동아시아 지역의 농작물 생산 감소량을 평가하기에는 다소 무리가 따른다고 생각된다. 왜냐하면 유럽의 주 농작물은 밀인 반면에(Ashmore와 Fuhrer, 2000), 동아시아 지역인 중국, 일본 및 한국지역의 주 농작물은 쌀이기 때문이다. 그리고 2000년도에 중국, 일본, 한국의 쌀생산량이 2억 1300만톤을 생산한 반면 EU의 나라들은 불과 260만 톤에 불과하였다(USDA, 2000). 그리고 오존에 대한 쌀의 내성은 밀보다 더 강하다는 연구 결과가 있다(Aunal 등, 2000). 그리고 이 지표를 사용하는 유럽에서조차도 남부 유럽에서 매우 높은 AOT40을 보임에도 불구하고 곡물 생산량은 오히려 높다는 연구 결과도 있다 (De Santis, 1999, 2000; Ashmore와 Fuhrer, 2000; Fumagalli 등, 2001).

하지만 동아시아에서 인위적인 오염이 가중됨에 따라 O<sub>3</sub>으로 인하여 산림 손실과 곡물 생산량 감소가 더욱 악화될 것이 예측되어 진다(Pakpong 등, 2002). 그리고 Aunal 등(2000)에 의하면 2020년에는 중국의 AOT40수준이 30ppm·hr가 되어, 심한 곡물 생산량 감소가 일어날 것이라고 주장하기도 했다. 그리고 일본에서도 장거리 수송에 의하여 대류권 오존이 매년 2% 정도씩 증가함으로서 지속적인 곡물의 생산량 감소가 나타나고 있다는 보고도 있다(Akimoto 등, 1994). 따라서 우리나라도 중국과 일본에 인접해 있음으로서 오존에 의한 피해가 예외일 수는 없는 실정이므로 이들 AOT40과 SUM06 지표들을 이용하여 현재의 대기질 수준에 대한 식물에 대한 영향정도를 사전에 파악해 볼 필요가 있다.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 3.1. 측정점 위치

제주도에서 운영하는 제주시 이도동(상업지역) 및 서귀포시 동홍동(주거지역) 관측소, 국가 배경농도 관측소인 고산리 관측소의 자료를 수집하였으며 삼림지역 대기질 변동을 파악하기 위해 새롭게 구축한 관측소(한라산 천아오름 해발 700m)에서 대기질을 연속적으로 관측하였다. Fig. 1은 제주지역에 설치되어 운영



Fig. 1. The location of air quality monitoring site in Jeju.

되고 있는 자동측정소의 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 제주도 북부에 제주시 이도동 측정점이 위치해 있고, 남쪽에 서귀포시 동홍동 측정점이 있다. 그리고 고산리 측정소는 서쪽 끝단에 위치해 있으며, 제주시 서측 경계부에 해발 700m의 천아오름 지점이 위치해 있다.

Table 2은 관측소의 지리적 현황을 나타냈다. 본 연구에서는 상업지역인 이도동과 주거지역인 동홍동을 도시지역으로, 해안지역인 고산리와 삼림지역인 천아오름을 전원지역으로 대별하였다. 고산리 측정소는 해안가의 절벽위에 위치하고 있으며 천아오름은 산림지역으로 이루어진 계곡에 위치하고 있으며, 이 두지역의 인근에는 국지 배출원의 영향이 거의 없는 지역이다.

Table 2. The location of ambient air quality monitoring station

Station	Location	Site elevation (asml*)	Sampling height**	Classification
Ido	126° 31' 50" E 33° 30' 00" N	50 m	9 m	Commercial area
Donghong	126° 34' 00" E 33° 15' 00" N	40 m	9 m	Residential area
Gosan	126° 10' 00" E 33° 17' 00" N	72 m	4 m	Coastal area
Chuna	126° 27' 31" E 33° 20' 30" N	700 m	3.5 m	Forest area

\* Site elevation above mean sea level.

\*\* Height of sampling point above ground level.

### 3.2. 자료 수집

#### 3.2.1 대기질 측정자료

측정기간은 2000년 1월부터 2003년 11월까지였으며 측정항목은 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>이다. 대기질 측정에 사용된 측정 기기 및 측정원리는 Table 3과 같다.

Table 3. Instruments used in the monitoring stations

Pollutants	Station	Instruments	Method of measurement
SO <sub>2</sub>	Ido	API/100A	Pulse U.V. Fluorescence Method.
	Donghong	Dongan/DA-1300	
	Chuna Gosan	TEI/43C	
NO <sub>2</sub>	Ido	API/200A	Chemiluminescent Method.
	Donghong	Dongan/DA-2300	
	Chuna Gosan	TEI/42C	
CO	Ido	API/400A	Non-dispersive Infrared Analysis.
	Donghong	Dongan/DA-3300	
	Chuna Gosan	TEI/48C	
O <sub>3</sub>	Ido	API/300A	Chemiluminescent Method.
	Donghong	Dongan/DA-4300	
	Chuna Gosan	TEI/49C	

이도동과 고산지역인 경우 대기질 자료는 2000년 1월부터 2003년 11월까지 수집하였으며, 동홍동은 2002년 3월부터 2003년 11월, 천아오름은 2003년 1월부

터 2003년 11월 까지 자료를 수집하였다. 측정기간 동안의 데이터 개수와 결측율은 다음 표에 나타내었다.

Table 4. Number of available date in Jeju area

Station	Standard Time	Total period	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO
Ido	Efficient Time	34,080	33,743	32,275	33,668	33,232
	Missing,%		1.0	5.3	1.2	2.5
	Efficient Day	1420	1401	1,341	1,397	1,381
	Missing,%		1.3	5.6	1.6	2.7
	Efficient Month	47	47	47	47	47
	Missing,%		0	0	0	0
Gosan	Efficient Time	34,080	28,856	28,690	27,757	28,763
	Missing,%		15.3	15.8	18.6	15.6
	Efficient Day	1420	1,135	1,121	1,070	1,120
	Missing,%		20.1	21.1	24.6	21.1
	Efficient Month	47	42	43	41	42
	Missing,%		10.6	8.5	12.8	10.6
Dong hong	Efficient Time	15,360	15,284	15,244	15,103	15,230
	Missing,%		0.5	0.8	1.7	0.8
	Efficient Day	628	623	621	615	620
	Missing,%		0.8	1.1	2.1	1.3
	Efficient Month	21	21	21	21	21
	Missing,%		0	0	0	0
Chuna	Efficient Time	7,776	7,639	7,635	6,213	5,311
	Missing,%		1.8	1.8	20.1	31.7
	Efficient Day	324	317	316	257	218
	Missing,%		2.2	2.5	20.7	32.7
	Efficient Month	11	11	11	8	8
	Missing,%		0	0	27.3	27.3

표에서 일부 기간에는 자료검색 기준(75%)에 약간 못 미치는 자료가 있었으나, 측정치의 변동특성을 파악하기 위한 시간별 경향성 분석에서는 이러한 기준

외의 측정자료도 포함시켰다.

측정기기의 비정상 가동 등으로 발생된 이상 자료를 검색하여 자료의 신뢰도를 향상함과 동시에 타 관측소의 관측 자료와의 통합관리하기 위해 모뎀을 설치하여 on-line으로 제주도에서 운영중인 제주도 대기질측정상황실의 주 컴퓨터로 자료를 송신하고 있다. on-line으로 측정자료를 수신할 수 있는 측정점은 이도동과 동홍동 및 천아오름 측정소이며, 국가 배경농도 관측소로 운영되고 있는 고산리 대기질 자료는 별도로 수집하였다.

매 시간별 측정자료는 매일의 자료를 검색하고, 회선장애가 발생할 경우에는 측정소의 자료를 회수하여 단말기로 수동 입력한다.

데이터 통계처리는 다음과 같은 기준을 적용하여 실시했다.

#### 가. 일, 월, 계절, 연 평균값

1시간 평균자료를 이용하여 일평균, 월평균, 계절평균, 연평균을 계산하며, 유효 측정값의 처리비율은 75% 이상을 대상으로 적용하였다.

#### 나. 8시간 평균값



하루를 기준으로 01~08시, 02~09시, 03~10시, 04~11시, ..., 17~24시의 총 17개의 경우의 평균치로서 각 경우의 자료 개수가 6개 이상인 8시간 평균치로 적용하고, 총 17개의 평균치중 최대치를 1일 8시간 평균치로 하였다.

#### 다. 백분위수(Percentile)

1시간 평균 자료로 백분위수(95, 99percentile)를 적용하여 고농도 계급 빈도 분포를 구체화 하였다.

#### 라. 대기오염 측정값의 유효자리수

대기오염 측정값의 유효자리수를 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>는 0.001 ppm, CO는 0.1 ppm으로 한다. 단, 유효자리수 다음(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>는 소숫점 4째자리, CO는 소숫점 2째자리)에서 반올림 하였다.

### 3.2.2. 오존 지수 산정

AOT40과 SUM06 지수값의 산정은 1-hr 평균오존 농도값을 사용하였으며 지수 선정 대상 기간은 식물의 성장기간을 고려하여 4월에서 9월까지이며 이 기간 동안 낮 시간대인 09시부터 15시까지를 오존 농도 자료에 대하여 다음의 식으로 산출하였다.

$$AOT40 = \sum_{i=1}^n ([O_3] - 40)_i \text{ for } [O_3] > 40ppb$$

$$SUM06 = \sum_{i=1}^n [O_3]_i \text{ for } [O_3] \geq 60ppb$$

### 3.2.3. 평균상대표준편차(오존 청정도 지수)산정

일본에서 사용되어지는 오존의 청정도지수의 산정에는 1-hr 평균 오존 농도값을 기준으로 다음의 식으로 산출하였다.

$$Ors = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{j=1}^N \left(\frac{S}{M}\right)$$

Ors : 평균 상대 표준편차      N : 측정일수

S : 일별 표준편차      M : 일평균

### 3.2.4 기상

측정기간동안의 기상자료는 제주지방 기상청의 각 지역별(이도, 고산, 동홍)로 제공되는 시간별 자료를 이용하였다. 다만 천아오름에서는 직접 AWS(Automatic Weather System)를 설치하여 자료를 수집하였다.

수집된 기상 데이터는 강우, 습도, 풍향, 풍속, 기온, 일사량이며, 기상자료의 데이터 통계처리는 다음과 같은 방법을 이용하였다.

#### 가. 강우량 및 강우일

4개 지점 AWS의 시간자료에서 0.1mm이상의 강우량을 이용하여 일 합계를 구한 후 월 강우량, 계절 강우량, 연 강우량을 구하였다.

강우일은 일 강우량이 0.1mm 이상인 날을 기준으로 선정하였다.



나. 바람(풍속)

AWS의 시간자료를 이용하여 일평균, 월평균, 계절 평균, 연평균을 구하였다.  
무풍(정온)은 0.5m/s 이하의 풍속으로 정의 하였다.

다. 일사량 및 최고기온

AWS시간자료에서 그날의 최고치를 구한 후 일별로 평균하여 월, 계절, 연의 값을 구하였다.

라. 일교차( $\Delta T$ )

각 날의 최고기온과 최저기온의 차이를 이용하여 구하였다.



## IV. 결과 및 고찰

### 4.1. 대기질의 시·공간적 분포특성

#### 4.1.1. 기상 및 연변화

특정 지역의 대기오염도를 지배하는 요인중에서 오염원을 제외하고 가장 영향을 주는 요소는 기상인자로 알려져 있다(나진균, 1985; 박일수, 1991).

제주지역의 기상 특성을 살펴보기 위해 최근 4년간의 기상요소의 측정결과를 Table 5에 정리했다. 표에서 도시지역인 이도동과 동홍동 그리고 전원지역인 고산리와 천아오름의 기상을 비교해 보면 도시지역에서는 전원지역에 비해 기온과 습도가 높음을 알 수 있다. 물론 이는 지리적으로 전원지역이 해안가와 고지대 산림속에 위치한 영향이 크기 때문이라고 생각된다. 일교차를 보면 도심지역에 비해 천아오름 지역이 큼을 알 수 있으며 해안가에 위치하여 해양의 영향을 직접적으로 받고 있는 고산리에서 가장 낮은 일교차를 보였다. 강수량에 있어서도 해발고도가 낮은 도시지역과 고산리에 비해 해발 700m 중산간 지역에 위치한 천아오름 지역에서 강수량이 많음을 알 수 있다.

특이한 점은 2003년도에 제주전역에 강수량이 크게 증가하였음을 볼 수 있다. 일사량의 경우에도 제주시 지역에 비해 천아오름과 고산리에서 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 5. The mean values of meteorological parameters in Jeju areas

	Rainfall amount (mm)	Temp. (°C)	$\Delta T^*$ (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Max. Solar Rad. (W/m <sup>2</sup> )
Ido						
2000	1189.4	15.7	6.1	3.4	66.2	-
2001	1388.6	16.1	6.0	3.2	65.0	564.6
2002	1876.1	15.7	5.6	2.0	67.8	554.3
2003	2083.7	16.8	6.2	1.9	73.1	587.7
Donghong						
2000	1368.5	17.2	6.4	3.0	67.2	-
2001	1782.1	17.4	6.4	3.3	66.4	-
2002	2049.2	17.3	6.5	1.8	67.8	-
2003	2329.9	18.4	6.4	1.7	69.8	-
Gosan						
2000	1013.6	15.2	5.6	7.2	72.7	-
2001	1113.7	15.6	5.9	7.3	71.8	651.9
2002	1236.8	15.3	5.8	1.9	73.8	649.4
2003	1553.2	16.4	5.6	1.9	77.3	603.3
Chuna						
2003	2718.4	11.8	8.6	2.0	78.0	642.0

\* : diurnal range of temperature.

Table 6는 측정지점별로 1시간 평균농도 자료를 기준으로 각 가스상 오염물질의 연평균(annual mean)과 표준편차(standard deviation) 그리고 데이터 결측율을 도시지역과 전원지역으로 구분하여 정리한 것이다. Table 4에서 보면 2001년 고산에서의 관측은 1월부터 5월까지 측정소의 가동이 정상적으로 이루어지지 못해 연간 결측율이 25%에 달하는 것으로 나타났다. 따라서 연간 대기질 특성을 파악하는데 무리가 있기는 하지만 그 경향성이나 평균농도에서는 과거의 수준과 거의 비슷할 뿐 아니라 변동경향도 크게 다르지 않았기 때문에 평균치를 그대로 인정하였다.

O<sub>3</sub>의 경우 연평균 농도를 살펴보면 2003년 고산리에서의 오존농도가 과거에 비해 크게 낮아졌음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 오존의 연평균 농도를 보면 비록 지역별 평균화 시간에 차이가 있지만, 고산리, 천아오름, 동홍동, 이도동 순으로 나타나고 있다. 연평균 오존농도의 수준은 제주 전역을 대상으로 29.5~38.5 ppb 수준으로서 이는 2002년 연평균 농도를 기준으로 서울 14 ppb, 부산 24 ppb, 울산 21 ppb, 광양 28 ppb에 비해 크게 높은 수준임을 알 수 있다(환경부, 2002).

O<sub>3</sub>을 제외한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 및 CO는 모두 도시지역인 이도동과 동홍동이 전원지역인 고산리와 천아오름에 비해 높게 나타나고 있다. 특히 NO<sub>2</sub>는 이도동에서 높게 나타남과 동시에 표준편차도 큼을 알 수 있으며 2003년에 들어서 도시지역인 이도동에서 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 과거에 비해 크게 농도가 낮아진 수준을 나타냈다.

Table 6. Yearly variation of gaseous air pollutant in Jeju area

year	Urban area						Rural area												
	Ido			Donghong*			Gosan			Chuna**									
	annual mean	std. dev.	Missing ratio	annual mean	std. dev.	Missing ratio	annual mean	std. dev.	Missing ratio	annual mean	std. dev.	Missing ratio							
O <sub>3</sub>	2000	27.2	12.0	3.0	43.9	10.4	8.9	41.5	10.2	31.8 <sup>1)</sup>	41.3	11.2	5.2	27.3	7.8	13.0	35.3	12.4	4.7
	2001	30.6	12.1	2.6	31.8	14.0	17.4	27.3	7.8	9.0	38.5	9.9	9.0	35.3	12.4	4.7			
	2002	28.4	10.4	0.4	35.9	13.9	0.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	16.9	1.9	1.2	5.2			
	2003	31.6	12.5	0.5	33.9	14.0	9.0	8.7	8.7	8.7	1.2	2.6	11.7	1.2	1.2	5.2			
Average	2000	3.3	2.0	16.5	2.3	2.3	3.1	3.8	2.6	11.7	3.8	2.6	11.7	1.9	1.2	5.2			
	2001	4.2	2.5	4.6	2.3	2.3	3.9	4.2	2.4	45.6 <sup>1)</sup>	4.2	2.4	45.6 <sup>1)</sup>	1.9	1.2	5.2			
	2002	3.9	2.3	0.2	7.0	3.9	16.3	4.0	2.8	4.1	4.0	2.8	4.1	1.9	1.2	5.2			
	2003	2.6	1.6	0.8	6.9	3.0	2.8	4.6	3.1	13.0	4.6	3.1	13.0	1.9	1.2	5.2			
Average	2000	3.5	2.1	5.5	7.0	3.5	9.5	4.2	2.7	9.6	4.2	2.7	9.6	1.9	1.2	5.2			
	2001	24.0	13.7	3.1	7.0	3.5	9.5	1.7	1.0	9.4	1.7	1.0	9.4	2.0	1.3	30.5			
	2002	22.1	13.5	3.9	3.4	1.4	16.3	4.1	1.2	31.5 <sup>1)</sup>	4.1	1.2	31.5 <sup>1)</sup>	2.0	1.3	30.5			
	2003	19.8	10.7	0.2	4.1	1.4	1.0	3.7	1.3	4.1	3.7	1.3	4.1	2.0	1.3	30.5			
Average	2000	2.7	1.6	4.7	4.1	1.2	8.6	3.4	1.6	9.5	3.4	1.6	9.5	2.8	2.0	42.4			
	2001	5.3	4.0	6.0	3.8	1.3	8.6	3.4	1.6	9.5	3.4	1.6	9.5	2.8	2.0	42.4			
	2002	6.0	2.2	0.2	4.1	1.2	1.0	4.0	2.9	15.1	4.0	2.9	15.1	2.8	2.0	42.4			
	2003	5.1	1.9	1.7	3.8	1.3	8.6	3.4	1.6	9.5	3.4	1.6	9.5	2.8	2.0	42.4			
Average	2000	4.8	2.4	3.1	3.8	1.3	8.6	3.4	1.6	9.5	3.4	1.6	9.5	2.8	2.0	42.4			

The data for year 2003 in this table are included only Jan. ~ Nov.

\* Measurement is started on March, 2003.

\*\* Measurement is started on Jan., 2003.

1) Data from Jan to May, 2001 are missing.

#### 4.1.2. 월 변화

##### 가. O<sub>3</sub>의 변동

Fig. 1은 2000년부터 2003년 11월까지 월평균 O<sub>3</sub> 농도의 변화를 나타낸 것이다. 제주지역을 통틀어 오존농도의 월 변화를 보면 전반적으로 봄철과 이른 여름철 그리고 가을철에 전반적으로 높고 7, 8월과 12월경에 낮아지는 경향이다. 봄철에 오존 농도가 높게 나오는 현상은 일반적으로 봄에 북위 30~35°에서 제트기류(jet stream)의 영향이 가장 커서 성층권의 오존 농도가 대류권으로 혼입되기 때문으로 알려져 있다(Thompson, 1994). Sunwoo 등(1994)은 성층권 오존 유입의 영향으로 인해 일본에서 해발고도가 높은 고산지역에서 O<sub>3</sub> 월평균농도가 3, 4월에 각각 약 50~60 ppb 수준인 것으로 보고했으며 지표 오존의 계절적 변동 형태는 봄철은 물론이고 가을철 상승이 나타나는 bi-modal형태로 제시하였으며, 가을철 상승은 가을철에 오존이 풍부한 대륙성 기단이 유출되기 때문이라고 하였다. Ogawa와 Miyata(1985), Tsurata 등(1987), Sunwoo 등(1994) 등의 보고에 의하면 일본의 외만섬에서 관측된 오존은 봄철 최고와 여름철 최저를 보이는 것으로 나타났다. 이들은 이런 현상의 원인으로서는 성층권 오존의 침투 때문으로 파악하고 있으며, 여름철 최저는 해양성 기단의 유입이 많은 경우에 일본 전역에 걸쳐 오존농도는 20 ppb이하 수준으로 나타난다고 했다. 또한 1987년 3, 4월에 대서양에서 선박을 이용하여 측정시에 북위 30~35°에서의 O<sub>3</sub>농도가 약 55 ppb 수준으로 보고하였다(Thompson, 1994). 가을철의 농도가 높은 것은 여름에 비하여 강우가 적고 겨울에 비하여 일사량이 풍부하기 때문으로 생각되며(신찬기 등, 1992), 또한 북서 아시아에서 발생하여 인위적인 배출원이 밀집된 아시아 동북 지역을 통과한 대륙성 기단의 오존의 농도가 높으므로 우리나라 전역이 이 기단의 영향권에 놓이기 때문으로 생각된다(Akimoto 등, 1996). 겨울철에 오존 농도가 낮아지는 이유는 기온이 낮고 일사량이 작으며 풍속이 강하여 오존의 생성 및 축적이 거의 일어나지 않기 때문으로 생각되며 여름철에는 7, 8월에 많은 강수로 인한 일사량 감소의 영향으로 보인다(오인보와 김유근, 2002; 전병일 등, 1999).

도시지역인 이도동, 동홍동 그리고 해안지역인 고산리에서 측정된 오존의 월

별 변동 상황은 비슷한 형태를 보인다. 도시지역에서는 도시규모가 작은 동홍동이 오히려 도시 규모가 큰 이도동 보다 높게 나타나고 있으며 삼림지역에 위치한 천아오름의 경우에는 측정기간이 짧아서 계절 경향을 단정할 수 없으나 여름철에 감소하는 형태를 보인다. 그리고 과거에 가장 농도가 높게 나타난 고산리에서 2002년 11월 이후에는 농도 수준이 크게 낮아졌으나 월별 변동형태는 과거와 비슷한 것으로 나타났다. 이처럼 고산리에서 오존농도 관측치가 크게 낮아진 원인을 현재로서는 구체적으로 파악 할 수가 없다. 인근 지역의 배출원 및 기상 요소에서 강수량이 2003년에 증가 된 것 외에는 예년과 큰 차이점을 찾을 수가 없다.

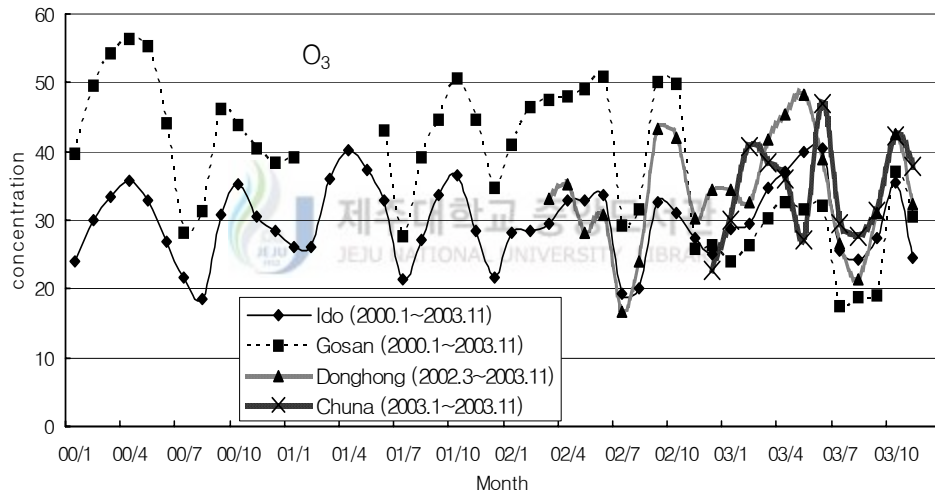


Fig. 2. Monthly variation of O<sub>3</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 나. SO<sub>2</sub>의 변동

Fig. 2는 2000년부터 2003년까지 4년간의 월별 SO<sub>2</sub>의 평균 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역인 이도동에서의 농도 수준이 가장 높았을 뿐 아니라 월별 변동도 아주 큰 것을 알 수 있었고, 동홍동, 천아오름, 고산의 순으로 낮아짐을 볼 수 있다.

도시지역인 이도동을 보면 경우를 보면 겨울철에 SO<sub>2</sub> 농도가 증가하고 여름철에 감소함을 보이는데, 그 원인은 겨울에 난방연료의 사용증가에 따른 SO<sub>2</sub> 배

출량의 증가 및 기온의 하강으로 인하여 대기 혼합고가 낮아져 오염물질이 지표에 쌓이기 때문으로 생각되며(Tsuyoshi, 1970; 소선섭 등, 1985; 소선섭 등, 1996) 여름에 감소는 난방연료의 사용감소에 따른 SO<sub>2</sub> 배출량의 감소 및 기온상승에 따른 대기혼합고의 상승과 활발한 대류현상으로 SO<sub>2</sub>의 확산이 양호함과 동시에, 많은 강우량에 인한 세정효과가 나타나기 때문으로 판단된다(신찬기 등, 1992).

해안가에 위치한 고산리 지역도 도시지역의 패턴을 따라가고 있었으며 산림 지역에 위치한 천아오름은 비록 측정기간은 짧지만, 월별 변동폭이 크지 않으나 여름철에 들어서 낮아지는 추세를 보임을 알 수 있다.

그리고 이도동에서 2002년 여름철 이후부터는 과거의 동일 계절에 비해 크게 농도가 낮아지면서 제주도내 4개 대기질 측정점에서의 SO<sub>2</sub> 농도가 거의 비슷한 수준을 나타내고 있다.

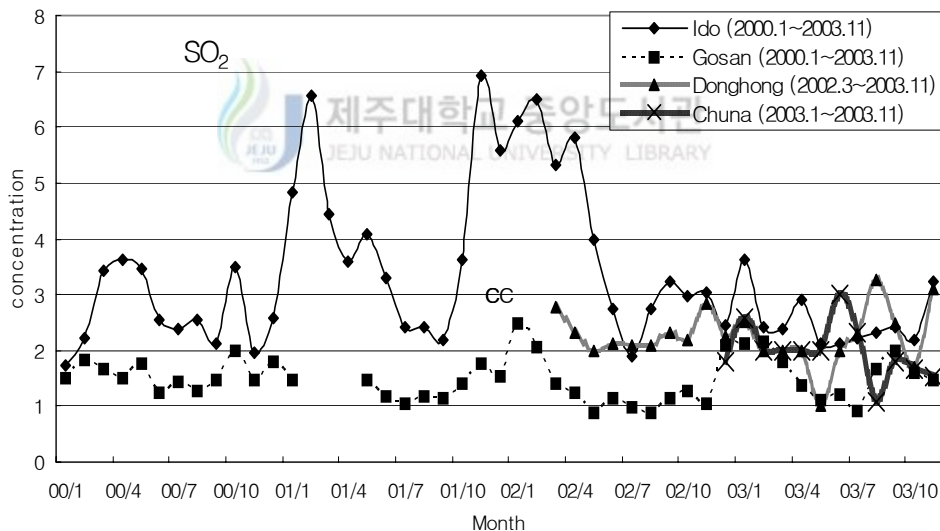


Fig. 3. Monthly variation of SO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 다. NO<sub>2</sub>의 변동

Fig. 3은 제주지역에서 관측된 최근 4년간의 NO<sub>2</sub> 월별 평균농도의 변화를 나타낸 것이다. NO<sub>2</sub> 농도에서는 도시지역인 이도동에서 가장 높았으며 다음으로는 동홍, 고산, 천아 순으로 낮아지는 것을 볼 수 있다. 제주지역에서 도시규모가 가



장 큰 이도동에서는 NO<sub>2</sub> 농도가 타 지점에 비해 훨씬 높을 뿐 아니라 월별 변동 폭도 큰 것을 알 수 있다. 도시지역인 이도동의 NO<sub>2</sub> 월변동 특성을 보면 여름철에 낮은 수준을 보인 후 가을철부터 큰 폭으로 상승하여 이듬해 봄까지 증가된 수준을 보인 후 여름철이 되면서 다시 낮아지는 농도 변동 주기를 보였다. 이는 여름철에 많은 강수량과 기온상승으로 인한 활발한 대류현상으로 사료된다(소선섭 등, 1996). 그렇지만 2002년 가을철에는 농도상승이 과거에 비해 크게 낮아지면서 2003년 봄철까지 낮은 농도 수준을 보였다.

그 외 지역에서는 10 ppb 이하로 낮은 수준을 나타내고 있으며 월변동도 거의 없이 일정한 수준을 보였다.

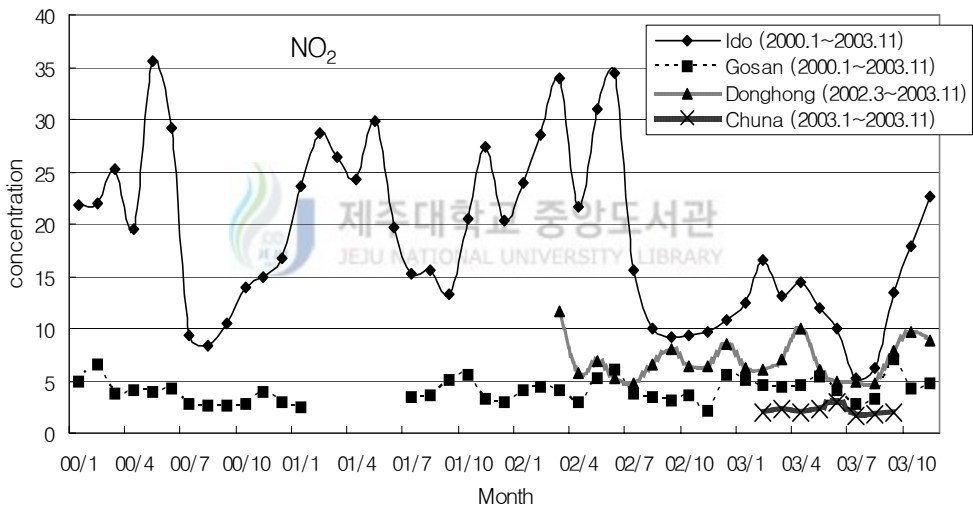


Fig. 4. Monthly variation of NO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 라. CO의 변동

Fig. 4는 제주지역에서 관측된 CO의 월별 평균농도를 각 측정점별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역과 전원지역의 구분 없이 제주지역의 CO 농도는 대체로 0.4 ppm의 수준으로 아주 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 그리고 각 측정점별로 보면 가장 규모가 큰 제주시 도심지역에서의 CO 농도가 타 지점에 비해 비교적 높음을 알 수 있다. 제주 전역의 CO 농도 수준은 북반구 대류권의 CO 배경농도 수준(0.1~0.2 ppm)보다 2배정도 높은 수준이지만 우리나라 대도시 CO

농도수준(0.8~1.4 ppm)에 비교하면 아주 낮은 농도 수준임을 알 수 있다.

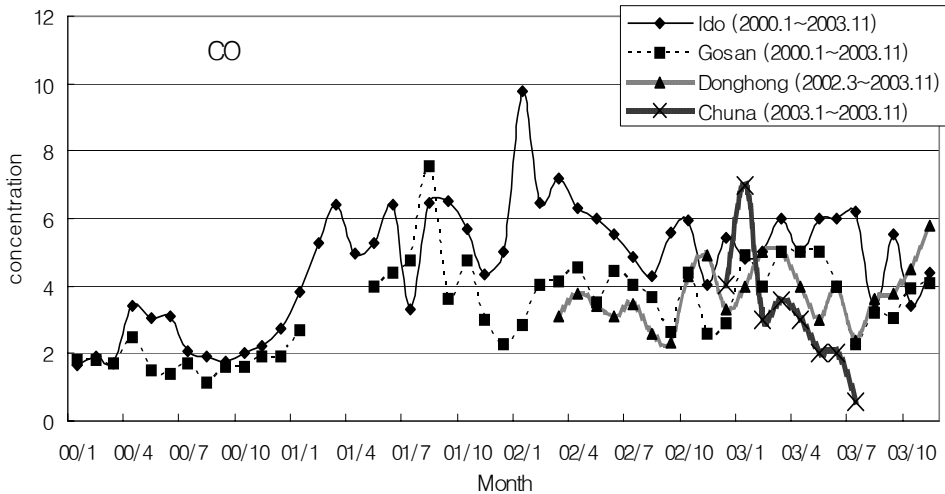


Fig. 5. Monthly variation of CO concentration in Jeju area(unit :  $\times 10\text{ppm}$ ).

앞에서 언급된 대기질 월변동의 결과에서 이도동의 2002년도 후반기부터  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$ 농도가 급격히 낮아지게 된 원인을 파악해 보고자 기상조건 등과 구체적으로 살펴보았다. Fig. 5에는 강우와 상대습도 그리고  $\text{SO}_2$ 와  $\text{NO}_2$  농도의 월 변동을 나타냈다. 그림에서 보면  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$ 의 월별 농도 변동의 패턴이 거의 동일하며, 이 두 물질들의 농도 변동은 강우량의 변동 패턴과 반대의 패턴을 보임을 알 수 있다. 특히 2002년 7월부터 크게 증가된 강우량으로 인해 습도 역시 전년에 비해 10% 이상 높은 수준을 꾸준히 유지되었음을 알 수 있다. 이러한 기상조건으로 인해 2002년 7월과 8월에 많은 강우량으로 인해  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$  농도 수준이 크게 감소된 이후에도 겨울철 및 이듬해 여름철까지 강우량이 지속적으로 많았기 때문에 과거 농도 수준으로 회복이 지연된 것으로 생각된다.

Table 7은 2002년과 2003년의 강우시와 비강우시의 대기오염물질 농도 수준을 비교한 것이다.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ 와 같이 비교적 용해도가 큰 기체인 경우 강우의 세정효과에 의한 습식 침적이 큰 물질인 경우 강우일에 비해 비강우일의 농도가 비교적 높은 값을 보인다. CO의 경우 물에 대한 용해도가 아주 낮아 강우에 의한 세정효과의 영향이 거의 없기 때문에 강우와 비강우시간의 농도차이가 거의

나타나지 않음을 알 수 있다.  $O_3$ 은 강우 현상시의 일사량 감소에 의해 비강우시의 농도가 강우시에 비해 약간 높게 나타났다. 오존의 경우 용해도가 낮아 강우에 의한 직접적인 Wash-out 효과는 적을 것으로 기대되나 강수에 동반된 일사량의 감소는 오존의 생성이 억제 될 것으로 생각된다(홍민선 등, 1992). 수중기 존재하에  $SO_2$ 와  $NO_2$ 는 OH Radical과 반응하여 결국에는 황산과 질산으로 전환되어 소멸된다. 특히 해안지역에서는  $NO_2$ 가 해염입자와 반응하여 질산염을 생성하면서 대기중에서 제거된다.

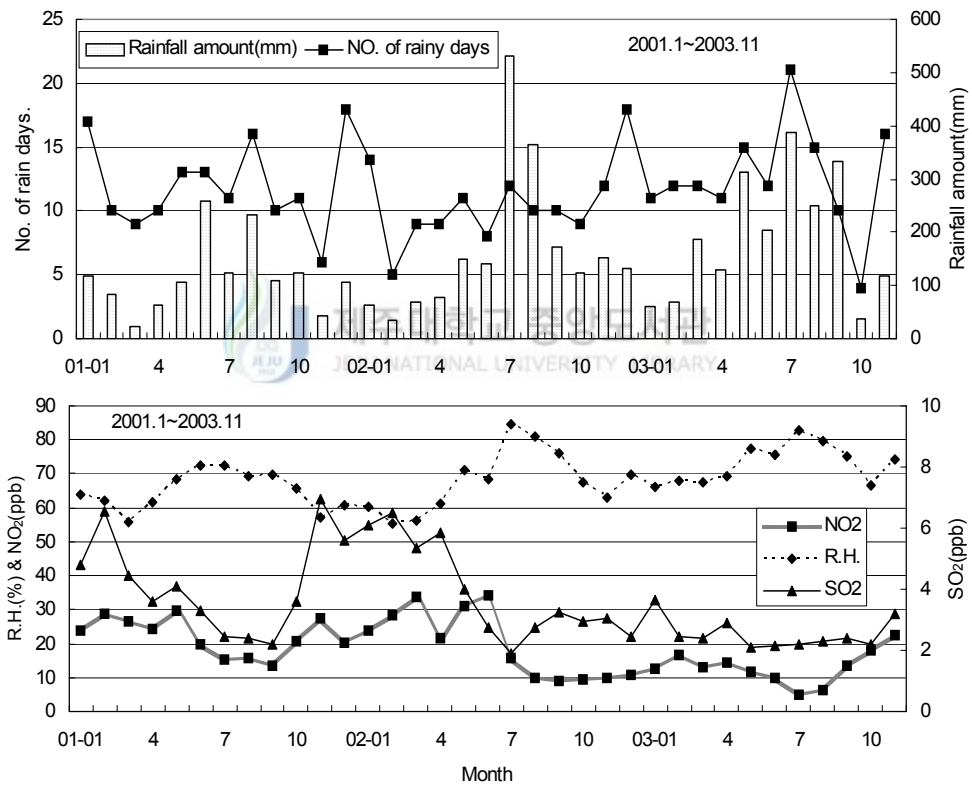


Fig. 6. Monthly meteorological parameters and  $SO_2$ ,  $NO_2$  concentrations.

Table 7. Comparison of air pollutant concentrations between with and without the precipitation phenomena in Jeju area

Pollutant	Station	Year	Concentration (ppb)			Ratio of concentration*	
			Rain days	Non-rain days	mean		
SO <sub>2</sub>	Ido	2002	3.23	4.35	3.96	1.35	
		2003	2.22	2.76	2.54	1.25	
	Donghong	2002	2.09	2.56	2.37	1.23	
		2003	2.13	2.41	2.30	1.13	
	Gosan	2002	1.06	1.36	1.26	1.29	
		2003	1.24	1.79	1.60	1.45	
NO <sub>2</sub>	Ido	2002	17.25	21.14	19.79	1.23	
		2003	11.17	14.36	13.03	1.29	
	Donghong	2002	6.87	7.49	7.24	1.09	
		2003	4.33	7.29	6.78	1.68	
	Gosan	2002	3.86	3.87	3.87	1.00	
		2003	4.18	4.87	4.61	1.17	
	O <sub>3</sub>	Ido	2002	33.20	36.74	35.51	1.11
			2003	36.81	41.84	39.71	1.14
Donghong		2002	37.89	44.31	40.20	1.17	
		2003	37.65	48.34	44.08	1.28	
Gosan		2002	41.61	48.59	46.23	1.17	
		2003	28.78	33.96	32.09	1.18	
CO	Ido	2002	6.72	7.21	7.04	1.07	
		2003	6.30	5.83	5.99	0.93	
	Donghong	2002	4.31	4.11	4.19	0.95	
		2003	6.03	4.89	4.67	0.81	
	Gosan	2002	4.19	4.24	4.22	1.01	
		2003	4.40	4.48	4.46	1.02	

\* : [Non-rain day]/[Rain day]

#### 4.1.3. 일변화

제주도의 지역별 대기중 O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>의 일변화를 알아보기 위하여 이도동, 고산리, 동홍동, 천아오름 지역의 2000년 3월부터 2003년 11월까지의 측정치를

계절별로 산술 평균하여 분석하였다.

#### 가. O<sub>3</sub>

우리나라의 경우 O<sub>3</sub>은 봄철에 가장 높고 여름에는 빈번한 강우에 의한 일사량 감소 때문에 낮은 평균값을 보이다가 가을에 다시 상승하는 2차 상승구조를 가지는 계절적 특성을 지닌다고 알려져 있다(김영성, 1996).

Fig. 6.은 계절별 O<sub>3</sub>농도의 일변화 패턴을 지역별로 나타낸 것이다. 도시지역인 이도동과 동홍동은 계절에 관계없이 거의 비슷한 일변화 형태를 보임을 알 수 있다. 그 변동 특징을 보면 오전 7시와 8시 사이에 O<sub>3</sub> 농도가 저하되고 그 이후 낮 시간 동안에는 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이처럼 아침시간대에 감소하는 현상은 지표 역전에 의하여 상부로부터 O<sub>3</sub> 공급이 제한되는 상황에서 지표부근 O<sub>3</sub>이 NO와 NO<sub>2</sub> 산화에 의해 소모되기 때문이며(오광중 등, 1998), 9시 이후 낮 시간대에 O<sub>3</sub> 농도가 급상승하는 이유는 아침에 발달하는 혼합층내의 대류에 의해 하층의 대기와 고농도 O<sub>3</sub>을 포함한 상부의 대기와의 연직혼합에 의해 상부 공기의 혼입에 의한 O<sub>3</sub> 농도의 증가와 인위적으로 생성된 NO, HC 등에 의한 광화학반응이 활발해지기 때문으로 해석된다. 그리고 저녁 6시 이후는 지표 부근에서 O<sub>3</sub> 이외에 일반적인 대기오염물질의 농도는 증가하지만, O<sub>3</sub>은 증가된 NO의 산화, 그리고 O<sub>3</sub> 자체의 지표면 건성 침적으로 인하여 지표 농도는 빠르게 감소한다고 알려져 있다(Seto, 1992).

전원지역인 천아오름과 고산리 지역은 계절에 관계없이 일 변동 폭이 도시지역에 비해 작지만 오후시간대에 증가하는 경향을 보이면서 일 최저값은 도시지역에 비해 높게 나타나고 있다. 이는 오존을 소멸 시킬 수 있는 대기오염물질의 농도가 너무 낮아서 야간에 O<sub>3</sub>의 소멸이 거의 일어나지 않는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다(이정주 등, 2000). 서울, 광주 및 부산과 같은 대도시에서의 오염물질의 일 변화 양상을 보면 일변동 폭이 아주 큰 반면 청정한 고산지대에서는 일변동 폭이 계절에 관계없이 아주 작게 나타난다고 보고한 바 있다(서명석, 1995).

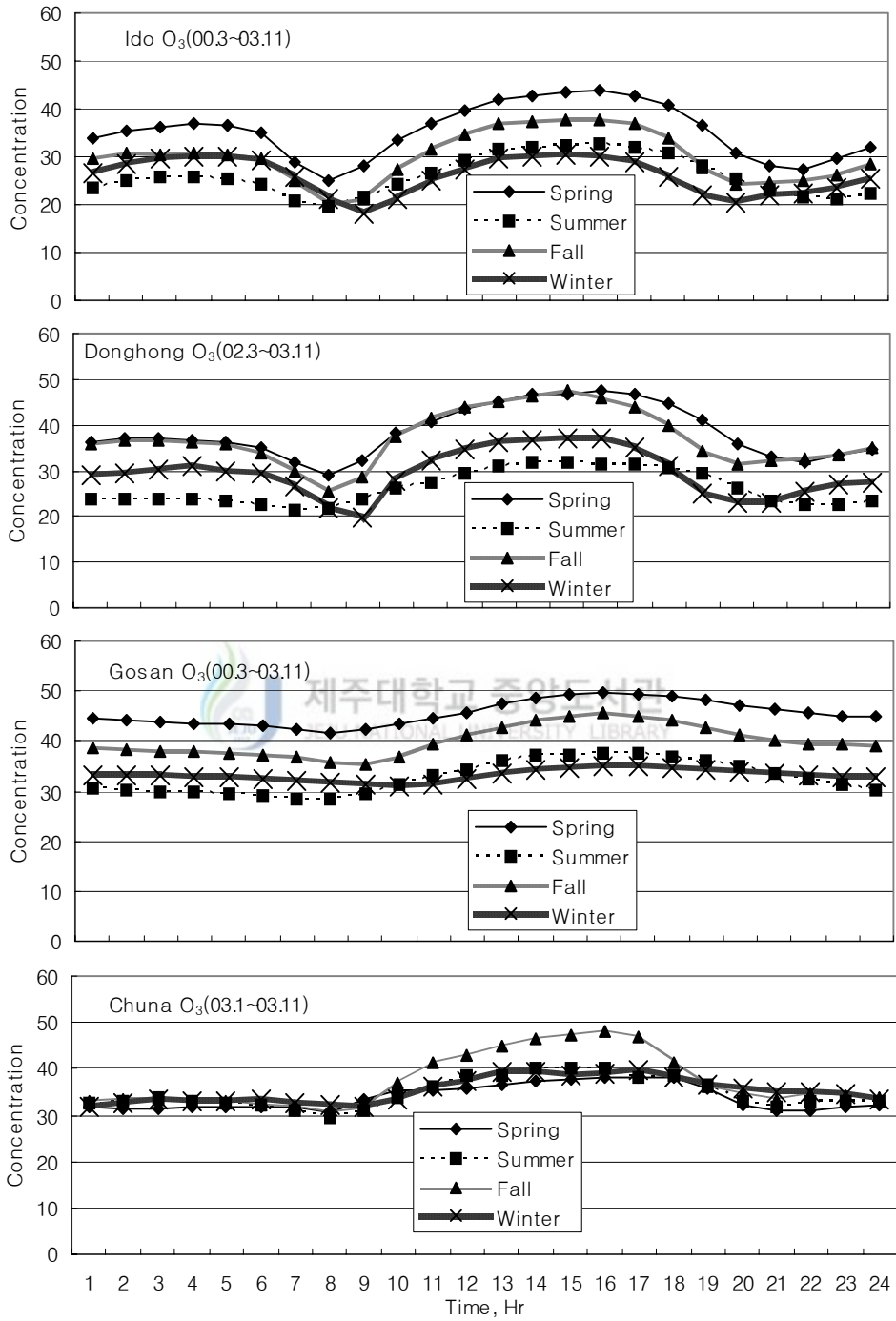


Fig. 7. Diurnal variation of O<sub>3</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

또한, 도시지역인 이도동과 동홍동은 새벽녘에 다시 농도가 증가하는 경향을 보이는 반면 전원지역인 고산리와 천아오름에서 이런경향은 거의 나타나지 않았다. 일반적으로 야간의 재상승은 야간의 복사냉각 및 풍속의 약화로 인하여 혼합고가 낮아지기 때문인 것으로 알려져 있는데(정용승과 정재섭, 1991), 고산리와 천아오름에서 새벽에 상승하지 않는 이유는 해안가와 비교적 높은 산악지대의 삼림속에 위치함으로 인해 야간에 일반풍의 영향을 지속적으로 받고 있기 때문에 야간 복사 냉각에 의한 효과가 거의 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

#### 나. SO<sub>2</sub>

Fig. 7.은 계절에 따른 시간별 SO<sub>2</sub> 농도 변화를 측정소별로 나타냈다. 먼저 전 측정소에서 SO<sub>2</sub>농도는 전반적으로 아주 낮은 수준을 유지하며 제주지역 대기환경기준(연평균 : 0.01ppm)을 충분히 만족하고 있는 상태이다. 그중에서 지역별로 보면 도시규모가 큰 제주시 이도동에서의 SO<sub>2</sub> 농도가 가장 높았으며 일 변동의 계절적 차이가 타 측정점에 비해 큼을 알 수 있었다. 그리고 아침 9시 전후와 오후 18시 이후에 농도가 증가함을 볼 수 있는데, 아침시간에서의 농도 증가는 자동차등의 오염물의 배출량이 늘어남과 동시에 대기가 안정상태에서 완전히 해소하기 직전의 오염물의 정체가 지속된 시간이기 때문으로 판단되며, 오전 10시 이후의 농도 감소는 기온 상승에 의한 대기의 불안정과 풍속의 증가가 중요한 원인이 되어 대류에 의한 확산 현상이 잘 일어나 오염물질이 희석되기 때문이다(전병일 등, 1994). 그리고 퇴근시간대에 증가는 차량운행의 증가와 가정의 난방을 위한 연료연소 및 아침과 같은 기상학적인 요인 때문으로 해석된다(장광미 등, 1996). 이러한 경향은 도시지역인 동홍동에서도 볼 수 있는데, 비록 농도 수준에서는 이도동에 비해 낮지만 변화 경향은 이도동과 흡사한 양상을 보임을 알 수 있다.

인근에 국지 오염원의 영향이 거의 없는 고산리와 천아오름에서의 SO<sub>2</sub> 변동 형태는 도시지역과 다소 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 특히 고산리에서의 일 변동을 보면 시간대별 변동이 거의 없이 일정한 수준을 보임을 알 수 있다. 또한 천아오름에서는 낮 시간대에 다소 증가하는 경향을 보이지만 그 외 시간대에서는 거의 일정한 수준을 나타내고 있다. 고산리와 천아오름에서는 국지 배출원이

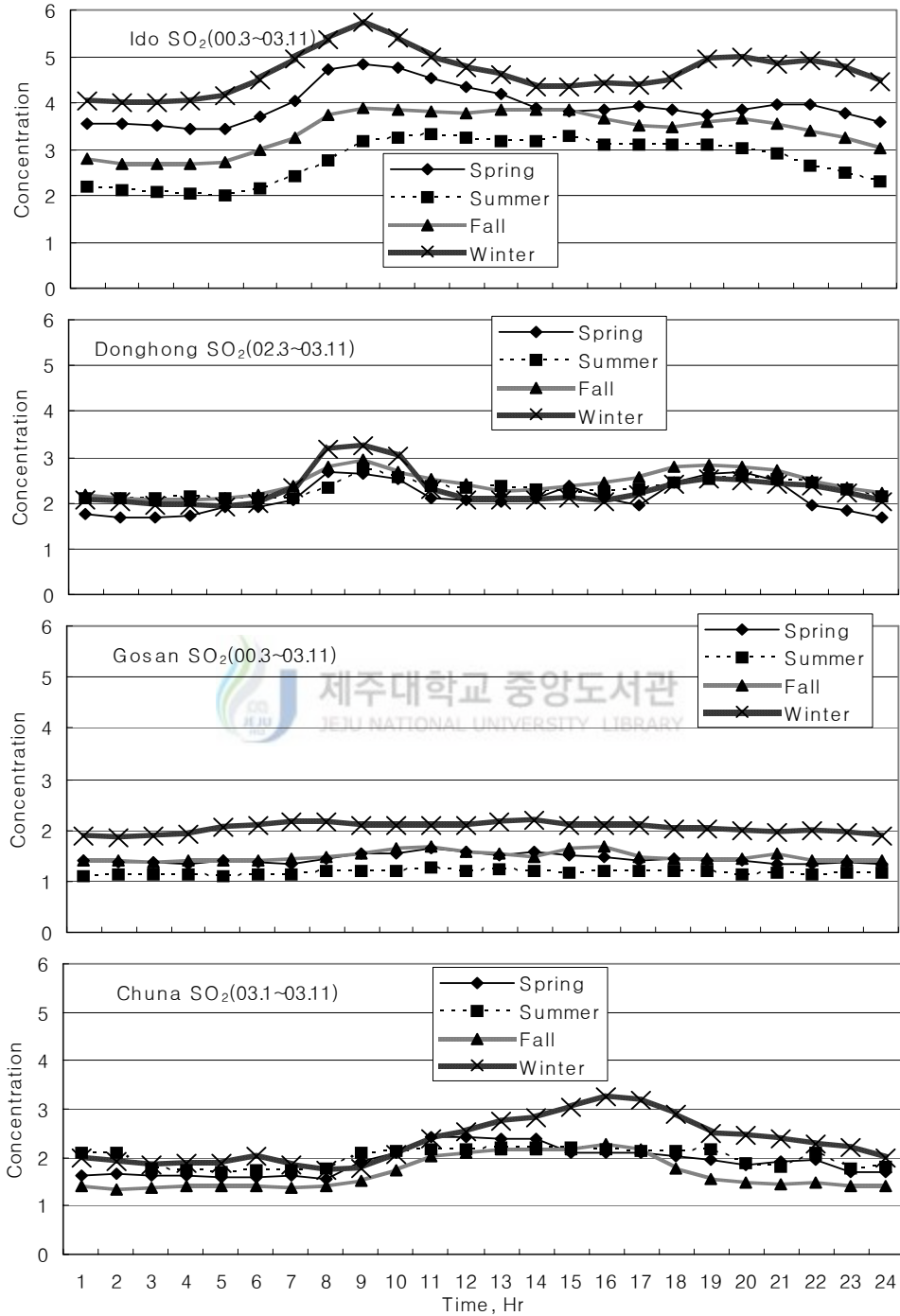


Fig. 8. Diurnal variation of SO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).



존재하지 않기 때문에 지역의 대기질은 주로 일반풍의 공기질에 좌우될 것이다. 따라서 해풍의 영향이 직접적으로 영향을 미치는 고산리는 하루 종일 거의 일정한 수준을 보이지만 천아오름에서는 측정소의 지리적 위치로 인해 북 동쪽에 위치한 제주시를 거쳐 바람이 유입되기 때문에 주간 농도가 다소 증가하는 것으로 판단된다. 천아오름에서 주간에 SO<sub>2</sub> 농도가 증가 하지만 결코 제주시 주간 SO<sub>2</sub> 농도에는 훨씬 미치지 못함을 알 수 있다.

제주지역 내 4개 지역에서는 공통적으로 SO<sub>2</sub> 농도가 겨울철이 가장 높으면서 시간에 따른 변화폭이 다소 크며, 여름철은 오염도가 가장 낮고 시간에 따른 변화폭이 작게 나타나고 있었다. 이와 같이 겨울철에 SO<sub>2</sub> 오염도가 높게 나타나는 것은 난방연료의 사용증가 등 국지적 영향이 다른 계절에 비해 크기 때문으로 생각된다.

반면에 여름철에 낮은 오염도와 시간에 따른 변화폭이 작은 것은 기온상승과 강수의 두 가지 원인으로 생각 할 수 있다. 전자의 경우는 여름철에는 연료사용량이 겨울에 비해 상대적으로 적을 뿐 아니라 높은 기온으로 혼합고가 상승하고 대류가 활발하여 수직혼합이 원활하기 때문이고, 후자의 경우는 SO<sub>2</sub>는 수용성 기체이기 때문에 여름철의 많은 강수에 의해 SO<sub>2</sub>의 습식침적 효과에 의한 영향이 크기 때문이다(소선섭 등, 1996).

다. NO<sub>2</sub>

Fig. 8.은 계절에 따른 시간대별 NO<sub>2</sub> 농도 변동수준을 측정소별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역에서의 농도수준이 전원지역에 비해 높음을 알 수 있으며 도시지역과 전원지역간에 시간대별 변동형태로 차이가 있음을 알 수 있다.

도시지역에서는 오전 8시경과 19시경에 농도 peak를 지는데 비해 전원지역은 시간대별 변동이 없이 거의 일정한 수준으로 유지됨을 알 수 있다. 도시지역을 보면 peak 농도 수준이 여름철에는 다소 낮는데 비해 나머지 계절은 거의 비슷한 수준을 보임을 알 수 있다. 그런데 전원지역인 고산리와 천아오름에서는 peak가 나타나지 않을 뿐 아니라 계절에 따른 농도 수준도 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 도시지역에서 도시규모가 큰 제주시 이도동에서의 NO<sub>2</sub> 농도 수준이

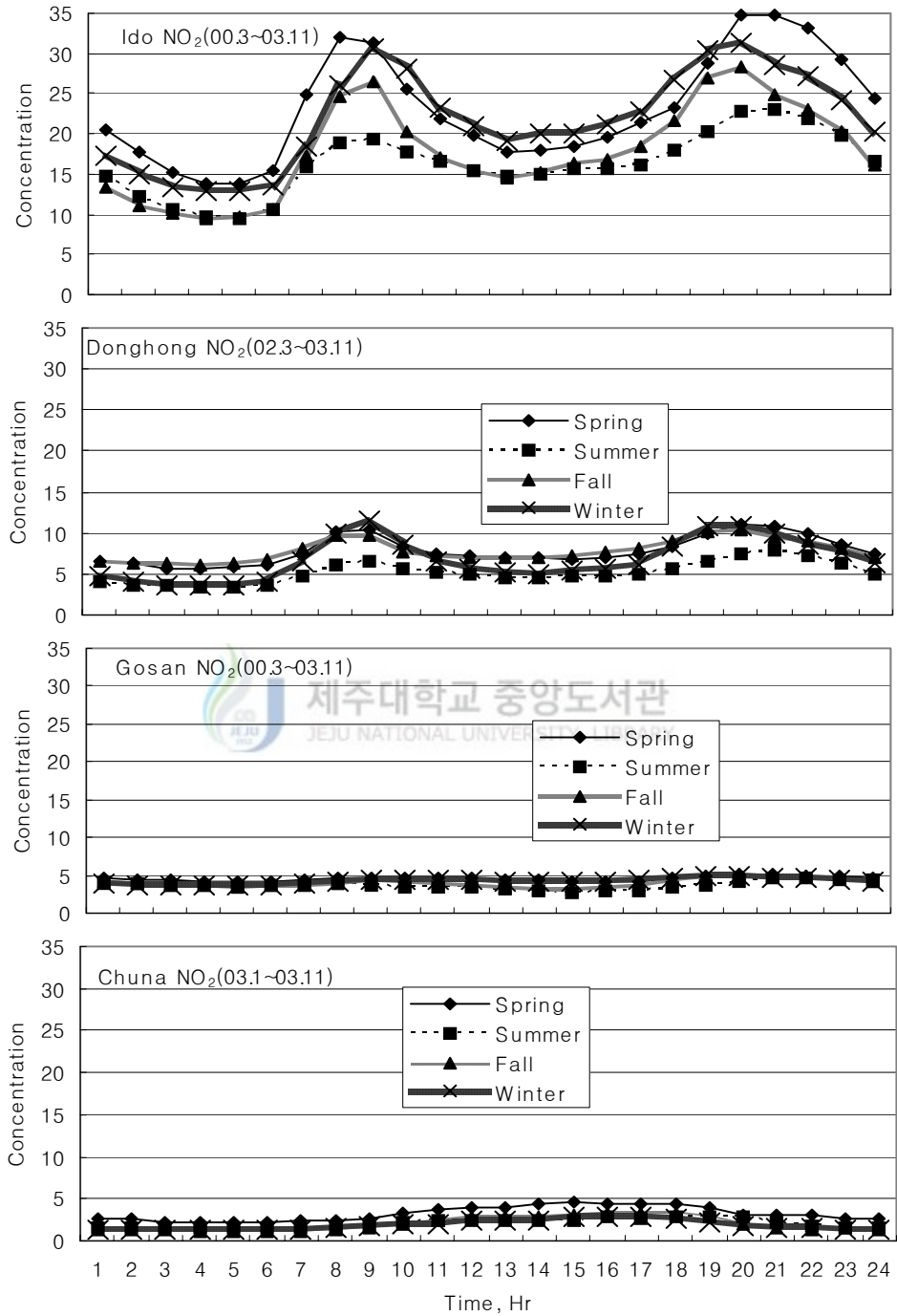


Fig. 9. Diurnal variation of NO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

도시규모가 상대적으로 적은 서귀포시 동홍동에 비해 훨씬 높을 뿐 아니라 일변동 폭도 큼을 알 수 있다.

이도동과 동홍동의 NO<sub>2</sub> 일 변동은 오전 8시경 까지 증가하였다가 이후 감소하여 19시경에 일중 최고치가 나타나게 되며 O<sub>3</sub>의 일 변동 양상과 반대의 경향을 보임을 알 수 있는데 오후의 감소는 출근 시간 이후의 운행감소 및 11시 이후에 햇빛이 강해지면서 NO<sub>2</sub>가 오존에 의해 다시 분해 되어 줄어들기 때문이다(조광명, 1993). 또한 도시지역 특히 이도동에서 O<sub>3</sub>이 이른 새벽녘에 증가하는 경향이 나타남을 볼 수 있는데(Fig. 6 참고) O<sub>3</sub> 농도 상승에 상당하는 NO<sub>2</sub> 농도 감소가 뚜렷하게 나타남도 볼 수 있다.

#### 라. CO

Fig. 8.은 CO의 일변동 특성을 나타낸 그림인데, CO의 일변동 특성은 앞에 NO<sub>2</sub>의 일 변동 특성과 아주 흡사함을 알 수 있다. 다시 말해 도시지역인 이도동과 동홍동은 NO<sub>2</sub> 증가시기에 CO도 증가하여 하루 중 두 번의 peak를 보인데 반해 전원지역인 고산리와 천야오름에서는 일중 변동이 거의 없이 일정한 농도 수준을 보이고 있다.

또한 도시지역에 비해 전원지역의 농도 수준이 낮게 나타남을 알 수 있으며, 도시지역에서도 도시규모가 큰 제주시 이도동이 서귀포시 동홍동에 비해 농도 수준이 높으면서 일 변동폭도 큼을 알 수 있다. 그렇지만 제주도 전역에서 CO의 농도 수준은 아주 낮은 것으로 나타나고 있다.

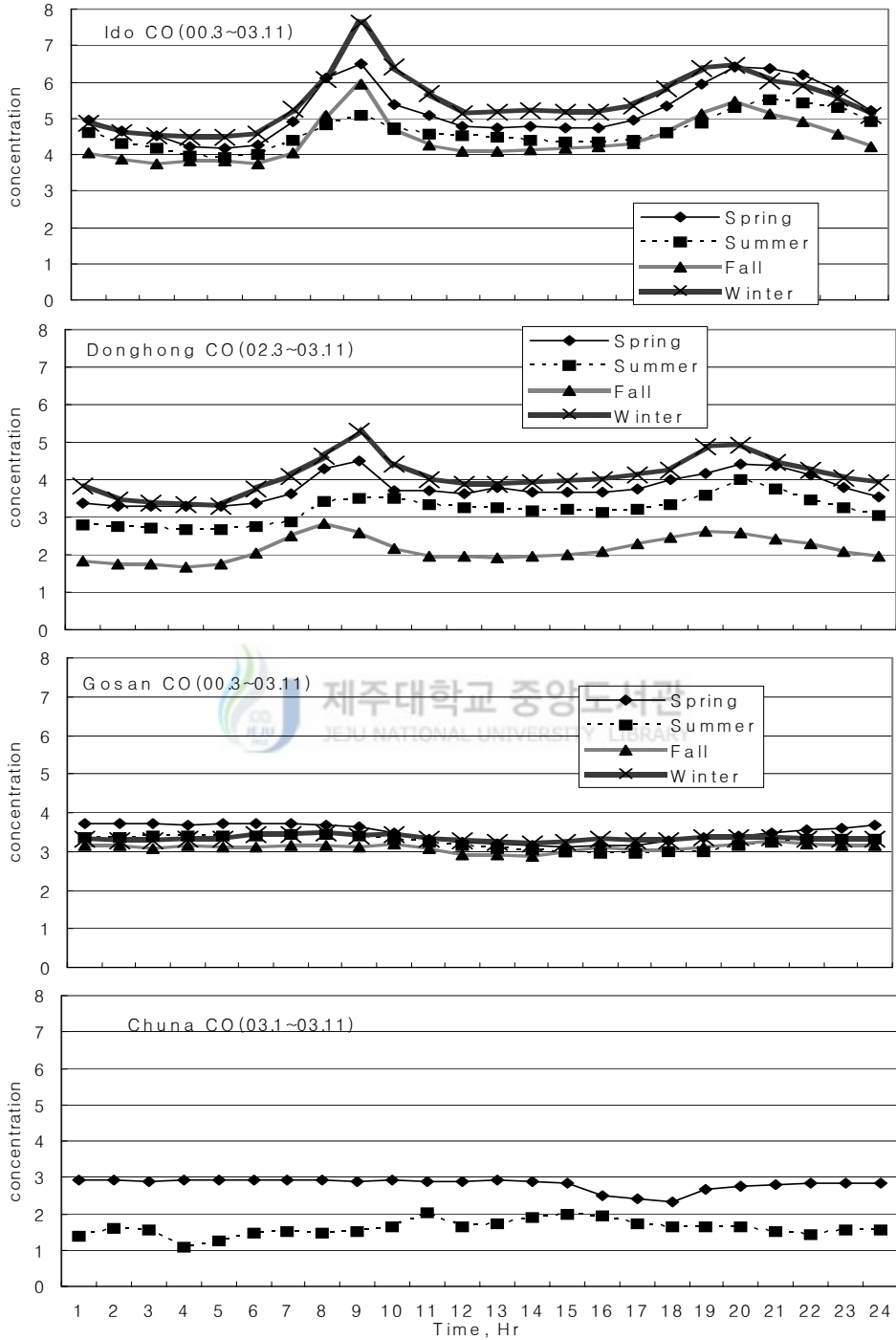


Fig. 10. Diurnal variation of CO concentration in Jeju area(unit :  $\times 10$  ppm).

## 4.2. 대기질 평가

### 4.2.1 환경기준 초과수준

앞에서 살펴본 대기질 변동 특성에서와 같이 1-hr 평균농도를 기준으로 각 오염물질의 환경기준 달성(또는 초과) 여부를 파악하였다. 그 결과에 따르면 O<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub>에서만 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타났다.

#### 가. O<sub>3</sub>

Table 8에는 최근 4년간 제주지역에서 측정된 농도 계급별 오존 출현빈도를 나타냈다. 표에서 보면 제주지역 대기중 오존은 20 ppb 이하의 농도로 출현하는 빈도는 평균 17%이며, 40 ppb이상의 농도에서는 평균 32% 정도로 나타났다. 그리고 도시지역인 이도동과 동홍동은 전원지역인 고산리와 천아오름에 비해 20 ppb 이하의 낮은 농도 수준에서의 빈도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 60 ppb 이상의 농도 수준을 보이는 경우를 보면 비록 2003년도 고산리에서는 출현하지 않았지만, 전반적으로 고산리와 천아오름에서 출현빈도가 도시지역에 비해 높음을 알 수 있다.

도심지역인 이도동과 동홍동을 서로 비교하면 도시규모가 작은 서귀포시 동홍동에서의 고농도 출현빈도가 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. 제주지역 대기 중 O<sub>3</sub> 농도의 출현 빈도는 20~60 ppb 사이에서 평균 78% 수준이지만 도시지역인 이도동과 동홍동에 비해 전원지역인 고산리와 천아오름에서 높은 빈도를 보였다. 제주지역 대기 중 O<sub>3</sub> 농도가 20 ppb에서 60ppb 사이에 가장 빈번하게 출현하는 것은, 우리나라 대도시 지역인 서울지역에서 10 ppb 이하의 온도 출현 빈도가 40~60% 정도인 것과는 큰 차이를 보이지만(유성철 등, 1999), 동북아시아 대륙 배경농도 수준과 유사한 농도 범위이며(Husar, 1998), 또한 세계 청정지역의 전형적인 농도 수준이 20~80 ppb (Fynlason-pitts와 pitts, 1986) 수준인 것과는 유사한 수준이라고

Table 8. The occurrence frequency of 1-hr average ozone concentration in Jeju area during 2000.1 to 2003.11

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

볼 수 있다.

Fig. 10.는 8시간 평균 오존 농도를 기준으로 설정된 대기환경기준(60 ppb)의 초과율을 연도별로 나타냈다. 그리고 Fig. 11.에는 최근 4년 동안의 대기환경초과 일수를 월별로 나타냈다. Fig. 10에서 해안가에 위치하면서 그동안 제주도 지역 대기질을 대표해온 고산리의 O3 출현 특성을 보면, 2002년까지 오존의 대기환경 기준 초과율이 제주지역내 다른 지역보다 월등히 높았다. 2003년에는 극히 미미한 수준을 나타냈다. 그리고 해발 700m의 산림지역에 위치한 천아오름에서 초과율이 대략 10% 수준으로 높은 것으로 파악되었다. 도시지역인 제주시 이도동에

서는 최근 4년간 대기환경기준 초과율에는 변화가 거의 없었으나 서귀포시 동홍동에서의 초과율은 최근 2년간 측정자료에서도 상당히 높은 수준을 보였다. 그렇지만 제주도 전역에 걸쳐 1-hr 평균농도를 기준으로 보면 대기환경기준(100 ppb)을 초과하는 경우는 전혀 발견되지 않았다

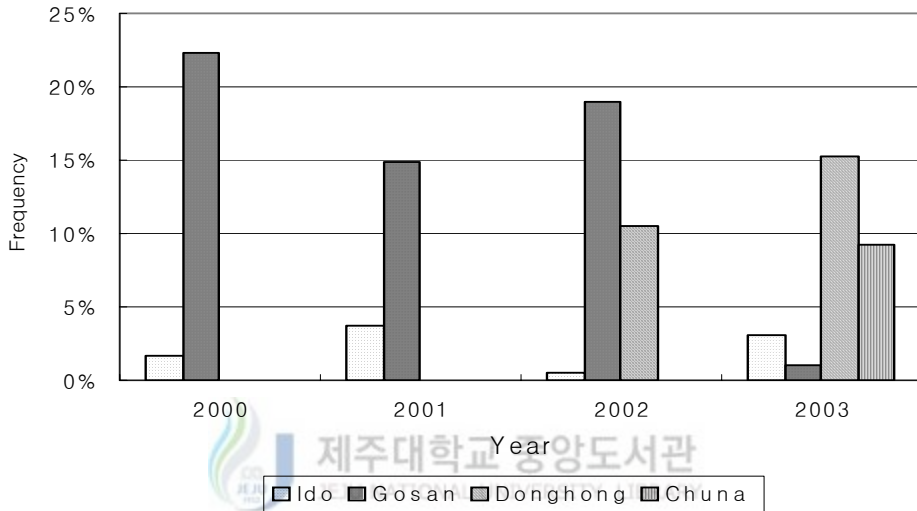


Fig. 11. Annual trend of O<sub>3</sub> exceedance pattern was compared with Jeju area(Ido, Gosan, Donghong, Chuna), 2000.1~2003.11.

Fig. 11에서 최근 4년간의 누적 초과일수를 보면 도시지역과 전원지역에 관계 없이 모두 봄철과 가을철에 집중되고 있음을 알 수 있다. 그리고 도시지역인 동홍동에서의 초과일수가 이도동 지역에서 보다 측정기간이 짧음에도 불구하고 빈번하게 나타남을 알 수 있다. 전원지역인 천아오름에서도 측정기간이 1년 정도 밖에 되지 않음에도 불구하고 초과일수가 6월과 9~10월에 빈번하게 나타남을 알 수 있다.

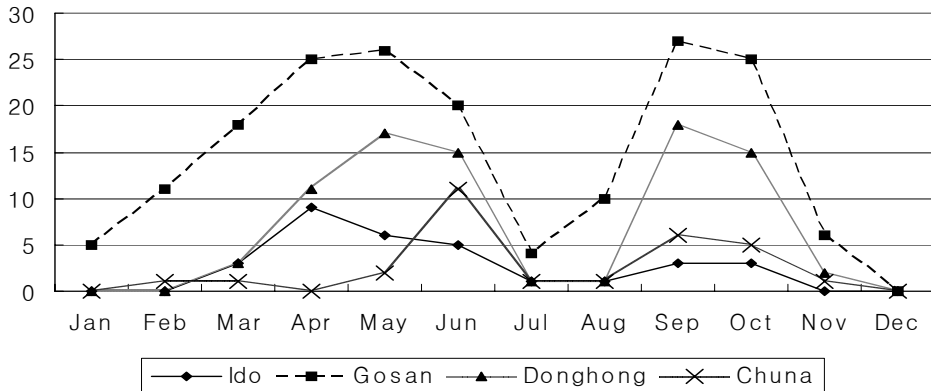


Fig. 12. Cumulative number of days exceed the 8-hr ozone average concentration of 60 ppb in Jeju area from Jan. 2000 to Nov. 2003.

Table. 9에서 계절별로 오존농도가 환경기준 초과경우(excess)와 그렇지 않은 경우(normal)에 대하여 각 오염물질의 평균농도와 기상인자를 정리한 것이다. 표에서 보면 환경기준 초과하는 날에는 도시지역과 전원지역에 관계없이 4개 측정소에서 측정된 모든 기체상 대기오염의 물질들의 농도도 전반적으로 증가하였으며, 일교차, 최고온도, 일사량도 높았고 습도는 낮은 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 고농도 오존이 발생하기 위해서는 일사가 강하고 습도가 낮아야만 광화학 반응이 촉진되므로 가능하다는 사실을 반영한다고 볼 수 있다(김민영 등, 2002). 이런 직접적인 요인 외에도, 최고기온 증가에 따른 혼합고의 상승으로 인해 생물권 상층의 오존이 지표면 부근으로 쉽게 유입될 수 있다는 점도 간과 할 수 없다(윤마병과 정용승, 1995). 일반적으로 오존 농도는 대기 안정도, 풍속, 풍향, 기온, 습도, 일사량, 혼합고 등과 같은 기상요소에 의해 변화될 수 있다. 특히 오존의 농도가 높게 나타날 수 있는 기상조건은 대기가 아주 안정하고, 풍속이 약하며, 기온이 20℃ 이상으로 높고, 습도가 70%이하로 대기가 건조하며, 일사량이 강할 때 등으로 보고 되고 있다(Seigneur와 Saxena, 1985). 국내에서 대기중 오존농도와 기상요소와의 상관관계에 대해 밝혀진 바에 의하면 상관계수를 기준으로 오존농도와 기온사이에서는 0.148, 오존농도와 습도 간에는 -0.402 정도 상관성을 보이는 것으로 보고된 바 있으며(이기원 등, 1993), 오존농도와 일사량은



0.42, 기온과는 0.28, 풍속과는 0.38의 상관성이 있음을 밝힌 바가 있다(정용 등, 1986). 오존농도는 기상요소 및 기타 다른 오염물질들과의 상관관계에서 상관계수가 0.5를 넘지 않는데, 이는 오존이 광화학 반응과 산화반응등 여러 반응에 의하여 생성, 소멸되는 2차 오염물질로서 많은 변수에 의해 결정되기 때문이다(김유근과 홍정혜, 1998).

Table 9. Comparison of air pollutant concentration and meteorology parameters between excess day and normal day base on 8-hr average air quality standard of Korea

Station	Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters					
			O <sub>3</sub> 8-hr	SO <sub>2</sub> 24-hr	NO <sub>2</sub> 24-hr	CO 8-hr	ΔT (°C)	Max Temp. (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Rad. (W/m <sup>2</sup> )	
Ido	Spring	Normal	44.4	3.9	22.8	7.3	6.7	17.8	2.3	65.4	660.3	
		Excess	64.3	3.8	21.2	6.5	7.3	18.6	2.8	63.3	662.3	
	Summer	Normal	35.1	2.5	14.6	6.1	5.8	27.6	2.0	76.2	669.4	
		Excess	67.9	3.5	15.1	8.3	7.0	27.3	2.4	58.4	836.8	
	Fall	Normal	39.7	3.3	16.0	6.0	5.8	21.0	2.3	68.2	547.3	
		Excess	67.9	3.0	18.4	6.3	6.5	23.9	1.8	70.4	692.2	
	Winter	Normal	32.9	4.8	20.5	6.9	5.4	9.7	3.0	63.4	369.1	
		Excess										
	Dong hong	Spring	Normal	48.7	2.1	7.8	4.4	6.6	19.3	1.7	66.4	-
			Excess	69.3	2.1	9.0	4.6	8.0	22.1	1.8	56.8	-
Summer		Normal	33.7	2.4	5.3	3.8	5.5	28.0	1.7	80.7	-	
		Excess	67.4	2.3	5.0	4.7	7.5	26.9	1.7	65.4	-	
Fall		Normal	46.9	2.4	7.7	5.0	7.0	23.4	1.9	65.2	-	
		Excess	67.6	2.3	8.4	4.8	7.6	26.4	1.9	64.1	-	
Winter		Normal	36.7	2.3	6.8	4.7	7.0	12.5	1.9	62.3	-	
		Excess	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Table 9. Continued

Station	Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters					
			O <sub>3</sub> 8-hr	SO <sub>2</sub> 24-hr	NO <sub>2</sub> 24-hr	CO 8-hr	ΔT (°C)	Max Temp. (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Rad. (W/m <sup>2</sup> )	
Gosan	Spring	Normal	45.1	1.3	4.5	4.7	6.4	17.0	3.6	74.1	720.6	
		Excess	65.1	1.5	4.8	4.3	6.7	18.4	1.8	73.4	907.4	
	Summer	Normal	38.8	1.1	3.8	5.1	5.3	26.4	3.0	85.2	728.9	
		Excess	68.9	1.4	5.4	6.6	6.1	25.5	3.4	79.0	911.0	
	Fall	Normal	46.2	1.4	4.3	4.0	6.0	21.2	3.7	69.8	645.4	
		Excess	67.8	1.9	4.7	5.3	6.4	23.7	4.4	68.8	796.8	
	Winter	Normal	35.8	2.0	4.2	4.1	5.4	9.6	5.3	66.2	419.6	
		Excess	67.7	6.6	7.3	7.4	7.0	12.5	1.8	59.5	664.4	
	Chuna	Spring	Normal	39.7	2.0	2.1	3.3	9.5	18.3	2.4	73.2	662.8
			Excess	68.2	3.5	2.6	2.6	5.1	18.2	4.4	82.7	-
Summer		Normal	43.2	2.0	2.1	2.2	8.1	25.2	2.1	79.9	567.9	
		Excess	70.6	2.7	3.1	3.1	11.8	24.1	2.1	66.7	735.7	
Fall		Normal	46.6	1.7	2.1	-	10.1	19.0	1.7	-	721.8	
		Excess	68.8	2.7	2.3	-	12.9	21.6	1.3	-	804.5	
Winter		Normal	40.3	2.4	1.9	7.1	-	-	-	-	-	
		Excess	61.5	4.4	1.9	4.4	-	-	-	-	-	

나. NO<sub>2</sub>

Table 10은 일평균 NO<sub>2</sub> 농도가 지역대기환경기준 초과 상황을 계절별로 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 오존과는 달리 제주지역에서 NO<sub>2</sub>가 대기환경기준(일평균 40 ppb) 초과하는 경우는 도시지역인 이도동에서만 나타났다. 그때의 기상 상태를 살펴보면(Table. 11) 오존 초과시와 같이 일교차, 최고온도, 일사량이 높았으며, 습도가 낮았음을 알 수 있었다. 그리고 다른 대기오염 물질들 특히

SO<sub>2</sub>와 CO의 농도의 증가 폭이 아주 높음을 알 수 있다. 이화운(1999)등은 부산 지역에서 온도, 일사량이 높고 풍속이 낮을 때 고농도 NO<sub>2</sub>발생 확률이 높다는 주장과 잘 일치하였다. 그리고 이러한 초과를 주로 봄철에 집중되어 나타났다.

Table 10. Number of excess days and Frequency of 24-hr NO<sub>2</sub> standard in Jeju area(2000~2003.11)

		Ido	Gosan	Donghong	Chuna
2000	No. of day	23	0		
	Frequency,%	6.32	0		
2001	No. of day	14	0		
	Frequency,%	3.89	0		
2002	No. of day	28	0	0	
	Frequency,%	7.67	0	0	
2003	No. of day	0	0	0	0
	Frequency,%	0	0	0	0
Total	No. of day	42	0	0	0
	Frequency,%	4.57	0	0	0

Table 11. Air pollutants and meteorological parameters for excess-day and normal-day of NO<sub>2</sub>

Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters				
		NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	ΔT	Max Temp.	Wind Speed	R.H.	Rad.
		24-hr	8-hr	24-hr	8-hr	(°C)	(°C)	(m/s)	(%)	(W/m <sup>2</sup> )
Spring	Normal	22.8	44.4	3.9	7.3	6.7	17.8	2.3	65.4	660.3
	Excess	44.8	43.3	6.6	8.7	7.5	19.1	1.8	58.8	715.7
Summer	Normal	14.6	35.1	2.5	6.1	5.8	27.6	2.0	76.2	665.3
	Excess	45.1	39.0	3.2	6.6	6.2	25.0	1.5	65.7	756.2
Fall	Normal	16.0	39.7	3.3	6.0	5.8	21.0	2.3	68.2	547.3
	Excess	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Winter	Normal	20.5	32.9	4.8	6.9	5.4	9.7	3.0	63.4	369.1
	Excess	43.9	32.0	9.5	11.9	7.5	12.6	2.0	61.5	365.6

## 4.2.2 오존관련 지수 분석

### 가. 오존 청정도지수

Mizoguchi 등(1985)는 일본의 오존 측정소의 청정도를 분류하기 위하여, 다음식을 사용하여 평균상대 표준편차를 산출한 바 있다. 이의 개념은 인위적 대기오염원이 없는 청정지역에서 오존과 같은 2차 광화학 오염물의 농도 변화는 주로 수평 및 연직방향의 유입/유출의 영향을 받기 때문에 일별 변동성은 대도시에 비하여 상대적으로 작을 수밖에 없다는 가정 하에 산출되는 값으로서, 오존의 청정도로 나타내는 지수라고 정의하였다.

$$Ors = \left( \frac{1}{N} \right) \sum_{j=1}^N \left( \frac{S}{M} \right)$$

여기서 Ors는 측정소의 청정도를 나타내는 평균 상대 표준편차이고, N은 측정일수, S는 일별 표준편차이며 M는 일평균값이다.

Table 12은 제주지역에서의 관측자료를 토대로 평균상대 표준편차를 계산하여 지역별로 정리한 것이다. 위식을 이용하여 계산한 남극 및 일본내 청정지역의 평균상대 표준편차값은 0.03~0.3정도라고 했다(Mizoguchi 등, 1985). 따라서 제주지역에서 계산된 평균상대표준편차를 보면 도시지역인 이도동과 동홍동은 0.3을 넘는 경우도 있지만 그 외 고산리와 천아오름에서는 모두 0.3이내의 값을 보였다. 이로써 판단해 보면, 제주지역의 대기에서 오존의 월평균 농도 값은 비교적 높은 수준을 보이지만 평균상대표준편차로써 보면 오존은 아주 청정한 상태를 유지할 수 있다고 할 수 있다.

Table 12. Mean relative standard deviations for O<sub>3</sub> concentrations in Jeju area(2002.3~2003.11)

Year	Season	Ido		Gosan		Donghong		Chuna	
		mean	Ors	mean	Ors	mean	Ors	mean	Ors
2002	Spring	31.83	0.30	48.20	0.13	32.20	0.38	-	-
	Summer	24.32	0.34	37.19	0.24	23.80	0.43	-	-
	Fall	30.40	0.29	41.93	0.13	38.56	0.30	-	-
	Winter	27.78	0.24	26.22	0.20	33.82	0.31	35.39	0.17
2003	Spring	37.27	0.25	31.52	0.14	45.11	0.25	33.08	0.24
	Summer	30.03	0.37	24.18	0.19	28.92	0.26	34.82	0.27
	Fall	29.19	0.38	30.04	0.21	35.40	0.30	37.04	0.25

나. 식물보호를 위한 오존지수(AOT40, SUM06)

현재까지는 오존 지표중 AOT40, SUM06과 같이 일정 한계농도 이상의 누적치로 나타내는 지표들이 가장 적절한 오존 지표로 인정되고 있으나, 한가지 지표만으로는 식생에 영향을 주는 오존특성을 표현하기에는 한계가 있으므로 농도별 빈도수(Table 8)와 같은 기존의 분석방법과 함께 적용시키는 것이 바람직하다(Musselman 등, 1994).

Table 13에는 지역별로 산출된 오존 지수값을 정리하여 나타냈다. 여기서 AOT40과 SUM06은 매년 4에서 9월 사이에 낮 시간인 09시부터 15시까지의 1-hr 평균오존농도를 기준으로 산출하였다.

Table 13에서 보듯이 도시지역인 이도동과 동홍동을 보면 동홍동의 오존 지수값이 이도동에 비하여 2~4배 정도 높은 수준을 보였는데, 이는 동홍동에서 percentile 농도가 이도동에 비해 10~20 ppb 정도 높은 것과 관련이 깊음을 알 수 있다.

전원지역인 고산리와 천아오름에서의 지수값은 고산리에서 2003년을 제외하면 동홍동의 지수범위와 유사함을 알 수 있다.

제주지역의 SUM06 지수값은 도시지역에서는 0.31~12 ppm·hr 범위이고, 전

원지역은 5.9~14.4 ppm·hr 범위인데, 우리나라 서울지역에서 보고된 0.05~7.1 ppm·hr 에 비해 훨씬 높은 수준임을 알 수 있다(윤성철, 1999). 그리고 중국 양쯔강 유역의 농촌지역에 대한 SUM06 지수값이 15~25 ppm·hr 로 보고된 바 있는데(Vincent Cheung와 Wang, 2001), 제주의 전원지역인 고산리와 천아오름 지역은 이에 비해서 낮은 수준임을 알 수 있다.

제주지역에서 4월부터 9월까지 식물의 성장시기에 계산된 AOT40 지수값을 보면 도시지역에서는 1.64~8.59 ppm·hr 의 범위이고 전원지역에서는 5.30~11.09 ppm·hr의 범위를 보이고 있다. 이는 도심을 제외한 서울지역에서 10~20 ppm·hr, 경기지역은 5~15 ppm·hr 수준과 비교할 때 결코 낮은 수준은 아닌 것으로 판단된다. 그렇지만 일본의 Oki 섬에서 보고된 10~30 ppm·hr에 비하여 낮은 수준임을 알 수 있다(Pakpong 등, 2002).

이들 오존 지수는 모두 고농도의 누적치로서 산출되므로 고농도 오존의 출현 빈도가 주로 많은 봄철과 여름철 동안에 결측이 많으면 지수값은 실제보다 훨씬 낮게 평가될 수 있다. 검토대상기간(4월에서 9월)동안에 결측율을 보면 고산리에서의 결측이 매우 많았음을 알 수 있다. 따라서 고산리에서의 AOT40과 SUM06 지수값은 실제로는 이보다 더 큰 값이었을 것으로 판단된다.

Table 15에 연간 오존농도 분포를 percentile로 환산한 결과를 보면 최근 4년간의 95 percentile 농도가 제주시에서 57 ppb를 넘지 않는데 비해 동홍동에서는 64 ppb를 넘어서고 있다. 그리고 전원지역에서도 65 ppb를 넘어서고 있다. 99 percentile에 있어서도 도시지역인 제주시는 60ppb를 넘고 있으며 동홍동에서는 75 ppb를 훨씬 초과하고 있다. 그리고 전원지역인 고산리와 천아오름에서도 70 ppb를 초과하는 것으로 나타나고 있다.

이로써 보면 제주지역에서 식생에 만성적 피해를 줄 수 있는 오존 빈도가 제주시를 제외한 전 지역에 걸쳐서 최소한 5%, 즉 438시간을 넘어서고 있을 뿐 아니라 이 빈도가 식물의 성장이 왕성한 시기에 발생되고 있는 점을 감안하면 하절기 식물 생장기간동안 만성피해가 염려되는 오존 노출 기간은 대략 20%에 달하는 것으로 볼 수 있다.

Table 13. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Jeju area

Site	Year	Indices(ppm · hr)		Max. (ppb)	avg. (ppb)	Percentile concentration(ppb)	
		AOT40	SUM06			95	99
Ido	2000	3.07	1.57	71	31.2	55	62
	2001	4.43	2.59	76	35.43	57	66
	2002	1.64	0.31	64	30.09	49	56
	2003	4.57	2.60	70	34.24	57	65
Go san	2000	11.09	14.41	87	46.26	69	78
	2001	5.30	5.91	80	40.02	65	71
	2002	9.86	12.74	92	43.70	71	78
	2003	0.32	0.00	51	26.49	43	47
Dong hong	2002	5.40	6.73	92	33.30	64	75
	2003	8.59	11.79	92	37.95	70	84
Chuna	2003	5.87	6.96	97	36.00	68	84



#### 4.2.3 기상인자의 단순 상관분석

Table 14는 각 지역에 대해서 오염물질 농도와 기상인자간의 상관관계를 분석한 결과를 나타냈다. 제주지역에서 가장 규모가 큰 도시지역에 위치한 이도동에서 오염물질들간의 상관성을 보면 1차 오염물질과 직접적인 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO들 간에는 양의 상관성을 보이고 있으나 2차 오염물질인 O<sub>3</sub>와 이들 1차 오염물질간에는 상관성이 거의 보이지 않았다. 그리고 오염물질 농도와 기상인자 사이의 상관성을 보면, SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 기온과 상대습도에 대하여 음의 상관성을 보이고, 일사량과는 상관성을 보이지 않았다. 그리고 O<sub>3</sub>는 일사량과는 양의 상관성을 보이고 습도와는 음의 상관성을 나타냈다. 그렇지만 CO는 기상인자들과는 상관관계를 거의 보이지 않았다.

동홍동을 보면 O<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub> 사이에서는 상관성을 보이나 1차 오염물질들과 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO들 사이에서는 상관성이 거의 보이지 않았다. 오염물질과

기상인자 사이에서는  $O_3$ ,  $SO_2$  및  $NO_2$ 는 상대습도와 음의 상관성을 나타냈으나 CO는 이도동과 마찬가지로 기상인자들과의 상관관계를 보이지 않았다. 다만 동홍동에서 일사 관측결과가 없어 직접 파악할 수는 없지만  $O_3$ 와의 상관성은 비교적 큰 것으로 예상된다.

고산리 해안변 지역에서의 상관성 분석의 결과를 보면, 도시지역과 다소 다른 특징을 보임을 알 수 있다. 즉, CO가  $O_3$ ,  $SO_2$  및  $NO_2$  등 모든 대기오염물질과 양의 상관성을 나타냈지만  $SO_2$ 를 제외한 CO,  $NO_2$ ,  $O_3$  모두 습도와의 상관성을 거의 보이지 않음을 알 수 있다. 제주도의 서쪽 끝 해안가의 절벽위에 위치한 고산리 측정소의 주변지역은 특징적인 오염원이 없을 뿐 아니라 평소 바람이 심한 지역으로서, CO,  $SO_2$ ,  $NO_2$ 가 아주 저 농도로 거의 일정한 수준을 유지하고 있는데 비해  $O_3$ 은 비교적 높은 농도 수준을 유지하고 있으므로 고산리 지역의 대기질은 국지배출원에 의해 지배되는 것은 아닐 것으로 판단된다.

그리고 앞에서 이미 살펴본 바와 같이 제주지역에서 도시지역이나 해안지역 모두 각 오염물질 및 기상인자들간의 상관성이 그다지 크지 않은데, 이는 제주지역은 전반적으로 대기순환이 원활하기 때문에 국지 배출과 국지 배출에 따른 국지지역의 광화학 반응의 결과가 아주 미미하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 도시지역에서도 1차 오염물질과 직접적으로 관련이 있는  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO의 농도가 낮는데 비해 2차 오염물질인  $O_3$  농도는 비교적 높게 나타나고 있음은 제주지역의 도시 대기질도 대기교환에 따른 외부 공기의 유입이 크게 작용하고 있다고 판단된다(장광미 등, 1996).



Table 14. Correlation coefficient between concentration of pollutant and meteorological parameter

Site		O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Temp.	W.S	Hum.	Rad.
Ido	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.038	1						
	NO <sub>2</sub>	0.066	0.529	1					
	CO	0.172	0.245	0.305	1				
	Temp.	0.094	-0.337	-0.141	0.020	1			
	W.S	0.037	0.164	-0.019	-0.010	-0.292	1		
	Hum.	-0.217	-0.446	-0.363	-0.084	0.359	-0.321	1	
	Rad.	0.323	-0.031	0.081	0.012	0.453	-0.151	-0.256	1
Dong hong	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.031	1						
	NO <sub>2</sub>	0.240	0.033	1					
	CO	0.173	0.170	0.072	1				
	Temp.	-0.074	0.044	-0.179	-0.265	1			
	W.S	-0.012	0.171	0.211	0.255	-0.128	1		
	Hum.	-0.459	-0.238	-0.321	-0.172	0.443	-0.279	1	
Gosan	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.146	1						
	NO <sub>2</sub>	0.174	0.343	1					
	CO	0.310	0.332	0.261	1				
	Temp.	0.278	-0.219	0.127	0.223	1			
	W.S	0.064	0.039	-0.252	-0.053	-0.160	1		
	Hum.	-0.117	-0.288	0.039	0.119	0.471	-0.230	1	
Rad.	0.398	-0.022	0.030	0.196	0.471	-0.148	-0.088	1	

## V 결 론

청정한 대기질을 지닌 것으로 알려진 제주 지역을 대상으로 대기질 변동특성 파악하고 평가하기 위해 2000.1~2003.11까지 제주도 4개 지점의 대기질 자료와 기상 관측 자료를 이용하여 도시지역과 전원지역의 대기질 특성을 비교하여 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 도시지역인 경우 대기오염물질 농도의 수준이 높고, 변동폭이 큰 반면에 전원지역인 천아오름과 고산은 오존을 제외하여 농도가 매우 낮았으며 변동도 매우 미미함을 알 수 있었다. 그렇지만 제주 지역에서는 오존을 제외한 기타 기체상 오염물질의 농도 수준은 아주 낮은 상태였다.
2. 제주지역에서 대기환경기준을 초과하는 대기오염물질은  $O_3$ 와  $NO_2$  뿐이었으며,  $NO_2$ 의 환경기준초과는 제주시에서만 나타났다. 오존의 대기환경기준 초과 일에는 다른 기체상 오염물질의 농도도 같이 높았으며 제주도내 4개 측정점 모두에서 일교차, 일사량 및 기온도 높았고, 습도는 낮은 기상조건을 보였다.
3. 제주지역은 오존의 월평균 농도 값은 비교적 높은 수준을 보이지만 평균상대표준편차로써 오존 청정도를 평가하면 청정상태를 유지하는 것을 알 수 있다.
4. 제주지역의 SUM06 지수값은 도시지역에서는 0.31~12 ppm·hr, 전원지역은 5.9~14.4 ppm·hr 수준이었으며, AOT40 지수값을 보면 도시지역에서는 1.64~8.59 ppm·hr, 전원지역에서는 5.30~11.09 ppm·hr의 범위를 보였다. 서울이나 경기도 지역과 비교 할 때 결코 낮은 수준이 아님을 알 수 있었다.
5. 제주지역에서 도시지역이나 해안지역 모두 각 오염물질 및 기상인자들간의 상

관성이 그다지 크지 않은데, 이는 제주지역은 전반적으로 대기 순환이 원활하기 때문으로 판단된다. 또한 도시지역에서도 1차 오염물질과 직접적으로 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO의 농도가 낮은데 비해 2차 오염물질인 O<sub>3</sub> 농도는 비교적 높게 나타나고 있음은 제주지역의 도시 대기질도 대기교환에 따른 외부 공기의 유입이 크게 작용하고 있다고 판단된다.



## VI. 참고 문헌

- 김민영, 최여진, 김기현, 2002, 오존의 환경기준 초과양상에 대한 연구, 한국환경과학회, 23(8), 683-696
- 김시완, 박순웅, 이보람, 1997, 종관 기상장에 따른 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO 그리고 O<sub>3</sub>농도의 변화, 한국환경기상학회, 33(2), 273-287.
- 김영성, 1996, 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회, 12, 55-66.
- 김영성, 김영주, 김진영, 2001, 1999년 기류의 이동궤적에 따른 우리나라 주요도시의 일상화탄소 농도변화, 한국대기환경학회지, 17(6), 451-461.
- 김용표, 김진영, 박세옥, 김성주, 심상규, 문길주, 박경운, 허철구, 1996 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구 : (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학회, 12(1), 91-99.
- 김용표, 김현진, 이승복, 1999, 우리나라 배경 농도 측정소의 측정결과 검토, 한국대기환경학회, 15(4), 505-512.
- 김유근, 홍정혜, 1998, 야간 지표 고농도 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회, 14(6), 545-554.
- 나진균외 6인, 1985, 대기오염예측을 위한 대기 안정도와 혼합고 분석에 관한 연구, 국립환경연구소보, 6, 17-33.
- 박경운, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1994, 제주도 고산측정소에서 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회, 10(4), 252-259.
- 박일수, 이덕길, 강인구, 1991 서울지역 겨울철 SO<sub>2</sub>농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96~104.
- 서명석, 박경운, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 179-184
- 소선섭, 광종흠, 1985, 일반기상학, 교문사, 83-83
- 소선섭, 이대성, 신흥렬, 1996, 우리나라 주요도시별 대기중 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 오염도의 변화 특성, 한국환경과학회, 17(2), 174-182.

- 신찬기, 한진석, 김윤신, 1992, 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구-서울 광화문 중심으로-, 한국대기보전학회, 8(2), 213~220.
- 안전공학협회편, 1982, 대기오염, 해문당, 9.
- 어수미, 김광진, 이규남, 1997, 기상인자가 대기오염에 미치는 영향, 한국환경위생학회지, 23(4), 104-114.
- 오광중, 광진, 정덕영, 손건태, 1998, 부산지역의 대기오염물질농도와 기상인자간의 통계분석, 대한환경공학회, 20(9), 1235-1245.
- 오인보, 김유근, 2002, 한반도 주요 대도시지역의 지표오존 특성 : 추세, 일변화, 월변화, 수평분포, 한국에기환경학회, 18(4), 253-264.
- 윤마병, 정용승, 1995, 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존, 한국대기보전학회지, 11(1), 85-93.
- 윤성철, 박은우, 장영기, 1999, 한계농도 누적 오존지표로 본 1990~1997년의 수도권 오존농도의 변화, 한국대기환경학회, 15(4), 429-439
- 이기원, 권숙표, 정용, 1993, 서울시 대기중 오존오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석-광화문 지역을 중심으로-, 한국대기보전학회, 9(1), 107-115.
- 이덕길, 강인구, 김양균, 홍윝기, 나진균, 유승도, 김정수, 이재인, 정준화, 양은희, 1990, 도시지역 도시대기질에 관한 연구(II) - 대기오염 영향인자 분석, 국립환경연구원보, 12, 71~96.
- 이정주, 이동범, 윤중섭, 2000, 청정지역과 도시지역에서 NO<sub>2</sub>광분해율이 오존농도에 미치는 영향에 관한 연구, 한국환경위생학회, 8(4), 141-147.
- 이종범, 강인구, 김양균, 나진균, 이석조, 유승도, 김정수, 이재인, 박보현, 남영규, 1989, 도시지역 도시대기질에 관한 연구(I) - 기상특성 및 대기질 분석을 중심으로, 국립환경연구원보, 11, 81~96
- 이화운, 김유근, 장난심, 이용희, 1999, 부산광역시에서의 NO<sub>2</sub>농도 특성 및 기상 영향인자 분석, 한국환경과학회, 8(2), 465-471
- 장광미, 이호근, 서명석, 박경윤, 강창희, 허철구, 심상규, 1996, 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO<sub>2</sub> 농도 변화 특성, 한국대기보전학회, 12(5), 541-554.
- 전미경, 1999, 지역대기환경기준 설정방안 연구, 경기개발연구원 연구보고서, 15호, 1-190

- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기 오염 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회, 3(4), 357-365.
- 전병일, 1999, 부산 동삼동 지역의 대기오염농도 특성, 한국환경과학회, 8(3), 281-286.
- 정영진, 이동인, 한영호, 이협희, 1998, 기상조건에 따른 부산지역 대기오염물질 농도변화와 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회, 14(3), 177-189.
- 정용, 장재연, 권숙표, 1986, 서울시 대기중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회, 2(1), 73-79.
- 정용승, 정재섭, 1991, 서울수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169~179.
- 조광명, 1993, 대기오염. 청문각, 39.
- 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경운, 1992, 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회, 8(4), 257-261.
- 환경부, 2002, 환경백서
- 환경부, 2003, 대기환경기준의 변천사.
- 吉田忠雄, 1981, 環境保全の 化學技術, 九善, 35.
- 森口實, 千秋銳夫, 小川弘, 1990, 環境汚染と氣象, 朝倉書店, 249
- Akimoto, H., Narita, H., 1994, Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1111 resolution. Atmospheric Environment 28, 213.225.
- Akimoto, H.H., Mukai, M., Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.M., Liu, M., Buhr, K.J., Hsu, D.A., Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T., Merrill, and R.E., Newell, 1996, Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, J. Geophys. Res., 101, 1999~2010.
- Ashmore, M., Fuhrer, J., 2000, New directions: use and abuse of the AOT40 concept, Atmospheric Environment 34, 1157-1158.
- Aunal, K., Berntsen, T.K., Seip, H.M., 2000, Surface ozone in China and its possible impact on agricultural crop yields. Ambio 29, 294.301.
- Beck, J.P., Krzyzanowski, M., Kof., B., 1998, Tropospheric ozone in the European Union. the consolidated report, Topic report no. 8/1988

(<http://reports.eea.eu.int/TOPO8-98>).

- Boubel, R. W., D.L. Fox, D.B. Turner and A.C. Stern, 1994, *Fundamentals of Air Pollution*, Academic Press, 574.
- Brasseur, G.P., J.J. Orlando and G.S. Tyndall, 1999, *Atmospheric Chemistry and global change*, Oxford University Press, 654.
- Chameides, W.L., Li, X., Tang, X., Zhou, X., Luo, C., Kiang, C.S., St. John, J., Saylor, R.D., Liu, S.C., Lam, K.S., Wang, T., Giorgi, F., 1999, Is ozone pollution affecting crop yields in China? *Geophysical Research Letters* 26, 867-870.
- Denise L. Mauzerall, 2003, The adverse impact of surface ozone on agricultural crops, *Air pollution as a climate forcing*, Day 4 presentations.
- Eder, B. K, J. M. Davis and P. Bloomfield, 1993, A characterization of the spatiotemporal variability of non-urban ozone concentration over the eastern united states, *Atmospheric Environment*, 27, 2645-2668.
- E. Donev, K. Zeller, A. Avramov, 2002, Preliminary background ozone concentrations in the mountain And coastal areas of Bulgaria, *Environmental Pollution*, 117, 281-286.
- Fuhrer, J., 2000, Introduction to the special issue on ozone risk analysis for vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 109, 359-360.
- Fukuko, Y., 1973, *Meteorological study of air pollution*, Faculty of Education, Fukushima univ, *Sci.Rep*, 23, 51-61.
- Fumagalli, I., Gimeno, B.S., Velissariou, D., Temmerman, L.D., Mills, G., 2001, Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region. *Atmospheric Environment* 35, 2583-2587.
- Fynlason-pitts, B.J. and J.N. Pitts, Jr., 1986, *Atmospheric chemistry, Fundamentals and experimental techniques*, John Wiley & Sons, New York USA.
- Godish, T., 1991., *Air Quality*, Second Edition, 39.
- Health, R.L. and G.E. Taylor, 1997, Physiological processes and plant responses to ozone exposure, in *Forest decline and ozone: Acomparison of*

- controlled chamber and field experiments. Edited by R.L. Health. Springer-Verlag. New York, 317-368.
- Hogsett. W.E., A. Herstrom. J.A., Lauence. J.E., Weber. E.H., Lee. and D. Tingey, 1995, An approach for characterizing tropospheric ozone risk to forest. Proceeding of 4th U.S./Dutch International symposium: Comparative Risk Analysis and Priority Setting for Air Pollution Issues, Pittsburgh, PA, 119-145.
- Husar,R.B., 1998, Spatial pattern of 1-hour and 8-hour daily maximum ozone over the OTAG region, Air & Waste Manage. Assoc.'s 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14~18, San Diego, Calif., Paper NO. 98-MA2A.01.
- Lefohn, A.S., Lioy, P.J., 1994, New directions. Atmospheric Environment 28, 3193-3194.
- Lefohn, A.S., 1997, Science, uncertainty, and EPA's new ozone standards, ES&T., 3(16), 280-284.
- Lin, X., O, T Melo, D. R. Hastie and H. Niki, 1992, A case study of ozone production in a rural area of central Ontario. Atmospheric Environment, 26, 311-324.
- Mizoguchi, T., M, Kunugi and M. Nishikawa(1985) Background air pollutant measurements and selection of background site in Japan, Res, Rep. Natl. Inst. Environment study, NO. 79, 476-485.
- Moody, J.L., Oltmans, S.J., Levy, H., Merrill, J.T., 1995. Transport climatology of tropospheric ozone: Bermuda, 1988~1991. Journal of Geophysical Research 100, 7192-7194.
- Musselman, R.C., McCool, P.M., Lefohn, A.L., 1994, Ozone descriptors for an air quality standard to protect vegetation. Journal of Air and Waste Management Association 44, 1383-1390.
- Ogawa, T., and A. Miyata, 1985, Seasonal variation of the tropospheric ozone: Summer minimum in Japan, J. Meteorol. Soc. Jpn., 63, 937~946.
- Pakpong Pochanart, Hajime Akimoto, Yoshikatzu Kinjo, Hiroshi Tanimoto,



- 2002, Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan, *Atmospheric Environment*, 36, 4235-4250
- de Santis, F., 1999, New directions: will a new European vegetation ozone standard be fair to all European countries. *Atmospheric Environment* 33, 3873-3874.
- de Santis, F., 2000, New directions: reply to 'use and abuse of the AOT40 concept'. *Atmospheric Environment*, 34, 1158-1159.
- Seigneur, C., and P. Saxena, 1985, A study of atmospheric acid formation in different environments, *Atmospheric Environment*, 18, 2109-2124.
- Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis, 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley & Sons, 1326
- 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.
- Showman, R.E., 1991, A comparison of ozone injury to vegetation during moist and drought years, *J. AWMA*, 41(1), 63-64.
- Skarby, L., Karlsson, P.E., 1996, Critical levels for ozone to protect forest trees—best available knowledge from Nordic countries and the rest of Europe. In: Karenlampi, L., Skarby, L. (Eds.), *Critical Levels for Ozone in Europe: Testing and Finalizing the Concepts*. UN-ECE Workshop Report. University of Kuopio, Dept. of Ecol. and Environ. Sci. Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, 72-85.
- Spektor, D.M. and M. Lippmann, 1990, Health effects of ambient ozone on healthy children at a summer camp, AWMA for presentation at the 83rd Annual Meeting & Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, June 24-29.
- Stockwell, W.R. and J.G. Calvert, 1983, The mechanism of the HO-SO<sub>2</sub> reaction, *Atmos. Environ.* 17, 2231.
- Sunwoo, Y.G.R. Carmichael and H. Ueda, 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan, *Atmos. Environ.* 28, 25-37
- Thompson, A.M., 1994, Oxidants in the unpolluted marine atmosphere, In

- Environmental oxidants, Ed. by J.O. Nriagu and M.S. Simmons, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Tilton, B.E., 1989, Health effects of tropospheric ozone, *ES&T*, 23(3), 257-263.
- Tsuruta, H., K. Shinya, T. Mizoguchi, T. Ogawa, 1989, Seasonal behavior of the tropospheric ozone in rural Japan, in *Pzone in the Atmosphere*, edited by R. D. Bpjikov and P. Fabian, A. Deepak, Hamton, Va.
- Tsuyoshi, Y., 1970, The diurnal variation of the pollutant concentration in urban area. *J. Japan. Soc. Air pollu.*, 5, 113-125.
- Urone, P., 1986, *Air Pollution*, Edited by Stern A. C., Academic Press, 24
- USDA, 2000, Grain: world markets and trade (<http://www.fas.usda.gov/grain/circular/2000/00-07/graintoc.htm>).
- USEPA, 1986, Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/8-84/02 cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC.
- USEPA, 1996, Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/P-93/004 a,b,cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC.
- Vincent T.F. Cheung, T. Wang, 2001, Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China, *Atmospheric Environment*, 35, 4947-4958.
- Vukovich, F.M., 1995, Regional-scale boundary layer ozone variations in the Eastern United states and their association with meteorological variations, *Atmospheric Environment*, 29(17), 2259-2273
- WHO, 1996, Update and revision of the WHO air quality guidelines for Europe. Ecotoxic effects, ozone effects on vegetation. European centre for environment and health, Bilthoven, the Netherlands.

## 감사의 글

지난 2년간은 비록 짧지만 제가 지금까지 살아왔던 삶에 있어 가장 소중했던 시간이었습니다. 그리고 결국 이렇게 작은 결실을 맺게 되었습니다. 정말 주위의 많은 분들의 도움이 없었더라면 과연 이 논문이 완성 될 수 있었을까 하는 생각을 해봅니다.

우선, 부족함이 많았던 저를 아낌없는 관심과 애정으로 격려해주시고 학문을 지도해주신, 때로는 아버지 같은 이기호 교수님께 깊은 감사와 존경을 드립니다. 바쁘신 와중에도 제 논문을 면밀히 검토해주시고 자상한 충고와 조언을 아끼지 않으신 허목 교수님, 감상규 교수님께 진심으로 감사드리며, 학부과정부터 지금까지 많은 가르침을 주신 오윤근 교수님, 허철구 교수님, 이용두 교수님, 조은일 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

항상 후배를 위해 본 논문이 완성되기까지 관심을 가지고 조언을 해주신 박용이 선생님, 류성필 선생님, 이준호 선생님, 고병철 선생님, 김병현 선생님, 강진영 선생님, 김대경 선생님, 강기봉 선생님, 양희준 선생님, 양수미 선생님께도 감사드립니다.

매우 바쁘신 와중에도 자료 분석에 있어 도움을 주신 김영주 과장님, 김형철 선생님, 송영철 선생님을 비롯한 제주도보건환경연구원 대기보전과 여러분들께 감사드리며, 기상자료를 제공하여 논문의 질을 높이는데 도움을 주신 홍근도 선생님, 강춘희 선생님을 비롯한 제주지방기상청 관계자 여러분께도 감사의 마음을 전합니다. 또한 이 작은 결실을 맺는데 시발점이 되었던 제주 지역 환경기술개발센터의 센터장님과 관련 업무 선생님들에게 깊은 감사를 드립니다.

실험실에서 논문이 완결될 수 있도록 여러 가지 꾀은일을 마다하지 않고 묵묵히 도와준 기훈, 민철, 경연, 대경, 일봉, 명선, 미영, 지윤, 혜영, 지향, 은정이를 비롯한 대기 실험실 후배님들과 대기실험실 가족 모든 분께도 고마움을 전하고, 대학원 생활 동안 한 배를 탔던 김대준, 김수미, 송정화, 김성수, 고기석, 강경호, 현경자 학형에게도 고마움을 전합니다. 또한 내 모든 노력이 힘들고 때로는 실망스러웠을 때도 나와 함께 있어준 희찬, 승언, 영진, 창운, 성호, 병수, 영민, 수미, 정훈, 치훈 등의 친구들에게도 고맙다는 말을 이 글을 통해 한 번 해봅니다.

오늘이 있기까지 막내를 위해 언제나 사랑과 믿음으로서 뒷바라지 해주신 어머님과 아버님께 작은 결실과 함께 감사와 존경과 사랑을 바칩니다. 또한 상은형, 찬수형, 수정누나, 그리고 재민매형과 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

2003년 12월 오 태 권

# 청정지역 대기질 특성의 평가

- 제주지역을 중심으로 -



濟州大學校 大學院

環境工學科

吳 泰 權

2003 年 12 月

# 청정지역 대기질 특성의 평가


## - 제주지역을 중심으로 -

指導教授 李 起 浩

吳 泰 權

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2003 年 12 月

 제주대학교 중앙도서관  
吳泰權의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 許 木 印

委 員 甘 相 奎 印

委 員 李 起 浩 印

濟州大學校 大學院

2003 年 12 月

The Assessment of Ambient Air Quality in  
Clean Region  
- in the case of Jeju Island -

Tae-Gwon Oh  
(Supervised by professor Ki-Ho Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the  
requirement for the degree of Master of Engineering

2003 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Mock. Hu, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Sang-Kyu. Kam, Prof. of Environmental engineering

Thesis director, Ki-Ho. Lee, Prof. of Environmental engineering

*December. 2003*

Department of Environmental Engineering  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

I. 서론	1
II. 문헌 고찰	3
2.1 배경농도	3
2.2 대기오염물질의 거동	4
2.2.1 황산화물	5
2.2.2 질소산화물	7
2.2.3 오존	10
2.2.4 일산화탄소	11
2.3 지역대기환경기준	13
2.4 식생보호를 위한 오존지표	14
III. 연구 방법	18
3.1 측정점 위치	18
3.2 자료 수집	20
3.2.1 대기질	25
3.2.2 오존 지수 산정	23
3.2.3. 평균상대표준편차(오존 청정도 지수)산정	23
3.2.2 기상	23
IV 결과 및 고찰	25
4.1 대기질의 시·공간적 분포특성	25
4.1.1 기상 및 연변화	25
4.1.2 월변화	29

가. O <sub>3</sub> 의 변동 .....	29
나. SO <sub>2</sub> 의 변동 .....	30
다. NO <sub>2</sub> 의 변동 .....	31
라. CO의 변동 .....	32
4.1.3 일변화 .....	35
가. O <sub>3</sub> .....	36
나. SO <sub>2</sub> .....	38
다. NO <sub>2</sub> .....	40
라. CO .....	42
4.2 대기질 평가 .....	44
4.2.1 환경기준 초과수준 .....	44
가. O <sub>3</sub> .....	44
나. NO <sub>2</sub> .....	49
4.2.2 오존관련 지수 분석 .....	51
가. 오존 청정도지수 .....	51
나. 식물보호를 위한 오존지수(AOT40, SUM06) .....	52
4.2.3 기상인자의 단순상관분석 .....	54
V. 결론 .....	57
VI. 참고문헌 .....	59



## List of Figures

Fig. 1. The location of air quality monitoring site in Jeju .....	18
Fig. 2. Monthly variation of O <sub>3</sub> concentration in Jeju area .....	30
Fig. 3. Monthly variation of SO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	31
Fig. 4. Monthly variation of NO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	32
Fig. 5. Monthly variation of CO concentration in Jeju area .....	33
Fig. 6. Monthly meteorological parameters and SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> concentrations .....	34
Fig. 7. Diurnal variation of O <sub>3</sub> concentration in Jeju area .....	37
Fig. 8. Diurnal variation of SO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	39
Fig. 9. Diurnal variation of NO <sub>2</sub> concentration in Jeju area .....	41
Fig. 10. Diurnal variation of CO concentration in Jeju area .....	43
Fig. 11. Annual trend of O <sub>3</sub> exceedance pattern was compared with Jeju area(Ido, Gosan, Donghong, Chuna), 2000.1~2003.11 .....	46
Fig. 12. Cumulative number of days exceed the 8-hr ozone average concentration of 60 ppb in Jeju area from Jan. 2000 to Nov. 20031 .....	47

## List of Tables

Table 1. Air Quality Standard in Korea .....	14
Table 2. The location of ambient air quality monitoring station .....	19
Table 3. Instruments used in the monitoring stations .....	20
Table 4. Number of available date in Jeju area .....	21
Table 5. The mean values of meteorological parameters in Jeju areas .....	26
Table 6. Yearly variation of gaseous air pollutant in Jeju area .....	28
Table 7. Comparison of air pollutant concentrations between with and without the precipitation phenomena in Jeju area .....	37
Table 8. The occurrence frequency of 1-hr average ozone concentration in Jeju area during 2000.1 to 2003.11 .....	45
Table 9. Comparison of air pollutant concentration and meteorology parameters between excess day and normal day base on 8-hr average air quality standard of Korea .....	48~49
Table 10. Number of excess days and Frequency of 24-hr NO <sub>2</sub> standard in Jeju area(2000~2003.11) .....	50
Table 11. Air pollutants and meteorological parameters for excess-day and normal-day of NO <sub>2</sub> .....	50
Table 12. Mean relative standard deviations for O <sub>3</sub> concentrations in Jeju area(2002.3~2003.11) .....	52
Table 13. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Jeju area .....	54
Table 14. Correlation coefficient between concentration of pollutant and meteorological parameter .....	56

## Summary

This study was carried out to assess the air quality over Jeju Island considered as the one of the cleanest sites in Korea. For this purpose, the measurement data of four major gaseous air pollutants and meteorological parameters were collected at four air quality monitoring stations located in Jeju Island. In this study, the four monitoring stations were also classified into two geographical groups, such as urban and rural areas.

It can be found that, except O<sub>3</sub>, the concentration of the gaseous pollutants at Idodong and Donghongdong stations located in urban area were higher than those at Gosan and Chuna stations in the rural area. However the concentration levels of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and CO were extremely low throughout Jeju Island, compared with the other larger cities in Korea.

There were only two gaseous air pollutants, that is, O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>, exceeded the air quality standards of Jeju Island. At all stations in Jeju Island, the NO<sub>2</sub> exceeded the standard only at Idodong station in urban area.

When the concentration of ozone exceeded the air quality standard over Jeju Island, the other gaseous pollutants were also increased together, and the meteorological parameters such as temperature, solar radiation and diurnal range of temperature were higher, but humidity was lowered. However there were little relationship between concentrations of pollutants and meteorological parameters in Jeju Island.

In this study, two ozone indices were also estimated. In urban area AOT40(Accumulated exposure Over a Threshold of 40ppb) and SUM06(SUM of hourly concentration at or above 0.06ppm) appeared to be ranged from 1.64 to 8.59 ppm · hr and from 0.13 to 12 ppm · hr, respectively. In rural areas

AOT40 was 5.3~11.09 ppm · hr and SUM06 was 5.9~14.4 ppm · hr. The level of these ozone indices in Jeju Island were not low, comparing with those of Seoul area in Korea.

Although the level of O<sub>3</sub> concentration was significantly high over the entire area of Jeju Island, it can be found that, based on the value of mean relative standard deviation, the air quality was cleanly maintained.



# I. 서론

대도시 또는 대도시 인접지역을 중심으로 대기질의 특성 및 변동에 관련된 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 연구로부터 대도시에서의 대기질 변동 특성 그리고 기타 오염물질과 또는 기상요소 등과의 관계 등에 대한 많은 자료가 축적되어왔다. 어수미 등(1997)은 서울지역에서 기상인자가 대기오염에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 김영성 등(2001)은 역궤적 분석을 통한 우리나라 주요도시의 일산화탄소의 농도변화를 연구하였다. 이종범 등(1989)은 도시지역 대기질 개선에 관한 연구에서 풍속이 낮고 고기압 상태일수록  $\text{SO}_2$ 는 고농도로 나타나며, 기압과 운량의 정도에 따라서도 농도 상승효과를 일으킨다고 하였고 이덕길 등(1990)은 풍속과 대기오염농도는 역 비례관계가 있고, 특히 풍속 1.5 m/s 이하 일 때 고농도  $\text{SO}_2$ 가 나타나는 경우가 많다고 보고하였다. 전병일(1994)은 부산지역의  $\text{SO}_2$  농도 변화의 특성을 분석하고,  $\text{SO}_2$  고농도일의 특성과 기상인자와의 관계를 조사하였다. 김시완 등(1997)은 종관기상장에 따른 기체상 물질의 농도변화에 대하여 연구하였으며, 정영진 등(1998)은 기상조건에 따른 부산지역 대기오염물질 농도 변화예측에 관한 연구를 수행하였다. 전병일(1999)은 부산 동삼동지역의 시간별 대기질 농도 자료를 이용하여 빈도분포로 나타내어 대기질의 변화특성을 파악하고, 청정지역(태하동)의 대기질 변화와 비교 분석하였다. 이화운 등(1999)은 부산광역시에서의  $\text{NO}_2$  농도 특성 및  $\text{NO}_2$  고농도일에 영향을 미치는 기상인자를 분석하였다.

그렇지만 대도시의 대기질 농도가 대도시내에서의 생성 및 소멸에만 국한되어 있는 것이 아니라 대기운동과 관련된 수송과도 밀접한 관련이 있다고 밝혀짐에 따라 청정한 대기상태에서 배경농도 특성에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 청정대기에서 오존을 비롯한 각종오염물질의 배경농도에 대한 정보와 이해는 대기질 예측 뿐 아니라 허용기준의 설정에 있어서도 필요한 것이다(Lin 등, 1992; Eder 등, 1993; Sunwoo 등, 1994).

우리나라에서 청정한 대기상태를 유지하고 있는 대표적인 지역중의 하나인 제주지역의 대기질에 관한 연구를 보면, 홍민선 등(1992)은 1992년 2월과 3월에

고산에서 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>를 측정 한 결과를 토대로 SO<sub>2</sub> 농도는 일변화가 거의 없고 강우 여부와 바람 방향에 따라 주로 변하는 것으로 나타나, 이 지역에 산성물질이 존재하고, SO<sub>2</sub>는 외부로부터 유입되는 양이 상당한 것으로 추정하였다. 서명석 등(1995)은 청정지역인 고산과 도시지역인 서울과 부산의 오존 농도를 비교하여 그 특성을 연구한 바 있고, 박경운 등(1994)은 1992년 2~12월 까지 SO<sub>2</sub>, NO<sub>y</sub>, O<sub>3</sub>를 측정하였는데, 이들 기체의 농도는 우리나라 주요도시에서 측정 한 값들보다 훨씬 낮았고, 외국에 청정 지역에서 측정 한 값들과는 유사한 것으로 나타났다. 그리고 장광미 등(1996)은 제주도 고산에서의 SO<sub>2</sub>농도변화 특성에 대하여 중국에서의 장거리 수송에 의한 외부의 유입이 크다는 것을 연구했으며, 김용표 등(1996) 고산에서 기체상 대기오염물질의 특성에 관하여 연구하였고, 김용표 등(1999)이 고산 배경농도 측정 정도·관리에 대해 검토하였다.

이처럼 제주지역의 대기질에 관한 연구는 제주도 서부의 해안가에 위치한 고산지역에서 측정된 대기질 자료에 한정되어 왔음을 알 수 있다. 그렇지만 제주지역은 섬 중앙부에 위치한 해발 1950m의 한라산 정상부를 중심으로 북측 중앙부에는 인구 약 29만명의 제주시와 한라산 정상 남측 중앙부에는 인구 약 8만5천명의 서귀포시가 위치하고 좌우로는 주로 전원지역으로 이루어진 군 지역이 위치하고 있다. 따라서 이러한 지리적·지형적 특성에 따른 대기질의 차이를 파악할 필요가 있다.

제주지역에서는 대기질을 관측하고 있는 곳은 제주도 서부 해안가에 위치한 국가 배경농도 관측소(고산측정소) 이외에도 제주시 상업지역에 위치한 이도동 관측소, 서귀포시 주거지역에 위치한 동홍동 관측소가 있다. 그리고 한라산 중턱의 해발 700m, 삼림지역에 위치한 천아오름 관측소가 2003년부터 가동되고 있다. 이처럼 제주지역에서의 대기질의 시간적·공간적 변동 상황을 보다 구체적으로 파악할 수 여건이 마련됨에 따라 본 연구에서는 제주지역의 대기질 모니터링 자료를 이용하여 제주지역내 지역별 특성에 따른 대기질 변동특성을 구체적으로 파악함과 동시에 제주지역 대기질의 특성을 평가하고자 하였다.

## II. 문헌 연구

### 2.1. 배경농도(background concentration)

현재 지구 대기의 조성은 초기 지구 대기의 조성과는 완전히 다르다. 초기의 지구 대기는 다소 환원성이 있는 혼합물로 구성되었는데 반해 오늘날의 지구 대기는 주로 질소, 산소 그리고 아르곤 가스로 구성되어 있으면서 초기 대기에 비해 크게 산화되어 있다고 할 수 있다.

오늘날의 대기구성은 생물권에 의해서 그 양이 지배되고 있다. 수증기도 아주 풍부한 구성성분으로서 주로 저층 대기에서 발견되며 그 농도 변동이 심하여 최고 3% 정도까지 이를 수 있다. 그리고 증발과 강수에 의해서 대기 내의 양이 제어되고 있다. 이 이외의 나머지 기체 성분들을 미량 기체(trace gases)라고 부르는데, 대기의 1% 이하를 차지하고 있다. 이들 미량 기체는 지구의 복사 균형 그리고 대기의 화학적 특성에 결정적인 역할을 한다(Seinfeld와 Pandis, 1998). 그리고 지난 두 세기 동안에 걸쳐 미량기체의 양은 급격하게 그리고 현저하게 변화되어 왔다.

우리 인간은 수천 년 동안 대기를 오염시켜 왔기 때문에 오염되지 않은 대기의 조성을 엄밀한 의미에서는 정확하게 알 수가 없다. 다시 말하면 인간이 처음 존재하였을 때 인간은 그것을 측정하지 않았고, 시간이 흘러 인간이 대기 중의 오염물질 농도를 측정하기 시작했을 때는 수백만 년 동안 지구상에 있었던 물질들에 의해 대기는 이미 오염된 이후인 것이다. 아주 멀리 떨어진 외딴 곳, 해양, 극지방 그리고 사막이나 산에서조차도 오염되지 않은 공기에 아주 가깝더라도 오래되고 크게 희석된 인위적인 오염의 흔적을 어느 정도 지니고 있어 오염되지 않은 공기와는 다를 것이다. 따라서 우리는 실제 자연이 가진 배경농도는 결코 알 수 없다. 그렇지만 대기의 자연배경농도를 파악하기 위해서 할 수 있는 최선의 방법은 바다 한 가운데나, 극지방, 산 정상과 같이 인간 활동영역에서 멀리 떨어진 지역에서의 대기는 실제 배경농도에 가장 근접하다고 가정하고 측정하는

것이다(Boubel 등, 1994).

따라서 배경농도 값으로 측정된 경우에도 인위적으로 발생된 오염물질이 함유될 가능성이 있으며, 자연적인 것과 인위적인 것을 구별한다는 것은 불가능하다고 할 수 있다(森口實, 1990). 그래서 현재로서는 자연계에 있어서 대기 중 오염물질의 배경농도는 화산이나 해변 중으로부터 자연적으로 발생된 것과 대기 중에서 제거되는 것과의 균형(balance)에 의해서 나타난 것이라고 볼 수 있다.

대기오염물질의 정의나 대기오염은 특정한 일련의 환경에 의한 영향과 시간적 및 공간적 배경에 의존하기 때문에 그 지역의 배경농도를 파악하는 것은 대기질관리 대책 수립에 있어 가장 기본적인 요소일 뿐 아니라 배출원 오염물질의 생성과 소멸의 관계, 즉 물질 순환을 파악 할 수 있게 된다. 그렇지만 대기는 끊임없이 순환하는 동적인 계이기 때문에 특정지역에 대한 배경농도를 구체적으로 파악할 수는 없는 실정이다. 따라서 국지적 오염원의 영향과는 거리가 먼 청정한 지역에서의 대기질을 구체적으로 파악하여 이를 배경농도로서 기준을 삼을 수 밖에 없는 실정이다.



## 2.2. 대기오염물질의 거동

대기 중의 각종 기체농도는 오랜 동안 마치 불변인 것처럼 거의 변함없이 유지되고 있다. 그렇지만 대기는 대기를 구성하는 기체상 성분들이 식물, 해양 그리고 생물체와 함께 끊임없이 변화하고 있기 때문에 실제로 역동적인 시스템일 뿐 아니라 대기는 질소와 산소와 같은 비교적 불활성 분자들로 구성되어 있기는 하지만 실제로는 자유 라디칼이라고 불리는 아주 반응성이 큰 분자 파편(reactive molecular fragments)들을 미량 함유하기 때문에 보다 효과적인 산화성 매개체로서 역할을 한다. 예를 들면 대류권 화학에서 가장 중요한 자유 라디칼은 OH(hydroxyl) 라디칼인데, 이는 대기에서 거의 모든 종류의 분자들과 반응을 한다. 또한 대기는 자유 라디칼보다 반응성은 떨어지지만 대기 중에 존재하는 다양한 화합물을 공격하기에는 충분한 반응성을 지닌 미량의 화학종들을 포함하고



있다. 오존은 하나의 중요한 산화제인데, 이는 OH 라디칼의 생성에도 관여한다.

그러므로 대기 기체의 순환(cycle)은 수많은 물리적 그리고 화학적 과정이 관련되어 있다. 기체들은 대기 자체 내의 화학적 과정, 생물의 활동, 화산 폭발, 방사선의 붕괴 그리고 인간의 산업활동 등에 의해 생성된다. 그리고 이들 기체는 대기에서의 화학 반응, 생물작용, 대기의 물리적 과정, 그리고 해양과 지구에 의한 침적과 흡수에 의해서 제거된다. 따라서 대기 중으로 유입된 기체 분자의 평균 수명은 제거 과정의 유효성에 따라서 몇 초에서 수백만 년까지 다양한 범위를 지니다. 대기의 자연 배경 농도 수준을 실질적으로 초과하는 농도를 지닌 물질, 즉 대기오염물질로 생각되는 대부분의 화학종들은 인위적인 배출원 뿐만 아니라 자연적인 배출원을 지니고 있다.

그러므로 이들 물질의 순환을 평가하기 위해서는 자연적인 배출원과 인위적인 배출원 그리고 지배적인 제거 과정을 포함하여 미량기체의 대기 순환 즉, 거동을 이해하는 것이 필요하다.

### 2.2.1. 황산화물(SO<sub>x</sub>)

황 함유 화합물은 지구 대기에서는 총 부피기준 혼합비도 1 ppm 이하인데, 대기화학에 큰 영향을 미치고 있다. 대기에서 주요 황 화합물로는 H<sub>2</sub>S, CH<sub>3</sub>SCH<sub>3</sub>, CS<sub>2</sub>, OCS 및 SO<sub>2</sub>를 들 수 있다.

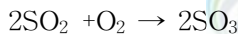
황은 대기 중에서 산화상태가 -2에서 +6의 범위로서 산화 형태와 환원 형태로 모두 존재하고 있다. 대기의 산화 분위기에 황이 일단 배출되면 일반적 경향은 환원된 황 화합물의 형태이고, 이는 산화상태 +4인 SO<sub>2</sub>와 CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>H (MSA; methane sulfonic acid)로 산화되고, 궁극적으로 +6 상태인 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 전환된다. +6 상태는 열역학적으로 산소 존재 하에서 안정한 형태이다. 이처럼 대기 내 황 화합물의 화학적 반응성은 그들의 황 산화상태에 역으로 관련된다. 환원된 황 화합물은, 산화 상태 -2 혹은 -1을 지니는데, OH 라디칼에 의해서 재빠르게 산화된다. 황 화학종의 물에 대한 용해도는 산화상태에 따라 증가한다. 환원된 황 화학종은 기체상에서 잘 나타나는 반면에 S(+6) 화합물은 입자 혹은 수적에서 발견되는 경향이 있다. S(+6) 상태인 화합물로 전환되기만 하면 황 화학종의 체류 시간은 습성 및 건성침적으로 제거됨으로서 결정된다(Seinfeld와 Pandis, 1998;

Brasseur, 1999).

SO<sub>2</sub>는 화석 연료의 연소에서 배출되는데, 대기 중 SO<sub>2</sub>는 약 30%가 황산염으로 전환되고 평균 체류시간은 1~4 일 정도로 짧기 때문에 온실가스와 같이 지구규모의 환경오염 문제보다는 산성비와 같은 국지적 오염에의 기여가 큰 것으로 알려져 있다.

그렇지만 SO<sub>2</sub>는 농도 수준이 100 pptv 이하로 아주 낮게 나타나는 외딴 지역의 대류권에서 신뢰도 높은 측정을 하기 아주 어려운 황 기체인데, SO<sub>2</sub>의 반응성이 크기 때문인 것도 한 원인이다. 해양에서 대기시료를 채취할 때 유입구 표면이 습할 경우에 특히 어렵다. 이러한 어려움에도 불구하고 대기 내 황의 산화 및 침적을 이해하고 황 화합물의 배출원에서부터 멀리 장거리 수송을 밝히는데 외딴 해양 대기에서의 SO<sub>2</sub> 측정은 대단히 중요하다. 예를 들면 대륙에서 멀리 떨어진 Bermuda에서의 산성침적은 북미대륙으로부터 질소와 황 화합물의 장거리 수송에 의해서 일어난다고 생각되고 있다(Moody 등, 1995).

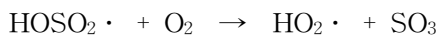
열역학적인 관점에서 보면 화학 양론적 변동에 의해서 SO<sub>2</sub>는 공기 중에서 산소와 반응하려는 경향이 강하다.



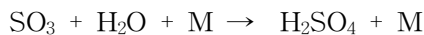
이의 반응속도는 기체상에서 촉매가 없으면 아주 느리기 때문에 대기 내 SO<sub>2</sub>의 기원으로서 무시된다. SO<sub>2</sub>는 대류권 내에서는 기체상과 액체상 과정을 거쳐서 반응하고 건식과 습식을 거쳐서 물리적으로 제거될 수 있다. 기체상 반응(gas-phase reaction)에 대해서 보면, OH radical과의 반응이 우세하다고 알려져 있다(Stockwell과 Calvert, 1983).



이어서 HO<sub>2</sub>· 라디칼의 재생성이 따르게 된다.



SO<sub>3</sub>는 수증기의 존재하에서 황산으로 빠르게 전환된다.



OH 라디칼과의 반응에 근거한 SO<sub>2</sub>의 수명은 약 1 주일 정도이며, SO<sub>2</sub>는 건성 침적에 의해서 대기로부터 합리적이고 효율적으로 제거되는 기체의 하나인 것이다. 구름이 존재할 때 SO<sub>2</sub> 제거는 건성 침적에 의한 것을 넘어서까지도 크게 증

진될 수도 있다.

대륙 배경 공기에서  $\text{SO}_2$ 의 혼합비는 20 ppt~1 ppb 이상의 범위를 지니며 오염되지 않은 해양경계층 수준에서는 20~50 ppt의 범위를 지니는 것으로 알려지고 있다.

### 2.2.2 질소화합물

화학적으로 대단히 안정하며 대류권이나 성층권 화학의 어디에도 관여하지 않는  $\text{N}_2$ 를 제외하고, 대기에서 중요한 질소 함유 미량 화학종으로는  $\text{N}_2\text{O}$  (nitrous oxide),  $\text{NO}$  (nitric oxide),  $\text{NO}_2$  (nitrogen dioxide),  $\text{HNO}_3$  (nitric acid) 그리고  $\text{NH}_3$  (ammonia)가 있다. 그리고  $\text{NO}_3$ 와  $\text{N}_2\text{O}_5$ 와 같은 기타 질소 산화물은 대기 중에 상대적으로 낮은 농도로 존재하지만 그럼에도 불구하고 대기 화학에 중요하게 참여한다.  $\text{HNO}_3$ 는 대기에서  $\text{NO}_2$ 가 산화된 생성물이다.  $\text{NH}_3$ 는 자연적 발생원에서 1차적으로 배출된다. 끝으로, 질산염과 암모늄염(nitrate and ammonium salts)은 어떤 상당한 양으로 방출되는 것은 아니지만 대기중에서 전환되면서  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ , 및  $\text{NH}_3$ 가 생성된다.

$\text{HNO}_3$ 는 대기에서  $\text{NO}_x$ 의 주요 산화 생성물인데, 물에 대한 용해성이 대단히 크기 때문에  $\text{HNO}_3$ 는 표면과 물방울에 빠르게 침적된다. 또한  $\text{NH}_3$ 가 존재하게 되면,  $\text{HNO}_3$ 는  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (ammonium nitrate) 에어로졸을 생성할 수 있다. 그리고  $\text{NO}_3$  (nitrate radical)는 대류권 화학에서 중요한 요소인데, 특히 야간에 중요하다.  $\text{NO}_3$ 는 야간에 경계층내에 300 ppt 정도까지의 혼합비(mixing ratio)로 존재한다.

대기에서  $\text{NO}_x$ 의 농도에 대한 자료가 상당히 있지만 이러한 측정 자료에서 어떤 결론을 이끌어내는데 주의해야 한다.  $\text{NO}_x$  측정은 대부분이  $\text{NO}_2$ 를  $\text{NO}$ 로 전환시켜서 화학적 형광을 측정하여 이루어진다. 보다 엄밀한 기술을 이용하여 측정된 결과들을 보면,  $\text{NO}_2$ 를  $\text{NO}$ 로 전환시킬 수 있는 표면전환장치(surface converters)는 PAN과 같은 다른 산화성 질소 산화물 화학종들도  $\text{NO}$ 로 전환시키게 되므로 측정에 방해가 주는 것을 알 수 있다. 그러므로 도시지역에서는 국지  $\text{NO}$  배출이 많기 때문에  $\text{NO}$ 와  $\text{NO}_2$ 가 총 반응성 질소 ( $\text{NO}_y$ ) 중에서 가장 우점적인 성분일 것이므로 PAN이나 다른 질소 산화물의 방해가 상대적으로 작을 것

으로 생각된다. 그렇지만 전원 지역이나 외딴 지역에서는 이들의 방해가 실제적 일 수 있을 것이다. 이런 이유로 인해 표면전환장치를 이용하여 비도시 지역에서 NOx를 측정함에 있어서는 상한치(upper limits)를, 다시 말해 측정치가 높아지는 쪽으로 편향될 수 있음을 염두에 두어야 한다.

대기 중 NOx 수치(budget)에서는 인위적인 배출의 역할이 우세하며 이들 배출원이 도시 지역 근교에 위치하는 경향이 있다는 사실로 인해, NOx의 농도 증가는 이러한 지역에서 예상할 수 있으며 이는 NOx 관측으로서도 확인되고 있다. 수많은 실측 연구에서, NOx가 다른 NOy 종으로 전환되는데 필요한 특성화 시간(characteristic time)은 4~20 시간이라고 추정되고 있다. NOy에 대한 NOx의 비율로서 NOx가 초기에 유입된 후에 공기 중에서 일어나는 화학적 과정을 반영할 수 있는데 도시 지역에 대규모 NOx 배출 그리고 NOx가 다른 NOy 화합물로 전환되는데 몇 시간이 걸리기 때문에 도시지역에서 NOy 농도는 일반적으로 NOx가 우세하게 된다.

미국에서 고립된 전원지역에서 이루어진 NOx 측정을 보면 고립이 안된 전원 지역에서 측정된 농도보다 상당히 낮은 경향이 있고 대체로 1 ppb 이하의 범위를 보였다.

외딴 해안 지역에서 저층 자유 대류권과 대기경계층에서 이루어진 NOx 측정에서는 대체로 0.02에서 0.04 ppb의 혼합비를 보이고 있다. 아직까지 측정 사례가 흔하지는 않지만 외딴 열대 삼림(식물을 태우는 직접적인 영향을 받지 않는 곳)에서의 혼합비는 0.02~0.08 ppb의 범위를 보이고 있다. 이처럼 외딴 열대삼림에서 다소 높은 수준임을 알 수 있는데, 이는 외딴 해안 지역과 비교해 볼 때 토양으로부터 생물에 의해 배출되는 NOx 영향 때문일 것으로 추정된다.

NOy를 측정할 수 있는 능력이 아주 최근에야 개발되었기 때문에, 도시와 외딴 지역에 대한 NOy 측정사례가 NOx에 비해 아주 제한되어 있으나 NOy 분포에 대한 대략적인 지표를 설정할 수는 있다. 미국의 여러 지역에서 관측한 평균 NOy 농도는 아주 비슷한데, 혼합비의 중앙치 (median mixing ratio)는 3~10 ppb 범위이다. 보다 외딴 지역으로 갈수록 NOy에 대한 NOx의 기여도가 점차로 감소한다. NOy는 NOx로서 대기 중으로 유입되기 때문에 보다 외딴 지역으로 갈수록 NOy에 대한 NOx의 비가 감소하는 것은 주요 인위 배출원으로부터 거리

가 멀어짐에 따라서 NO<sub>x</sub>가 유기 질산염 (organic nitrates, 대표적으로 PAN)이 나 무기 질산염(주로 HNO<sub>3</sub>)으로의 화학적 전환이 증가하는 것으로 이해될 수 있다. 가장 외딴 곳에서는 가장 낮은 NO<sub>x</sub>/NO<sub>y</sub> 비를 보인다. 그리고 고도가 높은 곳에 위치한 외딴 곳에서는 PAN/NO<sub>y</sub> 비가 최대를 보인다. 실제로 PAN은 외딴 자유 대류권에서 가장 풍부한 NO<sub>y</sub> 화학종이다.

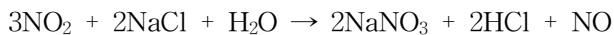
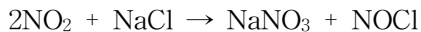
HNO<sub>3</sub>를 포함하여 기체상 NO<sub>x</sub>의 평균 대류권 체류시간은 1~4일, 입자상 질산염 (particulate nitrate)는 3~9일 정도의 범위이다. 이러한 비교적 짧은 대기내 수명으로 인해 질소산화물의 배출에 의한 주요 영향은 본질적으로 지구적인 규모라기보다는 국지 혹은 지역적 규모라고 예상할 수 있다.

NO의 소멸은 대기 중에서의 직접 산화되거나 O<sub>3</sub>, RO<sub>2</sub>, HO<sub>2</sub> 등과의 광화학 반응에 의하여 NO<sub>2</sub>로 전환됨으로서 이루어지는데, 이 NO<sub>2</sub>는 광화학 반응으로 생성된 OH 라디칼의 다음 반응하며 다음 반응을 거쳐 질산으로 전환되는 과정이 중요하게 된다.



여기에서 M은 N<sub>2</sub> 또는 O<sub>2</sub>와 같이 에너지 흡수체이다.

또한 해안 지역에서는 NO<sub>2</sub>가 해양입자와 반응하여 질산염을 생성함으로써 대기 중에서 제거되기도 한다.



대기 중에서의 체류시간은 NO와 NO<sub>2</sub>가 2~5일, N<sub>2</sub>O가 20~100년으로 추정되고 있다(Urone, 1986).

N<sub>2</sub>O는 대부분 토양과 수체에서 생물학적 배출원에 의해서 방출되는 중요한 대기 기체이지만 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O에 비해 그 농도가 아주 낮다. 그렇지만 N<sub>2</sub>O의 긴 체류시간과 분자당 에너지 흡수력이 비교적 크기 때문에 가장 영향력이 큰 온실 효과기체로 알려져 있다.

NH<sub>3</sub>는 대기에서 주요한 염기성 기체이며, 대기중에서 N<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 다음으로 가장 풍부한 질소함유화합물이다. NH<sub>3</sub>의 중요한 배출원으로는 동물사체, 부식토의 ammonification, 토양에서 NH<sub>3</sub> 비료의 소실 그리고 산업체 등을 들 수 있다. 암모늄 이온 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)은 대륙에서 대류권 에어로졸의 중요한 구성성분이다. NH<sub>3</sub>는

물이나 토양과 같은 표면에 쉽게 흡수되기 때문에 저층 대기에서 체류시간이 10 일 정도로 대단히 짧은 것으로 알려져 있다.  $\text{NH}_3$ 의 습성 및 건성 침적은  $\text{NH}_3$ 의 주요 대기제거과정이다. 사실 대기 중  $\text{NH}_3$ 와  $\text{NH}_4^+$ 의 침적은 그 지역에 생물권에 중요한 영양염이 될 것이다.  $\text{NH}_3$ 의 대기 내 농도는 대단히 변화가 심하고, 대륙에서  $\text{NH}_3$  혼합비의 범위는 0.1~10 ppb 정도인 것으로 알려져 있다.

### 2.2.3. 오존( $\text{O}_3$ )

오존( $\text{O}_3$ )은 산소 원자 3개로 이루어져 있으며, 무색의 반응성이 강한 기체로서 강한 산화제이다. 대부분 대기 중에서 자연적으로 생성되며, 자연적으로 생성될 수 있는  $\text{O}_3$ 의 농도는 대략 10~20 ppb 정도인 것으로 알려져 있다.

대기권 전체  $\text{O}_3$ 의 약 90%는 지상 10~50 km사이에 있는 성층권에 밀집되어 있으며(윤마병과 정용승, 1995), 나머지 10%는 지구의 지표면으로부터 10 km이내의 대류권에 있는데 사람의 호흡기나 눈을 자극하는 등 인체에 해를 미칠 뿐만 아니라 농작물의 성장에도 피해를 주게 된다(Tilton, 1989).

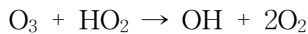
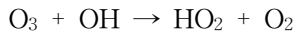
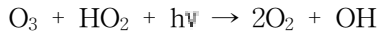
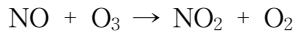
강한 태양광선과 역전층이 형성된 상태 하에서 탄화수소와 NO가 대기중에 방출되면 대기에는 산화물이 생성된다. 이때 생성된 광화학 산화물을 옥시던트라고 부르는데, 요오드이온을 요오드로 산화시킬 수 있는 물질로 정의 된다.

대류권의  $\text{O}_3$ 은 국지적인 광화학반응으로 생성된 옥시던트의 지표물질이며, 대류권 오존농도의 변화요인은 성층권에서의 유입, 대류권내 기체성분의 광화학 반응에 의한 생성, 오염된 지역으로부터의 유입 등이 있다(홍민선 등, 1992).

태양빛의 존재 하에서 일반적으로  $\text{O}_3$ 의 생성은 질소산화물의 광해리에 의해서 생성된다고 알려져 있다. 그렇지만 때로는 도시지역이나 전원지역에서  $\text{NO}_2$ 의 광분해에 의한 생성보다  $\text{O}_3$ 농도가 더욱 높은 경우가 나타나는데 이는 대기중에 탄화수소가 존재하면서 산화되어 과산화기( $\text{RO}_2$ )를 생성시키면  $\text{O}_3$ 를 소멸시키지 않고도 NO가  $\text{NO}_2$ 로 산화 될 수도 있기 때문이다.

따라서  $\text{O}_3$ 의 생성율은  $\text{RO}_2$ 의 농도와 관계가 깊다.  $\text{RO}_2$ 는 탄화수소, 산소원자, OH,  $\text{HO}_2$ 에 의하여 생성된다. 오염된 대기 중에서  $\text{O}_3$  농도에 영향을 주는 것은 태양빛의 강도,  $\text{NO}_2/\text{NO}$  비, 반응성 탄화수소의 농도, 기타 알데히드와 CO 및  $\text{RO}_2$ 를 생성하는 오염물 등이다.

대류권에서의 광화학반응과 성층권에서 생성된 O<sub>3</sub>은 지표면에서의 침착과 광화학적 소멸반응에 의하여 대기 중에서 제거된다. 광화학반응에 의한 O<sub>3</sub>의 소멸에는 NO와의 반응에 의한 파괴 및 H<sub>2</sub>O, OH, HO<sub>2</sub> 등과의 반응이 관여한다.



또한 야간에는 NO<sub>2</sub>와 반응하여 O<sub>3</sub>이 소멸되며, 이어서 일어나는 반응에 의하여 HNO<sub>3</sub>가 생성된다.

그러므로 오존의 생성에는 오존 전구물질의 농도와 일사량, 온도, 풍향, 풍속 등 기상조건 및 지역 환경인자 등이 밀접하게 관련되어 있다(Vukovich, 1995).

#### 2.2.4. CO

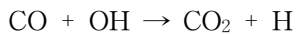
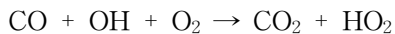
대기 중 CO의 농도 수준에는 자연적인 및 인위적 배출이 모두 기여하고 있다. 자동차 배기 및 불완전 연소에 의한 배출 가스내에 CO가 존재함은 잘 알려져 있다. CO가 대기의 자연적 미량 성분이라는 사실은 1949년에 알려졌는데, 1972년 이전에는 CO의 자연 배출에 대한 연구는 거의 없었다. 1972년 이후 수행된 연구에서 실제 자연적으로 배출된 CO는 인위적으로 배출되는 것보다 클 뿐 아니라 양적으로도 10 배는 된다고 알려져 있다.

자연적 대기 CO의 77% 이상이 메탄에 의한 것으로 알려져 있는데, 이 메탄은 습지, 열대 지방 중에서 수중 유기물의 분해로 인해 나오는 것으로 알려져 있다. 대기 중 메탄은 OH 라디칼이나 산소 원자와 반응하여 CH<sub>3</sub> 라디칼을 생성한다. 여기서 생성된 CH<sub>3</sub> 라디칼이 더욱 반응을 진행하여 결국 CO를 생성한다고 본다. OH 라디칼과 O 원자는 초기에 CH<sub>4</sub> 산화를 일으키는데 필요하다. 따라서 대기 중 CO의 주요 배출원으로서는 대기 중으로 방출되는 과정보다는 대기 내에서 CO가 생성되는 과정임을 알 수 있다.

해양이 대기 중 CO의 두 번째 발생원이다. 표면수는 대기와 접촉되어 있기 때문에 대기로부터 흡수된 용해된 CO를 함유할 수 있을 것으로 보았으나 해양에서 실제로 발견된 용해 CO 양은 그러한 흡수에 근거하여 예상한 양보다 10~

40 배 이상 더 크게 나타났다. 이는 algae와 다른 생물학적 발생원이 표면수의 CO 양에 실제로 기여한다고 보고 있다. 이 CO가 실제로 대기로 방출된다.

CO는 토양 박테리아에 활동에 의해 CO<sub>2</sub>로 산화됨으로서 대기 중에서 제거된다. 미국의 경우 전 토양에 의하여 제거되는 CO의 양은 약 500×10<sup>6</sup> ton/year 정도로 추정되며, 전 지구상의 인위적 발생원에서 배출되는 양과 비슷할 정도로 토양의 CO제거능력은 매우 크다(Godish, 1991). 이 외에 대류권 및 성층권에서의 광화학 반응에 의해 대기 중에서도 제거된다.



그러나 CO는 물리, 화학적 특징에 의해 다른 오염물질과는 대기 중에서의 거동이 다르게 나타난다. 즉 물에 난용성이기 때문에 수용성 가스와는 달리 강우에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 대기 중에서도 이산화탄소로 산화되기도 어렵다. 또한 대기 중에서 자외선을 흡수하거나 가시도를 저하시켜, 대기 중에서 다른 오염물질과 유해한 화학 반응을 일으키지도 않고, 다른 물질에 흡착현상도 나타나지 않는다.

CO의 대기질 배경농도는 북반구에서 0.1~0.2 ppm, 남반구에서 0.44~0.66 ppm 정도라고 알려져 있다(Urone, 1986). 그리고 대기 중에서 CO의 평균 체류시간은 발생량과 대기 중 평균농도로서 추정하면 대략 1~3개월 정도인 것으로 알려져 있다.

도시대기 중의 CO 농도가 높은 것은 연소 등에 의하여 배출량이 많아지고 토양면적의 감소 등에 따라 제거 능력이 감소하기 때문이다. 도시지역에서 CO의 주발생원은 자동차이며, 풍속이 약하고 (0.5~1 m/s) 교통량이 많은 지역에 기온 역전 현상이 일어났을 때 농도가 급격히 상승하게 된다(안전공학협회편, 1982).

도시 대기 중의 CO농도는 외국의 경우 과거에 매우 높게 관측되었다. 런던의 경우 1956년 말부터 1957년에 걸쳐 360 ppm이라는 높은 농도를 기록한 일이 있으며 1967년 시카고에서는 8시간 평균치 44 ppm을 기록하였다 (吉田忠雄, 1981).

우리나라는 대기오염 측정망과 함께 대도시에서 자동차 배출가스 측정망을 설치, 운영하고 있으며 대도시 도로변 CO 농도는 0.7~1.4 ppm 수준인 것으로 나타나고 있다(환경부, 2002).



### 2.3. 지역 대기환경기준

환경기준이란 일반적으로 특정한 지역에서 요구되는 일정한 환경상태를 유지하기 위한 기준이라고 말할 수 있다. 즉, 개별오염원에 대한 배출규제만으로써는 유해한 결과를 초래할 수 있으므로, 그 지역에 거주하는 사람들의 건강을 보호하고 생활환경을 보전하기 위하여 설정하는 것이 환경기준이다. 외국에서는 생활환경의 질을 인간 생존에 적절한 수준으로 유지하기 위한 환경기준의 하나로서 1970년대부터 대기환경기준을 설정하여 환경의 질을 평가하고 환경정책을 계획, 실행하는 지표로 삼고 있다(전미경, 1999).

우리나라의 대기환경기준은 대기오염에 의한 피해로부터 국민을 보호하기 위한 행정목표치로서 환경정책기본법 제10조 제1항 및 제2항의 규정에 의거하여 1978년 처음으로 SO<sub>2</sub>에 대한 기준을 설정한 이후, 1983년에는 CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, 먼지, HC에 대한 환경기준을 설정하고 1990년에는 Pb를 추가하였다. 그 후, 1994년에는 SO<sub>2</sub>, CO 등의 기준을 강화시키고 PM-10을 추가하였으며 HC는 항목에서 제외하였다(환경부, 2003).

다음 표는 우리나라 주요 도시별 지역 대기환경기준을 나타낸 것으로서 1999년도에 제정된 제주도의 지역환경기준은 청정한 자연환경과 우수한 문화적 자원의 보전을 위해서 유럽환경기준과 동일한 수준으로 환경기준을 대폭 강화시킨 것이 특징이다. 실제로 제주도는 근래 들어 무분별한 개발과 도시화로 인한 대기오염의 심화와 더불어 한국 뿐 만 아니라 중국으로부터의 대기오염 영향도 크다는 것이 밝혀졌다(장광미 등, 1996; 김용표 등, 1999; 김영성, 2001).

Table 1. Air Quality Standard in Korea

Pollutant	Seoul (‘97.12)	Kyonggi (‘01.8)	Daejeon (‘97.12)	Jeju (‘99.1)	Incheon (‘00.11)	Korea (‘01.1)
SO <sub>2</sub> ppm	0.01/yr	0.015/yr	0.02/yr	0.01/yr	0.015/yr	0.02/yr
	0.04/day	0.04/day	0.06/day	0.04/day	0.04/day	0.05/day
	0.12/hr	0.12/hr	0.13/hr	0.1/hr	0.12/hr	0.15/hr
CO ppm	9/8-hr	7/8hr	9/8hr	5/8hr	7/8hr	9/8hr
	25/hr	15/hr	25/hr	13/hr	20/hr	25/hr
NO <sub>2</sub> ppm	0.04/yr	0.04/yr	0.05/yr	0.027/yr	0.04/yr	0.05/yr
	0.07/day	0.075/day	0.08/day	0.04/day	0.07/day	0.08/day
	0.14/hr	0.14/hr	0.15/hr	0.1/hr	0.140/hr	0.15/hr
TSP μg/m <sup>3</sup>	-	-	90/yr 230/day	150/yr 300/day	-	-
PM10 μg/m <sup>3</sup>	60/yr 120/day	70/yr 140/day	50/yr 100/day	60/yr 120/day	60/yr 120/day	70/yr 150/day
	O <sub>3</sub> ppm	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr	0.06/8hr 0.1/hr
Pb μg/m <sup>3</sup>	1/3month	0.5/year	1/3month	0.5/3month	0.5/3month	0.5/yr

#### 2.4. 식생보호를 위한 오존지표(ACT40과 SUM06)

오존은 대류권에서 물리화학적 과정에서의 중요한 역할을 하는 것 이외에도 오존 그 자체가 강한 산화력을 지니고 있기 때문에, 특정 농도에서는 인간, 동물, 식물 그리고 물질에 대해서 피해를 줄 수 있다. 오존에 노출되면 여러 경로를 거쳐 호흡기도의 구조와 기능에 영향을 받게 된다. 식물에 대한 오염의 영향으로

가시적인 잎 손상, 식물성장 감소, 경제적 생산량 감소 그리고 농작물 품질의 저하를 들 수 있다. 그리고 오존은 대기오염원들 중에서 식물에 가장 독성이 강한 것으로 보고 되고 있다(USEPA, 1996, 1986). 오존은 식물에 대한 광화학 독성물질로 낮은 농도로도 식물의 잎 표면에 반점을 생기게 하고, 노화현상을 야기 시켜 광합성 작용을 방해하며 식물의 성장력을 감소시킨다(Lefohn, 1997). 1940년 중반 LA에서 농작물에 대한 광범위한 피해는 오존 또는 PAN과 같은 광화학 독성물질 때문으로 밝혀졌으며, 미국에서 연간 10억 달러 농업수확량 감소도 오존의 영향 때문이라고 보고 된 바 있다(Showmann, 1991)

이러한 이유로 인해서 대기 중 오존 기준치 혹은 지침을 제시하거나 또는 WHO와 같은 국제적인 기구에서 그 기준을 마련하고 있다. 오존의 인체에 대한 영향을 고려하여 WHO에서는 76~100 ppb (1-hr 평균) 그리고 50~60 ppb (8-hr 평균)의 지침을 두고 있으며, 식물 보호를 위해서 1-hr 평균으로 100 ppb 및 24-hr 평균으로 33 ppb를 제시하고 있다. 미국에서는 국가적으로는 120 ppb (시간최대농도)로 설정하고 있으나 California에서는 90 ppb로 강화하여 설정하고 있다. EU에서는 인간건강보호를 위해 WHO의 지침을 따라 55 ppb(8-hr 평균)을 설정하고 있다.

오존에 의한 식물의 피해는 오존의 농도, 기간 그리고 식물의 오존에 대한 민감도 및 생육조건에 따라 달라지는데 수 시간 또는 수일 정도의 단기간에 걸친 고농도 노출에 의한 반응은 식물의 생리적, 생화학적 과정의 급격한 변화에 따른 잎의 가시적 피해현상으로 나타난다(윤성철 등, 1999). 그렇지만 식물의 생육기간 전체에 걸쳐서 보면 비교적 낮은 농도의 오존 노출에 의해서도 생육저해, 조기낙엽, 화기형성 지연, 식물의 중량감소, 수확량감소 등의 피해가 나타난다고 보고 되고 있다(Denise L, 2003; Lefohn, 1997; USEPA, 1996). 때로는 고농도 오존에서 단기간 노출보다는 저농도 오존에서 장기간 노출될 경우에 인체에 더 위해하다는 보고도 있다(Lefohn, 1997; Spektor 등, 1990). 그리고 잎의 피해증상을 볼 수 없는 비교적 낮은 농도에서도 광합성의 억제, 탄소 동화물질의 뿌리로의 이동저해가 발생됨으로써 수년에서 수십년에 걸쳐 누적된 다년생 수목의 만성적 오존피해로 인해 삼림이 쇠퇴되는 결과를 초래하기도 한다(Health와 Taylor, 1997)

최근 여름철의 잦은 오존주의보 발령으로 우리나라의 대류권에서 발생되는

고농도의 오존에 대한 우려가 높아지면서 환경기준치보다 낮은 수준에서의 피해에 관심이 고조되고 있으나, 오존의 고농도 수준에 대한 정의가 연구자의 관점에 따라 60ppb, 80ppb, 100ppb 등으로 다양하게 제시되고 있다(윤성철 등, 1999). 오존으로 인한 만성적인 식생피해를 파악하려면 피해가 시작되는 상당히 낮은 수준에서부터 고려되어야 한다. 특히 낮은 농도의 장기간 노출에 따른 식물의 만성적인 피해는 눈에 띄지 않게 서서히 발생하기 때문에 이에 따른 식생의 피해를 평가하는데 있어서 오픈탑 챔버를 사용한 직접적인 노출실험을 전 생육기간에 걸쳐 수행해야하므로 많은 비용과 시간이 소요되게 된다(윤성철 등, 1999).

따라서 오존의 영향에 따른 식물의 생산량 감소를 평가하는 척도로서 미국에서는 SUM06을 이용하고 유럽에서는 AOT40을 이용하고 있다.

AOT40 지표는 UN-ECE (The United Nations Economic Commission for Europe)에서 제정된 잠재적인 생태계 영향을 경계하기 위한 유럽기준이다(Skarby와 Karlsson, 1996; Fuhrer, 2000). AOT40은 주간 시간대에 농도 한계치 40ppb를 초과하는 오존 농도에의 누적 노출값을 의미하는데, 식물의 성장기에 따라 3개월 또는 6개월 동안에 계산된다. 나무에 대해서는 가장 민감한 성장시기인 4월부터 9월까지 6개월 낮시간 동안 AOT40을 10000 ppb·hr로 정하고 있다. 그리고 농작물인 경우 농작물이 5% 감소하는 수치로 식물의 성장기간인 3개월(5~7월)동안 3000 ppb·h로 설정하여 그 이상의 수준이면 심각한 것으로 판단하고 있다(WHO, 1996; Beck 등, 1998). 그리고 가시적인 피해가 나타나는 급성 영향에 대한 기준은 증기압손차(Vapor pressure deficit, VDP)가 1.5 kPa이상일 때 연속 5일 동안 500 ppb·hr 혹은 VDP<1.5 kPa일 때 5일 동안 200 ppb·hr으로 설정하고 있다(Donev 등, 2002).

반면에 SUM06은 AOT40을 비교할 목적으로 NCLAN/USEPA(The Nation Crop Loss Assessment Network/US Environmental Protection Agency)에서 제정한 지수이다 곡식생산량을 10%이상 감소시킬 수 24hr-SUM06의 수준을 15-25 ppm·hr로 파악하고 있다(Chameides 등, 1999). Lefohn와 Liroy(1994)와 Musselman 등(1994)은 미국에서 10% 곡물이 감소되는 3개월 동안의 SUM06 값은 26.4ppm·hr로 제시한 바 있다. 그 후 Hogsett 등(1995)이 NCLAN 자료를 바탕으로 분석한 결과 SUM06이 23.4ppm·hr 이상일 때 전체 작물의 수량 감소가

약 10% 정도 된다고 보고하였다.

이상 지표들을 동아시아 지역의 농작물 생산 감소량을 평가하기에는 다소 무리가 따른다고 생각된다. 왜냐하면 유럽의 주 농작물은 밀인 반면에(Ashmore와 Fuhrer, 2000), 동아시아 지역인 중국, 일본 및 한국지역의 주 농작물은 쌀이기 때문이다. 그리고 2000년도에 중국, 일본, 한국의 쌀생산량이 2억 1300만톤을 생산한 반면 EU의 나라들은 불과 260만 톤에 불과하였다(USDA, 2000). 그리고 오존에 대한 쌀의 내성은 밀보다 더 강하다는 연구 결과가 있다(Aunal 등, 2000). 그리고 이 지표를 사용하는 유럽에서조차도 남부 유럽에서 매우 높은 AOT40을 보임에도 불구하고 곡물 생산량은 오히려 높다는 연구 결과도 있다 (De Santis, 1999, 2000; Ashmore와 Fuhrer, 2000; Fumagalli 등, 2001).

하지만 동아시아에서 인위적인 오염이 가중됨에 따라 O<sub>3</sub>으로 인하여 산림 손실과 곡물 생산량 감소가 더욱 악화될 것이 예측되어 진다(Pakpong 등, 2002). 그리고 Aunal 등(2000)에 의하면 2020년에는 중국의 AOT40수준이 30ppm·hr가 되어, 심한 곡물 생산량 감소가 일어날 것이라고 주장하기도 했다. 그리고 일본에서도 장거리 수송에 의하여 대류권 오존이 매년 2% 정도씩 증가함으로서 지속적인 곡물의 생산량 감소가 나타나고 있다는 보고도 있다(Akimoto 등, 1994). 따라서 우리나라도 중국과 일본에 인접해 있음으로서 오존에 의한 피해가 예외일 수는 없는 실정이므로 이들 AOT40과 SUM06 지표들을 이용하여 현재의 대기질 수준에 대한 식물에 대한 영향정도를 사전에 파악해 볼 필요가 있다.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 3.1. 측정점 위치

제주도에서 운영하는 제주시 이도동(상업지역) 및 서귀포시 동홍동(주거지역) 관측소, 국가 배경농도 관측소인 고산리 관측소의 자료를 수집하였으며 삼림지역 대기질 변동을 파악하기 위해 새롭게 구축한 관측소(한라산 천아오름 해발 700m)에서 대기질을 연속적으로 관측하였다. Fig. 1은 제주지역에 설치되어 운영



Fig. 1. The location of air quality monitoring site in Jeju.

되고 있는 자동측정소의 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 제주도 북부에 제주시 이도동 측정점이 위치해 있고, 남쪽에 서귀포시 동홍동 측정점이 있다. 그리고 고산리 측정소는 서쪽 끝단에 위치해 있으며, 제주시 서측 경계부에 해발 700m의 천아오름 지점이 위치해 있다.

Table 2은 관측소의 지리적 현황을 나타냈다. 본 연구에서는 상업지역인 이도동과 주거지역인 동홍동을 도시지역으로, 해안지역인 고산리와 삼림지역인 천아오름을 전원지역으로 대별하였다. 고산리 측정소는 해안가의 절벽위에 위치하고 있으며 천아오름은 삼림지역으로 이루어진 계곡에 위치하고 있으며, 이 두지역의 인근에는 국지 배출원의 영향이 거의 없는 지역이다.

Table 2. The location of ambient air quality monitoring station

Station	Location	Site elevation (asml*)	Sampling height**	Classification
Ido	126° 31' 50" E 33° 30' 00" N	50 m	9 m	Commercial area
Donghong	126° 34' 00" E 33° 15' 00" N	40 m	9 m	Residential area
Gosan	126° 10' 00" E 33° 17' 00" N	72 m	4 m	Coastal area
Chuna	126° 27' 31" E 33° 20' 30" N	700 m	3.5 m	Forest area

\* Site elevation above mean sea level.

\*\* Height of sampling point above ground level.

### 3.2. 자료 수집

#### 3.2.1 대기질 측정자료

측정기간은 2000년 1월부터 2003년 11월까지였으며 측정항목은 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>이다. 대기질 측정에 사용된 측정 기기 및 측정원리는 Table 3과 같다.

Table 3. Instruments used in the monitoring stations

Pollutants	Station	Instruments	Method of measurement
SO <sub>2</sub>	Ido	API/100A	Pulse U.V. Fluorescence Method.
	Donghong	Dongan/DA-1300	
	Chuna Gosan	TEI/43C	
NO <sub>2</sub>	Ido	API/200A	Chemiluminescent Method.
	Donghong	Dongan/DA-2300	
	Chuna Gosan	TEI/42C	
CO	Ido	API/400A	Non-dispersive Infrared Analysis.
	Donghong	Dongan/DA-3300	
	Chuna Gosan	TEI/48C	
O <sub>3</sub>	Ido	API/300A	Chemiluminescent Method.
	Donghong	Dongan/DA-4300	
	Chuna Gosan	TEI/49C	

이도동과 고산지역인 경우 대기질 자료는 2000년 1월부터 2003년 11월까지 수집하였으며, 동홍동은 2002년 3월부터 2003년 11월, 천아오름은 2003년 1월부



터 2003년 11월 까지 자료를 수집하였다. 측정기간 동안의 데이터 개수와 결측율은 다음 표에 나타내었다.

Table 4. Number of available date in Jeju area

Station	Standard Time	Total period	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO
Ido	Efficient Time	34,080	33,743	32,275	33,668	33,232
	Missing,%		1.0	5.3	1.2	2.5
	Efficient Day	1420	1401	1,341	1,397	1,381
	Missing,%		1.3	5.6	1.6	2.7
	Efficient Month	47	47	47	47	47
	Missing,%		0	0	0	0
Gosan	Efficient Time	34,080	28,856	28,690	27,757	28,763
	Missing,%		15.3	15.8	18.6	15.6
	Efficient Day	1420	1,135	1,121	1,070	1,120
	Missing,%		20.1	21.1	24.6	21.1
	Efficient Month	47	42	43	41	42
	Missing,%		10.6	8.5	12.8	10.6
Dong hong	Efficient Time	15,360	15,284	15,244	15,103	15,230
	Missing,%		0.5	0.8	1.7	0.8
	Efficient Day	628	623	621	615	620
	Missing,%		0.8	1.1	2.1	1.3
	Efficient Month	21	21	21	21	21
	Missing,%		0	0	0	0
Chuna	Efficient Time	7,776	7,639	7,635	6,213	5,311
	Missing,%		1.8	1.8	20.1	31.7
	Efficient Day	324	317	316	257	218
	Missing,%		2.2	2.5	20.7	32.7
	Efficient Month	11	11	11	8	8
	Missing,%		0	0	27.3	27.3

표에서 일부 기간에는 자료검색 기준(75%)에 약간 못 미치는 자료가 있었으나, 측정치의 변동특성을 파악하기 위한 시간별 경향성 분석에서는 이러한 기준

외의 측정자료도 포함시켰다.

측정기기의 비정상 가동 등으로 발생된 이상 자료를 검색하여 자료의 신뢰도를 향상함과 동시에 타 관측소의 관측 자료와의 통합관리하기 위해 모뎀을 설치하여 on-line으로 제주도에서 운영중인 제주도 대기질측정상황실의 주 컴퓨터로 자료를 송신하고 있다. on-line으로 측정자료를 수신할 수 있는 측정점은 이도동과 동홍동 및 천아오름 측정소이며, 국가 배경농도 관측소로 운영되고 있는 고산리 대기질 자료는 별도로 수집하였다.

매 시간별 측정자료는 매일의 자료를 검색하고, 회선장애가 발생할 경우에는 측정소의 자료를 회수하여 단말기로 수동 입력한다.

데이터 통계처리는 다음과 같은 기준을 적용하여 실시했다.

#### 가. 일, 월, 계절, 연 평균값

1시간 평균자료를 이용하여 일평균, 월평균, 계절평균, 연평균을 계산하며, 유효 측정값의 처리비율은 75% 이상을 대상으로 적용하였다.

#### 나. 8시간 평균값



하루를 기준으로 01~08시, 02~09시, 03~10시, 04~11시, ..., 17~24시의 총 17개의 경우의 평균치로서 각 경우의 자료 개수가 6개 이상인 8시간 평균치로 적용하고, 총 17개의 평균치중 최대치를 1일 8시간 평균치로 하였다.

#### 다. 백분위수(Percentile)

1시간 평균 자료로 백분위수(95, 99percentile)를 적용하여 고농도 계급 빈도 분포를 구체화 하였다.

#### 라. 대기오염 측정값의 유효자리수

대기오염 측정값의 유효자리수를 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>는 0.001 ppm, CO는 0.1 ppm으로 한다. 단, 유효자리수 다음(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>는 소숫점 4째자리, CO는 소숫점 2째자리)에서 반올림 하였다.

### 3.2.2. 오존 지수 산정

AOT40과 SUM06 지수값의 산정은 1-hr 평균오존 농도값을 사용하였으며 지수 선정 대상 기간은 식물의 성장기간을 고려하여 4월에서 9월까지이며 이 기간 동안 낮 시간대인 09시부터 15시까지를 오존 농도 자료에 대하여 다음의 식으로 산출하였다.

$$AOT40 = \sum_{i=1}^n ([O_3] - 40)_i \text{ for } [O_3] > 40ppb$$

$$SUM06 = \sum_{i=1}^n [O_3]_i \text{ for } [O_3] \geq 60ppb$$

### 3.2.3. 평균상대표준편차(오존 청정도 지수)산정

일본에서 사용되어지는 오존의 청정도지수의 산정에는 1-hr 평균 오존 농도값을 기준으로 다음의 식으로 산출하였다.

$$Ors = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{j=1}^N \left(\frac{S}{M}\right)$$

Ors : 평균 상대 표준편차      N : 측정일수

S : 일별 표준편차      M : 일평균

### 3.2.4 기상

측정기간동안의 기상자료는 제주지방 기상청의 각 지역별(이도, 고산, 동홍)로 제공되는 시간별 자료를 이용하였다. 다만 천아오름에서는 직접 AWS(Automatic Weather System)를 설치하여 자료를 수집하였다.

수집된 기상 데이터는 강우, 습도, 풍향, 풍속, 기온, 일사량이며, 기상자료의 데이터 통계처리는 다음과 같은 방법을 이용하였다.

#### 가. 강우량 및 강우일

4개 지점 AWS의 시간자료에서 0.1mm이상의 강우량을 이용하여 일 합계를 구한 후 월 강우량, 계절 강우량, 연 강우량을 구하였다.

강우일은 일 강우량이 0.1mm 이상인 날을 기준으로 선정하였다.

나. 바람(풍속)

AWS의 시간자료를 이용하여 일평균, 월평균, 계절 평균, 연평균을 구하였다.  
무풍(정온)은 0.5m/s 이하의 풍속으로 정의 하였다.

다. 일사량 및 최고기온

AWS시간자료에서 그날의 최고치를 구한 후 일별로 평균하여 월, 계절, 연의 값을 구하였다.

라. 일교차( $\Delta T$ )

각 날의 최고기온과 최저기온의 차이를 이용하여 구하였다.



## IV. 결과 및 고찰

### 4.1. 대기질의 시·공간적 분포특성

#### 4.1.1. 기상 및 연변화

특정 지역의 대기오염도를 지배하는 요인중에서 오염원을 제외하고 가장 영향을 주는 요소는 기상인자로 알려져 있다(나진균, 1985; 박일수, 1991).

제주지역의 기상 특성을 살펴보기 위해 최근 4년간의 기상요소의 측정결과를 Table 5에 정리했다. 표에서 도시지역인 이도동과 동홍동 그리고 전원지역인 고산리와 천아오름의 기상을 비교해 보면 도시지역에서는 전원지역에 비해 기온과 습도가 높음을 알 수 있다. 물론 이는 지리적으로 전원지역이 해안가와 고지대 산림속에 위치한 영향이 크기 때문이라고 생각된다. 일교차를 보면 도심지역에 비해 천아오름 지역이 큼을 알 수 있으며 해안가에 위치하여 해양의 영향을 직접적으로 받고 있는 고산리에서 가장 낮은 일교차를 보였다. 강수량에 있어서도 해발고도가 낮은 도시지역과 고산리에 비해 해발 700m 중산간 지역에 위치한 천아오름 지역에서 강수량이 많음을 알 수 있다.

특이한 점은 2003년도에 제주전역에 강수량이 크게 증가하였음을 볼 수 있다. 일사량의 경우에도 제주시 지역에 비해 천아오름과 고산리에서 높게 나타남을 알 수 있다.

Table 5. The mean values of meteorological parameters in Jeju areas

	Rainfall amount (mm)	Temp. (°C)	$\Delta T^*$ (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Max. Solar Rad. (W/m <sup>2</sup> )
Ido						
2000	1189.4	15.7	6.1	3.4	66.2	-
2001	1388.6	16.1	6.0	3.2	65.0	564.6
2002	1876.1	15.7	5.6	2.0	67.8	554.3
2003	2083.7	16.8	6.2	1.9	73.1	587.7
Donghong						
2000	1368.5	17.2	6.4	3.0	67.2	-
2001	1782.1	17.4	6.4	3.3	66.4	-
2002	2049.2	17.3	6.5	1.8	67.8	-
2003	2329.9	18.4	6.4	1.7	69.8	-
Gosan						
2000	1013.6	15.2	5.6	7.2	72.7	-
2001	1113.7	15.6	5.9	7.3	71.8	651.9
2002	1236.8	15.3	5.8	1.9	73.8	649.4
2003	1553.2	16.4	5.6	1.9	77.3	603.3
Chuna						
2003	2718.4	11.8	8.6	2.0	78.0	642.0

\* : diurnal range of temperature.

Table 6는 측정지점별로 1시간 평균농도 자료를 기준으로 각 가스상 오염물질의 연평균(annual mean)과 표준편차(standard deviation) 그리고 데이터 결측율을 도시지역과 전원지역으로 구분하여 정리한 것이다. Table 4에서 보면 2001년 고산에서의 관측은 1월부터 5월까지 측정소의 가동이 정상적으로 이루어지지 못해 연간 결측율이 25%에 달하는 것으로 나타났다. 따라서 연간 대기질 특성을 파악하는데 무리가 있기는 하지만 그 경향성이나 평균농도에서는 과거의 수준과 거의 비슷할 뿐 아니라 변동경향도 크게 다르지 않았기 때문에 평균치를 그대로 인정하였다.

O<sub>3</sub>의 경우 연평균 농도를 살펴보면 2003년 고산리에서의 오존농도가 과거에 비해 크게 낮아졌음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 오존의 연평균 농도를 보면 비록 지역별 평균화 시간에 차이가 있지만, 고산리, 천아오름, 동홍동, 이도동 순으로 나타나고 있다. 연평균 오존농도의 수준은 제주 전역을 대상으로 29.5~38.5 ppb 수준으로서 이는 2002년 연평균 농도를 기준으로 서울 14 ppb, 부산 24 ppb, 울산 21 ppb, 광양 28 ppb에 비해 크게 높은 수준임을 알 수 있다(환경부, 2002).

O<sub>3</sub>을 제외한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 및 CO는 모두 도시지역인 이도동과 동홍동이 전원지역인 고산리와 천아오름에 비해 높게 나타나고 있다. 특히 NO<sub>2</sub>는 이도동에서 높게 나타남과 동시에 표준편차도 큼을 알 수 있으며 2003년에 들어서 도시지역인 이도동에서 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 과거에 비해 크게 농도가 낮아진 수준을 나타냈다.





#### 4.1.2. 월 변화

##### 가. O<sub>3</sub>의 변동

Fig. 1은 2000년부터 2003년 11월까지 월평균 O<sub>3</sub> 농도의 변화를 나타낸 것이다. 제주지역을 통틀어 오존농도의 월 변화를 보면 전반적으로 봄철과 이른 여름철 그리고 가을철에 전반적으로 높고 7, 8월과 12월경에 낮아지는 경향이다. 봄철에 오존 농도가 높게 나오는 현상은 일반적으로 봄에 북위 30~35°에서 제트기류(jet stream)의 영향이 가장 커서 성층권의 오존 농도가 대류권으로 혼입되기 때문으로 알려져 있다(Thompson, 1994). Sunwoo 등(1994)은 성층권 오존 유입의 영향으로 인해 일본에서 해발고도가 높은 고산지역에서 O<sub>3</sub> 월평균농도가 3, 4월에 각각 약 50~60 ppb 수준인 것으로 보고했으며 지표 오존의 계절적 변동 형태는 봄철은 물론이고 가을철 상승이 나타나는 bi-modal형태로 제시하였으며, 가을철 상승은 가을철에 오존이 풍부한 대륙성 기단이 유출되기 때문이라고 하였다. Ogawa와 Miyata(1985), Tsurata 등(1987), Sunwoo 등(1994) 등의 보고에 의하면 일본의 외만섬에서 관측된 오존은 봄철 최고와 여름철 최저를 보이는 것으로 나타났다. 이들은 이런 현상의 원인으로서 성층권 오존의 침투 때문으로 파악하고 있으며, 여름철 최저는 해양성 기단의 유입이 많은 경우에 일본 전역에 걸쳐 오존농도는 20 ppb이하 수준으로 나타난다고 했다. 또한 1987년 3, 4월에 대서양에서 선박을 이용하여 측정시에 북위 30~35°에서의 O<sub>3</sub>농도가 약 55 ppb 수준으로 보고하였다(Thompson, 1994). 가을철의 농도가 높은 것은 여름에 비하여 강우가 적고 겨울에 비하여 일사량이 풍부하기 때문으로 생각되며(신찬기 등, 1992), 또한 북서 아시아에서 발생하여 인위적인 배출원이 밀집된 아시아 동북 지역을 통과한 대륙성 기단의 오존의 농도가 높으므로 우리나라 전역이 이 기단의 영향권에 놓이기 때문으로 생각된다(Akimoto 등, 1996). 겨울철에 오존 농도가 낮아지는 이유는 기온이 낮고 일사량이 작으며 풍속이 강하여 오존의 생성 및 축적이 거의 일어나지 않기 때문으로 생각되며 여름철에는 7, 8월에 많은 강수로 인한 일사량 감소의 영향으로 보인다(오인보와 김유근, 2002; 전병일 등, 1999).

도시지역인 이도동, 동홍동 그리고 해안지역인 고산리에서 측정된 오존의 월

별 변동 상황은 비슷한 형태를 보인다. 도시지역에서는 도시규모가 작은 동홍동이 오히려 도시 규모가 큰 이도동 보다 높게 나타나고 있으며 삼림지역에 위치한 천아오름의 경우에는 측정기간이 짧아서 계절 경향을 단정할 수 없으나 여름철에 감소하는 형태를 보인다. 그리고 과거에 가장 농도가 높게 나타난 고산리에서 2002년 11월 이후에는 농도 수준이 크게 낮아졌으나 월별 변동형태는 과거와 비슷한 것으로 나타났다. 이처럼 고산리에서 오존농도 관측치가 크게 낮아진 원인을 현재로서는 구체적으로 파악 할 수가 없다. 인근 지역의 배출원 및 기상 요소에서 강수량이 2003년에 증가 된 것 외에는 예년과 큰 차이점을 찾을 수가 없다.

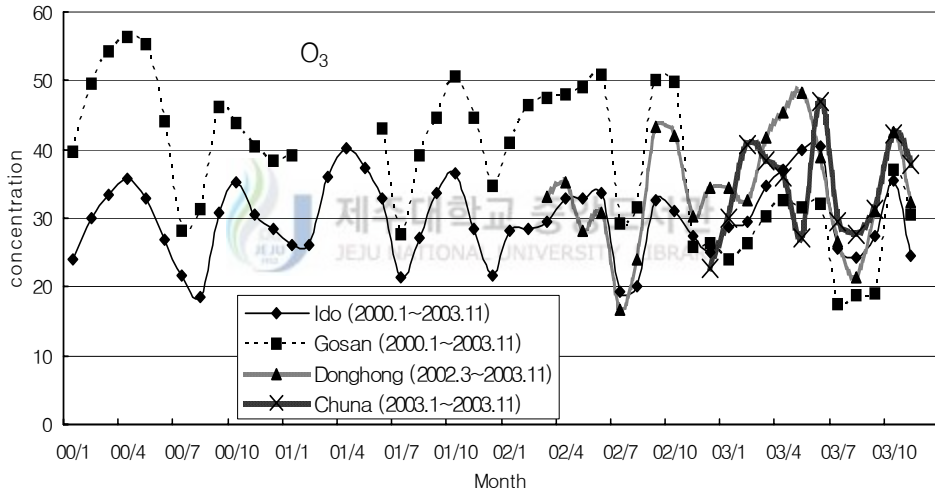


Fig. 2. Monthly variation of O<sub>3</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 나. SO<sub>2</sub>의 변동

Fig. 2는 2000년부터 2003년까지 4년간의 월별 SO<sub>2</sub>의 평균 농도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역인 이도동에서의 농도 수준이 가장 높았을 뿐 아니라 월별 변동도 아주 큰 것을 알 수 있었고, 동홍동, 천아오름, 고산의 순으로 낮아짐을 볼 수 있다.

도시지역인 이도동을 보면 경우를 보면 겨울철에 SO<sub>2</sub> 농도가 증가하고 여름철에 감소함을 보이는데, 그 원인은 겨울에 난방연료의 사용증가에 따른 SO<sub>2</sub> 배

출량의 증가 및 기온의 하강으로 인하여 대기 혼합고가 낮아져 오염물질이 지표에 쌓이기 때문으로 생각되며(Tsuyoshi, 1970; 소선섭 등, 1985; 소선섭 등, 1996) 여름에 감소는 난방연료의 사용감소에 따른 SO<sub>2</sub> 배출량의 감소 및 기온상승에 따른 대기혼합고의 상승과 활발한 대류현상으로 SO<sub>2</sub>의 확산이 양호함과 동시에, 많은 강우량에 인한 세정효과가 나타나기 때문으로 판단된다(신찬기 등, 1992).

해안가에 위치한 고산리 지역도 도시지역의 패턴을 따라가고 있었으며 산림 지역에 위치한 천아오름은 비록 측정기간은 짧지만, 월별 변동폭이 크지 않으나 여름철에 들어서 낮아지는 추세를 보임을 알 수 있다.

그리고 이도동에서 2002년 여름철 이후부터는 과거의 동일 계절에 비해 크게 농도가 낮아지면서 제주도내 4개 대기질 측정점에서의 SO<sub>2</sub> 농도가 거의 비슷한 수준을 나타내고 있다.

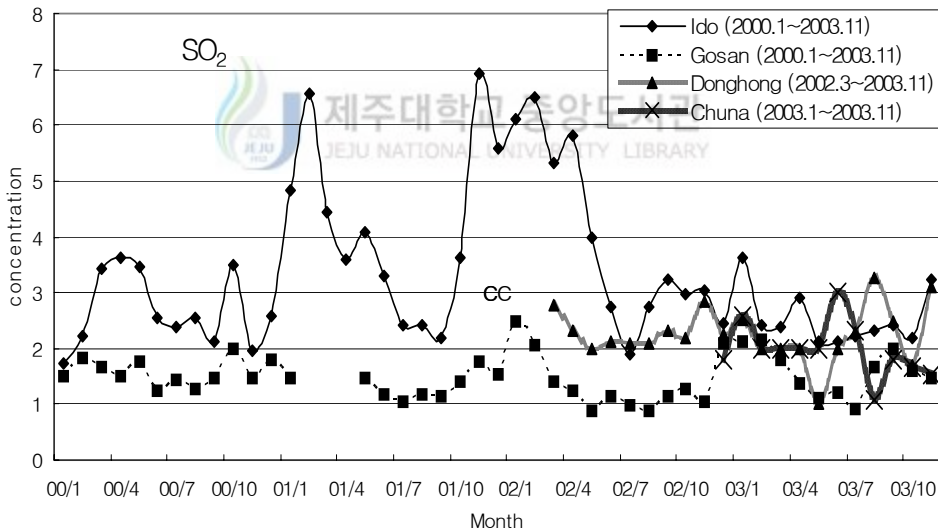


Fig. 3. Monthly variation of SO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 다. NO<sub>2</sub>의 변동

Fig. 3은 제주지역에서 관측된 최근 4년간의 NO<sub>2</sub> 월별 평균농도의 변화를 나타낸 것이다. NO<sub>2</sub> 농도에서는 도시지역인 이도동에서 가장 높았으며 다음으로는 동홍, 고산, 천아 순으로 낮아지는 것을 볼 수 있다. 제주지역에서 도시규모가 가

장 큰 이도동에서는 NO<sub>2</sub> 농도가 타 지점에 비해 훨씬 높을 뿐 아니라 월별 변동 폭도 큰 것을 알 수 있다. 도시지역인 이도동의 NO<sub>2</sub> 월변동 특성을 보면 여름철에 낮은 수준을 보인 후 가을철부터 큰 폭으로 상승하여 이듬해 봄까지 증가된 수준을 보인 후 여름철이 되면서 다시 낮아지는 농도 변동 주기를 보였다. 이는 여름철에 많은 강수량과 기온상승으로 인한 활발한 대류현상으로 사료된다(소선섭 등, 1996). 그렇지만 2002년 가을철에는 농도상승이 과거에 비해 크게 낮아지면서 2003년 봄철까지 낮은 농도 수준을 보였다.

그 외 지역에서는 10 ppb 이하로 낮은 수준을 나타내고 있으며 월변동도 거의 없이 일정한 수준을 보였다.

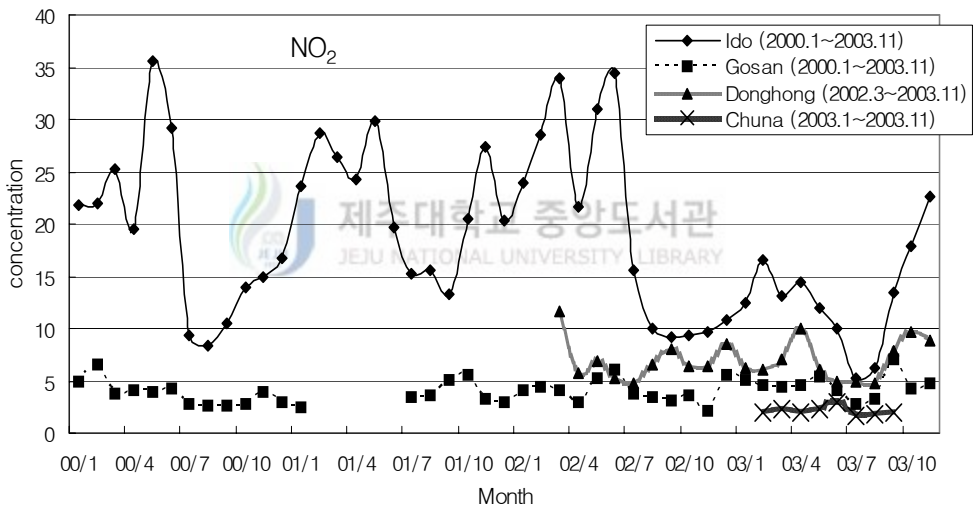


Fig. 4. Monthly variation of NO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

#### 라. CO의 변동

Fig. 4는 제주지역에서 관측된 CO의 월별 평균농도를 각 측정점별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역과 전원지역의 구분 없이 제주지역의 CO 농도는 대체로 0.4 ppm의 수준으로 아주 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 그리고 각 측정점별로 보면 가장 규모가 큰 제주시 도심지역에서의 CO 농도가 타 지점에 비해 비교적 높음을 알 수 있다. 제주 전역의 CO 농도 수준은 북반구 대류권의 CO 배경농도 수준(0.1~0.2 ppm)보다 2배정도 높은 수준이지만 우리나라 대도시 CO

농도수준(0.8~1.4 ppm)에 비교하면 아주 낮은 농도 수준임을 알 수 있다.

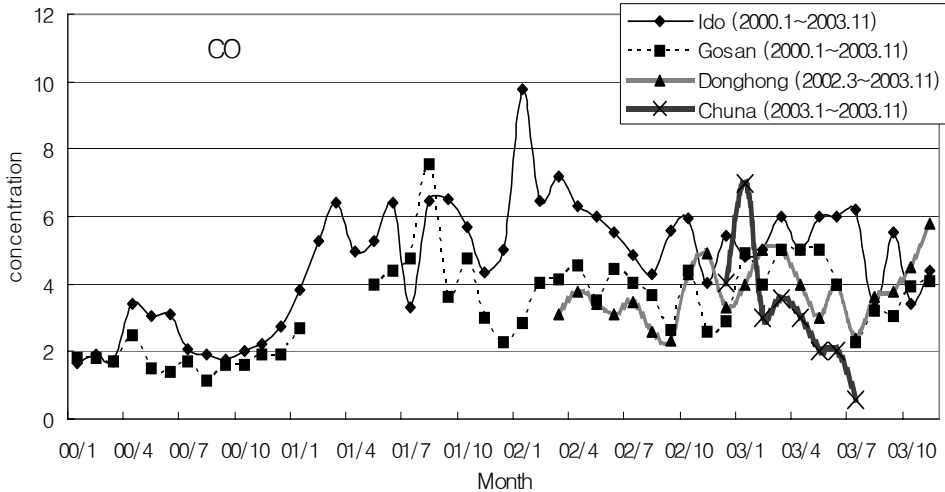


Fig. 5. Monthly variation of CO concentration in Jeju area(unit :  $\times 10$ ppm).

앞에서 언급된 대기질 월변동의 결과에서 이도동의 2002년도 후반기부터  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$ 농도가 급격히 낮아지게 된 원인을 파악해 보고자 기상조건 등과 구체적으로 살펴보았다. Fig. 5에는 강우와 상대습도 그리고  $\text{SO}_2$ 와  $\text{NO}_2$  농도의 월 변동을 나타냈다. 그림에서 보면  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$ 의 월별 농도 변동의 패턴이 거의 동일하며, 이 두 물질들의 농도 변동은 강우량의 변동 패턴과 반대의 패턴을 보임을 알 수 있다. 특히 2002년 7월부터 크게 증가된 강우량으로 인해 습도 역시 전년에 비해 10% 이상 높은 수준을 꾸준히 유지되었음을 알 수 있다. 이러한 기상조건으로 인해 2002년 7월과 8월에 많은 강우량으로 인해  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$  농도 수준이 크게 감소된 이후에도 겨울철 및 이듬해 여름철까지 강우량이 지속적으로 많았기 때문에 과거 농도 수준으로 회복이 지연된 것으로 생각된다.

Table 7은 2002년과 2003년의 강우시와 비강우시의 대기오염물질 농도 수준을 비교한 것이다.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ 와 같이 비교적 용해도가 큰 기체인 경우 강우의 세정효과에 의한 습식 침적이 큰 물질인 경우 강우일에 비해 비강우일의 농도가 비교적 높은 값을 보인다. CO의 경우 물에 대한 용해도가 아주 낮아 강우에 의한 세정효과의 영향이 거의 없기 때문에 강우와 비강우시간의 농도차이가 거의

나타나지 않음을 알 수 있다.  $O_3$ 은 강우 현상시의 일사량 감소에 의해 비강우시의 농도가 강우시에 비해 약간 높게 나타났다. 오존의 경우 용해도가 낮아 강우에 의한 직접적인 Wash-out 효과는 적을 것으로 기대되나 강수에 동반된 일사량의 감소는 오존의 생성이 억제 될 것으로 생각된다(홍민선 등, 1992). 수중기 존재하에  $SO_2$ 와  $NO_2$ 는 OH Radical과 반응하여 결국에는 황산과 질산으로 전환되어 소멸된다. 특히 해안지역에서는  $NO_2$ 가 해염입자와 반응하여 질산염을 생성하면서 대기중에서 제거된다.

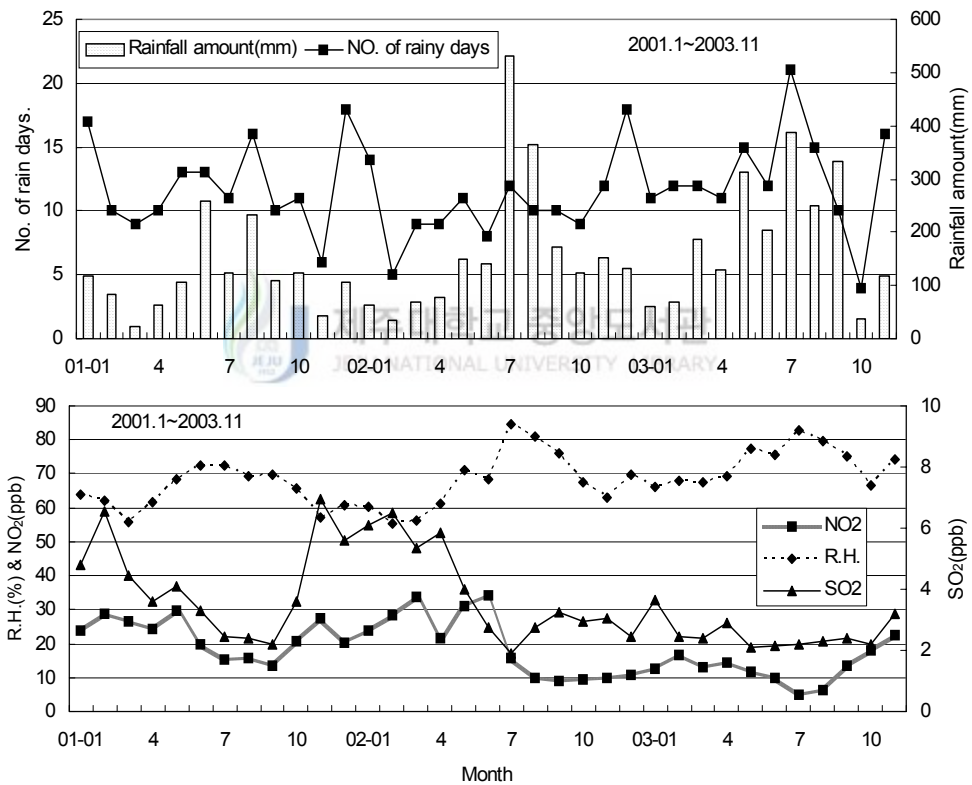


Fig. 6. Monthly meteorological parameters and  $SO_2$ ,  $NO_2$  concentrations.

Table 7. Comparison of air pollutant concentrations between with and without the precipitation phenomena in Jeju area

Pollutant	Station	Year	Concentration (ppb)			Ratio of concentration*
			Rain days	Non-rain days	mean	
SO <sub>2</sub>	Ido	2002	3.23	4.35	3.96	1.35
		2003	2.22	2.76	2.54	1.25
	Donghong	2002	2.09	2.56	2.37	1.23
		2003	2.13	2.41	2.30	1.13
	Gosan	2002	1.06	1.36	1.26	1.29
		2003	1.24	1.79	1.60	1.45
NO <sub>2</sub>	Ido	2002	17.25	21.14	19.79	1.23
		2003	11.17	14.36	13.03	1.29
	Donghong	2002	6.87	7.49	7.24	1.09
		2003	4.33	7.29	6.78	1.68
	Gosan	2002	3.86	3.87	3.87	1.00
		2003	4.18	4.87	4.61	1.17
O <sub>3</sub>	Ido	2002	33.20	36.74	35.51	1.11
		2003	36.81	41.84	39.71	1.14
	Donghong	2002	37.89	44.31	40.20	1.17
		2003	37.65	48.34	44.08	1.28
	Gosan	2002	41.61	48.59	46.23	1.17
		2003	28.78	33.96	32.09	1.18
CO	Ido	2002	6.72	7.21	7.04	1.07
		2003	6.30	5.83	5.99	0.93
	Donghong	2002	4.31	4.11	4.19	0.95
		2003	6.03	4.89	4.67	0.81
	Gosan	2002	4.19	4.24	4.22	1.01
		2003	4.40	4.48	4.46	1.02

\* : [Non-rain day]/[Rain day]

#### 4.1.3. 일변화

제주도의 지역별 대기중 O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>의 일변화를 알아보기 위하여 이도동, 고산리, 동홍동, 천아오름 지역의 2000년 3월부터 2003년 11월까지의 측정치를

계절별로 산술 평균하여 분석하였다.

#### 가. O<sub>3</sub>

우리나라의 경우 O<sub>3</sub>은 봄철에 가장 높고 여름에는 빈번한 강우에 의한 일사량 감소 때문에 낮은 평균값을 보이다가 가을에 다시 상승하는 2차 상승구조를 가지는 계절적 특성을 지닌다고 알려져 있다(김영성, 1996).

Fig. 6.은 계절별 O<sub>3</sub>농도의 일변화 패턴을 지역별로 나타낸 것이다. 도시지역인 이도동과 동홍동은 계절에 관계없이 거의 비슷한 일변화 형태를 보임을 알 수 있다. 그 변동 특징을 보면 오전 7시와 8시 사이에 O<sub>3</sub> 농도가 저하되고 그 이후 낮 시간 동안에는 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이처럼 아침시간대에 감소하는 현상은 지표 역전에 의하여 상부로부터 O<sub>3</sub> 공급이 제한되는 상황에서 지표부근 O<sub>3</sub>이 NO와 NO<sub>2</sub> 산화에 의해 소모되기 때문이며(오광중 등, 1998), 9시 이후 낮 시간대에 O<sub>3</sub> 농도가 급상승하는 이유는 아침에 발달하는 혼합층내의 대류에 의해 하층의 대기와 고농도 O<sub>3</sub>을 포함한 상부의 대기와의 연직혼합에 의해 상부 공기의 혼입에 의한 O<sub>3</sub> 농도의 증가와 인위적으로 생성된 NO, HC 등에 의한 광화학반응이 활발해지기 때문으로 해석된다. 그리고 저녁 6시 이후는 지표 부근에서 O<sub>3</sub> 이외에 일반적인 대기오염물질의 농도는 증가하지만, O<sub>3</sub>은 증가된 NO의 산화, 그리고 O<sub>3</sub> 자체의 지표면 건성 침적으로 인하여 지표 농도는 빠르게 감소한다고 알려져 있다(Seto, 1992).

전원지역인 천아오름과 고산리 지역은 계절에 관계없이 일 변동 폭이 도시지역에 비해 작지만 오후시간대에 증가하는 경향을 보이면서 일 최저값은 도시지역에 비해 높게 나타나고 있다. 이는 오존을 소멸 시킬 수 있는 대기오염물질의 농도가 너무 낮아서 야간에 O<sub>3</sub>의 소멸이 거의 일어나지 않는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다(이정주 등, 2000). 서울, 광주 및 부산과 같은 대도시에서의 오염물질의 일 변화 양상을 보면 일변동 폭이 아주 큰 반면 청정한 고산지대에서는 일변동 폭이 계절에 관계없이 아주 작게 나타난다고 보고한 바 있다(서명석, 1995).



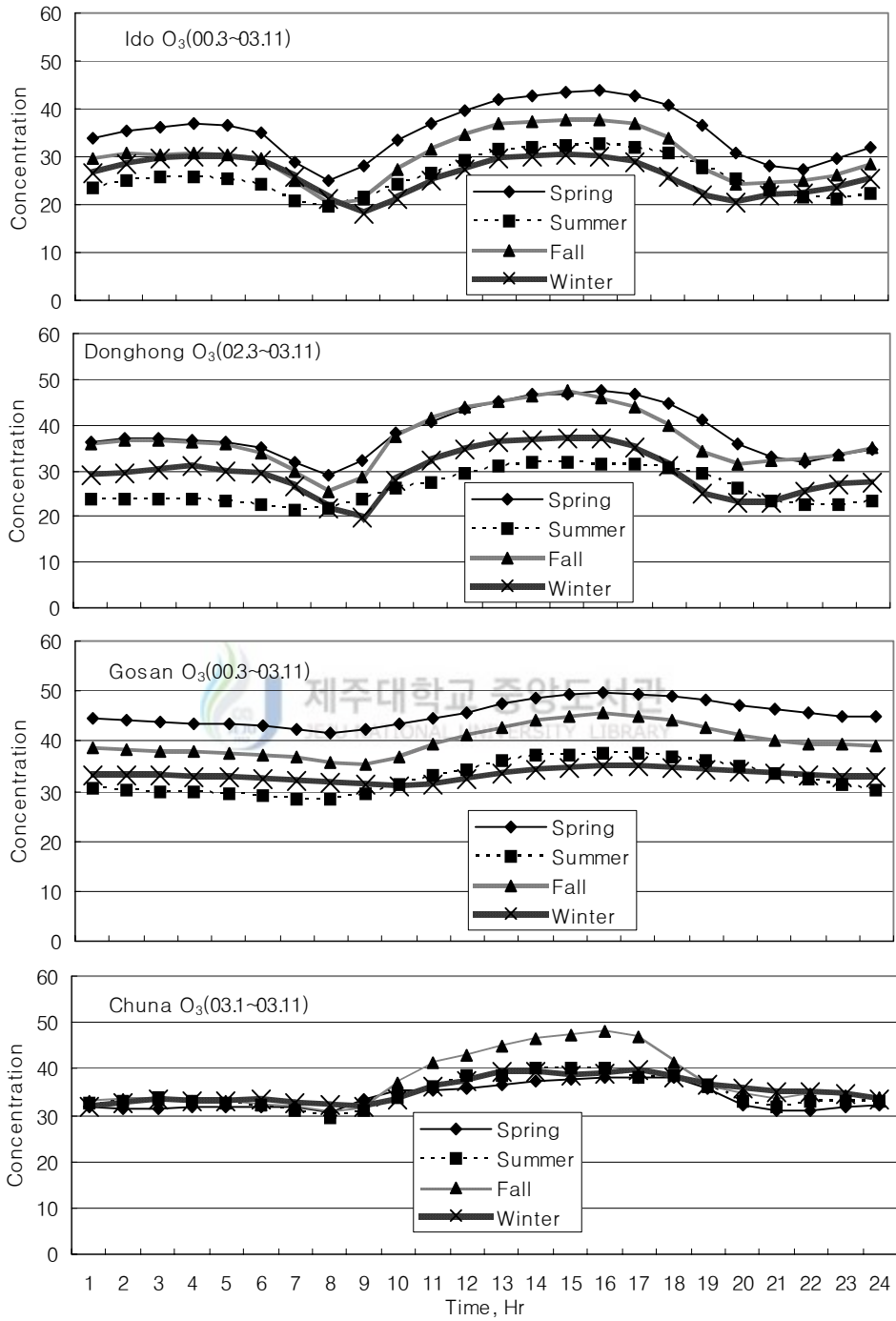


Fig. 7. Diurnal variation of O<sub>3</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

또한, 도시지역인 이도동과 동홍동은 새벽녘에 다시 농도가 증가하는 경향을 보이는 반면 전원지역인 고산리와 천아오름에서 이런경향은 거의 나타나지 않았다. 일반적으로 야간의 재상승은 야간의 복사냉각 및 풍속의 약화로 인하여 혼합고가 낮아지기 때문인 것으로 알려져 있는데(정용승과 정재섭, 1991), 고산리와 천아오름에서 새벽에 상승하지 않는 이유는 해안가와 비교적 높은 산악지대의 삼림속에 위치함으로 인해 야간에 일반풍의 영향을 지속적으로 받고 있기 때문에 야간 복사 냉각에 의한 효과가 거의 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

#### 나. SO<sub>2</sub>

Fig. 7.은 계절에 따른 시간별 SO<sub>2</sub> 농도 변화를 측정소별로 나타냈다. 먼저 전 측정소에서 SO<sub>2</sub>농도는 전반적으로 아주 낮은 수준을 유지하며 제주지역 대기환경기준(연평균 : 0.01ppm)을 충분히 만족하고 있는 상태이다. 그중에서 지역별로 보면 도시규모가 큰 제주시 이도동에서의 SO<sub>2</sub> 농도가 가장 높았으며 일 변동의 계절적 차이가 타 측정점에 비해 큼을 알 수 있었다. 그리고 아침 9시 전후와 오후 18시 이후에 농도가 증가함을 볼 수 있는데, 아침시간에서의 농도 증가는 자동차등의 오염물의 배출량이 늘어남과 동시에 대기가 안정상태에서 완전히 해소하기 직전의 오염물의 정체가 지속된 시간이기 때문으로 판단되며, 오전 10시 이후의 농도 감소는 기온 상승에 의한 대기의 불안정과 풍속의 증가가 중요한 원인이 되어 대류에 의한 확산 현상이 잘 일어나 오염물질이 희석되기 때문이다(전병일 등, 1994). 그리고 퇴근시간대에 증가는 차량운행의 증가와 가정의 난방을 위한 연료연소 및 아침과 같은 기상학적인 요인 때문으로 해석된다(장광미 등, 1996). 이러한 경향은 도시지역인 동홍동에서도 볼 수 있는데, 비록 농도 수준에서는 이도동에 비해 낮지만 변화 경향은 이도동과 흡사한 양상을 보임을 알 수 있다.

인근에 국지 오염원의 영향이 거의 없는 고산리와 천아오름에서의 SO<sub>2</sub> 변동 형태는 도시지역과 다소 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 특히 고산리에서의 일 변동을 보면 시간대별 변동이 거의 없이 일정한 수준을 보임을 알 수 있다. 또한 천아오름에서는 낮 시간대에 다소 증가하는 경향을 보이지만 그 외 시간대에서는 거의 일정한 수준을 나타내고 있다. 고산리와 천아오름에서는 국지 배출원이

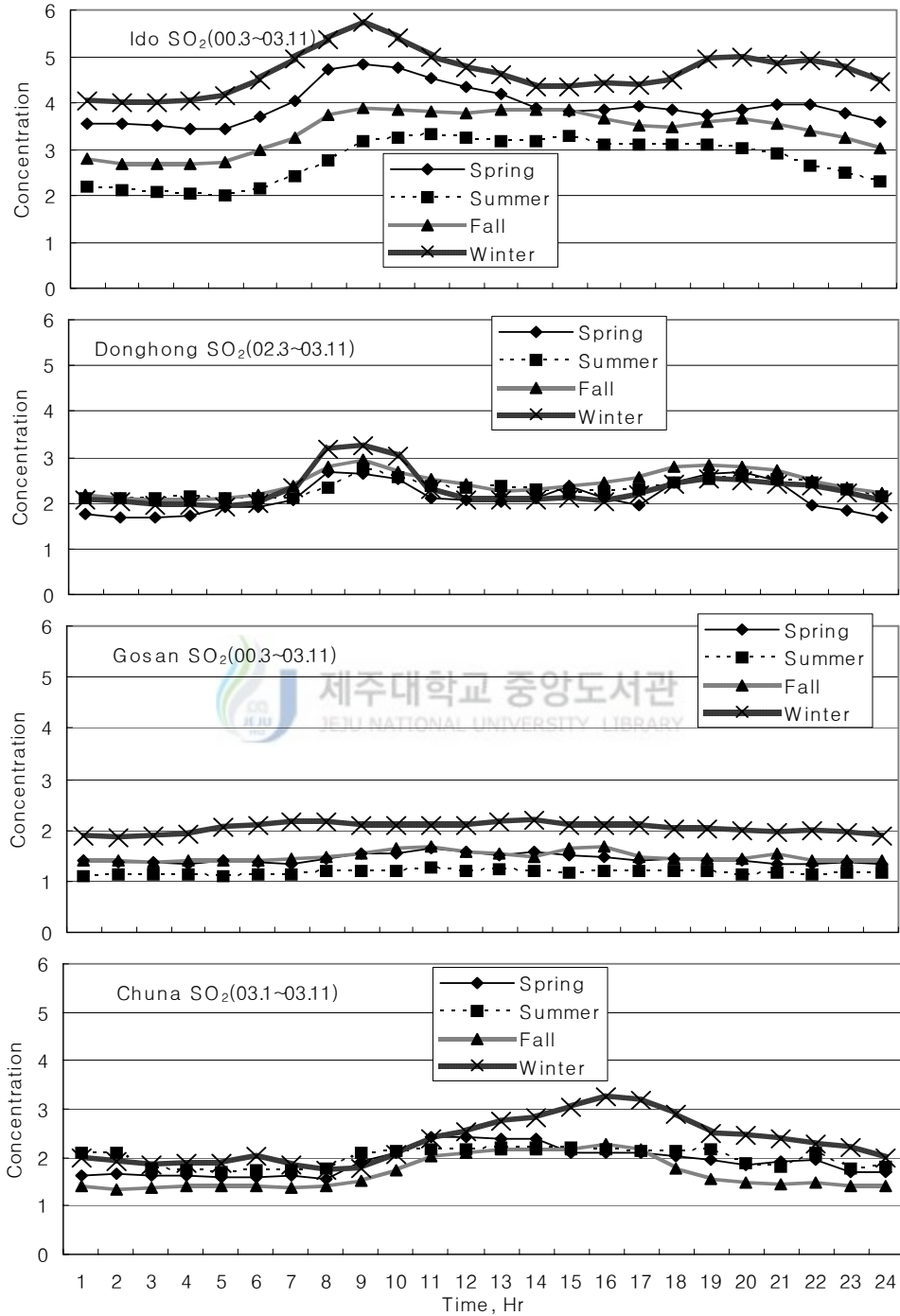


Fig. 8. Diurnal variation of SO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

존재하지 않기 때문에 지역의 대기질은 주로 일반풍의 공기질에 좌우될 것이다. 따라서 해풍의 영향이 직접적으로 영향을 미치는 고산리는 하루 종일 거의 일정한 수준을 보이지만 천아오름에서는 측정소의 지리적 위치로 인해 북 동쪽에 위치한 제주시를 거쳐 바람이 유입되기 때문에 주간 농도가 다소 증가하는 것으로 판단된다. 천아오름에서 주간에 SO<sub>2</sub> 농도가 증가 하지만 결코 제주시 주간 SO<sub>2</sub> 농도에는 훨씬 미치지 못함을 알 수 있다.

제주지역 내 4개 지역에서는 공통적으로 SO<sub>2</sub> 농도가 겨울철이 가장 높으면서 시간에 따른 변화폭이 다소 크며, 여름철은 오염도가 가장 낮고 시간에 따른 변화폭이 작게 나타나고 있었다. 이와 같이 겨울철에 SO<sub>2</sub> 오염도가 높게 나타나는 것은 난방연료의 사용증가 등 국지적 영향이 다른 계절에 비해 크기 때문으로 생각된다.

반면에 여름철에 낮은 오염도와 시간에 따른 변화폭이 작은 것은 기온상승과 강수의 두 가지 원인으로 생각 할 수 있다. 전자의 경우는 여름철에는 연료사용량이 겨울에 비해 상대적으로 적을 뿐 아니라 높은 기온으로 혼합고가 상승하고 대류가 활발하여 수직혼합이 원활하기 때문이고, 후자의 경우는 SO<sub>2</sub>는 수용성 기체이기 때문에 여름철의 많은 강수에 의해 SO<sub>2</sub>의 습식침적 효과에 의한 영향이 크기 때문이다(소선섭 등, 1996).

다. NO<sub>2</sub>

Fig. 8.은 계절에 따른 시간대별 NO<sub>2</sub> 농도 변동수준을 측정소별로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 도시지역에서의 농도수준이 전원지역에 비해 높음을 알 수 있으며 도시지역과 전원지역간에 시간대별 변동형태로 차이가 있음을 알 수 있다.

도시지역에서는 오전 8시경과 19시경에 농도 peak를 지니는데 비해 전원지역은 시간대별 변동이 없이 거의 일정한 수준으로 유지됨을 알 수 있다. 도시지역을 보면 peak 농도 수준이 여름철에는 다소 낮는데 비해 나머지 계절은 거의 비슷한 수준을 보임을 알 수 있다. 그런데 전원지역인 고산리와 천아오름에서는 peak가 나타나지 않을 뿐 아니라 계절에 따른 농도 수준도 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 도시지역에서 도시규모가 큰 제주시 이도동에서의 NO<sub>2</sub> 농도 수준이

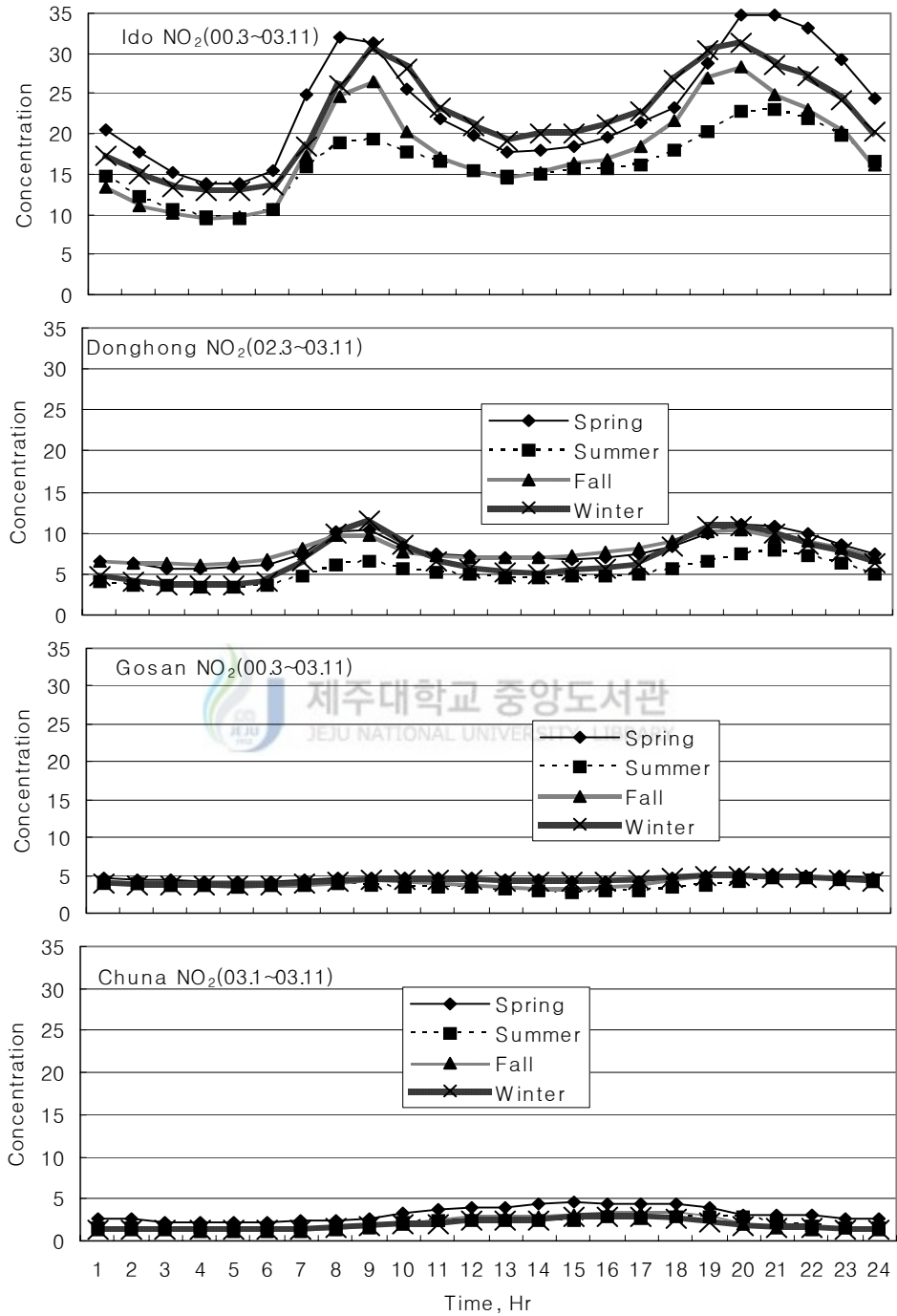


Fig. 9. Diurnal variation of NO<sub>2</sub> concentration in Jeju area(unit : ppb).

도시규모가 상대적으로 적은 서귀포시 동홍동에 비해 훨씬 높을 뿐 아니라 일변동 폭도 큼을 알 수 있다.

이도동과 동홍동의 NO<sub>2</sub> 일 변동은 오전 8시경 까지 증가하였다가 이후 감소하여 19시경에 일중 최고치가 나타나게 되며 O<sub>3</sub>의 일 변동 양상과 반대의 경향을 보임을 알 수 있는데 오후의 감소는 출근 시간 이후의 운행감소 및 11시 이후에 햇빛이 강해지면서 NO<sub>2</sub>가 오존에 의해 다시 분해 되어 줄어들기 때문이다(조광명, 1993). 또한 도시지역 특히 이도동에서 O<sub>3</sub>이 이른 새벽녘에 증가하는 경향이 나타남을 볼 수 있는데(Fig. 6 참고) O<sub>3</sub> 농도 상승에 상당하는 NO<sub>2</sub> 농도 감소가 뚜렷하게 나타남도 볼 수 있다.

#### 라. CO

Fig. 8.은 CO의 일변동 특성을 나타낸 그림인데, CO의 일변동 특성은 앞에 NO<sub>2</sub>의 일 변동 특성과 아주 흡사함을 알 수 있다. 다시 말해 도시지역인 이도동과 동홍동은 NO<sub>2</sub> 증가시기에 CO도 증가하여 하루 중 두 번의 peak를 보인데 반해 전원지역인 고산리와 천야오름에서는 일중 변동이 거의 없이 일정한 농도 수준을 보이고 있다.

또한 도시지역에 비해 전원지역의 농도 수준이 낮게 나타남을 알 수 있으며, 도시지역에서도 도시규모가 큰 제주시 이도동이 서귀포시 동홍동에 비해 농도 수준이 높으면서 일 변동폭도 큼을 알 수 있다. 그렇지만 제주도 전역에서 CO의 농도 수준은 아주 낮은 것으로 나타나고 있다.

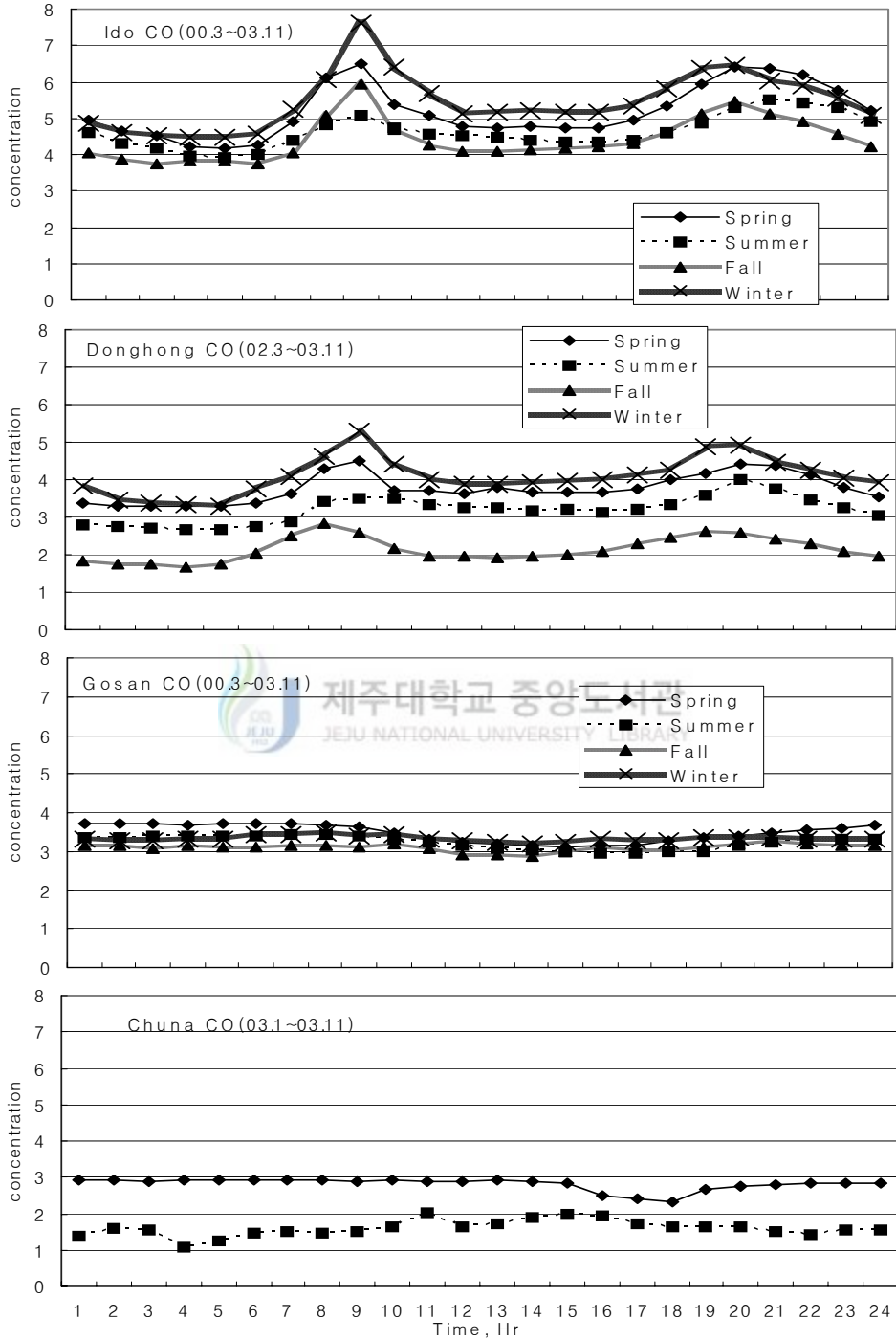


Fig. 10. Diurnal variation of CO concentration in Jeju area(unit :  $\times 10$  ppm).

## 4.2. 대기질 평가

### 4.2.1 환경기준 초과수준

앞에서 살펴본 대기질 변동 특성에서와 같이 1-hr 평균농도를 기준으로 각 오염물질의 환경기준 달성(또는 초과) 여부를 파악하였다. 그 결과에 따르면 O<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub>에서만 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타났다.

#### 가. O<sub>3</sub>

Table 8에는 최근 4년간 제주지역에서 측정된 농도 계급별 오존 출현빈도를 나타냈다. 표에서 보면 제주지역 대기중 오존은 20 ppb 이하의 농도로 출현하는 빈도는 평균 17%이며, 40 ppb이상의 농도에서는 평균 32% 정도로 나타났다. 그리고 도시지역인 이도동과 동홍동은 전원지역인 고산리와 천아오름에 비해 20 ppb 이하의 낮은 농도 수준에서의 빈도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 60 ppb 이상의 농도 수준을 보이는 경우를 보면 비록 2003년도 고산리에서는 출현하지 않았지만, 전반적으로 고산리와 천아오름에서 출현빈도가 도시지역에 비해 높음을 알 수 있다.

도심지역인 이도동과 동홍동을 서로 비교하면 도시규모가 작은 서귀포시 동홍동에서의 고농도 출현빈도가 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. 제주지역 대기 중 O<sub>3</sub> 농도의 출현 빈도는 20~60 ppb 사이에서 평균 78% 수준이지만 도시지역인 이도동과 동홍동에 비해 전원지역인 고산리와 천아오름에서 높은 빈도를 보였다. 제주지역 대기 중 O<sub>3</sub> 농도가 20 ppb에서 60ppb 사이에 가장 빈번하게 출현하는 것은, 우리나라 대도시 지역인 서울지역에서 10 ppb 이하의 온도 출현 빈도가 40~60% 정도인 것과는 큰 차이를 보이지만(유성철 등, 1999), 동북아시아 대륙 배경농도 수준과 유사한 농도 범위이며(Husar, 1998), 또한 세계 청정지역의 전형적인 농도 수준이 20~80 ppb (Fynlason-pitts와 pitts, 1986) 수준인 것과는 유사한 수준이라고



Table 8. The occurrence frequency of 1-hr average ozone concentration in Jeju area during 2000.1 to 2003.11

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

볼 수 있다.

Fig. 10.는 8시간 평균 오존 농도를 기준으로 설정된 대기환경기준(60 ppb)의 초과율을 연도별로 나타냈다. 그리고 Fig. 11.에는 최근 4년 동안의 대기환경초과 일수를 월별로 나타냈다. Fig. 10에서 해안가에 위치하면서 그동안 제주도 지역 대기질을 대표해온 고산리의 O3 출현 특성을 보면, 2002년까지 오존의 대기환경 기준 초과율이 제주지역내 다른 지역보다 월등히 높았다. 2003년에는 극히 미미한 수준을 나타냈다. 그리고 해발 700m의 산림지역에 위치한 천아오름에서 초과율이 대략 10% 수준으로 높은 것으로 파악되었다. 도시지역인 제주시 이도동에

서는 최근 4년간 대기환경기준 초과율에는 변화가 거의 없었으나 서귀포시 동홍동에서의 초과율은 최근 2년간 측정자료에서도 상당히 높은 수준을 보였다. 그렇지만 제주도 전역에 걸쳐 1-hr 평균농도를 기준으로 보면 대기환경기준(100 ppb)을 초과하는 경우는 전혀 발견되지 않았다

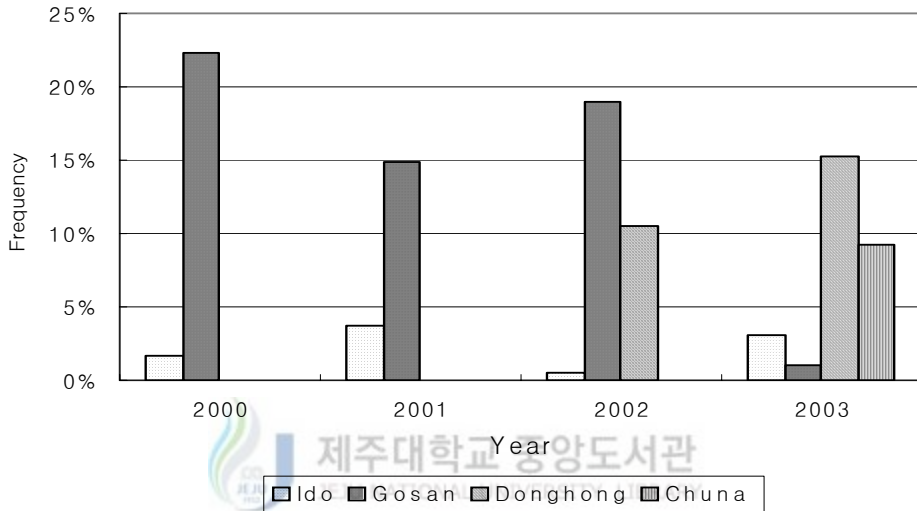


Fig. 11. Annual trend of O<sub>3</sub> exceedance pattern was compared with Jeju area(Ido, Gosan, Donghong, Chuna), 2000.1~2003.11.

Fig. 11에서 최근 4년간의 누적 초과일수를 보면 도시지역과 전원지역에 관계 없이 모두 봄철과 가을철에 집중되고 있음을 알 수 있다. 그리고 도시지역인 동홍동에서의 초과일수가 이도동 지역에서 보다 측정기간이 짧음에도 불구하고 빈번하게 나타남을 알 수 있다. 전원지역인 천아오름에서도 측정기간이 1년 정도 밖에 되지 않음에도 불구하고 초과일수가 6월과 9~10월에 빈번하게 나타남을 알 수 있다.

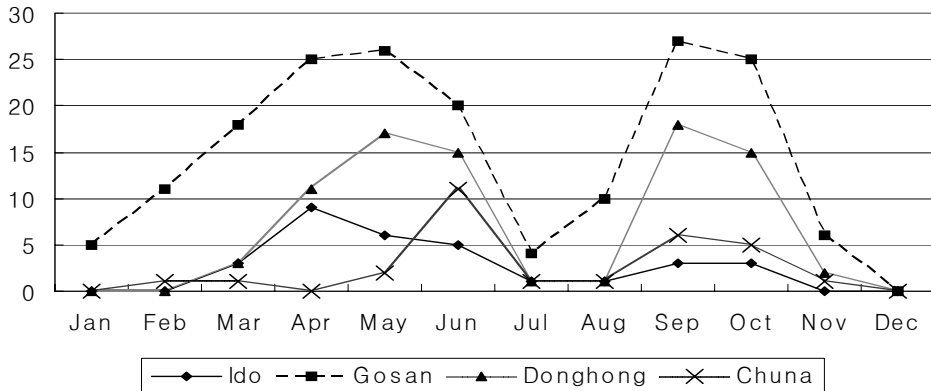


Fig. 12. Cumulative number of days exceed the 8-hr ozone average concentration of 60 ppb in Jeju area from Jan. 2000 to Nov. 2003.

Table. 9에서 계절별로 오존농도가 환경기준 초과경우(excess)와 그렇지 않은 경우(normal)에 대하여 각 오염물질의 평균농도와 기상인자를 정리한 것이다. 표에서 보면 환경기준 초과하는 날에는 도시지역과 전원지역에 관계없이 4개 측정소에서 측정된 모든 기체상 대기오염의 물질들의 농도도 전반적으로 증가하였으며, 일교차, 최고온도, 일사량도 높았고 습도는 낮은 경향을 보였다. 이와 같은 현상은 고농도 오존이 발생하기 위해서는 일사가 강하고 습도가 낮아야만 광화학 반응이 촉진되므로 가능하다는 사실을 반영한다고 볼 수 있다(김민영 등, 2002). 이런 직접적인 요인 외에도, 최고기온 증가에 따른 혼합고의 상승으로 인해 생물권 상층의 오존이 지표면 부근으로 쉽게 유입될 수 있다는 점도 간과 할 수 없다(윤마병과 정용승, 1995). 일반적으로 오존 농도는 대기 안정도, 풍속, 풍향, 기온, 습도, 일사량, 혼합고 등과 같은 기상요소에 의해 변화될 수 있다. 특히 오존의 농도가 높게 나타날 수 있는 기상조건은 대기가 아주 안정하고, 풍속이 약하며, 기온이 20℃ 이상으로 높고, 습도가 70%이하로 대기가 건조하며, 일사량이 강할 때 등으로 보고 되고 있다(Seigneur와 Saxena, 1985). 국내에서 대기중 오존농도와 기상요소와의 상관관계에 대해 밝혀진 바에 의하면 상관계수를 기준으로 오존농도와 기온사이에서는 0.148, 오존농도와 습도 간에는 -0.402 정도 상관성을 보이는 것으로 보고된 바 있으며(이기원 등, 1993), 오존농도와 일사량은

0.42, 기온과는 0.28, 풍속과는 0.38의 상관성이 있음을 밝힌 바가 있다(정용 등, 1986). 오존농도는 기상요소 및 기타 다른 오염물질들과의 상관관계에서 상관계수가 0.5를 넘지 않는데, 이는 오존이 광화학 반응과 산화반응등 여러 반응에 의하여 생성, 소멸되는 2차 오염물질로서 많은 변수에 의해 결정되기 때문이다(김유근과 홍정혜, 1998).

Table 9. Comparison of air pollutant concentration and meteorology parameters between excess day and normal day base on 8-hr average air quality standard of Korea

Station	Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters					
			O <sub>3</sub> 8-hr	SO <sub>2</sub> 24-hr	NO <sub>2</sub> 24-hr	CO 8-hr	ΔT (°C)	Max Temp. (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Rad. (W/m <sup>2</sup> )	
Ido	Spring	Normal	44.4	3.9	22.8	7.3	6.7	17.8	2.3	65.4	660.3	
		Excess	64.3	3.8	21.2	6.5	7.3	18.6	2.8	63.3	662.3	
	Summer	Normal	35.1	2.5	14.6	6.1	5.8	27.6	2.0	76.2	669.4	
		Excess	67.9	3.5	15.1	8.3	7.0	27.3	2.4	58.4	836.8	
	Fall	Normal	39.7	3.3	16.0	6.0	5.8	21.0	2.3	68.2	547.3	
		Excess	67.9	3.0	18.4	6.3	6.5	23.9	1.8	70.4	692.2	
	Winter	Normal	32.9	4.8	20.5	6.9	5.4	9.7	3.0	63.4	369.1	
		Excess										
	Dong hong	Spring	Normal	48.7	2.1	7.8	4.4	6.6	19.3	1.7	66.4	-
			Excess	69.3	2.1	9.0	4.6	8.0	22.1	1.8	56.8	-
Summer		Normal	33.7	2.4	5.3	3.8	5.5	28.0	1.7	80.7	-	
		Excess	67.4	2.3	5.0	4.7	7.5	26.9	1.7	65.4	-	
Fall		Normal	46.9	2.4	7.7	5.0	7.0	23.4	1.9	65.2	-	
		Excess	67.6	2.3	8.4	4.8	7.6	26.4	1.9	64.1	-	
Winter		Normal	36.7	2.3	6.8	4.7	7.0	12.5	1.9	62.3	-	
		Excess	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Table 9. Continued

Station	Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters					
			O <sub>3</sub> 8-hr	SO <sub>2</sub> 24-hr	NO <sub>2</sub> 24-hr	CO 8-hr	ΔT (°C)	Max Temp. (°C)	Wind Speed (m/s)	R.H. (%)	Rad. (W/m <sup>2</sup> )	
Gosan	Spring	Normal	45.1	1.3	4.5	4.7	6.4	17.0	3.6	74.1	720.6	
		Excess	65.1	1.5	4.8	4.3	6.7	18.4	1.8	73.4	907.4	
	Summer	Normal	38.8	1.1	3.8	5.1	5.3	26.4	3.0	85.2	728.9	
		Excess	68.9	1.4	5.4	6.6	6.1	25.5	3.4	79.0	911.0	
	Fall	Normal	46.2	1.4	4.3	4.0	6.0	21.2	3.7	69.8	645.4	
		Excess	67.8	1.9	4.7	5.3	6.4	23.7	4.4	68.8	796.8	
	Winter	Normal	35.8	2.0	4.2	4.1	5.4	9.6	5.3	66.2	419.6	
		Excess	67.7	6.6	7.3	7.4	7.0	12.5	1.8	59.5	664.4	
	Chuna	Spring	Normal	39.7	2.0	2.1	3.3	9.5	18.3	2.4	73.2	662.8
			Excess	68.2	3.5	2.6	2.6	5.1	18.2	4.4	82.7	-
Summer		Normal	43.2	2.0	2.1	2.2	8.1	25.2	2.1	79.9	567.9	
		Excess	70.6	2.7	3.1	3.1	11.8	24.1	2.1	66.7	735.7	
Fall		Normal	46.6	1.7	2.1	-	10.1	19.0	1.7	-	721.8	
		Excess	68.8	2.7	2.3	-	12.9	21.6	1.3	-	804.5	
Winter		Normal	40.3	2.4	1.9	7.1	-	-	-	-	-	
		Excess	61.5	4.4	1.9	4.4	-	-	-	-	-	

나. NO<sub>2</sub>

Table 10은 일평균 NO<sub>2</sub> 농도가 지역대기환경기준 초과 상황을 계절별로 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 오존과는 달리 제주지역에서 NO<sub>2</sub>가 대기환경기준(일평균 40 ppb) 초과하는 경우는 도시지역인 이도동에서만 나타났다. 그때의 기상 상태를 살펴보면(Table. 11) 오존 초과시와 같이 일교차, 최고온도, 일사량이 높았으며, 습도가 낮았음을 알 수 있었다. 그리고 다른 대기오염 물질들 특히

SO<sub>2</sub>와 CO의 농도의 증가 폭이 아주 높음을 알 수 있다. 이화운(1999)등은 부산 지역에서 온도, 일사량이 높고 풍속이 낮을 때 고농도 NO<sub>2</sub>발생 확률이 높다는 주장과 잘 일치하였다. 그리고 이러한 초과를 주로 봄철에 집중되어 나타났다.

Table 10. Number of excess days and Frequency of 24-hr NO<sub>2</sub> standard in Jeju area(2000~2003.11)

		Ido	Gosan	Donghong	Chuna
2000	No. of day	23	0		
	Frequency,%	6.32	0		
2001	No. of day	14	0		
	Frequency,%	3.89	0		
2002	No. of day	28	0	0	
	Frequency,%	7.67	0	0	
2003	No. of day	0	0	0	0
	Frequency,%	0	0	0	0
Total	No. of day	42	0	0	0
	Frequency,%	4.57	0	0	0

Table 11. Air pollutants and meteorological parameters for excess-day and normal-day of NO<sub>2</sub>

Season	Con- dition	Concentration				meteorology parameters				
		NO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	ΔT	Max Temp.	Wind Speed	R.H.	Rad.
		24-hr	8-hr	24-hr	8-hr	(°C)	(°C)	(m/s)	(%)	(W/m <sup>2</sup> )
Spring	Normal	22.8	44.4	3.9	7.3	6.7	17.8	2.3	65.4	660.3
	Excess	44.8	43.3	6.6	8.7	7.5	19.1	1.8	58.8	715.7
Summer	Normal	14.6	35.1	2.5	6.1	5.8	27.6	2.0	76.2	665.3
	Excess	45.1	39.0	3.2	6.6	6.2	25.0	1.5	65.7	756.2
Fall	Normal	16.0	39.7	3.3	6.0	5.8	21.0	2.3	68.2	547.3
	Excess	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Winter	Normal	20.5	32.9	4.8	6.9	5.4	9.7	3.0	63.4	369.1
	Excess	43.9	32.0	9.5	11.9	7.5	12.6	2.0	61.5	365.6

## 4.2.2 오존관련 지수 분석

### 가. 오존 청정도지수

Mizoguchi 등(1985)는 일본의 오존 측정소의 청정도를 분류하기 위하여, 다음식을 사용하여 평균상대 표준편차를 산출한 바 있다. 이의 개념은 인위적 대기오염원이 없는 청정지역에서 오존과 같은 2차 광화학 오염물의 농도 변화는 주로 수평 및 연직방향의 유입/유출의 영향을 받기 때문에 일별 변동성은 대도시에 비하여 상대적으로 작을 수밖에 없다는 가정 하에 산출되는 값으로서, 오존의 청정도로 나타내는 지수라고 정의하였다.

$$Ors = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{j=1}^N \left(\frac{S}{M}\right)$$

여기서 Ors는 측정소의 청정도를 나타내는 평균 상대 표준편차이고, N은 측정일수, S는 일별 표준편차이며 M는 일평균값이다.

Table 12은 제주지역에서의 관측자료를 토대로 평균상대 표준편차를 계산하여 지역별로 정리한 것이다. 윗식을 이용하여 계산한 남극 및 일본내 청정지역의 평균상대 표준편차값은 0.03~0.3정도라고 했다(Mizoguchi 등, 1985). 따라서 제주지역에서 계산된 평균상대표준편차를 보면 도시지역인 이도동과 동홍동은 0.3을 넘는 경우도 있지만 그 외 고산리와 천아오름에서는 모두 0.3이내의 값을 보였다. 이로써 판단해 보면, 제주지역의 대기에서 오존의 월평균 농도 값은 비교적 높은 수준을 보이지만 평균상대표준편차로써 보면 오존은 아주 청정한 상태를 유지할 수 있다고 할 수 있다.

Table 12. Mean relative standard deviations for O<sub>3</sub> concentrations in Jeju area(2002.3~2003.11)

Year	Season	Ido		Gosan		Donghong		Chuna	
		mean	Ors	mean	Ors	mean	Ors	mean	Ors
2002	Spring	31.83	0.30	48.20	0.13	32.20	0.38	-	-
	Summer	24.32	0.34	37.19	0.24	23.80	0.43	-	-
	Fall	30.40	0.29	41.93	0.13	38.56	0.30	-	-
	Winter	27.78	0.24	26.22	0.20	33.82	0.31	35.39	0.17
2003	Spring	37.27	0.25	31.52	0.14	45.11	0.25	33.08	0.24
	Summer	30.03	0.37	24.18	0.19	28.92	0.26	34.82	0.27
	Fall	29.19	0.38	30.04	0.21	35.40	0.30	37.04	0.25

나. 식물보호를 위한 오존지수(AOT40, SUM06)

현재까지는 오존 지표중 AOT40, SUM06과 같이 일정 한계농도 이상의 누적치로 나타내는 지표들이 가장 적절한 오존 지표로 인정되고 있으나, 한가지 지표만으로는 식생에 영향을 주는 오존특성을 표현하기에는 한계가 있으므로 농도별 빈도수(Table 8)와 같은 기존의 분석방법과 함께 적용시키는 것이 바람직하다(Musselman 등, 1994).

Table 13에는 지역별로 산출된 오존 지수값을 정리하여 나타냈다. 여기서 AOT40과 SUM06은 매년 4에서 9월 사이에 낮 시간인 09시부터 15시까지의 1-hr 평균오존농도를 기준으로 산출하였다.

Table 13에서 보듯이 도시지역인 이도동과 동홍동을 보면 동홍동의 오존 지수값이 이도동에 비하여 2~4배 정도 높은 수준을 보였는데, 이는 동홍동에서 percentile 농도가 이도동에 비해 10~20 ppb 정도 높은 것과 관련이 깊음을 알 수 있다.

전원지역인 고산리와 천아오름에서의 지수값은 고산리에서 2003년을 제외하면 동홍동의 지수범위와 유사함을 알 수 있다.

제주지역의 SUM06 지수값은 도시지역에서는 0.31~12 ppm·hr 범위이고, 전



원지역은 5.9~14.4 ppm·hr 범위인데, 우리나라 서울지역에서 보고된 0.05~7.1 ppm·hr 에 비해 훨씬 높은 수준임을 알 수 있다(윤성철, 1999). 그리고 중국 양쯔강 유역의 농촌지역에 대한 SUM06 지수값이 15~25 ppm·hr 로 보고된 바 있는데(Vincent Cheung와 Wang, 2001), 제주의 전원지역인 고산리와 천아오름 지역은 이에 비해서 낮은 수준임을 알 수 있다.

제주지역에서 4월부터 9월까지 식물의 성장시기에 계산된 AOT40 지수값을 보면 도시지역에서는 1.64~8.59 ppm·hr 의 범위이고 전원지역에서는 5.30~11.09 ppm·hr의 범위를 보이고 있다. 이는 도심을 제외한 서울지역에서 10~20 ppm·hr, 경기지역은 5~15 ppm·hr 수준과 비교할 때 결코 낮은 수준은 아닌 것으로 판단된다. 그렇지만 일본의 Oki 섬에서 보고된 10~30 ppm·hr에 비하여 낮은 수준임을 알 수 있다(Pakpong 등, 2002).

이들 오존 지수는 모두 고농도의 누적치로서 산출되므로 고농도 오존의 출현 빈도가 주로 많은 봄철과 여름철 동안에 결측이 많으면 지수값은 실제보다 훨씬 낮게 평가될 수 있다. 검토대상기간(4월에서 9월)동안에 결측율을 보면 고산리에서의 결측이 매우 많았음을 알 수 있다. 따라서 고산리에서의 AOT40과 SUM06 지수값은 실제로는 이보다 더 큰 값이었을 것으로 판단된다.

Table 15에 연간 오존농도 분포를 percentile로 환산한 결과를 보면 최근 4년간의 95 percentile 농도가 제주시에서 57 ppb를 넘지 않는데 비해 동홍동에서는 64 ppb를 넘어서고 있다. 그리고 전원지역에서도 65 ppb를 넘어서고 있다. 99 percentile에 있어서도 도시지역인 제주시는 60ppb를 넘고 있으며 동홍동에서는 75 ppb를 훨씬 초과하고 있다. 그리고 전원지역인 고산리와 천아오름에서도 70 ppb를 초과하는 것으로 나타나고 있다.

이로써 보면 제주지역에서 식생에 만성적 피해를 줄 수 있는 오존 빈도가 제주시를 제외한 전 지역에 걸쳐서 최소한 5%, 즉 438시간을 넘어서고 있을 뿐 아니라 이 빈도가 식물의 성장이 왕성한 시기에 발생되고 있는 점을 감안하면 하절기 식물 생장기간동안 만성피해가 염려되는 오존 노출 기간은 대략 20%에 달하는 것으로 볼 수 있다.

Table 13. Various ozone indices, yearly average, and percentiles in Jeju area

Site	Year	Indices(ppm · hr)		Max. (ppb)	avg. (ppb)	Percentile concentration(ppb)	
		AOT40	SUM06			95	99
Ido	2000	3.07	1.57	71	31.2	55	62
	2001	4.43	2.59	76	35.43	57	66
	2002	1.64	0.31	64	30.09	49	56
	2003	4.57	2.60	70	34.24	57	65
Go san	2000	11.09	14.41	87	46.26	69	78
	2001	5.30	5.91	80	40.02	65	71
	2002	9.86	12.74	92	43.70	71	78
	2003	0.32	0.00	51	26.49	43	47
Dong hong	2002	5.40	6.73	92	33.30	64	75
	2003	8.59	11.79	92	37.95	70	84
Chuna	2003	5.87	6.96	97	36.00	68	84



#### 4.2.3 기상인자의 단순 상관분석

Table 14는 각 지역에 대해서 오염물질 농도와 기상인자간의 상관관계를 분석한 결과를 나타냈다. 제주지역에서 가장 규모가 큰 도시지역에 위치한 이도동에서 오염물질들간의 상관성을 보면 1차 오염물질과 직접적인 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO들 간에는 양의 상관성을 보이고 있으나 2차 오염물질인 O<sub>3</sub>와 이들 1차 오염물질간에는 상관성이 거의 보이지 않았다. 그리고 오염물질 농도와 기상인자 사이의 상관성을 보면, SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>는 기온과 상대습도에 대하여 음의 상관성을 보이고, 일사량과는 상관성을 보이지 않았다. 그리고 O<sub>3</sub>는 일사량과는 양의 상관성을 보이고 습도와는 음의 상관성을 나타냈다. 그렇지만 CO는 기상인자들과는 상관관계를 거의 보이지 않았다.

동홍동을 보면 O<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub> 사이에서는 상관성을 보이나 1차 오염물질들과 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO들 사이에서는 상관성이 거의 보이지 않았다. 오염물질과

기상인자 사이에서는  $O_3$ ,  $SO_2$  및  $NO_2$ 는 상대습도와 음의 상관성을 나타냈으나 CO는 이도동과 마찬가지로 기상인자들과의 상관관계를 보이지 않았다. 다만 동홍동에서 일사 관측결과가 없어 직접 파악할 수는 없지만  $O_3$ 와의 상관성은 비교적 큰 것으로 예상된다.

고산리 해안변 지역에서의 상관성 분석의 결과를 보면, 도시지역과 다소 다른 특징을 보임을 알 수 있다. 즉, CO가  $O_3$ ,  $SO_2$  및  $NO_2$  등 모든 대기오염물질과 양의 상관성을 나타냈지만  $SO_2$ 를 제외한 CO,  $NO_2$ ,  $O_3$  모두 습도와의 상관성을 거의 보이지 않음을 알 수 있다. 제주도의 서쪽 끝 해안가의 절벽위에 위치한 고산리 측정소의 주변지역은 특징적인 오염원이 없을 뿐 아니라 평소 바람이 심한 지역으로서, CO,  $SO_2$ ,  $NO_2$ 가 아주 저 농도로 거의 일정한 수준을 유지하고 있는데 비해  $O_3$ 은 비교적 높은 농도 수준을 유지하고 있으므로 고산리 지역의 대기질은 국지배출원에 의해 지배되는 것은 아닐 것으로 판단된다.

그리고 앞에서 이미 살펴본 바와 같이 제주지역에서 도시지역이나 해안지역 모두 각 오염물질 및 기상인자들간의 상관성이 그다지 크지 않은데, 이는 제주지역은 전반적으로 대기순환이 원활하기 때문에 국지 배출과 국지 배출에 따른 국지지역의 광화학 반응의 결과가 아주 미미하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 도시지역에서도 1차 오염물질과 직접적으로 관련이 있는  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO의 농도가 낮는데 비해 2차 오염물질인  $O_3$  농도는 비교적 높게 나타나고 있음은 제주지역의 도시 대기질도 대기교환에 따른 외부 공기의 유입이 크게 작용하고 있다고 판단된다(장광미 등, 1996).

Table 14. Correlation coefficient between concentration of pollutant and meteorological parameter

Site		O <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Temp.	W.S	Hum.	Rad.
Ido	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.038	1						
	NO <sub>2</sub>	0.066	0.529	1					
	CO	0.172	0.245	0.305	1				
	Temp.	0.094	-0.337	-0.141	0.020	1			
	W.S	0.037	0.164	-0.019	-0.010	-0.292	1		
	Hum.	-0.217	-0.446	-0.363	-0.084	0.359	-0.321	1	
	Rad.	0.323	-0.031	0.081	0.012	0.453	-0.151	-0.256	1
Dong hong	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.031	1						
	NO <sub>2</sub>	0.240	0.033	1					
	CO	0.173	0.170	0.072	1				
	Temp.	-0.074	0.044	-0.179	-0.265	1			
	W.S	-0.012	0.171	0.211	0.255	-0.128	1		
	Hum.	-0.459	-0.238	-0.321	-0.172	0.443	-0.279	1	
Gosan	O <sub>3</sub>	1							
	SO <sub>2</sub>	0.146	1						
	NO <sub>2</sub>	0.174	0.343	1					
	CO	0.310	0.332	0.261	1				
	Temp.	0.278	-0.219	0.127	0.223	1			
	W.S	0.064	0.039	-0.252	-0.053	-0.160	1		
	Hum.	-0.117	-0.288	0.039	0.119	0.471	-0.230	1	
Rad.	0.398	-0.022	0.030	0.196	0.471	-0.148	-0.088	1	

## V 결 론

청정한 대기질을 지닌 것으로 알려진 제주 지역을 대상으로 대기질 변동특성 파악하고 평가하기 위해 2000.1~2003.11까지 제주도 4개 지점의 대기질 자료와 기상 관측 자료를 이용하여 도시지역과 전원지역의 대기질 특성을 비교하여 살펴본 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 도시지역인 경우 대기오염물질 농도의 수준이 높고, 변동폭이 큰 반면에 전원지역인 천아오름과 고산은 오존을 제외하여 농도가 매우 낮았으며 변동도 매우 미미함을 알 수 있었다. 그렇지만 제주 지역에서는 오존을 제외한 기타 기체상 오염물질의 농도 수준은 아주 낮은 상태였다.
2. 제주지역에서 대기환경기준을 초과하는 대기오염물질은 O<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub> 뿐이었으며, NO<sub>2</sub>의 환경기준초과는 제주시에서만 나타났다. 오존의 대기환경기준 초과 일에는 다른 기체상 오염물질의 농도도 같이 높았으며 제주도내 4개 측정점 모두에서 일교차, 일사량 및 기온도 높았고, 습도는 낮은 기상조건을 보였다.
3. 제주지역은 오존의 월평균 농도 값은 비교적 높은 수준을 보이지만 평균상대표준편차로써 오존 청정도를 평가하면 청정상태를 유지하는 것을 알 수 있다.
4. 제주지역의 SUM06 지수값은 도시지역에서는 0.31~12 ppm·hr, 전원지역은 5.9~14.4 ppm·hr 수준이었으며, AOT40 지수값을 보면 도시지역에서는 1.64~8.59 ppm·hr, 전원지역에서는 5.30~11.09 ppm·hr의 범위를 보였다. 서울이나 경기도 지역과 비교 할 때 결코 낮은 수준이 아님을 알 수 있었다.
5. 제주지역에서 도시지역이나 해안지역 모두 각 오염물질 및 기상인자들간의 상

관성이 그다지 크지 않은데, 이는 제주지역은 전반적으로 대기 순환이 원활하기 때문으로 판단된다. 또한 도시지역에서도 1차 오염물질과 직접적으로 관련이 있는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO의 농도가 낮은데 비해 2차 오염물질인 O<sub>3</sub> 농도는 비교적 높게 나타나고 있음은 제주지역의 도시 대기질도 대기교환에 따른 외부 공기의 유입이 크게 작용하고 있다고 판단된다.



## VI. 참고 문헌

- 김민영, 최여진, 김기현, 2002, 오존의 환경기준 초과양상에 대한 연구, 한국환경과학회, 23(8), 683-696
- 김시완, 박순웅, 이보람, 1997, 종관 기상장에 따른 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO 그리고 O<sub>3</sub>농도의 변화, 한국환경기상학회, 33(2), 273-287.
- 김영성, 1996, 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회, 12, 55-66.
- 김영성, 김영주, 김진영, 2001, 1999년 기류의 이동궤적에 따른 우리나라 주요도시의 일상화탄소 농도변화, 한국대기환경학회지, 17(6), 451-461.
- 김용표, 김진영, 박세옥, 김성주, 심상규, 문길주, 박경운, 허철구, 1996 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구 : (II) 기체상 대기오염물질의 특성, 한국대기보전학회, 12(1), 91-99.
- 김용표, 김현진, 이승복, 1999, 우리나라 배경 농도 측정소의 측정결과 검토, 한국대기환경학회, 15(4), 505-512.
- 김유근, 홍정혜, 1998, 야간 지표 고농도 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회, 14(6), 545-554.
- 나진균외 6인, 1985, 대기오염예측을 위한 대기 안정도와 혼합고 분석에 관한 연구, 국립환경연구소보, 6, 17-33.
- 박경운, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1994, 제주도 고산측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회, 10(4), 252-259.
- 박일수, 이덕길, 강인구, 1991 서울지역 겨울철 SO<sub>2</sub>농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96~104.
- 서명석, 박경운, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 179-184
- 소선섭, 광종흠, 1985, 일반기상학, 교문사, 83-83
- 소선섭, 이대성, 신흥렬, 1996, 우리나라 주요도시별 대기중 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>2</sub> 오염도의 변화 특성, 한국환경과학회, 17(2), 174-182.

- 신찬기, 한진석, 김윤신, 1992, 대기오염농도와 기상인자의 관련성 연구-서울 광화문 중심으로-, 한국대기보전학회, 8(2), 213~220.
- 안전공학협회편, 1982, 대기오염, 해문당, 9.
- 어수미, 김광진, 이규남, 1997, 기상인자가 대기오염에 미치는 영향, 한국환경위생학회지, 23(4), 104-114.
- 오광중, 광진, 정덕영, 손건태, 1998, 부산지역의 대기오염물질농도와 기상인자간의 통계분석, 대한환경공학회, 20(9), 1235-1245.
- 오인보, 김유근, 2002, 한반도 주요 대도시지역의 지표오존 특성 : 추세, 일변화, 월변화, 수평분포, 한국에기환경학회, 18(4), 253-264.
- 윤마병, 정용승, 1995, 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존, 한국대기보전학회지, 11(1), 85-93.
- 윤성철, 박은우, 장영기, 1999, 한계농도 누적 오존지표로 본 1990~1997년의 수도권 오존농도의 변화, 한국대기환경학회, 15(4), 429-439
- 이기원, 권숙표, 정용, 1993, 서울시 대기중 오존오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석-광화문 지역을 중심으로-, 한국대기보전학회, 9(1), 107-115.
- 이덕길, 강인구, 김양균, 홍윝기, 나진균, 유승도, 김정수, 이재인, 정준화, 양은희, 1990, 도시지역 도시대기질에 관한 연구(II) - 대기오염 영향인자 분석, 국립환경연구원보, 12, 71~96.
- 이정주, 이동범, 윤중섭, 2000, 청정지역과 도시지역에서 NO<sub>2</sub>광분해율이 오존농도에 미치는 영향에 관한 연구, 한국환경위생학회, 8(4), 141-147.
- 이종범, 강인구, 김양균, 나진균, 이석조, 유승도, 김정수, 이재인, 박보현, 남영규, 1989, 도시지역 도시대기질에 관한 연구(I) - 기상특성 및 대기질 분석을 중심으로, 국립환경연구원보, 11, 81~96
- 이화운, 김유근, 장난심, 이용희, 1999, 부산광역시에서의 NO<sub>2</sub>농도 특성 및 기상 영향인자 분석, 한국환경과학회, 8(2), 465-471
- 장광미, 이호근, 서명석, 박경윤, 강창희, 허철구, 심상규, 1996, 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO<sub>2</sub> 농도 변화 특성, 한국대기보전학회, 12(5), 541-554.
- 전미경, 1999, 지역대기환경기준 설정방안 연구, 경기개발연구원 연구보고서, 15호, 1-190



- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기 오염 농도에 미치는 영향, 한국환경과학회, 3(4), 357-365.
- 전병일, 1999, 부산 동삼동 지역의 대기오염농도 특성, 한국환경과학회, 8(3), 281-286.
- 정영진, 이동인, 한영호, 이협희, 1998, 기상조건에 따른 부산지역 대기오염물질 농도변화와 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회, 14(3), 177-189.
- 정용, 장재연, 권숙표, 1986, 서울시 대기중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회, 2(1), 73-79.
- 정용승, 정재섭, 1991, 서울수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169~179.
- 조광명, 1993, 대기오염. 청문각, 39.
- 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경운, 1992, 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회, 8(4), 257-261.
- 환경부, 2002, 환경백서
- 환경부, 2003, 대기환경기준의 변천사.
- 吉田忠雄, 1981, 環境保全の 化學技術, 九善, 35.
- 森口實, 千秋銳夫, 小川弘, 1990, 環境汚染と氣象, 朝倉書店, 249
- Akimoto, H., Narita, H., 1994, Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1111 resolution. Atmospheric Environment 28, 213.225.
- Akimoto, H.H., Mukai, M., Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.M., Liu, M., Buhr, K.J., Hsu, D.A., Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J.T., Merrill, and R.E., Newell, 1996, Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, J. Geophys. Res., 101, 1999~2010.
- Ashmore, M., Fuhrer, J., 2000, New directions: use and abuse of the AOT40 concept, Atmospheric Environment 34, 1157-1158.
- Aunal, K., Berntsen, T.K., Seip, H.M., 2000, Surface ozone in China and its possible impact on agricultural crop yields. Ambio 29, 294.301.
- Beck, J.P., Krzyzanowski, M., Kof., B., 1998, Tropospheric ozone in the European Union. the consolidated report, Topic report no. 8/1988

(<http://reports.eea.eu.int/TOPO8-98>).

- Boubel, R. W., D.L. Fox, D.B. Turner and A.C. Stern, 1994, *Fundamentals of Air Pollution*, Academic Press, 574.
- Brasseur, G.P., J.J. Orlando and G.S. Tyndall, 1999, *Atmospheric Chemistry and global change*, Oxford University Press, 654.
- Chameides, W.L., Li, X., Tang, X., Zhou, X., Luo, C., Kiang, C.S., St. John, J., Saylor, R.D., Liu, S.C., Lam, K.S., Wang, T., Giorgi, F., 1999, Is ozone pollution affecting crop yields in China? *Geophysical Research Letters* 26, 867-870.
- Denise L. Mauzerall, 2003, The adverse impact of surface ozone on agricultural crops, *Air pollution as a climate forcing*, Day 4 presentations.
- Eder, B. K, J. M. Davis and P. Bloomfield, 1993, A characterization of the spatiotemporal variability of non-urban ozone concentration over the eastern united states, *Atmospheric Environment*, 27, 2645-2668.
- E. Donev, K. Zeller, A. Avramov, 2002, Preliminary background ozone concentrations in the mountain And coastal areas of Bulgaria, *Environmental Pollution*, 117, 281-286.
- Fuhrer, J., 2000, Introduction to the special issue on ozone risk analysis for vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 109, 359-360.
- Fukuko, Y., 1973, *Meteorological study of air pollution*, Faculty of Education, Fukushima univ, *Sci.Rep*, 23, 51-61.
- Fumagalli, I., Gimeno, B.S., Velissariou, D., Temmerman, L.D., Mills, G., 2001, Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region. *Atmospheric Environment* 35, 2583-2587.
- Fynlason-pitts, B.J. and J.N. Pitts, Jr., 1986, *Atmospheric chemistry, Fundamentals and experimental techniques*, John Wiley & Sons, New York USA.
- Godish, T., 1991,, *Air Quality*, Second Edition, 39.
- Health, R.L. and G.E. Taylor, 1997, Physiological processes and plant responses to ozone exposure, in *Forest decline and ozone: Acomparison of*

- controlled chamber and field experiments. Edited by R.L. Health. Springer-Verlag. New York, 317-368.
- Hogsett. W.E., A. Herstrom. J.A., Lauence. J.E., Weber. E.H., Lee. and D. Tingey, 1995, An approach for characterizing tropospheric ozone risk to forest. Proceeding of 4th U.S./Dutch International symposium: Comparative Risk Analysis and Priority Setting for Air Pollution Issues, Pittsburgh, PA, 119-145.
- Husar,R.B., 1998, Spatial pattern of 1-hour and 8-hour daily maximum ozone over the OTAG region, Air & Waste Manage. Assoc.'s 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14~18, San Diego, Calif., Paper NO. 98-MA2A.01.
- Lefohn, A.S., Lioy, P.J., 1994, New directions. Atmospheric Environment 28, 3193.3194.
- Lefohn, A.S., 1997, Science, uncertainty, and EPA's new ozone standards, ES&T., 3(16), 280-284.
- Lin, X., O, T Melo, D. R. Hastie and H. Niki, 1992, A case study of ozone production in a rural area of central Ontario. Atmospheric Environment, 26, 311-324.
- Mizoguchi, T., M, Kunugi and M. Nishikawa(1985) Background air pollutant measurements and selection of background site in Japan, Res, Rep. Natl. Inst. Environment study, NO. 79, 476-485.
- Moody, J.L., Oltmans, S.J., Levy, H., Merrill, J.T., 1995. Transport climatology of tropospheric ozone: Bermuda, 1988~1991. Journal of Geophysical Research 100, 7192-7194.
- Musselman, R.C., McCool, P.M., Lefohn, A.L., 1994, Ozone descriptors for an air quality standard to protect vegetation. Journal of Air and Waste Management Association 44, 1383.1390.
- Ogawa, T., and A. Miyata, 1985, Seasonal variation of the tropospheric ozone: Summer minimum in Japan, J. Meteorol. Soc. Jpn., 63, 937~946.
- Pakpong Pochanart, Hajime Akimoto, Yoshikatzu Kinjo, Hiroshi Tanimoto,

- 2002, Surface ozone at four remote island sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan, *Atmospheric Environment*, 36, 4235-4250
- de Santis, F., 1999, New directions: will a new European vegetation ozone standard be fair to all European countries. *Atmospheric Environment* 33, 3873-3874.
- de Santis, F., 2000, New directions: reply to 'use and abuse of the AOT40 concept'. *Atmospheric Environment*, 34, 1158-1159.
- Seigneur, C., and P. Saxena, 1985, A study of atmospheric acid formation in different environments, *Atmospheric Environment*, 18, 2109-2124.
- Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis, 1998, *Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley & Sons, 1326
- 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.
- Showman, R.E., 1991, A comparison of ozone injury to vegetation during moist and drought years, *J. AWMA*, 41(1), 63-64.
- Skarby, L., Karlsson, P.E., 1996, Critical levels for ozone to protect forest trees—best available knowledge from Nordic countries and the rest of Europe. In: Karenlampi, L., Skarby, L. (Eds.), *Critical Levels for Ozone in Europe: Testing and Finalizing the Concepts*. UN-ECE Workshop Report. University of Kuopio, Dept. of Ecol. and Environ. Sci. Swedish Environmental Research Institute, Gothenburg, 72-85.
- Spektor, D.M. and M. Lippmann, 1990, Health effects of ambient ozone on healthy children at a summer camp, *AWMA* for presentation at the 83rd Annual Meeting & Exhibition, Pittsburgh, Pennsylvania, June 24-29.
- Stockwell, W.R. and J.G. Calvert, 1983, The mechanism of the HO-SO<sub>2</sub> reaction, *Atmos. Environ.* 17, 2231.
- Sunwoo, Y.G.R. Carmichael and H. Ueda, 1994, Characteristics of background surface ozone in Japan, *Atmos. Environ.* 28, 25-37
- Thompson, A.M., 1994, Oxidants in the unpolluted marine atmosphere, In

- Environmental oxidants, Ed. by J.O. Nriagu and M.S. Simmons, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A.
- Tilton, B.E., 1989, Health effects of tropospheric ozone, *ES&T*, 23(3), 257-263.
- Tsuruta, H., K. Shinya, T. Mizoguchi, T. Ogawa, 1989, Seasonal behavior of the tropospheric ozone in rural Japan, in *Pzone in the Atmosphere*, edited by R. D. Bpjikov and P. Fabian, A. Deepak, Hamton, Va.
- Tsuyoshi, Y., 1970, The diurnal variation of the pollutant concentration in urban area. *J. Japan. Soc. Air pollu.*, 5, 113-125.
- Urone, P., 1986, *Air Pollution*, Edited by Stern A. C., Academic Press, 24
- USDA, 2000, Grain: world markets and trade (<http://www.fas.usda.gov/grain/circular/2000/00-07/graintoc.htm>).
- USEPA, 1986, Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/8-84/02 cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC.
- USEPA, 1996, Air quality criteria for ozone and other photochemical oxidants. EPA-600/P-93/004 a,b,cF. National Center for Environmental Assessment, Research Triangle Park, NC.
- Vincent T.F. Cheung, T. Wang, 2001, Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China, *Atmospheric Environment*, 35, 4947-4958.
- Vukovich, F.M., 1995, Regional-scale boundary layer ozone variations in the Eastern United states and their association with meteorological variations, *Atmospheric Environment*, 29(17), 2259-2273
- WHO, 1996, Update and revision of the WHO air quality guidelines for Europe. Ecotoxic effects, ozone effects on vegetation. European centre for environment and health, Bilthoven, the Netherlands.

## 감사의 글

지난 2년간은 비록 짧지만 제가 지금까지 살아왔던 삶에 있어 가장 소중했던 시간이었습니다. 그리고 결국 이렇게 작은 결실을 맺게 되었습니다. 정말 주위의 많은 분들의 도움이 없었더라면 과연 이 논문이 완성 될 수 있었을까 하는 생각을 해봅니다.

우선, 부족함이 많았던 저를 아낌없는 관심과 애정으로 격려해주시고 학문을 지도해주신, 때로는 아버지 같은 이기호 교수님께 깊은 감사와 존경을 드립니다. 바쁘신 와중에도 제 논문을 면밀히 검토해주시고 자상한 충고와 조언을 아끼지 않으신 허목 교수님, 감상규 교수님께 진심으로 감사드리며, 학부과정부터 지금까지 많은 가르침을 주신 오윤근 교수님, 허철구 교수님, 이용두 교수님, 조은일 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

항상 후배를 위해 본 논문이 완성되기까지 관심을 가지고 조언을 해주신 박용이 선생님, 류성필 선생님, 이준호 선생님, 고병철 선생님, 김병현 선생님, 강진영 선생님, 김대경 선생님, 강기봉 선생님, 양희준 선생님, 양수미 선생님께도 감사드립니다.

매우 바쁘신 와중에도 자료 분석에 있어 도움을 주신 김영주 과장님, 김형철 선생님, 송영철 선생님을 비롯한 제주도보건환경연구원 대기보전과 여러분들께 감사드리며, 기상자료를 제공하여 논문의 질을 높이는데 도움을 주신 홍근도 선생님, 강춘희 선생님을 비롯한 제주지방기상청 관계자 여러분께도 감사의 마음을 전합니다. 또한 이 작은 결실을 맺는데 시발점이 되었던 제주 지역 환경기술개발센터의 센터장님과 관련 업무 선생님들에게 깊은 감사를 드립니다.

실험실에서 논문이 완결될 수 있도록 여러 가지 궂은일을 마다하지 않고 묵묵히 도와준 기훈, 민철, 경연, 대경, 일봉, 명선, 미영, 지윤, 혜영, 지향, 은정이를 비롯한 대기 실험실 후배님들과 대기실험실 가족 모든 분께도 고마움을 전하고, 대학원 생활 동안 한 배를 탔던 김대준, 김수미, 송정화, 김성수, 고기석, 강경호, 현경자 학형에게도 고마움을 전합니다. 또한 내 모든 노력이 힘들고 때로는 실망스러웠을 때도 나와 함께 있어준 희찬, 승언, 영진, 창운, 성호, 병수, 영민, 수미, 정훈, 치훈 등의 친구들에게도 고맙다는 말을 이 글을 통해 한 번 해봅니다.

오늘이 있기까지 막내를 위해 언제나 사랑과 믿음으로서 뒷바라지 해주신 어머님과 아버님께 작은 결실과 함께 감사와 존경과 사랑을 바칩니다. 또한 상은형, 찬수형, 수정누나, 그리고 재민매형과 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

2003년 12월 오 태 권