

## 한국의 지면 오존이 식생에 미치는 영향에 관한 연구 -아까시나무 조기낙엽 현상과 관련성 검토 예비 연구-

### Effect of Surface Ozone on Vegetation in Korea -Preliminary Study on Early Foliage of *Robinia pseudo-acacia*-

조 석 연\*

인하대학교 환경토목 공학부

(2006년 8월 1일 접수, 2007년 2월 13일 채택)

SeogYeon Cho\*

Civil and Environmental Engineering, Inha University

(Received 1 August 2006, accepted 13 February 2007)

#### Abstract

Recently, the tropospheric ozone has gained a global attention for its adverse effect on vegetation as well as its contribution to the global warming. Although a number of studies have been carried out for the urban ozone, the effect of ozone on vegetation is still largely unknown in Korea. The present work aimed at performing the first evaluation of forest damage by ozone using the national air monitoring data from the year 2000 to the year 2005. Moreover, it also explored the relevance of adverse effect of ozone to the recent events on leaf chlorosis of black locust, *Robinia pseudo-acacia*, leading to early foliage widely observed in Korea since 2001.

In the nineties, forest damages caused by ozone such as leaf chlorosis occurred in Europe and North America and led to invoke comprehensive field and laboratory studies. As a result, AOT40, implying the accumulated dose over a threshold 40 ppb, was developed to assess the forest damage by ozone. 19 air monitoring stations were selected across Korea to calculate AOT40 from the year 2000 to the year 2005. The calculated AOT40 generally increased during April and May and reached the maximum after May. The increase of AOT40 diminished substantially from the mid-June as the rainy season started.

The calculated AOT40 in the nine rural sites from the year 2002 to the year 2005 ranged from 6.8 to 29.4 ppm-hr. And all the AOT40 at the year 2005 exceeded the critical value of 10 ppm-hr for forest damage. Moreover the calculated AOT40 of Korea appeared higher than the AOT40 of Europe in the year 2004/2005 and comparable to the AOT40 of China in the year 2000. Despite the high levels of the calculated AOT40 since the year 2001 and the consistency of time of seasons between high AOT40 values and occurrence of chlorosis of black locust, further studies are required to conclude that the chlorosis of black locust occurred from the year 2001 to the year 2005 were resulted from a damage by ozone.

**Key words** : Ozone effect, Vegetation, Early foliage, Chlorosis, AOT40

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-860-7506, E-mail : sycho@inha.ac.kr

## 1. 서 론

도시지역에서 질소산화물과 VOC간에 광화학반응으로 생성된 오존이 광화학 스모그의 원인으로 규명되면서 오존은 주요한 대기오염물질로 인식되어 왔다. 최근에 들어서 대류권 오존이 이산화탄소와 메탄 다음으로 중요한 온실가스이며 (IPCC, 2001) 지면 오존 (ground level ozone)이 식생에 피해를 야기한다는 사실이 밝혀지면서, 지역규모 오염물질로써 오존이 주목받고 있다 (Krupa and Manning, 1988). Krupa *et al.* (1998)은 식물이 고농도 오존에 일정기간 이상 노출되면 황화 (chlorosis) 및 조기낙엽 (early foliage)과 같은 급성 증상 혹은 생장 저해 및 수확량 감소와 같은 만성 증상이 발생함을 보고하였다. 오존이 식생에 미치는 영향의 심각성을 일찍이 인지한 미국과 유럽은 농작물 손실 네트워크인 NCLAN (US National Crop Loss Assessment Network)과 EUCLAN (European Crop Loss Assessment Network)을 각각 설치하여 오존이 식생에 미치는 영향을 조사 및 평가하고 있다 (Heck *et al.*, 1984).

한국이 위치한 동아시아는 급속한 경제 성장으로 인하여 질소산화물과 VOC 배출량이 증가하고 있으며, 이에 따라서 지면 오존도 증가추세에 있다. Richter *et al.* (2005)은 1996년과 2002년에 동아시아 지역 대류권에서 질소산화물의 농도를 관측한 결과 북경과 상하이 등에서 질소산화물이 약 7%/yr 증가하였다고 보고하였다. 농촌 지역 오존은 도시 지역보다 질소산화물 한계 ( $\text{NO}_x$  limited) 성향이 강하므로, 질소산화물의 증가는 농촌 지역 오존의 증가로 연계될 가능성이 높다. 이에 따라서, Huixiang *et al.* (2005)은 2000년대에 양쯔강 인근 분지에서 겨울 보리의 생산량이 약 25% 감소하였다고 추산하였다. 또한, 1995년도에 일본 가나와현의 타나자와 산에서 너도밤나무의 가지가 고사하는 현상 (dieback)이 관찰되었다 (Akimoto, 2005).

우리나라에서도 1990년도부터 수도권 지역에서 고농도 오존이 관찰되었으며 (차창민 등, 1999; 오현선과 김영성, 1995), 이에 오존생성에 영향을 미치는 인자의 규명, 도시와 농촌지역 오존 분포 특성, 오존 전구 물질 관측과 오존 예측 모형 등에 관한 많은 연구가 진행되었다 (이종범 등, 2000; 윤마병과 정용

승, 1995; 허정숙과 김동술, 1993). 그러나, 대다수의 연구가 도시지역의 고농도 오존 현상에 관한 연구이어서, 농촌지역 오존의 거동 및 오존이 식생에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 미진하다.

우리나라에서 오존에 의한 식생의 피해는 아직 보고되지 않고 있다. 그러나, 오존 민감 수종인 아까시나무에 유사 오존 증상 (ozone like symptom)인 황화와 이에 따른 조기낙엽 (Koht, 2005)이 2001년에 경북지역에서 발생한 이래 전국으로 확대되고 있다 (구교상 등, 2004). 본 논문에서는 오존이 아까시나무 황화현상에 영향을 주었을 가능성을 검토하는 첫 번째 단계로 AOT40 (Accumulated dose over a threshold 40 ppb)을 우리나라 주요 지역에서 산출하였다. 그리고, AOT40의 거동과 우리나라에서 관찰되고 있는 아까시나무 황화현상을 정성적으로 비교하였다.

오존이 식생에 미치는 영향을 규명하기 위해서는 현장에서 오존 측정과 지표종의 관찰을 병행하여야 함은 물론이고 유사 오존 증상에 대한 세밀한 현장 관측이 요구된다 (Koht, 2005). 이와 더불어 식생에 영향을 미치는 다른 인자인 온도, 습도, 일조량, 임목 밀도, 식생의 노후정도, 배층해 등에 대한 심층적 연구가 이루어져야 한다 (구교상 등, 2004). 그러나, 본 논문은 근래에 발생하고 있는 아까시나무 황화현상의 원인을 규명하기 보다는 오존이 하나의 스트레스로써 작용할 수 있는지 가능성을 검토함을 목적으로 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 한국 오존의 거동 특성

오존이 인체에 미치는 영향을 평가할 때에는 1~8시간의 단기간 고농도값이 사용되는 반면, 1~5개월의 장기간 평균농도가 오존이 식생에 영향을 미치는 인자로 사용된다. 이러한 장기간 평균 오존 농도의 변화추이를 정성적으로 평가하기 위해서는 도시 및 농촌지역의 연평균 변화를 검토하여야 한다. 그러나, 과거에 오존을 포함한 기준성 오염물질의 관측은 도시지역을 중심으로 이루어졌으므로, 도시지역의 연평균 추이만 검토가능하다. 그림 1에 나타난 바와 같이 대도시지역인 서울, 부산, 대구, 대전, 광주를 물론이고 중소도시인 원주, 충주, 김천, 익산도 2000년까지

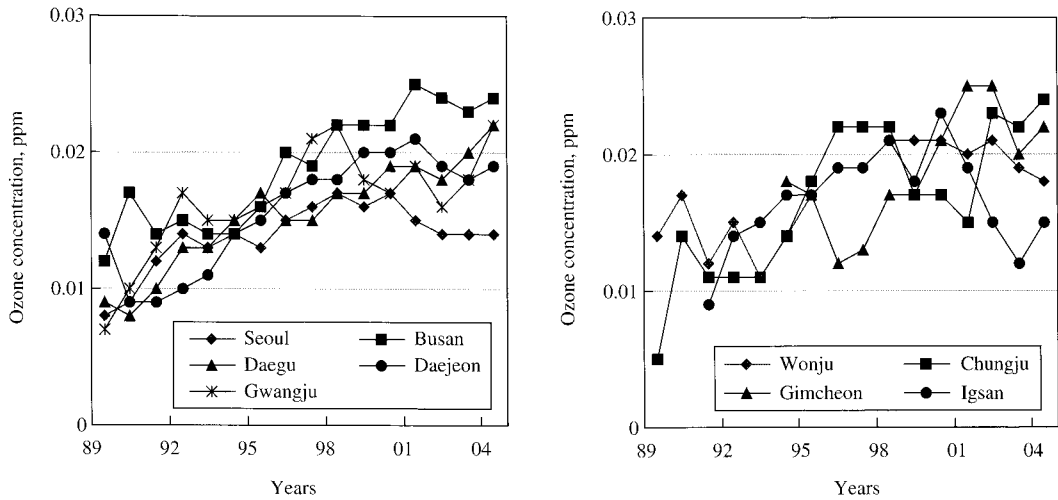


Fig. 1. The annual trend of ozone concentrations at different cities in Korea.

오존 농도가 지속적으로 증가하였으며, 도시규모에 관계없이 농도변화 특성은 서로 유사하였다.

대류권 오존은 주로 광화학반응으로 생성되므로 뚜렷한 일변화 및 계절적 변화를 하는 한편, 식물은 광합성이 활발한 시기에 오존에 민감하다. 그림 2는 2005년도에 전국에 산재한 190개소의 지역대기 측정소에서 오존 8시간 환경기준인 0.06 ppm을 초과한 회수를 보여준다. 국내 오존 단기 환경기준은 1시간 기준과 8시간 기준이 있는데, 오존이 식생에 미치는 영향에는 광합성이 활발한 낮 전체의 농도가 중요하므로 8시간 기준을 사용하였다.

일사량이 약한 겨울철인 1, 2, 11월과 12월에 환경기준 초과회수는 3회 미만으로 미미하다가, 3월부터 증가하기 시작하여 5월에 1,250회로 최고를 이룬다. 일사량이 지속적으로 증가하는 6월 초에도 8시간 오존 환경기준을 빈번히 초과하지만 6월 중순에 장마가 시작하면서 초과회수가 감소한다. 결과적으로 6월에 8시간 환경기준 초과회수는 5월보다 다소 적게 나타났다. 7월 중순에 장마가 끝나면서 일사량면에서 오존을 생성하기에 적절한 조건을 갖추지만, 남풍계열로 풍향이 바뀌어 비교적 깨끗한 공기가 유입되면서 8시간 환경기준 초과회수는 5월과 6월의 절반이하로 감소하였다. 온도가 낮고 습도가 높은 경우에는 증기압 결손(vapor pressure deficit)이 낮아서, 광화학반응이 활발하여 지고 식생이 오존에 피해를 입기

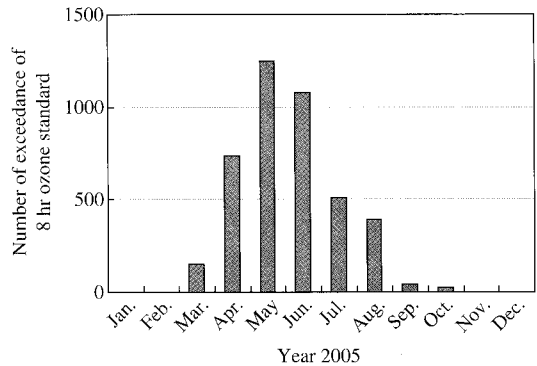


Fig. 2. The number of exceedance of 8 hr ozone national standard, 0.06 ppm, in 2005.

쉽다(ICP vegetation, 2005). 우리나라에 5, 6월은 7월과 8월보다 온도가 낮아서 일부 건조한 기간을 제외하면 오존이 식생에 영향을 미칠 수 있는 조건을 갖추고 있다.

## 2.2 AOT40의 정의 및 산출 방법

오존이 식물에 미치는 영향은 식물의 종류, 오존 노출 기간 중 식물의 성장단계와 식생에 영향을 미치는 각종 인자들 간의 복잡한 상호작용에 의하여 결정된다. 과거 20여 년간 다양한 농작물과 나무에 대한 연구를 한 결과 AOT40(Accumulated dose over

a threshold 40 ppb)과 SUM06 등이 식생에 대한 오존 영향을 평가하는 인자로 개발되었다 (European EA, 1999; US EPA 1996). AOT40과 SUM06은 오존 농도에 노출시간을 가중한 값인데, 유럽에서 주로 사용되는 AOT40은 40 ppb 이상의 오존을 대상으로 하며 미국과 캐나다에서 주로 사용되는 SUM06은 60 ppb 이상의 오존을 대상으로 한다. AOT40과 SUM06는 서로 유사한 평가 척도인데, 본 논문에서는 다양한 나무와 농작물에 대한 실험자료가 있는 AOT40을 사용하였다.

AOT40은 다음 식과 같이 낮에 40 ppb 이상의 오존농도를 90일간 누적한 값인데, 3 ppm-hr 이상이면 오존이 농작물에 영향을 준다고 한다 (Fuhrer *et al.* 1997). 또한, UN/ECE(2001)의 유럽 산림 보고서에서는 AOT40이 10 ppm-hr 이상이면 오존이 산림에 영향을 준다고 평가하고 있다.

$$AOT40 = \sum_{j=i}^{j=i+90} \sum_{k \in \text{day}} (C_{i,k} - 40)$$

윗 식에서  $C_{j,k}$ 는 j일, k시간의 오존농도이며, “k∈day”는 낮시간에 합을 의미한다. 본 논문에서는 대기 자동 측정망 자료로부터 AOT40을 산출하여 오존이 식생에 미치는 영향을 평가하였다. 대상기간은 그림 1에 나타난 바와 같이 오존 연평균 농도가 높았던 2000년부터 2005년으로 하였다.

### 2.3 연구 대상 지점 선정

우리나라에서 오존을 포함한 기준성 오염물질은

지역대기 측정망, 지역배경대기 측정망과 국가 배경대기 측정망에서 상시 관측하고 있다. 지역대기 측정망은 도시지역, 지역배경대기 측정망은 교외지역, 국가 배경 측정망은 우리나라 최외곽 청정지역에 설치되어 있다. 오존이 2차 오염물질임에도 불구하고, 도시지역에서는 일산화질소에 의한 적정 효과로 AOT40이 대상으로 하는 지역 규모 농도를 정확히 평가할 수 없다. 따라서, 교외지역에 설치된 지역 배경 측정망 자료를 이용하여 AOT40을 산출함을 원칙으로 하였다.

표 1과 같이 2004년 이전에 설치된 지역 배경 측정소(rural sites)는 9개소가 있다. 그러나, 2000년 이전에 간성읍, 양구군, 영덕면 등 3개소만 측정소가 있었다. 2000년에 방산면, 설성면, 운암면 측정소, 2001년에 관인면, 청천면 측정소, 2003년에 고당리, 남상면 측정소가 설치되어 현재의 측정망을 구성하였다. 이와 같이 지역 배경 측정망은 근래에 구성된 것으로서, 본 논문 대상기간인 2000년부터 2005년까지 오존 관측자료가 충분하지 않다. 그래서, 지역대기 측정소(urban sites) 중에서 녹지 혹은 중소형 도시 주거지역에 설치되어 주변 배출원의 영향이 크지 않고, 2000년 이전에 설치되었으며, 조사 대상기간인 2000년부터 2005년까지 측정소 이전이 없었던 10개소를 추가로 선정하였다. 추가로 선정된 도시 대기 측정소는 표 1에 나열하였다. 본 연구에서는 이상과 같이 도시 배경 측정소 10개소와 함께 총 19개 측정소에서 AOT40을 산출하였다.

Table 1. The chosen air monitoring stations for evaluation of ozone effects by AOT40.

	Province	City	Site name	Land use <sup>#</sup>	Province	City	Site name	Land use <sup>#</sup>
Rural sites	Gangwon	Goseong	Ganseog	F	Chungbuk	Goisan	Cheongcheon	SA
		Yanggu	Bangsang	F	Chungnam	Gongju	Sagok	SA
	Jeonbuk	Imsil	Unam	G	Gyeongbuk	Yeongdeog	Jipum	SA
	Gyeonggi	Icheon	Seolsung	F	Gyeongnam	Geochang	Nammsang	RI
Pocheon		Gwanin	R					
Urban sites	Seoul		Pangi	G	Gyeonggi	Gwachun	Gwachun	G
			Bulkwang	R		Namyangju	Geumgok	G
			Sangye	R	Gyeongbuk	Gimcheon	Pyeongwha	R
	Chungbuk	Cheongju	Naedeog	R		Andong	Nammun	C
	Gangwon	Wonju	Myeonglyun	R	Gyeongnam	Gimhae	Dongsang	R

<sup>#</sup>F: forest area; G: green area; SA: semi agricultural and forest area; R: residential area; C: commercial area

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 AOT40 산출결과

AOT40은 광합성이 일어나는 낮을 대상으로 90일 동안 40 ppb 이상의 오존농도를 누적한 값이다. 우리

나라에서는 가을철 및 겨울철에는 오존 농도가 낮아서 1월부터 3월까지 AOT40의 값은 매우 적다. 따라서, 4월 1일부터 일자별로 지역대기 측정소와 지역 배경 측정소의 AOT40을 산출하여 그림 3과 4에 각각 나타내었다. 여기서 4월 1일에 AOT40은 3개월전인 1월 1일부터 4월 1일까지 40 ppb 이상의 오존농

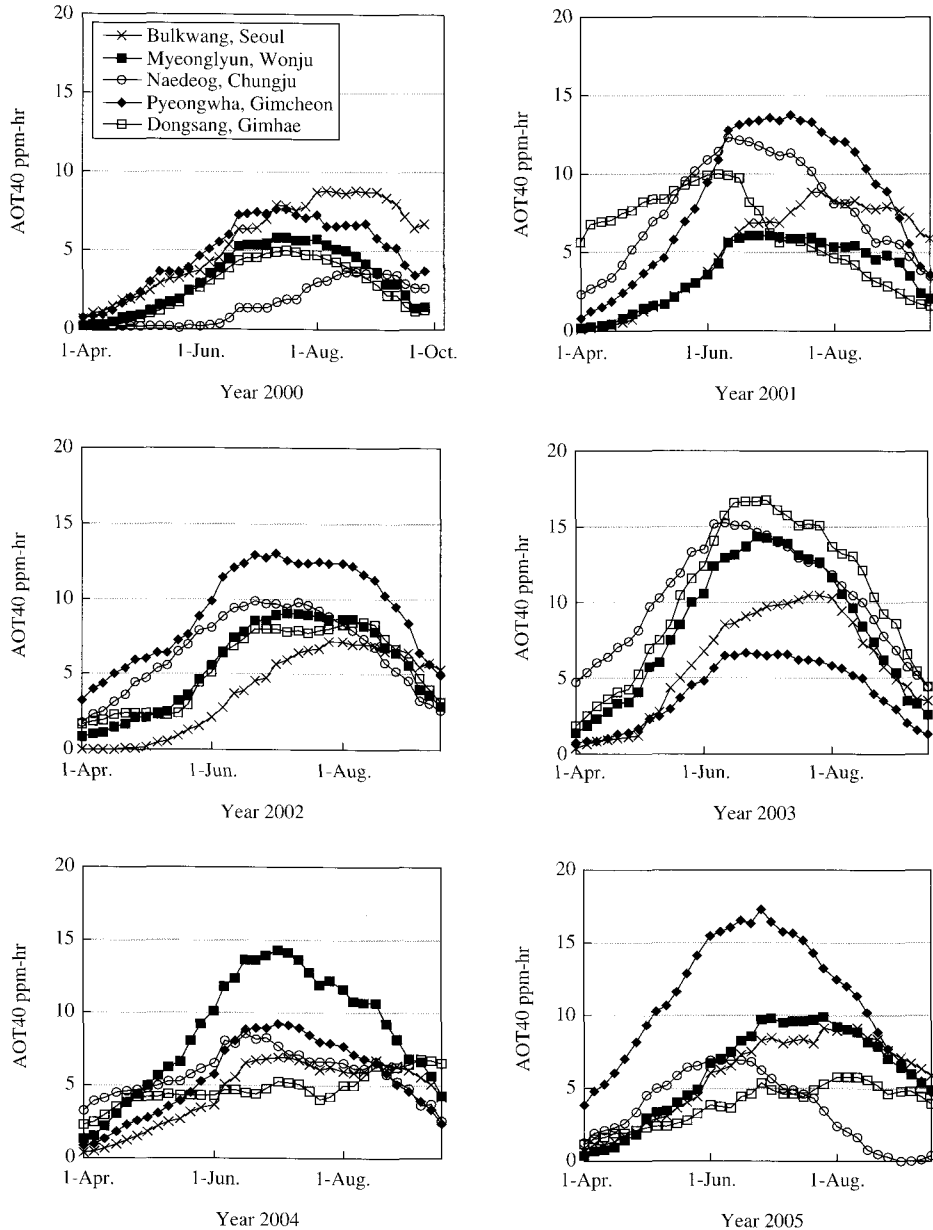


Fig. 3. The temporal variations of AOT40 in the chosen urban sites.

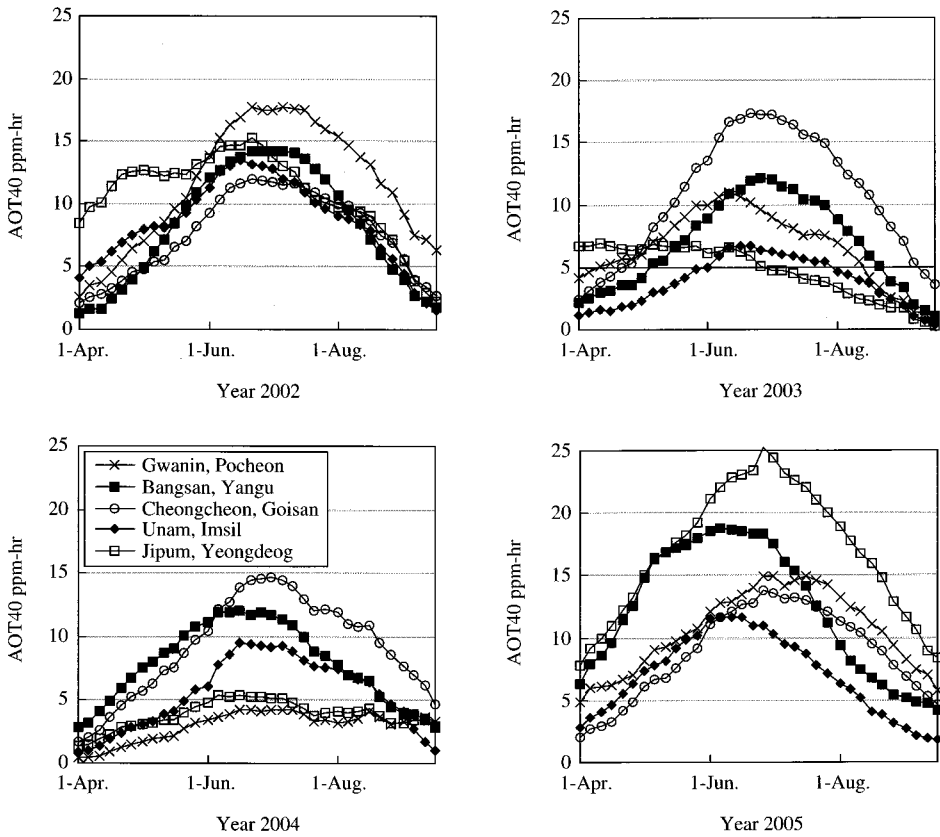


Fig. 4. The temporal variations of AOT40 in the chosen rural sites.

도를 대상으로 한다. 또한, 같은 원리로 4월 2일에 AOT40은 1월 2일부터 4월 2일까지 오존 농도를 대상으로 한다.

그림 3은 지역대기 측정소에서 AOT40의 거동을 보여주고 있는데, 일부 예외를 제외하고는 4월 1일에 AOT40은 3 ppm-hr 이하로 낮았다가 6월 초까지 급속히 증가하였다. 장마철인 6월 중순부터는 일사조건에 따라서 AOT40값이 크게 감소하지 않는 경우와 크게 감소하는 경우가 모두 있었는데 2002년은 전자에 속하였고 2003년은 후자에 속하였다. 2001년과 2003년이 예년보다 AOT40값이 다소 높게 관찰되었다.

지역배경 측정소는 1990년대 말부터 설치되기 시작하였고 교외지역에 설치되어 있어서 관리가 어려웠기 때문에 2000년과 2001년에는 결시율이 높았다. 그래서 2002년부터 AOT40값을 산출하여 그림 4에

제시하였다. 지역대기 측정소와 유사하게 4월부터 6월 초까지 AOT40이 급속히 증가하였다. 그러나, 지역대기 측정소와는 다르게 대부분 측정소에서 장마철인 6월 말부터 AOT40이 빠르게 감소하였다. 이는 지역배경 측정소는 주변에 질소산화물 배출원이 없어서 풍향의 변화로 중장거리 이동영향이 적은 7월에 오존 값이 급격히 감소하기 때문으로 사료된다.

그림 5와 6은 본 논문에서 선정된 10개 지역대기 측정소와 9개 지역배경 측정소에서 연도별 AOT40의 최대값을 보여준다. 단, 대상연도 4월부터 9월까지 월별 결시율이 20% 이상인 경우는 해당되는 “막대 그래프”를 표시하지 않았다. 대체적으로 지역대기 측정소의 AOT40값이 지역배경 측정소보다 낮게 산출되었다. 이는 오존은 2차 대기오염물질로써 광화학 반응에 의해 생성되는데 일정시간이 소요되며, 도시 지역은 연소과정에서 배출된 일산화질소가 오존을

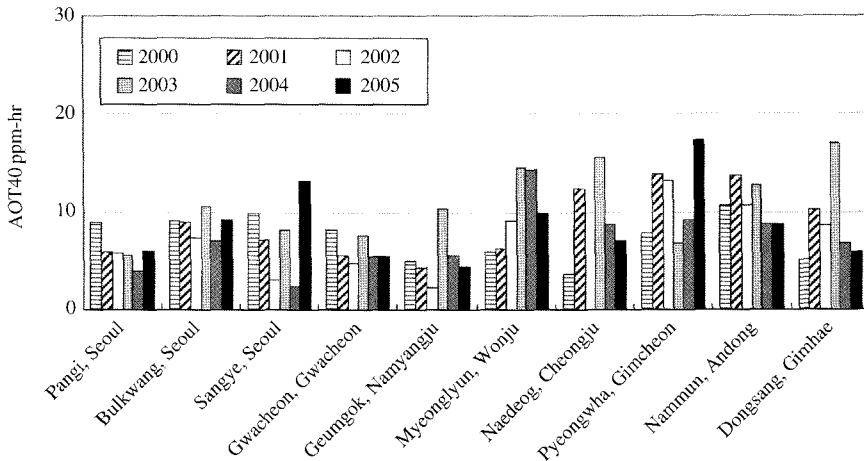


Fig. 5. The yearly maximum AOT40 in the chosen urban sites.

파괴하여 교외지역이 도시지역보다 장기간 평균 오존농도가 높게 나타나기 때문이다. 이와 같은 도시지역과 교외지역간 AOT40의 거동은 단기간 고농도 오존의 거동과는 상치된다.

그림 5는 수도권에 해당하는 서울시의 방이, 불광, 상계와 경기도의 과천과 금곡 측정소의 오존이 강원도 원주시 명륜동, 충북 청주시 내덕동, 경북 김천시 평화동, 경북 안동시 남문동, 경남 김해시 동상동 측정소의 오존보다 다소 낮음을 보여 주었다. UN/ECE (2001)의 유럽 산림 보고서에서는 산림에 영향을 주는 AOT40의 임계치로 10 ppm-hr를 추산하고 있다. 2000년에는 AOT40이 본 조사 대상 10개 지역대기 측정소에서 10 ppm-hr 이하이었으나, 2001년에는 충북 청주시 내덕동, 경북 김천시 평화동, 경북 안동시 남문동, 경남 김해시 동상동 등 4개 측정소에서 10 ppm-hr를 초과하였다. 또한, 2003년도는 수도권의 방이동, 상계동, 과천동과 김천의 평화동 등 4개소를 제외한 6개소에서 AOT40이 10 ppm-hr를 초과하였다. 따라서, 2001년부터 우리나라 오존농도는 식생에 영향을 줄 정도로 높아졌다고 평가된다.

지역배경 측정소에서 연도별 AOT40의 최대값을 도해한 그림 6은 AOT40이 대부분 10 ppm-hr를 초과하며 20 ppm-hr를 초과하는 경우도 3회가 있었음을 보여주고 있다. 전북 임실군 운암명 측정소에서 AOT40이 다른지역보다 다소 낮게 산출되었다. 강원도 고성군 간성읍이 2003년에 AOT40이 30 ppm-hr

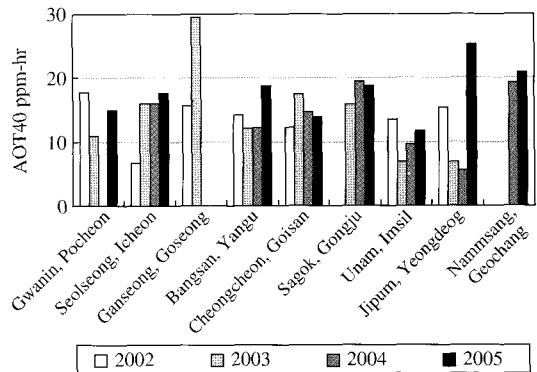


Fig. 6. The yearly maximum AOT40 in the chosen rural sites.

에 육박하였으나, 2004년과 2005년은 유효 측정치 부족으로 AOT40을 산출할 수 없었다. 또한 2003년 가을부터 측정을 시작한 경상남도 거창군 남상면에서 2004년과 2005년에 AOT40이 약 20 ppm-hr를 기록하였다.

그림 7은 AOT40의 최대에 도달하는 시기를 보여 주고 있는데, 지역대기 측정소에서는 6월 중순부터 8월 중순까지 비교적 고르게 분포한다. 반면에 지역배경 대기 측정소에서는 대부분 6월 11일부터 30일까지 AOT40이 최대에 이르는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 지역대기 측정소가 주로 위치한 도시지역은 자체적으로 배출원을 갖고 있

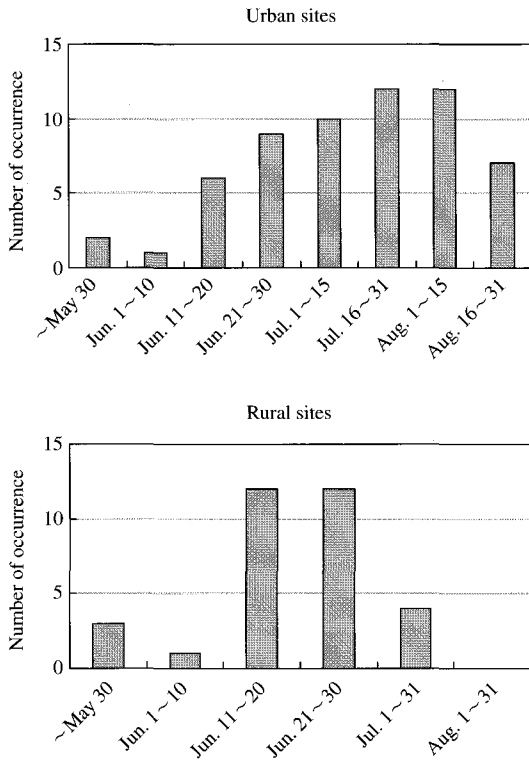


Fig. 7. The frequency distributions of occurrence of the maximum AOT40.

어서 일사량만 충분하면 오존이 생성될 수 있는 여건을 갖추기 때문에 사료된다.

### 3.2 우리나라에서 오존이 아까시나무 등 식생에 미치는 영향 검토

오존이 농작물의 생산성을 낮추고 나무의 조기낙엽을 초래시키는 현상에 대해서는 많은 연구가 있었으며, AOT40은 오존이 농작물 및 나무에 미치는 영향을 평가하는 인자로 유럽 및 일본 등지에서 사용되어 왔다(Akimoto, 2005; UN/ECE, 2001; Fuhrer *et al.*, 1997). 표 2에서 나타난 바와 같이 본 논문에서 산출한 지역배경 측정소에 2005년도 AOT40은 15 ppm-hr 이상으로 유럽지역의 2004/2005년도의 3~14 ppm-hr보다 높으며, 중국의 상해지역의 2000년도 값과 유사한 수준으로 평가되었다(ICP vegetation, 2005; Huixiang *et al.*, 2005).

이상과 같이 우리나라 AOT40은 숲에 영향을 미

Table 2. The comparison of the calculated AOT40 in this study with reported values.

Location	AOT40
Seibersdorf, Austria*	8.2
Pisa, Italy	7.3
Cadenazzo, Switzerland	13.7
Tehssaloniki, Greece	4.1
Ascot, UK	3.3
Jiaxing, China <sup>#</sup>	16.0
Changshu, China <sup>#</sup>	23.7
Sheshan, China <sup>#</sup>	18.5
Icheon, Gyeonggi <sup>@</sup>	15.0
Yangu, Gangwon <sup>@</sup>	18.8
Gongju, Chungnam <sup>@</sup>	18.8
YeongDeog, Gyeongbuk <sup>@</sup>	25.2

\* ICP Vegetation (2005); <sup>#</sup>Huixiang *et al.* (2005); <sup>@</sup>This study for the year 2005

치는 임계치인 10 ppm-hr를 크게 초과하고 있으며, 오존의 피해가 관측된 유럽보다도 높은 수치로 평가된다. 더욱이 AOT40은 고도가 증가하면 같이 증가하는 경향을 보이는데(Hunova *et al.*, 2003), 우리나라 지역배경 측정소 대부분은 평야지역에 위치하여 있으므로 아까시나무가 분포되어 있는 산에는 AOT40 값이 보다 높을 가능성이 있다.

따라서, 우리나라에서 아까시나무와 같은 오존 민감 수종이 오존에 영향을 받을 개연성이 있다고 사료된다. 특히, 우리나라에서 아까시나무 황화현상이 2001년도에 경북지역에서 처음으로 발견되었는데, 이는 AOT40이 2000년도에는 10 ppm-hr 이하이었다가 2001년도에 경북 김천시 평화동 측정소와 경남 김해시 동상동에서 10 ppm-hr를 초과하였다는 점에서 유의성이 있어 보인다. 그리고, 2003년도에 전국적으로 AOT40이 높았는데, 이는 아까시나무 황화현상이 전국적으로 확산한 시기와 일치한다. 또한 우리나라에서 아까시나무의 황화현상은 6월 초 혹은 중순 이후에 발생하고 있는데, 이는 AOT40이 높은 수준의 값을 가지는 시기와 일치한다.

오존에 의한 식생의 피해에 대한 연구가 활발한 유럽과 미국에서는 아까시나무가 많지 않기 때문에 주요 감시대상 수종은 아니다. 따라서, AOT40의 값에 따른 아까시나무 피해현상에 대한 상세한 실험실 연구는 없었지만, 오존에 의한 아까시나무의 피해에 대한 관찰 기록은 다수 있었다. UN/ECE(2001)는 헝가리에 1988년부터 2000년까지 아까시나무의 낙엽



화(defoliation)현상으로 10% 이상의 낙엽화가 된 나무가 25% 증가하였다고 보고하였다. 또한, 2000년에 루마니아와 몰도비아에서는 29.9%의 아까시나무 낙엽화 현상이 관찰되었다. 이러한 아까시나무의 낙엽에 의한 피해는 다른 오존 민감 수종에 비해서도 높은 수준으로 보고되었다.

대기오염이라 심각하다 할지라도 대기오염물질이 단독적으로 동물 및 식생에 영향을 미치는 가능성은 높지 않다. 그러나, 주변의 다른 요인에 의해서 대상 동물 및 식생에 취약할 경우에는 대기오염에 의한 피해를 야기할 수 있다. 구교상 등(2004)은 우리나라 아까시나무의 자연 수명이 40년이기 때문에 쇠퇴기에 있고 임목밀도가 높아서 광경쟁 및 양분경쟁이 심한 조건에 있다고 평가하였다. 이와 같이 식생적으로 취약한 아까시나무에 높은 AOT40이 대규모 황화현상을 촉진하였을 개연성이 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

과거에는 SO<sub>2</sub>와 먼지가 우리나라 주요 대기오염 물질이었으나, 1990년대에 들어서 정부의 지속적인 청정연료 정책으로 인하여 SO<sub>2</sub>의 오염도는 크게 개선되었다. 그러나, 지속적인 자동차 및 산업활동의 증가로 인하여 질소 산화물과 VOC가 증가하였고, 이는 오존의 증가를 초래하였다. 그 결과 1994년도에 도시지역에 심각한 고농도 오존현상(ozone episode)이 발생하였고, 그 이후에도 기상조건 등에 따라서 고농도 오존현상이 다수 발생하였다. 이에 환경부는 오존 경보제 및 예보제를 시행하여 오존농도가 건강에 미치는 영향에 대비하고 있다.

현재까지의 오존에 대한 연구 및 정책은 대도시 고농도 오존 현상에 국한되어 있었다. 본 논문에서는 2001년도부터 우리나라에서 발생한 아까시나무 황화현상을 계기로 하여 오존이 식생에 미치는 영향을 고찰하였다. 지역규모 오존농도 수준을 파악하기 적합한 지역대기 측정소와 지역배경 측정소의 측정자료를 이용하여 AOT40을 산출한 결과, 수림에 영향을 준다고 평가된 ATO40의 임계치인 10 ppm-hr을 초과하는 사례가 다수 발견되었다. 또한, 2001년부터 경북지역에서 AOT40이 10 ppm-hr을 초과하였다는 점과 6월 초순 이후에 최고값을 이룬다는 점은 아까

시나무 황화현상과 일치하였다.

이와 같이 AOT40의 거동은 아까시나무 황화현상이 오존에 의한 것일 가능성을 보여주지만, AOT40만으로 식생에 미치는 피해를 단정적으로 평가할 수는 없다. 특히, 황화현상을 입은 아까시나무잎이 생리학적으로 오존에 의한 것이라는 증거는 아직 발견되지 않으므로 오존의 피해라기보다는 오존유사증상으로 사료된다. 그리고, 논문에서 사용된 자료가 피해를 입은 아까시나무 수림내에서 관측된 것이 아니라는 점도 유의하여야 한다. 따라서, 향후에는 passive sampler를 이용하여 아까시나무 피해 수림지역에서 직접적인 오존 농도 관측이 요망된다 하겠다. 또한, AOT40의 임계치가 10 ppm-hr라는 것은 유럽에서 개발된 수치로써 우리나라 식생에 직접 적용되지 않을 수 있으므로, 우리나라 식생에 적합한 AOT40의 임계치를 도출하여야 한다. 이와 더불어서 크로버 등 지표종(bio-indicator)를 활용하여 오존의 피해정도를 직접적으로 평가할 필요가 있다고 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 인하대학교 교내 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 그리고, 본 연구에 사용된 대기 자동 측정망 자료를 제공하여 주신 국립환경과학원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 구교상, 이천용, 김선희, 성주한, 이승규(2004) 토양특성과 생리특성에 의한 아까시나무 잎의 황화현상 원인조사, 한국임학회 학술연구발표논문집, 154-156.
- 마창민, 박진수, 진형아, 김병곤, 박철진, 한진석(1999) 우리나라 주요도시의 장기간 오존농도 분포 특성, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 57-58.
- 오현선, 김영성(1995) 1991~1993년 수도권 지역의 오존농도 변화 특성, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 129-130.
- 윤마병, 정용승(1995) 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존, 한국대기보전학회지, 11(1), 85-93.
- 이종범, 이대균, 이상미(2000) Model-3를 이용한 수도권지역의 오존 고농도 사례 모사, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 197-199.

- 허정숙, 김동술 (1993) 다변량 통계분석을 이용한 서울시 고농도 오존의 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 207-215.
- Akimoto (2005) Tropospheric ozone: a growing threat, Acid Deposition and Oxidant Research Center, Niigata-City, Niigata, Japan, 26 pp.
- European Environment Agency (1999) Environment in the European Union at the turn of the century, Environmental Assessment Report No. 2, Denmark.
- Fuhrer, J., L. Skarby, and M.R. Ashmore (1997) Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environmental Pollution, 97, 91-106.
- 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. I. Overview, Journal of Air Pollution Control Association, 34, 729-735.
- Huixiang, W., C.S. Kiang, T. Xiaoyan, Z. Xiuji, and W.L. Chameides (2005) Surface ozone, A likely threat to crops in Yangtze delta of China, Atmospheric Environment, 39, 3843-3850.
- Hunova, I., H. Livorova, and J. Ostanicka (2003) Potential ambient ozone impact on ecosystems in the Czech Republic as indicated by exposure index AOT40, Ecological Indicators, 3, 35-47.
- ICP vegetation (2005) Air pollution and Vegetation-2004/2005, ICP Annual Report, Center for Ecology & Hydrology, 48 pp.
- IPCC (2001) Climate Change 2001: the scientific basis, Technical summary of the working group I report, 83 pp, <http://www.grida.no/climate/ipcc.tar>.
- Koht, R. (2005) Handbook for assesment of foliar ozone injury on vegetation in the national parks, USA National Park Service, [http://www2.nature.nps.gov/air/permits/aris/networks/docs/Handbook\\_Ozone\\_Injury\\_Assessment.pdf](http://www2.nature.nps.gov/air/permits/aris/networks/docs/Handbook_Ozone_Injury_Assessment.pdf), 79 pp.
- Krupa, S.V. and W.J. Manning (1988) Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. Environmental Pollution, 50, 101-137.
- Krupa, S.V., A.E.G. Tonneijck, and W.J. Manning (1998) Recognition of Air Pollution Injury to Vegetation: A Pictorial Atlas (Edited by Flagler, R.B.), Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA 160 pp.
- Richter, A., J.P. Burrows, H. Nuß, C. Granier, and U. Niemeir (2005) Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, Nature, 32, 129-132.
- UN/ECE (2001) Forest Condition in Europe: results of the large-scale survey, ISSN 1020-3729, 105 pp.
- US Environmental Protection Agency (1996). Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants. Research Triangle Park, NC: Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment Office; report no. EPA-600/p-93/004aF-cF.