

## 남한 지역의 지면 오존 농도 특성과 식생에 대한 임계값 적용 연구

### Study on the Characteristics of Surface Ozone Distributions and the Ozone Critical Levels to Vegetation in the South Korea

구 해 정\* · 박 순 응<sup>1)</sup>

기상청 국립기상연구소 응용기상연구팀, <sup>1)</sup>대기환경모델링센터  
(2007년 10월 16일 접수, 2008년 5월 19일 채택)

Hae-Jung Koo\* and Soon-Ung Park<sup>1)</sup>  
*Applied Meteorology Research Laboratory,  
National Institute of Meteorological Research (NIMR)/KMA  
<sup>1)</sup>Center for Atmospheric and Environmental Modeling*

(Received 16 October 2007, accepted 19 May 2008)

#### Abstract

Concentration of tropospheric ozone ( $O_3$ ) was investigated for the South Korea. And then the critical ozone levels, expressed as AOT40 (Accumulated exposure over a threshold of 40 ppb) to vegetation have been used in this region within the UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) Convention on Long-Range Trans-boundary Air Pollution (CLRTAP). Hourly ozone concentration data from 1996 to 2001 at 26 air monitoring stations was used to estimate the exceedance of the critical levels. It was calculated for daylight hours for each station, and mapped using surface interpolation over the South Korea.

The critical levels of ozone have shown the highly exceeded value in the Gyeonggi region, southern coastal region and central inland of the South Korea. It was some different from the typical ozone distribution which represented highly in the western inland and coastal regions. The area exceeding the critical level for crops was founded to be more than 40% of the whole South Korean territory. While that for trees was to be about 17% of the South Korea.

The critical ozone critical level was based upon data from experiments on specific species, and thus may not be fully representative for all types of vegetation. Nevertheless, the critical level and its exceedance of the ozone concentration would be one of the useful tools for international agreements on abatement strategies to prevent ecosystem damage.

**Key words** : Tropospheric ozone, Critical level exceedance, Critical levels, AOT40, Solar radiation, Vegetation

---

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)2-6712-0456, E-mail : hjkoo@metri.re.kr

## 1. 서 론

동북아시아 지역은 전 세계 인구의 1/3 이상이 살고 있으며, 산업화와 경제 성장이 급속하게 진행되고 있어 이에 따른 오염 물질의 배출량도 증가 추세여서(환경부, 2002a, b) 이 지역 환경을 악화시킬 것으로 우려되고 있다. 우리나라는 청정 연료 사용의 확대, 저공해 자동차 보급 등의 각종 대기 오염 물질의 저감 정책으로 아황산가스(SO<sub>2</sub>)나 부유 분진의 농도는 급격히 줄어들었으나(김용표, 1999) 자동차의 증가로 인한 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 배출량 증가로 농촌 지역에서도 지면 오존 농도가 증가할 가능성이 높아지고 있다(조석연, 2007; 이종범 등, 2000; 허정숙과 김동술, 1993). 이러한 지면 오존 농도의 증가는 장·단기적으로 농작물과 산림의 성장에 영향을 주게 된다. 즉, 물리적 혹은 생화학적인 변화, 잎의 가시적 피해 현상 및 산림의 성장이나 생산성 감소 그리고 유전적 변화, 수명의 단축 등에 영향을 미치게 된다(한심희, 2007; Seinfeld and Pandis, 1998; Fuhrer *et al.*, 1997; Karenlampi and Skarby, 1996; Nussbaum *et al.*, 1995). 따라서 지표 오존이 식생에 직접적으로 미치는 영향을 평가하기 위한 임계 농도의 기준 설정이 필요하게 되었다(Emberson *et al.*, 2000; Fowler *et al.*, 1994).

오존(O<sub>3</sub>)은 식생의 성장 기간인 4월에서 9월까지 임계 농도(critical levels: CL) 이상으로 장기 노출될 경우 생육에 영향을 주게 된다. 이에 UNECE(United Nations Economic Commission for Europe)는 AOT40(Accumulated exposure over a threshold of 40 ppb)이라는 임계 농도를 정의하여 오존이 식생에 미치는 영향을 설명하고 있다(UNECE, 2004, 1996). AOT40이란 어떤 특정한 기간에 시간 평균 오존 농도가 40 ppb를 초과한 양의 누적값을 말한다. 농작물의 경우, 오존의 장기 임계 농도는 농작물이 성장하는 6월 1일부터 8월 31일까지 3개월간의 AOT40 값이 3,000 ppb·h 이상이다. 이 값을 초과하면 밀의 생산량이 5% 이상 감소하게 된다. 산림에 대한 장기 임계 농도는 6개월 간(4월 1일부터 9월 31일까지)의 AOT40 값이 10,000 ppb·h 이상이다. 이 값 이상이면 산림 생산량이 10% 이상 감소하는 것으로 보고되고 있다(Coyle *et al.*, 2002; Grünhage *et al.*, 2001; Huttunen

and Laine, 1983).

북미와 유럽의 국가들은 「CLs」와 같은 여러 환경 기준을 수립하여 식생을 보호하기 위한 배출량 저감 정책을 수립해 왔으며, 각각 NCLAN(US National Crop Loss Assessment Network)와 EUCLAN(European Crop Loss Assessment Network)의 농작물 손실 네트워크를 설치하여 오존이 식생에 미치는 영향을 조사 및 평가하고 있다(조석연, 2007; Heck *et al.*, 1984). 이와 함께 오존이 식생에 미치는 임계 농도에 관한 연구도 활발하게 이루어져 왔다(UNECE, 2004; Emberson *et al.*, 2000; Fuhrer and Achermann, 1999; Fuhrer *et al.*, 1997; Karenlampi and Skarby, 1996; UNECE, 1996). Coyle *et al.*(2002)은 영국 지역의 지표 오존 농도에 대한 공간적 분포를 정량화 하였고, De Kluizenaar *et al.*(2001)은 Ireland 지역의 오존에 대한 농도 및 임계 농도의 분포도를 분석하였으며, Nali *et al.*(2002)은 이탈리아 중부 지역에서 식생에 대한 오존의 임계 농도에 대한 분포도를 작성하였다. 한편, 우리나라에서는 대기 오염 물질의 건성 및 습성 침착량을 통한 식생에 대한 임계 부하량(critical loads)을 계산하여 임계값에 대한 연구를 활발히 해 왔다(Shim and Park, 2004; Park and Shim, 2002). 그러나 임계 부하량은 대기 오염 물질이 건성 및 습성 침착을 통해 토양의 산성화로 인해 식생에 영향을 미치는 연구인 반면, 대기 오염 물질의 직접적인 피해에 관한 임계 농도의 연구는 부족하다. 최근 구해정(2004)이 1996년부터 2001년까지 환경부에서 측정된 오존 농도 자료를 이용하여 남한 지역의 식생에 대한 임계 농도 분포를 작성하고 기상인자와의 관련성을 연구함으로써 이에 대한 연구가 시도된 바 있다. 또한 조석연(2007)은 2000년부터 2005년까지 오존 농도 자료를 이용하여 한국의 지면 오존이 식생에 미치는 영향에 관한 연구를 통해 임계 농도 산출 및 아까시나무 조기낙엽 현상과의 관련성을 정성적으로 비교 연구한 바 있다.

본 연구에서는 1996년부터 2001년까지 환경부의 자동 오염 측정망에서 측정된 오존 농도 자료를 이용하여 남한 지역의 분포 특성을 분석하고, UNECE가 제시한 식생에 대한 임계 농도값(UNECE, 2004, 1996)을 적용하고자 한다. 그리하여 식생이 장·단기적으로 영향을 받을 수 있는 지역의 가능성을 평가하고 나아가 식생에 대한 대기환경 기준 및 대기

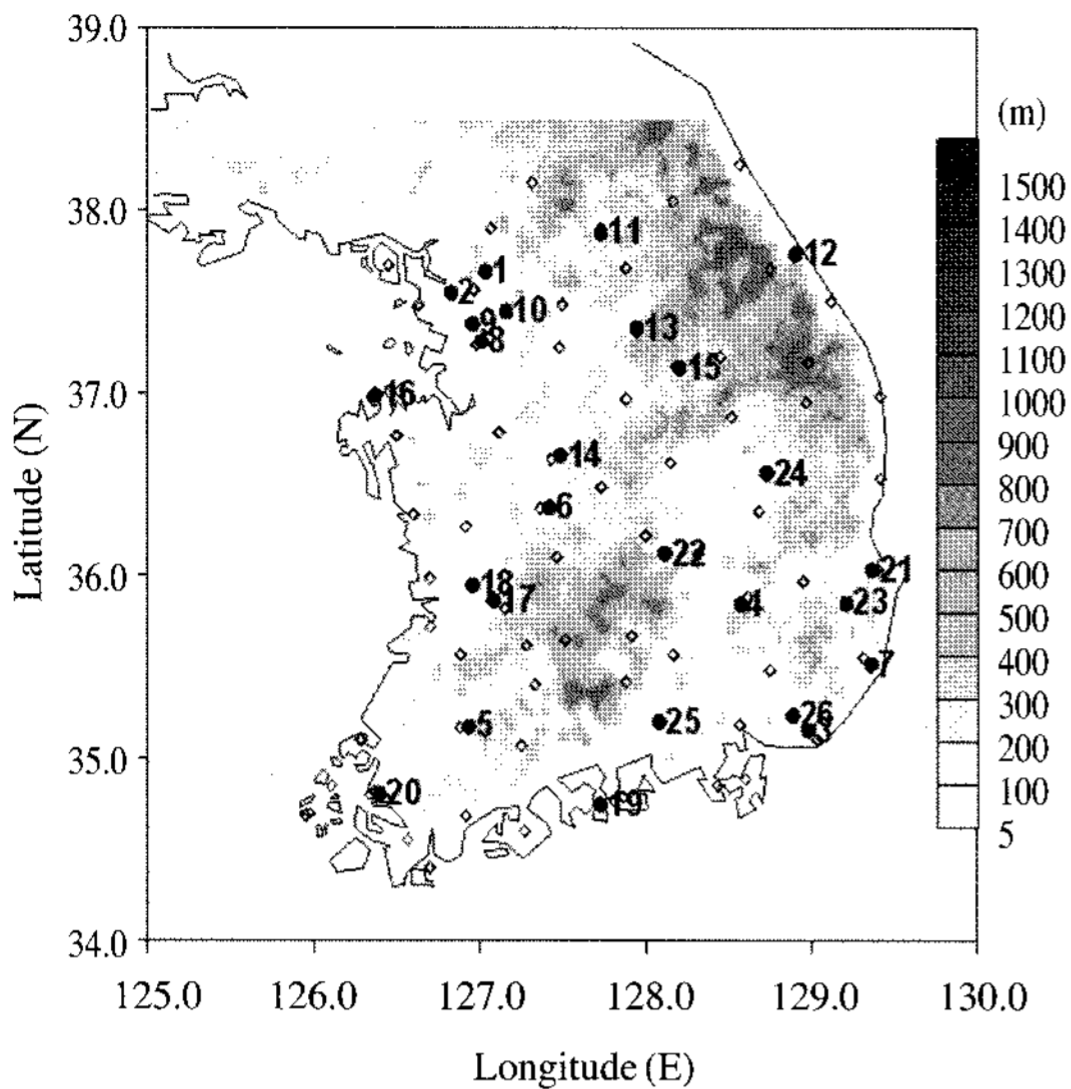


Fig. 1. Locations of selected 26 air monitoring sites (●), surface meteorological observation sites (◇) and the topography of the South Korea.

오염 물질 저감 대책에 필요한 자료를 마련하고자 한다.

## 2. 자료 및 분석 방법

본 연구의 분석 영역은 남한 지역이며 그 영역은 125°E ~ 130.0°E, 34.0°N ~ 39.0°N 지역이다(그림 1). 이 지역에는 143개의 자동 오염 측정망이 설치되어 있으며, 각종 오염 물질(O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> 등)에 대하여 매 시간 농도를 관측하고 있다. 본 연구를 위해서 자동 오염 측정망에서 1996년부터 2001년까지 6년간 측정된 시간 평균 오존 농도 자료를 사용하였으며, 같은 기간 73개의 정규기상관측소의 기상 자료를 이용하여 각 연별 월별 시간별 평균을 한 후 ±12이 이내의 자료만 농도 분석 및 임계값 계산에 사용하였다. 또한 오염농도에 대한 농도분포를 그리기 위해서 각 지역별 여러 개 존재하는 관측지점 중 자료의 수가 가장 많은 지역을 선정하였다. 그림 1에서 번호가 붙여진 지점(26 지점)들은 수평 분포를 나타내기 위해 선택된 지점들이며 표 1은 지점명을 나타낸다.

Table 1. Number, name, longitude, and latitude of each environmental monitoring site in the South Korea.

Site no.	Site name	Longitude (°E)	Latitude (°N)
1	Seoul-Banghak	127.0344	37.6630
2	Seoul-Hwagok	126.8282	37.5455
3	Busan-Gamjeon	128.9817	35.1510
4	Daegu-Daemyoung	128.5739	35.8423
5	Gwangju-Duam	126.9341	35.1710
6	Daejeon-Eupnae	127.4193	36.3696
7	Ulsan-Yeochon	129.3615	35.5133
8	Suwon-Sinpung	127.0122	37.2815
9	Anyang-Hogye	126.9558	37.3786
10	Seongnam-Dandae	127.1572	37.4467
11	Chuncheon-Jwoon	127.7325	37.8769
12	Gangnung-Okcheon	128.9044	37.7614
13	Wonju-Hakseong	127.9469	37.3533
14	Cheongju-Naedeog	127.4877	36.6566
15	Jecheon-Seobu	128.2058	37.1389
16	Seosan-Doggot	126.3705	36.9886
17	Jeonju-Palbok	127.0829	35.8613
18	Iksan-Namjung	126.9586	35.9458
19	Yeosu-Gwangmu	127.7302	34.7437
20	Mokpo-Yongdang	126.3952	34.8016
21	Pohang-Jukdo	129.3667	36.0291
22	Gimcheon-Pyeongwha	128.1158	36.1193
23	Gyeongju-Seonggeon	129.2099	35.8481
24	Andong-Nammun	128.7309	36.5613
25	Jinju-Sangbong	128.0803	35.1954
26	Gimhae-Dongsang	128.8857	35.2336

그림 2는 1995년부터 1999년까지 측정된 한반도 지역의 농작물 분포 및 산림 분포에 대한 자료이다. 이는 NOAA 위성의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 센서를 통해 측정된 1.1 km × 1.1 km 자료를 11 km × 14 km의 격자 내에서 가장 많은 식생이 차지하는 면적의 분포로 나타낸 것이다. 그림 2a에서 농작물은 주로 태백산맥을 경계로 서쪽 지역인 경기도와 충청도 지역, 전라도 지역 및 중부 내륙 지역에 많이 경작되고 있으며 전 국토 면적의 18.4%를 차지한다. 그림 2b에서 산림은 주로 태백산맥과 소백산맥 등 주요 산맥을 중심으로 분포하고 있으며 전 국토 면적의 66.6%를 차지하고 있다.

오존에 대한 임계값을 산출하기에 앞서 일변화 경향, 연변화 경향 및 경년변화 경향 분석을 통해 지역별 농도 특성 및 기준치를 넘는 빈도 등을 살펴보았으며 다음과 같은 임계 기준을 가지고 임계값을 계산하였다. 임계 기준은 UNECE가 CLRTAP (Convention on long-range transboundary air pollution)에서 발

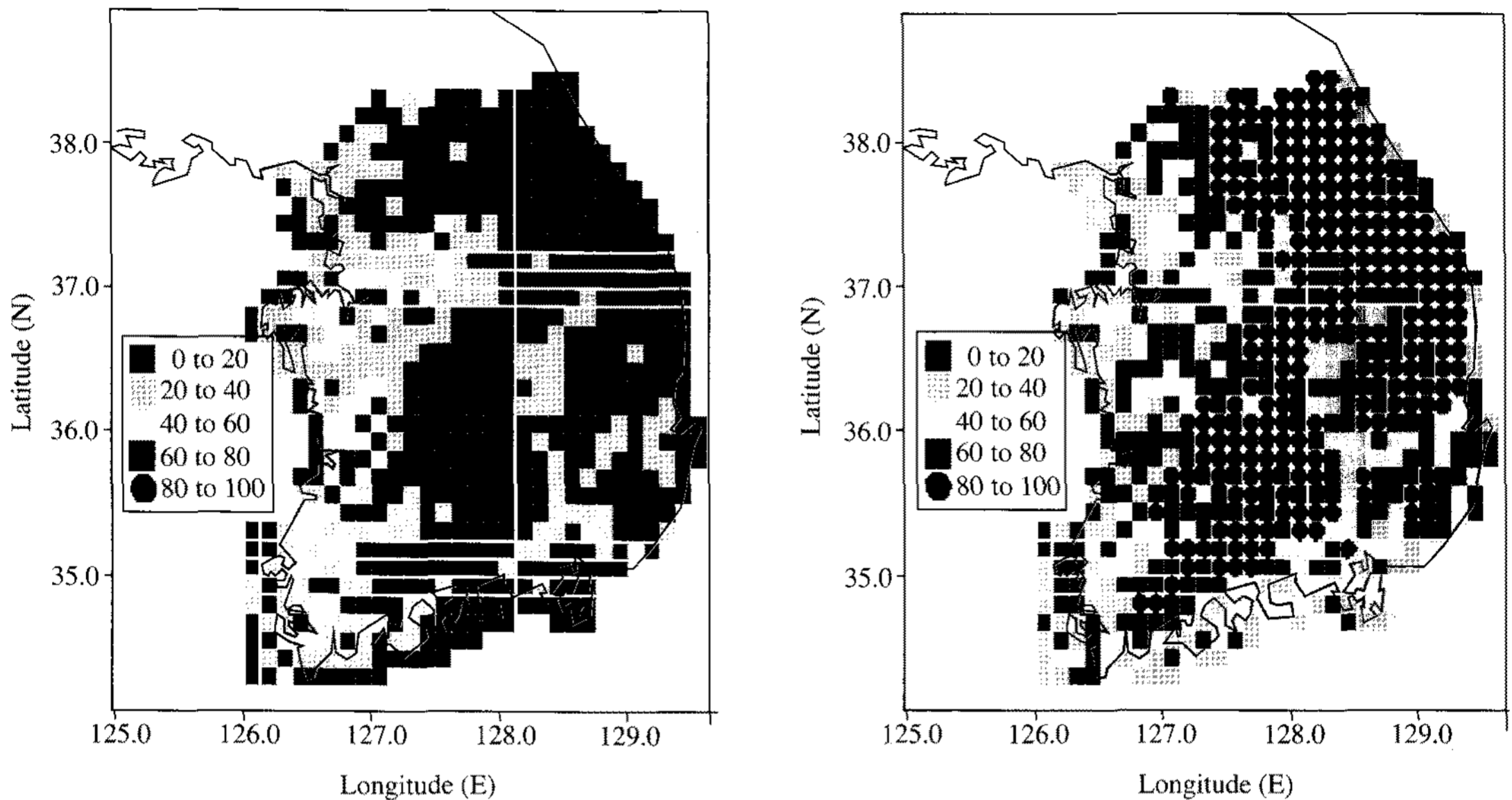


Fig. 2. Spatial distributions of (a) agricultural area (%) and (b) forest area (%) in the grid scale of 11 km x 14 km over the South Korea in 1999.

표한 「Mapping critical levels/loads」이라는 안내서 (UNECE, 2004, 1996)에서 구하였다(표 2).

UNECE (2004, 1996)에 따르면 오존이 식생에 직접적으로 미치는 영향에 대한 임계값(critical levels)은 AOTX (eg. AOT30, AOT40, AOT50, AOT60)라는 노출지수로 표현되며 그 중 AOT40 지수를 채택하고 있다. AOT40이란, 특별한 기간에 대해서 매시간 평균 오존 농도의 값이 40 ppb 이상일 때 그 농도와 40 ppb와의 차이의 합(식(1))을 나타낸다.

$$AOT40 = \sum_{i=1}^n ([O_3]_i - 40) \text{ [unit: ppb} \cdot \text{h]} \quad (1)$$

여기서  $[O_3]_i$ 는 각 시간별 오존 농도(ppb)가 40 ppb 이상인 경우의 농도이고 n은 이를 만족하는 식생의 성장 계절의 총 시간수를 나타낸다.

장기간에 대한 오존의 임계값은 농작물과 산림의 생육 기간에 대해서 계산(표 1)하는데, 농작물의 경우 생육 기간인 6월 1일부터 8월 31일까지 3개월에 대한 기간 동안 AOT40 지수를 계산하며, 산림의 경우 4월 1일부터 9월 31일까지 6개월 동안 노출지수를 계산한다. 단, AOT40 값을 구할 때, 일사량이 시간당  $50 \text{ W m}^{-2}$  이상인 낮 시간대라는 조건을 만족해

Table 2. Critical levels of  $O_3$  for agricultural crops and forest trees.

Criteria	Long-term (ppb · h)	Short-term (ppb · h)
Agricultural crops (June ~ August)	3,000	500 for 5 consecutive days
Forest trees (April ~ September)	10,000	-

야만 하는데 이는 식물이 광합성 작용을 하기 위해서 일사량이 필요하며 이때 기공을 통해 공기가 식물체로 유입되기 때문이다. 표 3과 4는 경험적 실험 연구에 따른 농작물과 산림의 민감도를 나타낸다 (UNECE, 2004; Mills *et al.*, 2003). 이 중 농작물의 경우 AOT40에 가장 민감한 종은 콩류, 밀, 면화 등이 있다. 비록 자료의 한계와 유럽 식물에 임계 농도 지수가 맞춰져 있다는 점에서 한계가 있기는 하나 노출-반응(exposure-response)에 있어서 단기 혹은 장기간 평균한 오존 농도를 기초로 하는 것보다 적합할 것으로 보인다.

한편, 농작물의 경우 6월 1일에서 8월 31일까지의 기간에 콩, 토마토, 담배 등과 같은 작물들은 5일 연

**Table 3. The range of sensitivity of agricultural and horticultural crops to ozone (see Mills *et al.*, 2003 for response functions and definition of sensitivities).**

Sensitive	Moderately sensitive	Moderately resistant
Cotton, Lettuce, Pulses, Soybean, Salad Onion, Tomato, Turnip, Watermelon, Wheat	Potato, Rapeseed, Sugarbeet, Tobacco	Broccoli, Grape, Maize, Rice

**Table 4. Sensitivity classes for the tree species based on effects of ozone on growth.**

Ozone-sensitive species		Moderately ozone-sensitive species	
Deciduous	Coniferous	Deciduous	Coniferous
Fagus sylvatica, Betula pendula	Picea avies, Pinus sylvestris	Quercus petraea, Quercus robur	Pinus halepensis

속(5 consecutive days) 고농도 오존에 노출되면 잎의 손상 등 가시적 피해가 있으므로 단기 임계값도 제시하고 있다(UNECE, 2004, 1996). 즉, 낮 시간대의 평균 수증기압이 1.5 kPa을 초과하는 경우 5일 연속 한 날에 대한 AOT40 값이 500 ppb · h를 단기 임계값으로 정의된다. 단기 임계값에 대해서는 임계값을 초과하는 빈도수를 계산하여 수평분포로 나타내었다.

임계값 계산시 손실된 자료에 대해서는 식(2)를 이용하여 보정하였다(De Kluizenaar *et al.*, 2001).

$$AOT40_{cor} = RAOT40 \times \frac{N_{total}}{N_{total} - N_{missing}} \quad (2)$$

여기서 AOT40<sub>cor</sub>은 보정된 값, RAOT40은 실제 계산된 임계 농도, N<sub>total</sub>은 총 시간수(일사값 50 W m<sup>-2</sup> 이상), N<sub>missing</sub>은 손실된 오존 농도의 시간수를 의미한다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 남한 지역 오존 농도 특성

대류권 오존의 일변화는 광화학 반응에 의해 영향을 받으며 대기경계층(atmospheric boundary layer: ABL)과 자유 대류권의 오존 농도의 영향을 받는다

(Zhang and Rao, 1999). 즉, 낮 동안 바람 시어(wind shear)와 열적 대류에 의해 유발되는 대기경계층에서의 난류 혼합은 자유 대기로부터의 오존 유입을 유도하기 때문이다(Roibi *et al.*, 1994; United Kingdom Photochemical Oxidants Review Group, 1993; Stull, 1989). 반면, 한밤중이나 이른 아침에는 대기경계층의 하부 영역이 지표 냉각에 의해서 열역학적으로 성층화되고 안정해지게 되고 광화학 반응에 의한 오존이 생성되지 않을 뿐만 아니라 오존 전구물질인 NO의 배출이 있으면 산화제로 작용하여 오존의 농도가 줄어들고 또한 건성 침착에 의해 농도가 감소하게 된다. 따라서 대부분의 지점들의 일변화는 오후에 최대, 야간에 최소인 전형적인 형태를 보이게 된다. 특히, 해안 지역 및 고산 지대에 위치한 관측 지점들의 일변화는 한 낮에 최대가 나타나게 되고 야간에도 높게 나타나 이중 극값을 보이거나 일변화 폭은 작게 나타나게 된다. 해안 지역의 일변화 특성은 해륙풍에 의하여 육지에서 만들어진 오존이 재유입되어 야간 농도의 감소가 적게 나타나게 된다(Entwistle *et al.*, 1997). 따라서 임계값을 적용하기에 앞서 지점별 오존의 농도 특성을 분석할 필요가 있게 된다. 이를 위해 남한 지역을 해안지역(3개 권역)과 내륙지역(1개 권역)으로 분류하여 각 권역별 특성이 가장 뚜렷한 지점들의 농도 특성을 살펴보았다(그림 3과 4).

그림 3은 1996년부터 2001년까지 6년 동안 평균한 오존 농도의 일변화를 보여준다. 전반적으로 오존의 농도는 오후 2~4시 사이에 가장 높고, 일출 직전에 최저값을 보인다. 그림 3a에서 동해안 지역 중 울산 지역의 낮 최고 농도가 25 ppb 정도로 가장 낮고 포항 지역이 가장 높으며, 야간에는 강릉 지역의 오존 농도가 23 ppb 정도로 지속되면서 높게 나타난다. 서쪽 지역(그림 3b)에서는 세 지역(서울, 서산, 목포) 모두 일 최고 오존 농도가 40 ppb 정도이다. 그러나 서울과 목포 지역은 서산 지역에 비해 한낮에는 2 ppb 정도 더 높고, 야간에는 더 낮았으며 서울 지역에서 가장 낮게 나타난다. 이는 서울 지역에서는 광화학 반응 전구물질의 많은 배출로 인해 주간에는 오존이 생성되고 야간에는 NO의 배출로 인한 오존이 파괴되어 최저값이 나타난 것으로 생각된다. 이 세 지역의 주간 최대값이 40 ppb에 달하고 있는 것으로 보아 임계값 계산에 영향을 줄 수 있을 것으로

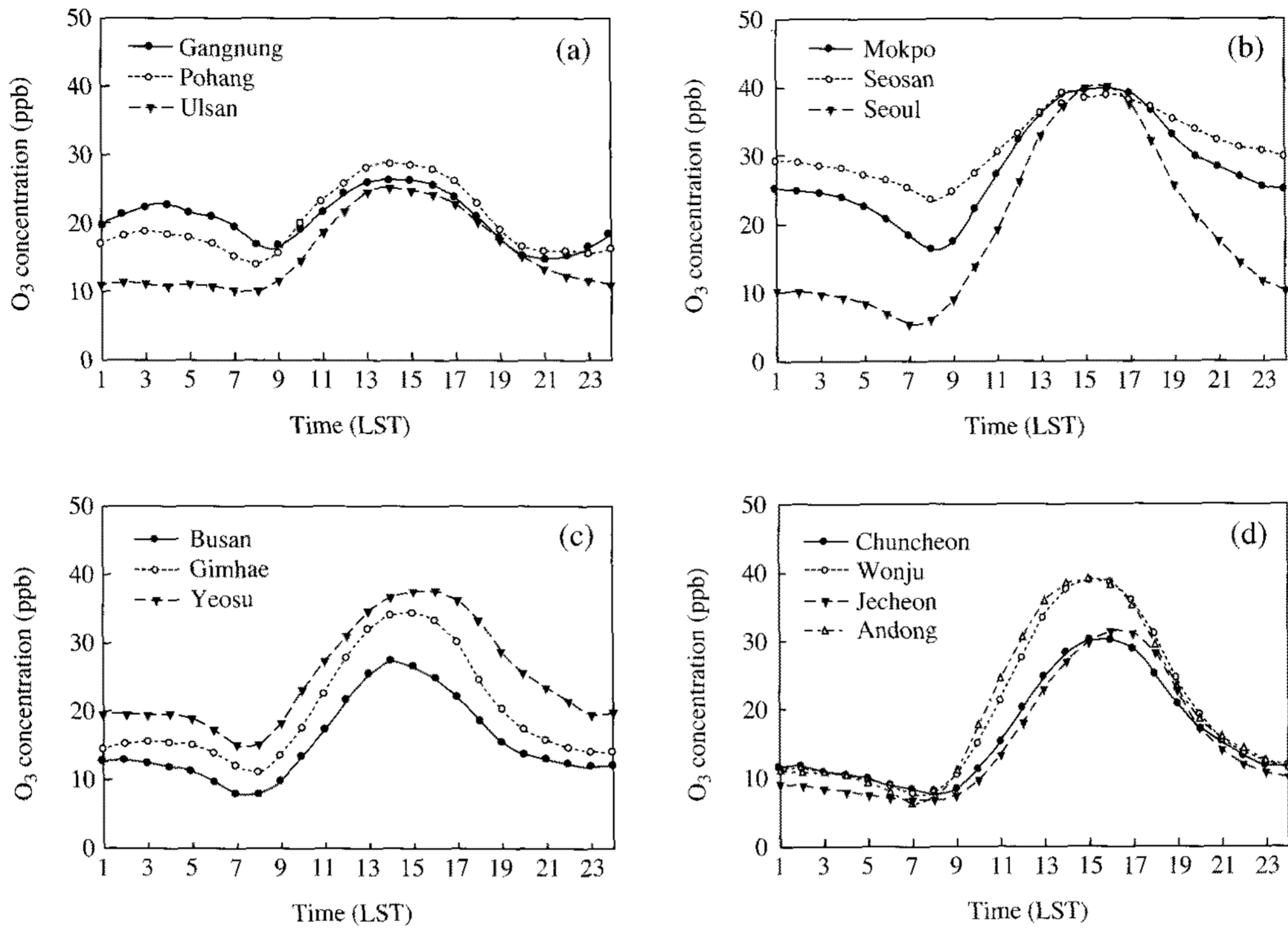


Fig. 3. Annual averaged diurnal variations of O<sub>3</sub> concentration (1996~2001) at monitoring sites over South Korea.

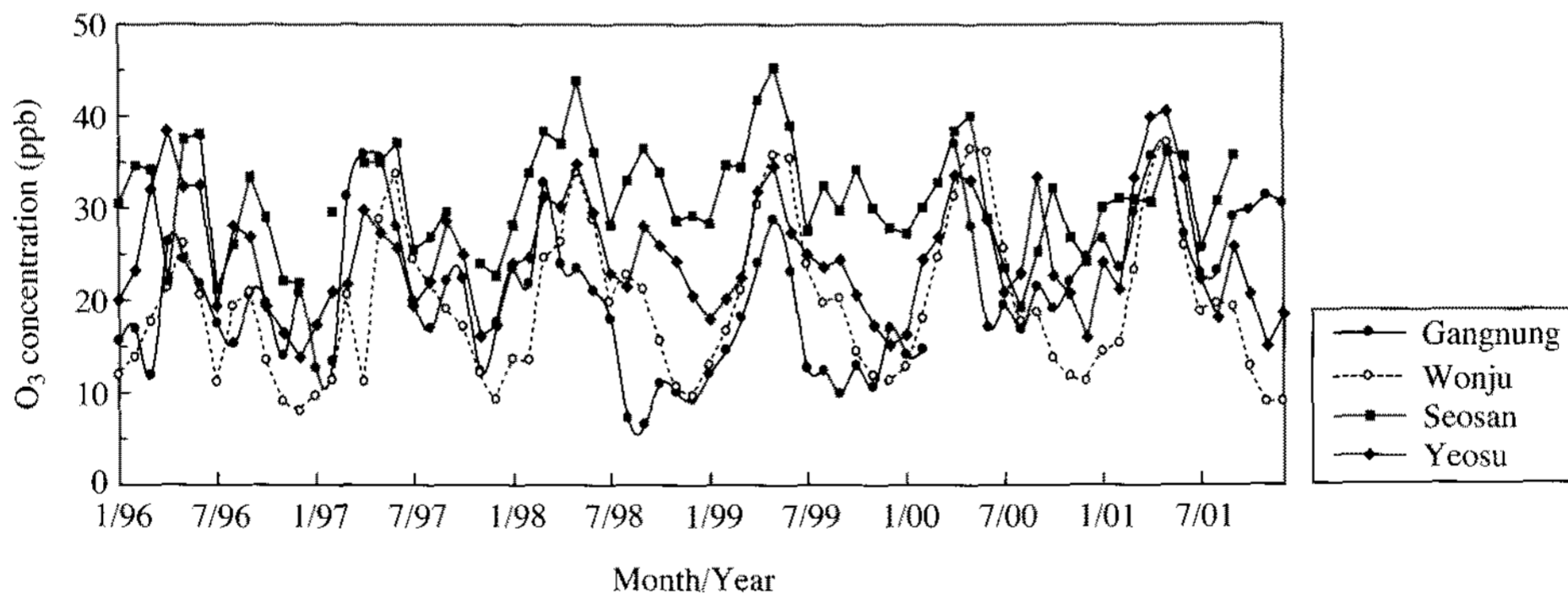


Fig. 4. Seasonal variations of monthly mean O<sub>3</sub> concentration at several sites in Korea for 6 years from 1996 to 2001.

생각된다. 남해안 지역에 위치한(그림 3c) 부산, 김해, 여수 지역에서는 오존 농도가 전반적으로 한낮에 최대(최대 38 ppb), 오전 7~9시 사이에 최저를 보인다. 야간에도 여수 지역이 가장 높고, 부산 지역이 가장 낮다. 내륙 지역의 일변화(그림 3d)에서는 네 지

역 모두 비슷한 경향을 보인다. 야간에는 10 ppb에서 거의 일치하나 주간에는 산간 내륙에 위치한 원주와 안동 지역이 거의 같은 농도 39 ppb 정도에서 최대값이 나타나고 춘천과 제천 지역은 30 ppb 정도에서 최대값이 나타나는 등의 차이를 보인다. 또한 원주와

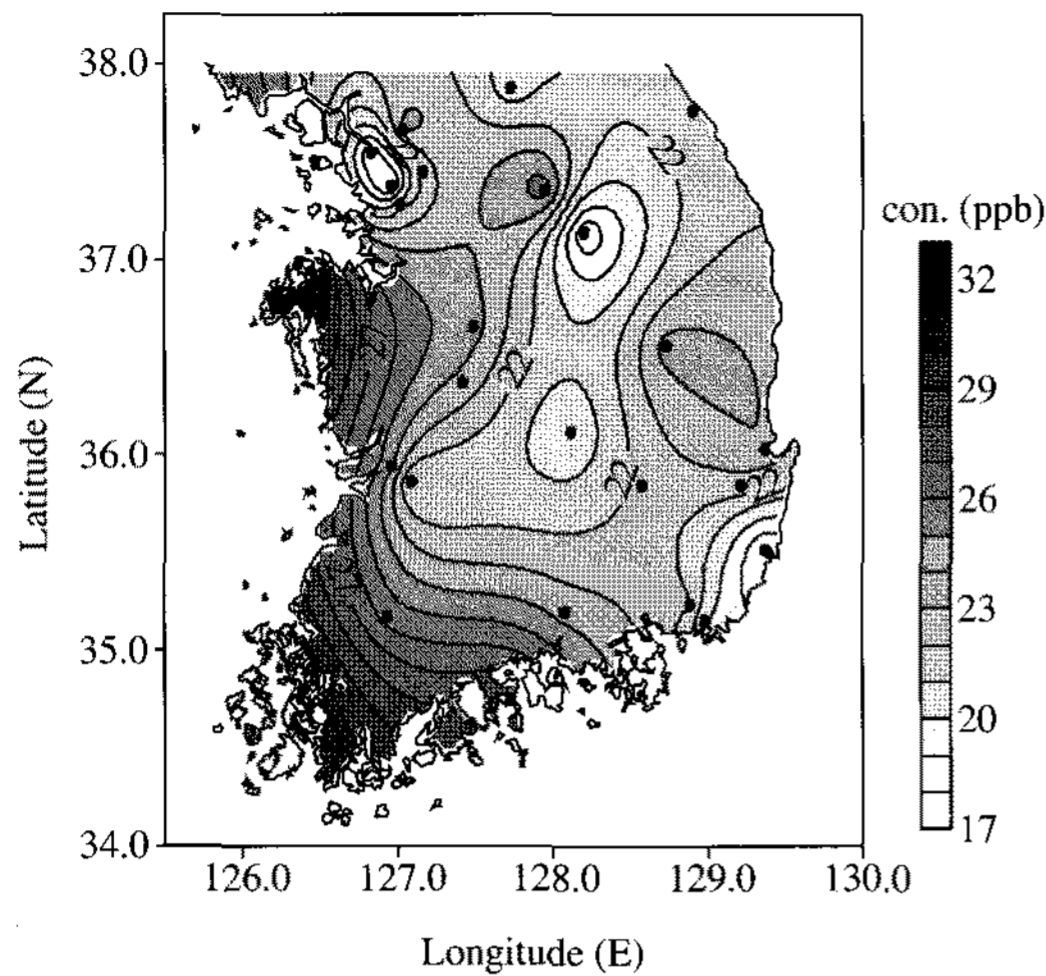


Fig. 5. Spatial distribution of averaged ozone concentration for the period of April to September (ppb) of 1996~2001.

안동은 오후 3시에 최대값이 나타나고 제천 및 춘천 지역은 오후 4시에 나타나는 것으로 보아 그 시간대도 차이가 있음을 알 수 있다.

그림 4는 그림 3과 같은 지역들에 대해 1996년부터 2001년까지의 각 연도별 오염 농도의 연변화 경향을 살펴본 것이다. 제시된 그림에서는 일변화 경향에서 제시한 권역별 한 지역씩만 선정하여 특별히 농도가 높거나 낮은 지역 중 강릉, 원주, 서산, 여수 지역만 나타내었다. 일사량이 증가하기 시작하는 4~6월에 최대가 나타나고 있으며, 흐린 날이 상대적으로 많은 7월에는 농도가 감소하다가 9월에 다시 높은 값을 보인다. 각 지역별로 농도의 차이는 있으나 연변화 경향은 거의 비슷한 형태를 보인다. 서산 지역에서는 월 최대 농도가 40~45 ppb로 가장 높고 원주, 강릉, 여수 지역 순으로 농도가 높게 나타난다. 그러나 내륙 지역인 원주 지역은 최대월과 최저월의 편차가 20~25 ppb 정도로 높으며 해안 지역의 경우 15~20 ppb 정도로 상대적으로 더 낮다. 즉, 최대월을 제외하면 해안 지역의 오존 농도가 더 높게 나타남을 알 수 있다.

그림 5는 식생의 성장 기간(4~9월)에 대한 평균 분포를 나타낸 것으로 1996년부터 2001년까지 연간 오존의 평균 농도는 각각 22.0, 22.3, 22.7, 24.3, 23.7, 23.4 ppb이다. 6년간 최소값은 13.6 ppb (제천), 최대값

Table 5. Maximum AOT40 values and area (%) exceeding critical levels for 1996~2001.

Year	Vegetation type	Max. AOT40 (ppb · h)	Exceedance area (%)
1996	Crops	7,203	21
	Forest	16,921	8
1997	Crops	10,787	57
	Forest	14,831	11
1998	Crops	6,344	25
	Forest	15,804	11
1999	Crops	11,126	51
	Forest	20,722	33
2000	Crops	9,691	56
	Forest	18,540	14
2001	Crops	5,270	51
	Forest	15,627	27

은 37.1 ppb (목포) 이다. 그림 5에서 평균 오존 농도는 우리나라 서쪽에서 동쪽 지역으로 갈수록 낮아지는 분포를 보인다. 특히, 최대값은 우리나라의 서해안 태안반도 및 남서해안 지역에서 나타나고 있으며 최고 32.8 ppb (서산) 이상의 연평균 값을 보이고 있다. 최소값은 남동해안 일부 지역 및 서울 경기 일부 지역, 그리고 태백산맥을 경계로 한 중부 내륙 지역에서 나타나고 있으며, 특히 울산에서는 17 ppb이다.

### 3.2 임계 농도 분포도

일사량이  $50 \text{ W m}^{-2}$  이상인 때를 고려하여 오존의 AOT40을 계산하였다. 표 5의 매해 농작물과 자연 식생에 대한 AOT40 값을 계산하여 그 최대값과 임계값을 초과하는 남한 면적을 계산하여 제시하였다. 매년 임계 농도를 초과하는 면적은 변화하지만 임계 농도를 초과하고 있음을 알 수 있다. 농작물의 임계 농도를 초과한 면적이 제일 큰 해는 1997년이었으며 이 때 남한 면적의 57%를 차지하였다. 그러나 1996년에는 21%로 최저값을 보였다. 최대 AOT40 값은 1996년부터 2001년까지 각각 7203, 10787, 6344, 11126, 9691, 5270 ppb · h로 1999년에 최대치를 보였다(표 5). 한편, 산림에 대한 임계 농도는 농작물의 임계농도 분포에 비해 훨씬 적은 영역을 가지는 것으로 나타났다(표 5와 그림 6). 최고 초과 임계 농도는 전 국토 면적의 33%를 차지한 1999년에 발생하였으며 최저 초과 임계 농도는 1996년에 전 남한 면적의 8%를 차지하였다(표 5).

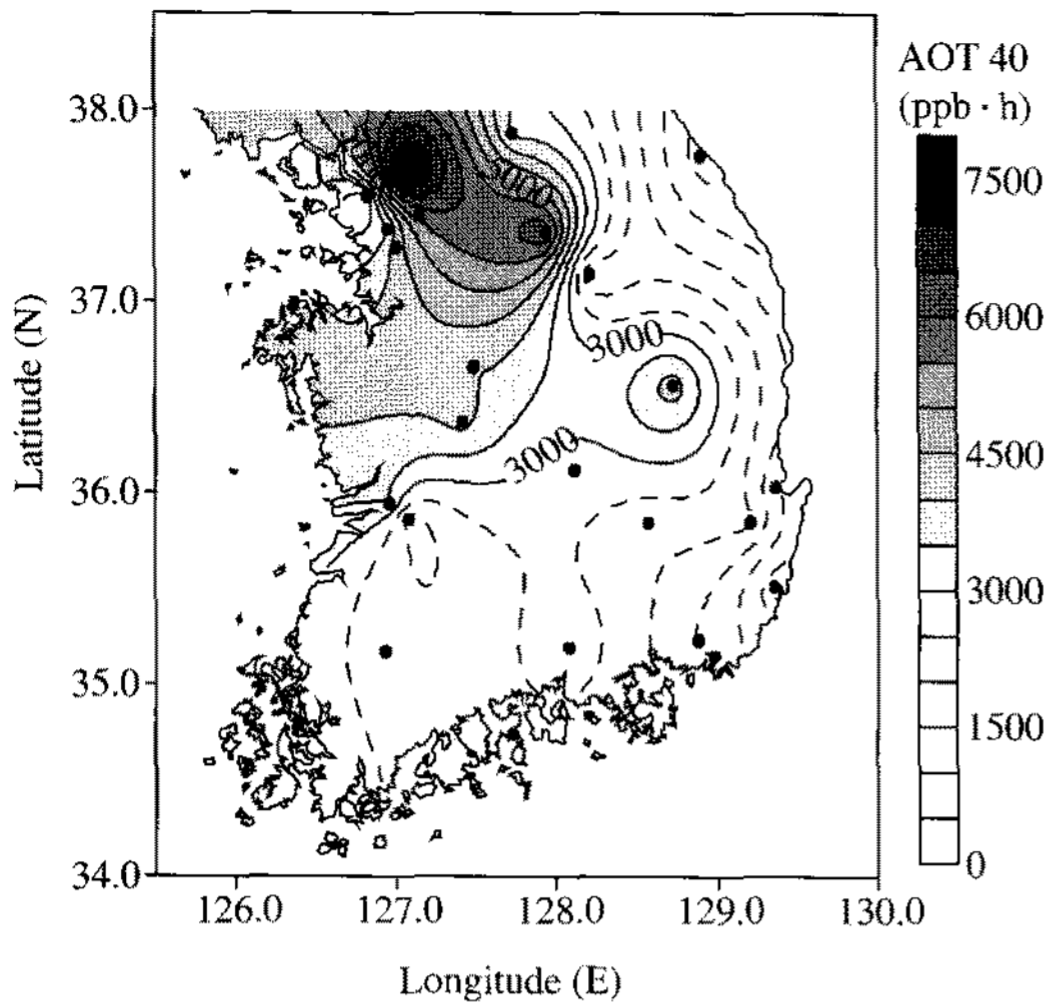


Fig. 6. Spatial distribution of averaged long-term AOT40 value for crops for June to August averaged for the period from 1996 to 2001.

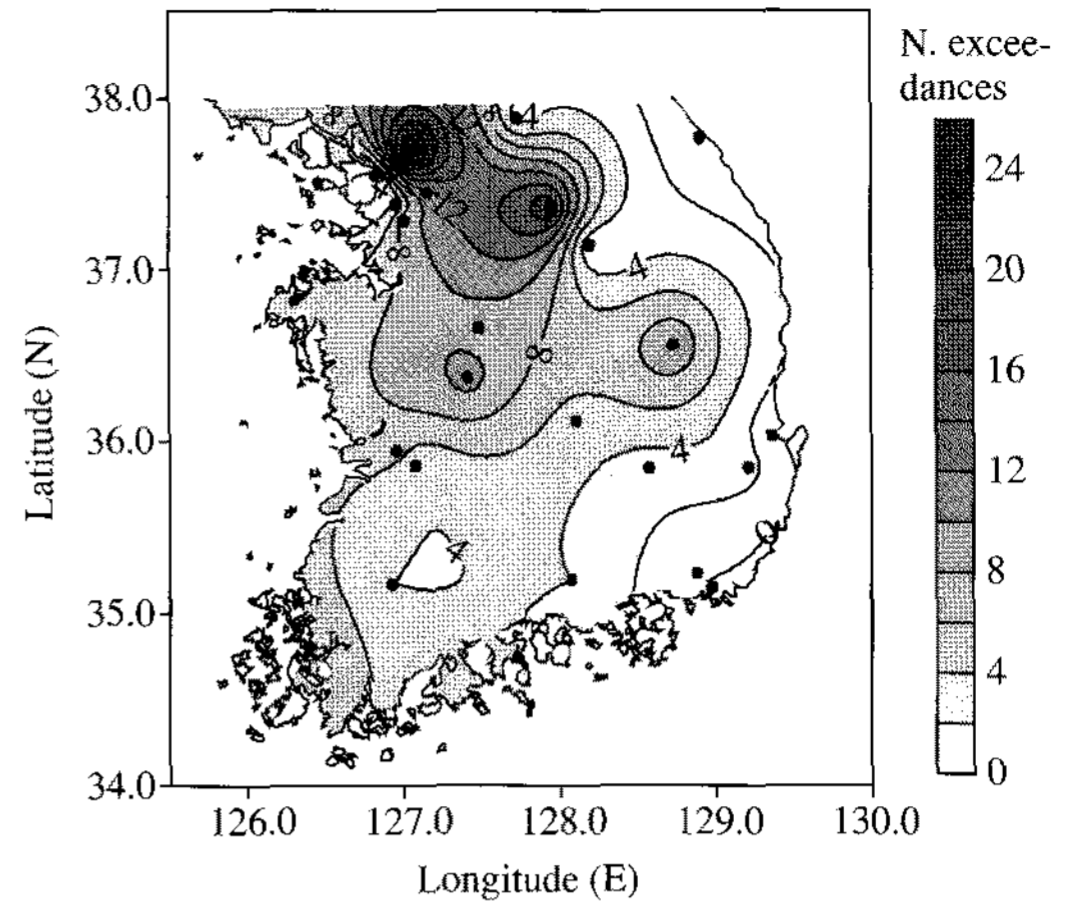


Fig. 8. Occurrence frequency of the short-term AOT40 values for crops exceeding 500 ppb·h for the period of June to August averaged from 1996 to 2001.

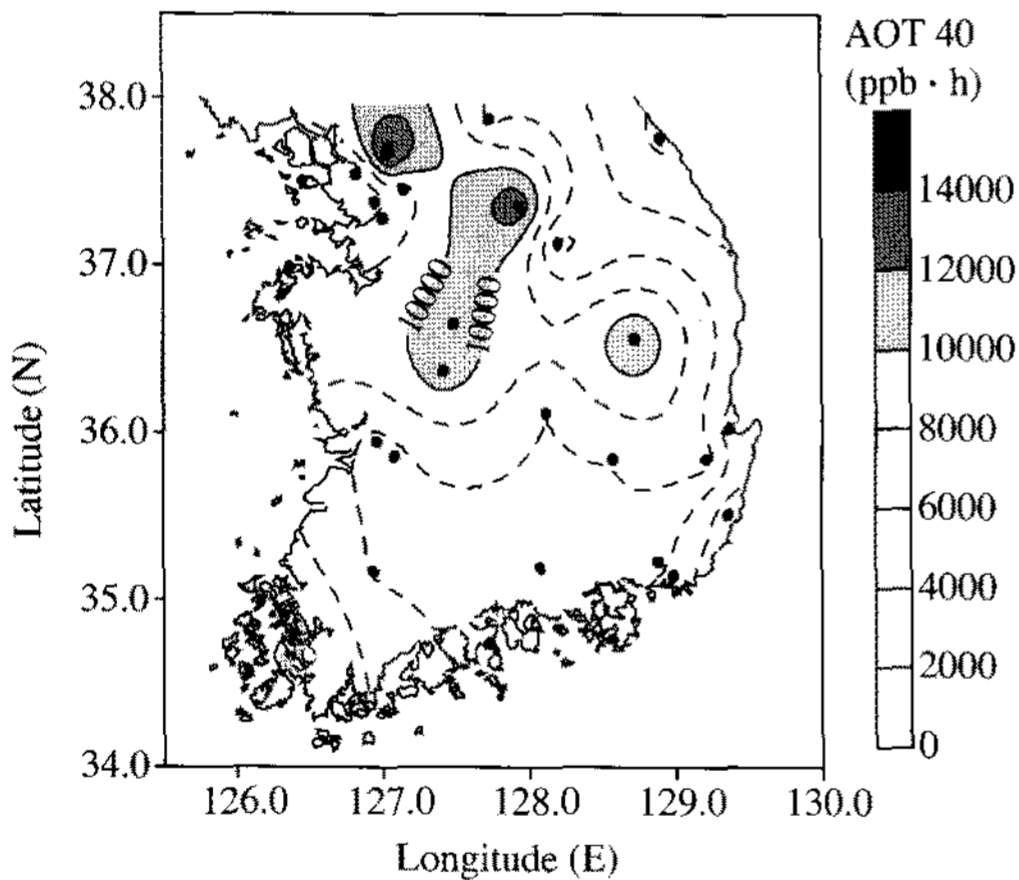


Fig. 7. The same as in Fig. 6 except for forest trees.

6~8월 기간에 농작물에 대한 AOT40 값이 임계치(3,000 ppb·h)를 초과하는 지역은(그림 6) 주로 서울·경기 지역과 충청도 지역 및 태백산맥 서쪽 지역으로 남한 지역의 서북부 지역에 국한되어 있다. 이 지역들은 그림 2에서 제시된 농작물의 주된 분포 지역이 경기도 북부 및 서해안 내륙 지역과 겹쳐 있어 이들 지역에서는 오존이 농작물에 영향을 줄 수 있음을 시사하고 있다.

4~9월 기간에 산림에 대한 AOT40 값이 그 임계값(10,000 ppb·h)을 초과하는 영역(그림 7)은 농작물에 대한 임계 기준 초과 지역과 비슷한 분포 양상을 보이고 있으나 그 면적은 전반적으로 더 적게 나타나고 있다. 10,000 ppb·h를 초과하는 지역은 주로 경기도 북부 일부 지역 및 충청도 일부 지역과 태백산맥과 소백산맥의 경계지역인 안동 지역이다. 이 지역의 산림분포를 볼 때 오존의 임계값 초과는 삼림에도 다소 피해를 줄 수 있을 것으로 생각된다.

농작물은 단기간에도 고농도 오존에 노출되면 식물의 잎이 가시적 피해를 받을 수 있다. 그림 8은 같은 기간 내(1996년부터 2001년까지 6~8월)에서 단기간에 대한 즉, 5일 연속된 날의 임계 농도(500 ppb·h)를 계산하여 6년간 누적하여 나타난 것이다. 그 중 경기도 북부 지역에서 임계값을 초과하는 빈도수가 가장 높았으며(총 87회 중 10~30회) 그 외 중부 내륙 지역 등에서도 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 농작물의 생육 기간에 대한 오존의 장·단기 임계값의 분포는 거의 일치하기 때문에 농작물은 장기 및 단기 모두 영향을 받을 수 있음을 시사한다. 하지만 단기간에 대한 임계농도 초과 빈도수 계산 시 손실된 자료에 대한 보정이 되지 않았으므로 실제 값보다는 작게 계산되었을 것으로 생각된다.

오존에 대한 임계 농도의 수평 분포는 앞서 제시



한 연평균 변화에 대한 수평 분포와는 그 경향이 다르게 나타난다. 연평균 농도가 높은 지역들은 대부분 해안 지역에서 나타나는 반면, 식생에 대한 임계값의 수평 분포는 서해안 지역을 포함하여 서울·경기 지역 및 산간 내륙 지역에서 나타나고 있다. 해안 지역의 연평균은 주·야간의 모든 시간대에 대해 계산된 것이므로 해안 지역의 야간의 고농도가 평균값에 고려되었기 때문이다. 반면, 식생에 대한 임계값의 수평 분포는 일사량이  $50 \text{ W m}^{-2}$  이상인 주간에 대해서만 계산되기 때문에 야간의 오존 농도 값은 임계값 계산에 영향을 주지 않게 된다. 오존에 의해 영향을 받는 지역은 경기도 및 수도권 지역과 남동해안 지역 및 일부 내륙 지역들임을 알 수 있다. 즉, 오존의 전구물질 배출량이 많은 지역과 일사량과 다른 기상학적 인자들(습도, 풍향 등)이 오존 농도를 증가시킬 수 있는 곳에서 AOT40 값이 높아지게 된다.

#### 4. 요약 및 결론

남한 지역에서 오존이 식생에 미치는 영향 및 그 원인을 파악하기 위해서 1996년부터 2001년까지 일 변화, 연변화, 그리고 식생의 생육 기간 동안의 평균 분포 특성을 분석하였으며, 식생의 종류별 임계 농도 분포도를 작성하여 식생에 미치는 영향을 평가하였다.

오존은 오후에 최대, 오전에 최저 농도를 보였고, 해안 지역의 경우 도시 및 내륙 지역보다 한 낮에 상대적으로 최대 농도가 낮게 나타났으나 야간에는 고농도가 나타나 이중 극값의 형태를 보였다. 주로 경기 및 서해안 지역과 태백산맥을 경계로 한 서쪽 지역에서 오존의 농도가 최대 약 40 ppb까지 나타났었다.

연변화의 경우 봄철에 최대, 겨울에 최저 농도가 나타났으며 태백산맥을 경계로 한 서쪽 내륙 지역과 서해안 지역에서 주로 높게 나타났었다. 특히, 해안 지역이 내륙 지역에 비해 연평균 농도가 상대적으로 높게 나타났는데 이는 해안 지역에서 야간의 고농도가 나타나기 때문이다. 식생의 성장기간에 대한 평균 분포 역시 그 양상은 비슷하며 농도는 더 높게 나타났다.

식생의 형태별 오존의 임계값을 계산한 후 그 분

포도를 작성하여 남한 지역의 식생에 미칠 수 있는 영향을 살펴보았다. 농작물의 경우 장기 및 단기적 영향을 동시에 받을 수 있는 지역이 거의 일치하였으며 농작물이 많이 분포하는 경기 지역 및 서해안 중심의 중부 내륙 지역은 피해가 상대적으로 클 수 있음을 알 수 있었다. 산림에 대한 임계 농도 분포는 농작물이 장기간 받을 수 있는 영역과 거의 일치하였으나 비중은 상대적으로 적게 나타났다. 산림이 많이 분포하는 태백산맥과 소백산맥 지역은 안동 지역을 제외하고 상대적으로 적은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

이상의 오존에 대한 임계값 산출을 통한 영향평가는 고농도 오존이 농작물과 산림 등에 장·단기적으로 미칠 위험 가능성에 대한 이해와 예측능력을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 배출량을 줄이기 위한 과학적인 자료를 제공할 수 있다. 임계 농도의 초과 지역에 대한 정보는 오염 물질에 대한 생태계 피해를 막기 위한 국제 협약이나 전략을 위한 기초 자료로도 유용할 것이다. 그러나 농작물과 생태계에 대한 오존 피해 지수의 정확한 예측이 이루어질 수 있기 위해서는 환경기준과 더 많은 식생 종류에 대한 임계 농도의 개발과 일사량, 운량, 강수량과 같은 기상 인자들의 비교 분석 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 대기환경모델링센터 및 기상청 국립기상연구소 선진기상선도기술개발의 '신생활산업기상기술개발' 과제의 지원으로 수행되었습니다. 아울러 논문 심사를 통해 아낌없는 조언을 주신 위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고 문헌

- 구해정(2004) 오염 물질이 남한 지역 식생에 미치는 영향, 서울대학교 이학석사학위논문, 62 pp.
- 김용표(1999) 동북아시아지역 대기오염 현황: 중국을 중심으로, 한국대기보전학회지, 15(2), 211-217.
- 이종범, 이대균, 이상미(2000) Model-3을 이용한 수도권 지역의 오존 고농도 사례 모사, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 197-199.

- 조석연 (2007) 한국의 지면 오존이 식생에 미치는 영향에 관한 연구 - 아까시나무 조기낙엽 현상과 관련성 검토 예비 연구, 한국대기환경학회지, 23(1), 29-38.
- 한심희 (2007) 수목의 오존 피해 및 진단, 산림지, 6, 76-79.
- 허정숙, 김동술 (1993) 다변량 통계분석을 이용한 서울시 고농도 오존의 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 207-215.
- 환경부 (2002a) 기후 변화 감시 예측 및 영향 평가 기술 - 한반도 산성화 예측 기술 개발.
- 환경부 (2002b) 대기환경연보 (Annual Report of Ambient Air Quality in Korea), 257-261.
- Coyle, R.I., R.I. Smith, J.R. Stedman, J.J. Weston, and D. Fowler (2002) Quantifying the spatial distribution of surface ozone concentration in the UK, Atmospheric Environment, 36, 1013-1024.
- De Kluizenaar, Y., J. Aherene, and E.P. Farrell (2001) Concentrations, cumulative exposure and critical levels of ozone in Ireland. Water, Air, and Soil Pollution, 1, 197-210.
- Emberson, L.D., M.R. Ashmore, H.M. Cambridge, D. Simpson, and J.-P. Tuovinen (2000) Modeling stomatal ozone flux across Europe, Environmental Pollution, 109, 403-414.
- Entwistle, J., K. Weston, R. Singkesm, and R. Burgess (1997) The magnitude and extent of elevated ozone concentrations around the coasts of the British Isles. Atmospheric Environment, 31(13), 1925-1932.
- Fowler, D., R.I. Smith, and K.J. Weston (1994) Quantifying the spatial distribution of surface ozone exposure at the 1 km × 1 km scale in J. Fuhrer and B. Achermann (eds), Critical levels for ozone: A UNECE workshop report, Schrifteihe der Les Cahiers de la FAC Liebefeld 16, Liebefeld Bern, Switzerland, 196-205.
- Fuhrer, J. and B. Achermann (1999) Critical levels for ozone-Level II, Environmental Document No. 115, Swiss Agency for Environment, Forest and Landscape, Bern, Switzerland, 333 pp.
- Fuhrer, J., L. Skarby, and M.R. Ashmore (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe, Environmental Pollution, 97, 91-106.
- Grünhage, L., G.H.M. Krause, B. Köllner, J. Bender, H.-J. Weigel, H.-J. Jäger, and R. Guderian (2001) A new flux-orientated concept to derive critical levels for ozone to protect vegetation, Environmental Pollution, 111, 355-362.
- Heck, W.W., W.W. Cure, J.O. Rawlings, L.J. Zaragoza, A.S. Heagle, H.E. Heggstad, R.J. Kohut, L.W. Kress, and P.J. Temple (1984) Assessing impacts of ozone on agricultural crops, Journal of Air Pollution Control Association, 34, 729-735.
- Huttunen, S. and K. Laine (1983) Effects of air-borne pollutants on the surface wax structure of Pinus sylvestris needles, Annales Botanici Fennici, 20, 79-86.
- Karenlampi, L. and L. Skarby (1996) Critical levels for ozone in Europe: testing and finalizing the concepts, UNECE workshop report, University of Kuopio, Finland, 363 pp.
- Mills, G., M. Holland, A. Buse, S. Cinderby, F. Hayes, L. Emberson, H. Cambridge, M. Ashmore, and A. Terry (2003) Introduction response modifying factors into a risk assessment for ozone effects on crops in Europe.
- Nali, C., C. Pucciariello, and G. Lorenzini (2002) Mapping ozone critical levels for vegetation in central Italy, Water, Air, and Soil Pollution, 141, 337-347.
- Nussbaum, S., M. Geissmann, and J. Fuhrer (1995) Ozone exposure-response relationships for mixtures of perennial ryegrass and white clover depend on ozone exposure patterns, Atmospheric Environment, 29(9), 989-995.
- Park, S.-U. and J.-M. Shim (2002) Estimation of critical loads of sulfur and nitrogen for the Korean ecosystem, International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, 10(2), 121-129.
- Roibi, W., W. Winiwarter, A. Kopsca, and J. Zueger (1994) Estimating the spatial distribution of ozone concentrations in complex terrain, Atmospheric Environment, 28, 2557-2566.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, J. Wiley & Sons, New York, 1326 pp.
- Shim, J.-M. and S.-U. Park (2004) Acidic loadings in South Korean ecosystems by long-range transport and local emissions. Atmospheric Environment, 38(33), 5623-5636.
- Stull, R.B. (1989) An introduction to boundary layer meteorology, 1st Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- UKPORG (1993) Ozone in the United Kingdom, United Kingdom Photochemical Oxidants Review Group, United Kingdom, 170 pp.
- UNECE (1996) Manual on methodologies and criteria for mapping critical levels/loads and geographical areas where they are exceeded, United Nations Econo-

mic Commission for Europe, 47-57.  
UNECE (2004) Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks, and trends.

Zhang, J. and S.T. Rao (1999) The role of vertical mixing in the temporal evolution of ground-level ozone concentrations, *Journal of Applied Meteorology*, 38(12), 1674-1691.