

한반도 중부지역의 밀에 대한 오존 위험도 평가

Assessment of Ozone Risk for Wheat in the Central Region of the Korean Peninsula

홍낙기 · 이종범^{1),*} · 김재철¹⁾ · 천태훈¹⁾

강원도 보건환경연구원 대기환경과, ¹⁾강원대학교 환경과학과
(2014년 10월 16일 접수, 2015년 2월 10일 수정, 2015년 2월 10일 채택)

Nak-Gi Hong, ChongBum Lee^{1),*}, Jea-Chul Kim¹⁾ and Tae Hun Cheon¹⁾

Air Research Division, Health & Environment Institute of Gangwon-Do

¹⁾*Department of Environmental Science, Kangwon National University*

(Received 16 October 2014, revised 10 February 2015, accepted 10 February 2015)

Abstract

This study was performed to assess the level of ozone risk for wheat in the central region of the Korean Peninsula by using two ozone indices, the ozone-concentration based index (AOT40) and the ozone-flux based index (AF_{st}Y), and to analyze the relationship between the two indices. In the present study for AF_{st}Y calculation, the Monin-Obukhov length was estimated using the Pasquill stability class which was determined from routine meteorological data such as wind speed, solar radiation and cloudiness.

The AOT40 and AF_{st}6 indices were calculated for wheat at 3 sites in the central region of the Korean Peninsula during a period of 3 months from April 1 to June 30, 2006. It should be noted that the estimation of ozone index AF_{st}6 in this study was performed under several assumptions. The results for both indices, AOT40 and AF_{st}6, showed that agricultural crops could be seriously damaged by ozone in the local region of the Korean Peninsula.

Key words : Ozone, Ozone risk, Ozone index, AOT40, AF_{st}Y, Wheat

1. 서 론

대류권 오존은 식물 성장을 저해하는 가장 중요한 대기오염물질이며, 식물 내부 조직에 피해를 줌으로써 광합성, 식물 성장 그리고 생산성을 감소시키는 등 식물에 심각한 영향을 주는 것으로 알려져 있다

(Ashmore, 2005; USEPA, 1996).

오존이 식생에 미치는 피해의 한계수준을 정의하기 위해 세 가지의 누적 노출 접근법 즉, 오존 기공 플럭스를 이용하는 방법, 오존농도를 이용하는 방법, 수증기압결핍을 보정한 오존농도를 이용하는 방법 등이 사용되고 있다. 각각의 접근법은 canopy 상부에서의 오존농도를 사용하며, 오존의 영향은 누적되고 일정 기간 동안 각각의 방법에 대한 한계수준을 초과한 농도값을 합하여 구한 값을 사용한다(UNECE, 2004). 이러한 접근법들은 각각 장점과 한계점을 가

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)33-250-8571, E-mail : cbl@kangwon.ac.kr

지고 있다. AOT40과 SUM06과 같은 오존농도 기반 한계수준은 농작물, 원예작물 및 산림 등의 식생에 대한 오존의 영향을 평가하기 위하여 여전히 보편적으로 사용되고 있다(Mills *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2005; Skårby *et al.*, 2004; Panek *et al.*, 2002; Fuhrer *et al.*, 1997). 그러나 오존농도 기반 오존지표는 실제로 잎의 손상부위에 도달하는 오존량을 고려하지 못하는 등의 여러 가지 한계점이 존재한다. 이러한 한계점을 보완하기 위하여 실제로 잎의 외부로부터 기공을 통해 잎의 손상부위에 도달하는 오존 플럭스에 기반한 새로운 오존지표가 개발되고 있으며(Emberson *et al.*, 2007; Percy *et al.*, 2006) 잎의 AOT40과 $AF_{st}Y$ 두 가지 오존 지표에 대한 비교연구도 활발히 진행되고 있다(Karlsson *et al.*, 2007). 그러나 오존 플럭스 기반 오존지표 접근법은 실제로 오존이 식생에 미치는 영향을 평가하기에 유용하나 각각의 농작물별, 수종별 기공전도도도 관련 특정 변수를 개발해야 하는 어려움이 있으며, 변수에 대한 불확실성이 여전히 존재하고 있다는 한계점이 있다.

국내에서 오존농도 피해 지표인 AOT40을 적용한 연구는 주로 대기오염자동측정망에서 측정된 오존농도 자료를 이용하였으며, 이를 이용해 오존이 식생에 만성적 피해를 줄 수 있을 정도로 심각한 상황임을 보여주었으나(Cho, 2007; Yun and Kim, 2004; Yun *et al.*, 1999), 오존 플럭스 기반 오존지표를 적용한 연구결과는 아직 없다.

본 연구의 목적은 식생에 대한 오존의 위해도를 평가하기 위하여 상시관측 기상자료와 환경부에서 측정된 오존농도를 사용하여 오존 플럭스 기반 오존 지표 $AF_{st}Y$ 를 계산하는 모델을 개발하는 것이다. 또한 개발된 모델을 한반도 중부지역의 밀에 적용하여 두 가지 오존지표인 AOT40과 $AF_{st}Y$ 를 추정함으로써 농작물에 대한 오존의 위해도를 평가하고, 두 오존 지표 간의 상관도를 분석하였다.

2. 연구 방법

한반도 중부지역 농작물 등 식생에 대한 오존 위해도 평가를 위하여 본 연구에서는 다음 두 가지 오존지표(Ozone index)를 이용하였다. 본 연구에서는 전통적으로 오존 위해도 평가를 위해 가장 일반적으로

로 사용되어 온 오존농도 기반 오존지표 중 AOTX와 최근 몇 년 전부터 기존의 오존농도 기반 오존지표의 단점을 보완할 새로운 오존지표를 개발하기 위해 연구되고 있는 방법으로 실제로 잎의 기공으로 흡수되는 오존 양을 이용하여 지표를 계산하는 오존 플럭스 기반 오존지표 $AF_{st}Y$ 를 산정하여 평가하였다.

본 연구에서는 실측 오존농도 자료와 기상자료를 이용한 오존지표 계산방법을 개발하여 평가하였다. Hong (2008)은 지상기상측정소에서 상시 측정되는 기상요소 중 풍속, 기온, 일사량, 상대습도와 운량의 시간별 측정자료와 대기오염 자동측정망에서 상시 측정되는 시간별 오존농도자료(ppb)를 이용하여 두 가지 오존지표 AOTX와 $AF_{st}Y$ 를 추정하는 방법을 개발하였으며, 본 연구에서 이 방법을 이용하였다. 이 방법의 계산과정은 그림 1과 같다.

2.1 AOTX

AOTX는 오존농도를 이용하여 계산하는 오존 지표중의 하나로 일사량이 $50 W/m^2$ 이상인 맑은 날 낮 시간 동안에 오존 농도 threshold가 X ppb 이상인 오존농도를 누적한 시간별 오존농도로서 정의된다(Mills *et al.*, 2007; Fuhrer *et al.*, 1997). AOTX(ppmh)는 UNECE(2004)에서 기술된 오존의 gradient 표를 적용하여 전환된 canopy 높이에서의 오존농도를 사용하여 식 (1)로 계산하였다.

$$AOTX = \sum_{i=1}^n (C_i - X) \quad \text{if } C > X \text{ ppb} \quad (1)$$

여기에서 X는 threshold 농도(ppb)이고, C_i 는 canopy 정상에서의 오존농도(ppb)이다. 구체적인 산출과정은 Hong *et al.* (2009)에 설명되어 있는 방법에 의하였다. 본 연구에서는 AOTX의 threshold로 일반적으로 사용되는 값인 40 ppb를 적용하여 밀에 대한 AOT40을 계산하였다.

2.2 $AF_{st}Y$

오존 기공 플럭스(Fst)는 Monin-Obukhov 길이(L)와 준라미나층 저항(Rb)의 계산방법을 제외하고는 UNECE Mapping Manual(Emberson *et al.*, 2007; UNECE, 2004)에서 기술한 방법에 따라서 추정하였다(식 2).

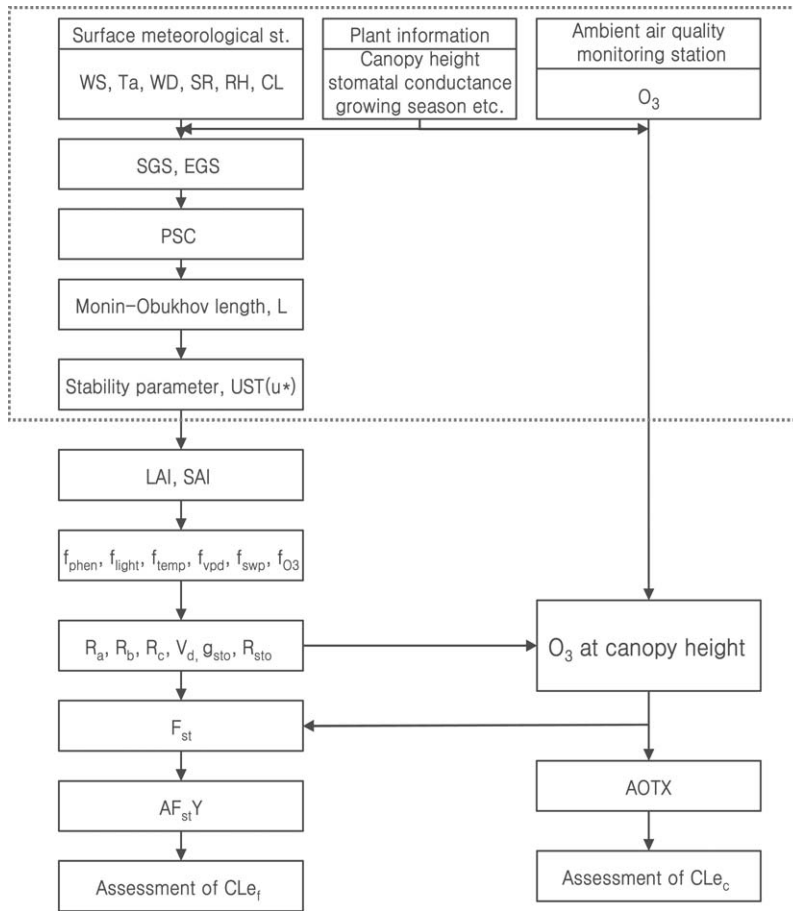


Fig. 1. The flowchart of procedure to estimate two ozone indices, AOTX and $AF_{st}Y$, using observed ozone concentration and meteorological data.

$$F_{st} = c(z_1) * g_{sto} * \frac{R_c}{R_b + R_c} \quad (2)$$

여기에서 F_{st} 는 시간별 평균 오존 기공 플럭스 ($\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$)이다. $C(z_1)$ 은 canopy 상부에서의 오존농도 (nmol m^{-3}), g_{sto} 는 기공전도도 (m s^{-1}), R_b 는 잎의 준라미나층 저항 (s m^{-1})이고 R_c 는 표면 저항 (s m^{-1})이다.

오존 기공 플럭스 기준 (threshold) $Y \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$ 이상의 누적 플럭스, $AF_{st}Y$ 는 아래의 식(3)과 같이 계산된다.

$$AF_{st}Y = \sum_{i=1}^n [F_{st_i} - Y] \quad \text{if } F_{st_i} \geq Y \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1} \quad (3)$$

여기에서 F_{st} 는 시간별 평균 오존 기공 플럭스 ($\text{nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$)이고, n 은 누적 기간 동안의 시간수이다. 본 연구에서 대상 식물종으로는 밀을 선정했으며, 밀에 대한 기준 Y 는 생산량 감소와 상관성이 가장 좋은 것으로 제시된 $6 \text{ nmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}$ (UNECE, 2004)로 $AF_{st}Y$ 를 계산하였다. 그러므로 플럭스 기반 오존지표, $AF_{st}Y$ 는 밀에 대해 $AF_{st}6$ 와 같이 정의된다.

2.3 저항, R_a , R_b , R_c

오존 기공 플럭스와 건성침적속도를 계산하기 위해 R_a , R_b , R_c 가 필요하다. 어떤 두 높이 z_2 와 z_1 사이의 열 또는 스칼라 값에 대한 공기역학적 저항

$R_a(z_2, z_1)$ ($s\ m^{-1}$)는 식 (4)에 의해 계산된다.

$$R_{a,h}(z_2, z_1) = \frac{1}{k \cdot u_*} \left[\ln \left(\frac{z_2-d}{z_1-d} \right) - \psi_h \left(\frac{z_2-d}{L} \right) + \psi_h \left(\frac{z_1-d}{L} \right) \right] \quad (4)$$

여기에서 ψ_h 는 열에 대한 similarity function, k 는 von Karman 상수 (0.41), u_* 는 마찰속도 ($m\ s^{-1}$), d 는 변위 높이 (m)이고, L 은 Monin-Obukhov length (m)이다. 침적계산을 위하여 z_2 는 오존농도를 측정할 참조높이 z_1 이고, z_1 은 준라미나층의 상부인 z_0+d 이므로 $R_a = R_{a,h}(z_r, d+z_0)$ 이다.

준라미나층 저항인 R_b 는 식 (5)로 계산되었다.

$$R_b = \frac{2}{ku_*} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (5)$$

여기에서 R_b 는 준라미나(quasi-laminar)층 저항 ($s\ m^{-1}$), Sc 는 Schmidt number이고, Pr 은 Prandtl number이다. Sc 와 Pr 값은 Lamaud *et al.* (2002)에서 R_b 에 대해 사용된 것으로서 각각 1.07과 0.72를 사용했다.

Canopy 저항(또는 표면 저항), R_c ($s\ m^{-1}$)는 기온, 일사량, 상대습도와 토양 수분의 함수이다. R_c 는 canopy 규모의 기공 플럭스 알고리즘 (Emberson *et al.*, 2000)을 사용하여 식 (6)으로 추정하였다.

$$R_c = \frac{1}{\frac{LAI}{R_{sto}} + \frac{SAI}{R_{ext}} + \frac{1}{R_{ec} + R_{gs}}}}, \quad (6)$$

여기에서 R_{sto} ($s\ m^{-1}$)는 기공을 통한 오존 흡수에 대한 저항인 토지용도별 잎의 기공 저항이다. R_{ext} ($s\ m^{-1}$)는 오존의 흡수 또는 파괴에 대한 잎 외부 영역의 저항인 외부저항이다. R_{ec} ($s\ m^{-1}$)는 토양과 canopy의 저항부를 향한 canopy 내에서 오존의 수송에 대한 저항으로 토지용도별 canopy내 공기역학적 저항이다. R_{gs} ($s\ m^{-1}$)는 지표면에서 파괴 또는 흡착을 계산하는 토양저항이다. LAI (Leaf Area Index)는 엽면적지수 ($m^2\ m^{-2}$)이고, SAI (Surface Area Index)는 표면적지수 ($m^2\ m^{-2}$)로 생육기간에는 LAI와 같고, 낙엽성 산림처럼 잎이 없는 생육기간 이외에는 1로 설정하였다.

전체 canopy의 기공 저항을 계산하기 위하여 Emberson *et al.* (2000)에 의해 제시된 방법에 따라서 잎에서부터 canopy 높이까지 scaling-up이 수행되었다.

R_{ext} 와 R_{gs} 의 값은 모든 토지 용도에 대해 각각 $2500\ s\ m^{-1}$ 와 $200\ s\ m^{-1}$ 값으로 설정했다. R_{inc} 는 Erisman *et al.* (1994)이 제시한 식 (7)에 의해 계산되었다.

$$R_{inc} = b\ SAI \frac{h}{u_*} \quad (7)$$

여기에서 $b=14\ m^{-1}$ 인 경험상수 (m)이고, h 는 canopy 높이 (m)이며, SAI는 표면적지수 ($m^2\ m^{-2}$)이다.

2. 4 기공전도도 (g_{sto})와 기공저항 (R_{sto})

기공저항에 대한 모델링 접근법은 Emberson *et al.* (2000)과 UNECE (2004)에서 기술된 것처럼 과거 몇 년 동안 개발된 stomatal multiplicative algorithm을 기본으로 하였다. multiplicative algorithm은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$g_{sto} = g_{max} * [\min(f_{phen}, f_{o_3})] * f_{light} * \max\{f_{min}, (f_{temp} * f_{vpd} * f_{swp})\} \quad (8)$$

여기에서 g_{sto} 는 실제 기공전도도 ($mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA\ s^{-1}$), g_{max} 는 식물종별 최대 기공전도도 ($mmol\ O_3\ m^{-2}\ PLA\ s^{-1}$), f_{min} 은 야외 현장에서 측정된 낮시간 최소 기공전도도이다. 기공전도도에 대한 보정 파라미터인 f_{phen} , f_{o_3} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} 와 f_{SWP} 는 각각 계절, 오존농도, 일사량, 기온, 수증기압 결핍과 토양수분포텐셜 (토양수분 결핍, SMD와 관계)에 대한 함수이고, g_{max} 를 보정하기 위해 사용된 비율로서 0과 1 사이의 값을 가지는 상대적인 용어로 표현된다.

그 다음에 토지 이용도 또는 식물종별 잎의 기공 저항 (R_{sto} , $s\ m^{-1}$)는 아래의 식 (9)와 같이 계산된다.

$$R_{sto} = (g_{sto} / 41000)^{-1} \quad (9)$$

여기에서 41,000은 $mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ 에서 $m\ s^{-1}$ 로 단위를 전환하기 위한 factor이다. 기공전도도 보정 파라미터인 f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} 와 f_{phen} 은 UNECE (2004)에 기술된 식에 의해 계산되었다. 본 연구에서 함수 f_{SWP} 와 f_{o_3} 는 각각 1.0으로 설정했다. 향후 이들 파라미터들을 포함하여 기공전도도 알고리즘을 개선할 것이다. 본 연구에서 기공전도도에 대한 일사량의 보정 파라미터인 f_{light} 는 photosynthetic photon flux density로부터 직접적으로 계산하는 것 대신에 Emberson *et al.* (2000)에서 기술한 방법에 따라 식 (10)과 같이 일사량으로부터 추정하였다.

Table 1. Pasquill stability class modified by Japan Meteorological Administration (after Lee, 2000).

Wind speed at 10 m (m/s)	Insolation (Daytime) (cal cm ⁻² min ⁻¹)				Coudiness (Nighntime) (cal cm ⁻² min ⁻¹)		
	≥.83	.83 > ≥.42	.42 > ≥.21	.21 >	< .03	.03 ≤ < .06	.06 ≤
u < 2	A	A ~ B	B	D	D	G	G
2 ≤ u < 3	A ~ B	B	C	D	D	E	F
3 ≤ u < 5	B	B ~ C	C	D	D	D	E
5 ≤ u < 6	C	C ~ D	D	D	D	D	D
6 ≤ u	C	D	D	D	D	D	D

$$f_{light} = 1 - \text{EXP}((-light_a) * \text{PFD}) \tag{10}$$

여기에서, PFD는 Photosynthetic photon flux density (μmol m⁻² s⁻¹)를 나타낸다. PFD는 400~700 nm 파장 범위에 해당하는 PAR (photosynthetically active radiation)로서 전형적으로 전구 일사량의 약 45~50%에 해당한다. 본 연구에서는 PFD를 전구 일사량의 50%로 추정하였다.

2.5 마찰속도와 안정도 파라미터

마찰속도, u* (m s⁻¹)는 대기안정도 값과 함수를 사용하여 식(11)과 같이 계산하였다(Simpson *et al.*, 2003).

$$u_* = \frac{u(z_r)k}{\ln\left(\frac{z_r-d}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_r-d}{L}\right) + \psi_m\left(\frac{z_0}{L}\right)} \tag{11}$$

여기에서 u(z_r)는 z_r 높이에서의 풍속 (m s⁻¹), k는 von Karman 상수 (0.41)이고, ψ_m은 운동량에 대한 similarity function이다. 변위 높이 (d)와 거칠기 길이 (z₀)는 각각 canopy 높이의 0.7과 0.1로 설정했다.

대기의 안정도를 나타내는 파라미터 중 하나인 Monin-Obukhov length (L)은 일반적으로 특수한 측정기기를 이용하여 안정도를 산출하므로 실용적인 목적에 적용하기에는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 난류측정자료 대신에 기상청에서 상시 측정된 풍속, 일사량, 운량 등의 시간별 지상기상관측자료를 이용하여 Pasquill 안정도 계급을 구한 후, Golder (1972)가 제시한 거칠기 길이 (z₀)에 따른 1/L과 Pasquill 안정도계급과의 관계로부터 Monin-Obukhov length (L)을 구하였다. 특히, 주간 경우에는 일사량을 구분하는 데 있어 주관적인 판단이 요구되므로 표 1에 제시한 것처럼 일본기상청에

서 일사량을 4 단계로 구분한 정량화한 안정도를 사용하였다(Lee, 2000). 대기안정도 상태에 따른 운동량 함수와 열함수들은 Simpson *et al.* (2003)과 Panofsky *et al.* (1984)에 정의된 식을 사용하여 계산하였다.

2.6 LAI 추정

EMEP (European Monitoring and Evaluation Program) 모델에서는 침적모듈을 사용하기 위해 토지이용도를 16개의 부류로 구분하고 있다(Simpson *et al.*, 2003; Emberson *et al.*, 2000). 본 연구에서는 밀에 대한 오존지표만을 계산하기 때문에 토지이용도에 따른 침적 모듈을 반영하지 않았으며, 밀에 대하여는 EMEP 모델에서 사용된 토지이용도에 따른 대표 식생종의 LAI 변수(Simpson *et al.*, 2003)를 사용하여 생육기간에 따른 LAI와 SAI의 변화를 고려했다. 오존의 건성침적을 정확하게 모사하고 오존지표의 정확도를 개선하기 위하여 향후의 연구에서 토지이용도에 따른 침적모듈을 포함하여야 할 것으로 사료된다.

기공 모델링이 수행된 이들 식생종에 대하여 생육기간 (growing season)의 시작 (Start Growing Season; SGS)과 끝 (End Growing Season; EGS)이 지정되어 저야만 한다. 생육기간 동안에 LAI의 발달은 간단한 함수로 계산된다. 본 연구에서는 LAI 추정을 위해 사용된 변수 값은 EMEP 모델에서 토지이용도별로 분류한 온대농작물 (Temperate Crops)에서 기공전도도 자료를 이용할 수 있는 대표 식생종인 밀에 대한 LAI 파라미터 값을 사용했으며, 생육기간은 밀의 한반도 지역 생육기간에 해당하는 4월 1일부터 6월 30일까지의 기간을 사용하여 오존지표를 계산하였다.

SAI는 간단히 산림의 경우 LAI+1, 또는 농작물이 아닌 식생종인 경우 LAI와 동일한 값으로 설정된다.

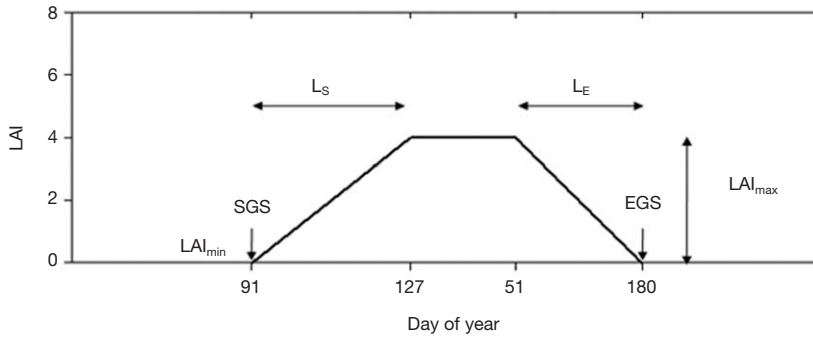


Fig. 2. Schematic of LAI development and associated parameters. SGS and EGS are the start and end of the growing season, in day-numbers. Ls and Le represent the length of the LAI-increase and decline periods, also in-day numbers. Maximum and minimum (within the growing season) LAI values are given by LAI_{max}, LAI_{min}, respectively.

그러나 농작물의 경우 실질적인 엽면적은 농작물의 수확 후에는 없어질 수 있다. 따라서 농작물의 경우 생육기간 이외의 기간에는 SAI=LAI=0 m²m⁻²이다.

본 연구에서는 LAI를 추정하기 위해 그림 2의 모형을 수식화하여 사용하였으며, 밀에 대한 생육기간의 시간변화에 따른 LAI는 Emberson *et al.* (2000)에서 제시한 값을 이용하여 추정하였다.

2.7 Canopy 높이에서의 오존농도

농작물과 키가 작은 다른 식물들의 경우, canopy 상부에서의 오존농도가 지면 위 2~5 m의 측정높이에서 측정된 오존농도보다 상당히 더 작다. 측정 높이와 canopy 높이 사이에서 오존농도의 차이는 풍속, 다른 기상 요소들과 canopy 높이 그리고 총오존플럭스(total flux of ozone, F_{tot})를 포함하는 여러 인자들의 함수에 기인한다(UNECE, 2004).

본 연구에서는 canopy 높이에서의 오존농도를 계산하기 위해 UNECE (2004)에 기술된 방법을 사용했다. canopy 높이인 z₁에서의 오존농도인 C(z₁)은 식(12)에 의해 계산된다.

$$C(z_1) = C(z_r) \cdot [1 - (R_a(z_r, z_1) \cdot V_d(\vec{z}_r))] \quad (12)$$

여기에서 C(z_r)은 오존농도를 측정된 참고 높이(z_r)에서의 오존농도, R_a(z_r, z₁)은 두 고도, z_r과 z₁사이의 공기역학적 저항이고, V_d(\vec{z}_r)은 참고 높이 z_r에서 오존의 건성침적속도(m s⁻¹)이다. z_r 높이에서의 침강속도, V_d(\vec{z}_r)은 식(13)과 같이 정의된다.

$$V_d(z_r) = \frac{1}{(R_a(z_r, z_0) + R_b + R_c)}, \quad (13)$$

여기에서 R_a(z_r, z₀)는 z_r에서 z₁이 아니라 z₀까지의 공기역학적 저항이다.

2.8 오존지표 AOT40과 AF_{st}Y 계산

밀(*Triticum aestivum*)에 대한 오존 지표 AOT40과 AF_{st}6을 계산하기 위하여 그림 3과 표 2에 나타난 것처럼 한반도 중부지역 3개 지점을 선정 하였다. JD 지점은 서울 중심의 정동에 위치해 있고, 나머지 2개 소의 다른 지점은 교외지역을 선택하였다. JA 지점은 서울의 남동쪽 방향에 있는 강원도 원주 중앙동에, SH 지점은 서울의 북서쪽 방향에 있는 인천광역시 송해면에 각각 위치하고 있다. 대상(누적) 기간은 선정된 식물종의 생육기간에 해당하는 4월 1일부터 6월 30일까지 3개월간으로 설정하였다. 기상자료는 기상청에서 측정된 인근 기상대의 자료를 지역별로 이용하였으며, 오존농도는 환경부의 대기오염자동 측정소에서 측정된 자료를 사용하였다. 밀에 대한 기공전도도, g_{sto}를 계산하기 위한 파라미터들은 UNECE (2004)에서 각각 선정하였으며, 표 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 오존농도와 기상요소의 일변화

2006년 4월 1일부터 6월 30일까지 3개월간에 대

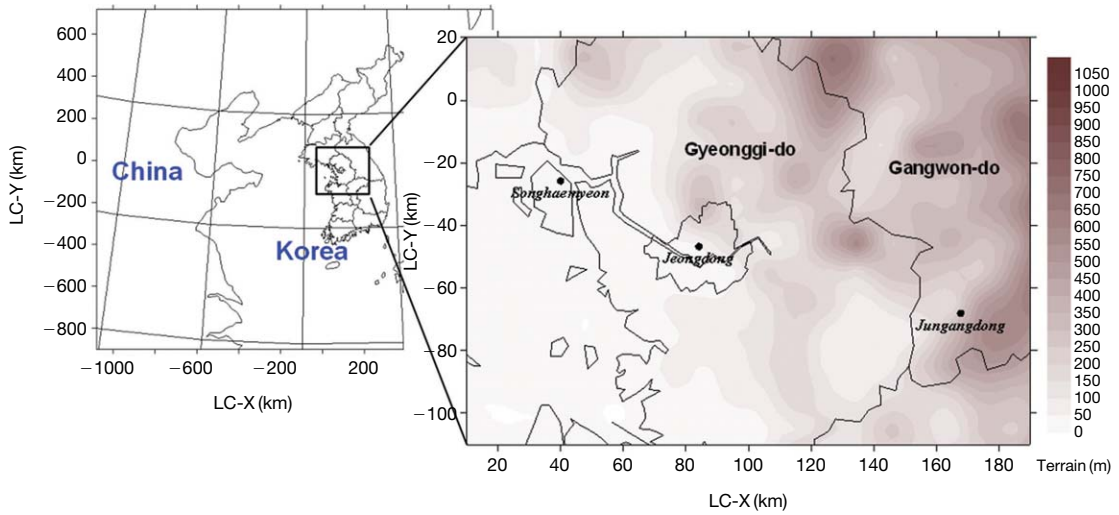


Fig. 3. Mapping of sites in the central region of the Korean Peninsula.

Table 2. The list of the 3 ambient air quality monitoring sites.

ID	City	Site name	LON (deg)	LAT(deg)
823691	Incheon	Songhaemyeon (SH)	126.27	37.45
111121	Seoul	Jeongdong (JD)	126.58	37.33
632121	Wonju	Jungangdong (JA)	127.56	37.21

Table 3. Summary of the parameterization for the stomatal flux algorithms for wheat flag leaves (UNECE, 2004).

Parameter	Units	Wheat	Parameter	Units	Wheat
g_{max}	$mmol O_3 m^{-2} PLA s^{-1}$	450	light a	(constant)	0.0105
f_{min}	(fraction)	0.01	T_{min}	$^{\circ}C$	12
f_{phen_a}	(fraction)	0.8	T_{opt}	$^{\circ}C$	26
f_{phen_b}	(fraction)	0.2	T_{max}	$^{\circ}C$	40
f_{phen_c}	days	15	VPD_{max}	kPa	1.2
f_{phen_d}	days	40	VPD_{min}	kPa	3.2
f_{phen_e}	$^{\circ}C$ days	270	SWP_{max}	MPa	-0.3
f_{phen_f}	$^{\circ}C$ days	700	SWP_{min}	MPa	-1.1

* Wheat: Triticum aestivum

한 오존농도, Pasquill 안정도 계급 (PSC), 오존 전성 침적속도 (V_d)와 오존 표면저항 (R_o)의 일변화를 3개 지점에 대하여 그림 4에 나타냈다.

시간별 평균 오존농도의 일변화는 일출과 함께 증가하기 시작하여 이른 오후에 최대에 도달하고 오전 6시와 8시 사이의 이른 아침에 최소를 나타내는 전형적인 일변화를 나타냈다. 3개 지점 중 내륙지역 중 소도시에 위치한 JA 지점의 시간별 평균농도는 대도

시 중심에 위치한 JD 지점보다 대부분의 주간 및 야간 시간대에서 더 높은 농도를 나타냈고, 일최고 오존농도 도달시각이 17시로 JD 지점의 15시보다 더 늦은 시각에 나타났다. 이는 서풍계열의 바람이 불 경우 서울 및 경기도의 대도시 풍하측에 해당되어 장거리 이동한 오존의 영향을 받았기 때문이다 (Lee and Song, 2006). SH 지점의 경우 해안 시골지역에 위치하고 있어 도시지역에 위치한 다른 지점과 달리

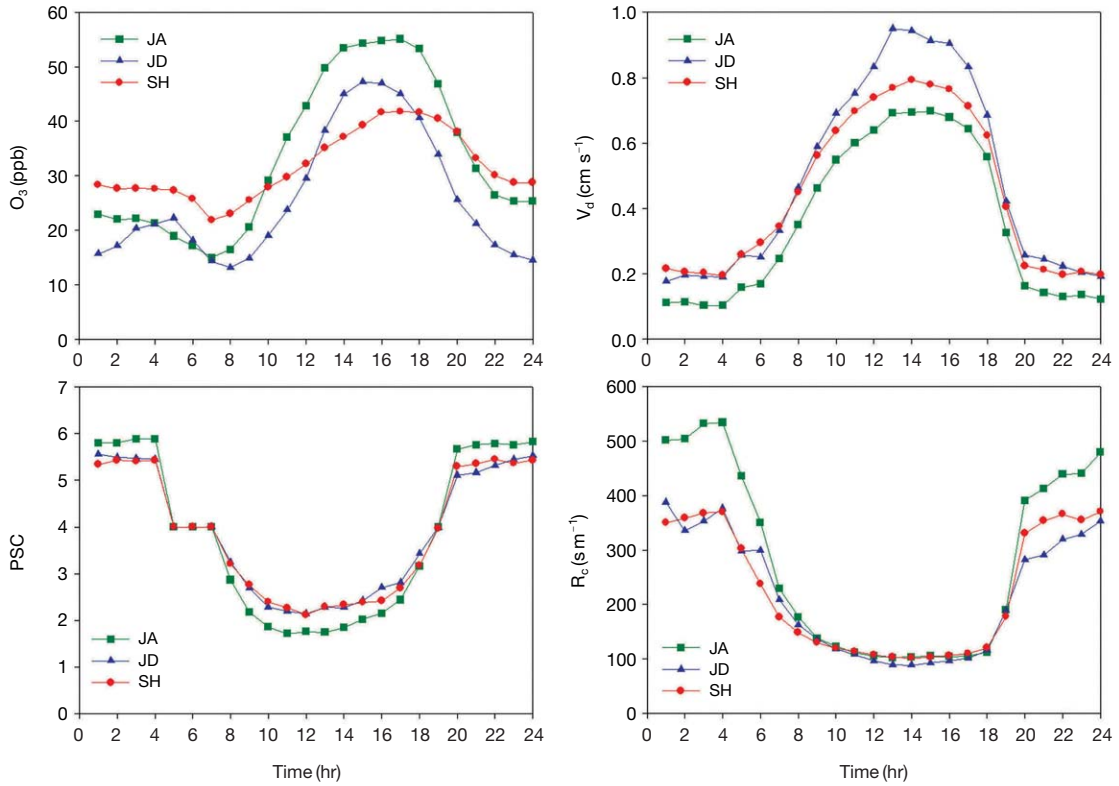


Fig. 4. Diurnal variation of ozone concentration, Pasquill stability class, deposition velocity and canopy resistance for wheat at 3 sites (April 1 ~ June 30, 2006). PSC refers to 6 Pasquill stability classes (1=A, 2=B, 3=C, 4=D, 5=E, 6=F).

질소산화물 등 오존전구물질의 농도가 낮으며, 해륙풍의 영향을 받기 때문에 다른 지점과 비교하여 주간시간대에 오존농도가 낮고 야간 시간대에도 크게 감소하지 않는 일변화를 나타내고 있는 것으로 사료된다.

PSC의 경우 주간시간대에 A~B 등급의 불안정 상태를 나타내고 야간시간대에 E~F 등급의 안정 상태를 나타내는 일변화 경향을 나타내고 있다. SH와 JD는 PSC가 비슷한 일변화 경향을 나타내고 있으며, 내륙의 교외지점인 JA는 야간시간대에 다른 지점보다 더 강안정 상태를 나타내고 있다. 이것은 JA의 야간시간대 평균 풍속이 $0.8 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 로 다른 지점의 평균 풍속 $1.8 \sim 3.4 \text{ m s}^{-1}$ 보다 더 낮았기 때문이다. 주간 시간대에는 JA이 이외 지점보다 더 강불안정 상태를 나타냈는데, JA의 주간시간대 풍속이 이외 지점의 풍속보다 더 낮았으나 일사량이 더 높았

기 때문이다.

건성 침강속도는 이른 오후에 $0.8 \sim 1.0 \text{ cm s}^{-1}$ 로 최대를 나타내고, 야간에 0.2 cm s^{-1} 로 최소를 나타냈다.

그림 5는 대상기간 동안 3지점의 기상 일변화를 나타내었다. 온도의 경우 강한 일사량에 의해 도심지점인 JD보다 교외지역(JA)의 평균 일최고 온도가 약 1.9°C 높게 나타났다. 풍속의 경우 JD와 JA의 풍속 차이가 뚜렷이 구분되는 결과를 보였고, 상대습도의 경우 온도의 지점별 특징과 대조적으로 낮동안 해안지역(SH)의 습도가 다른 지점보다 높은 결과를 나타냈다.

3.2 기공전도도 파라미터들의 일변화

본 연구에서 기공전도도, g_{sto} 는 f_{SWP} 와 f_{O_3} 가 각각 1.0이라는 가정하에 식(8)의 기공의 multiplicative 알고리즘을 사용하여 계산되었다. 본 연구에서 기공의

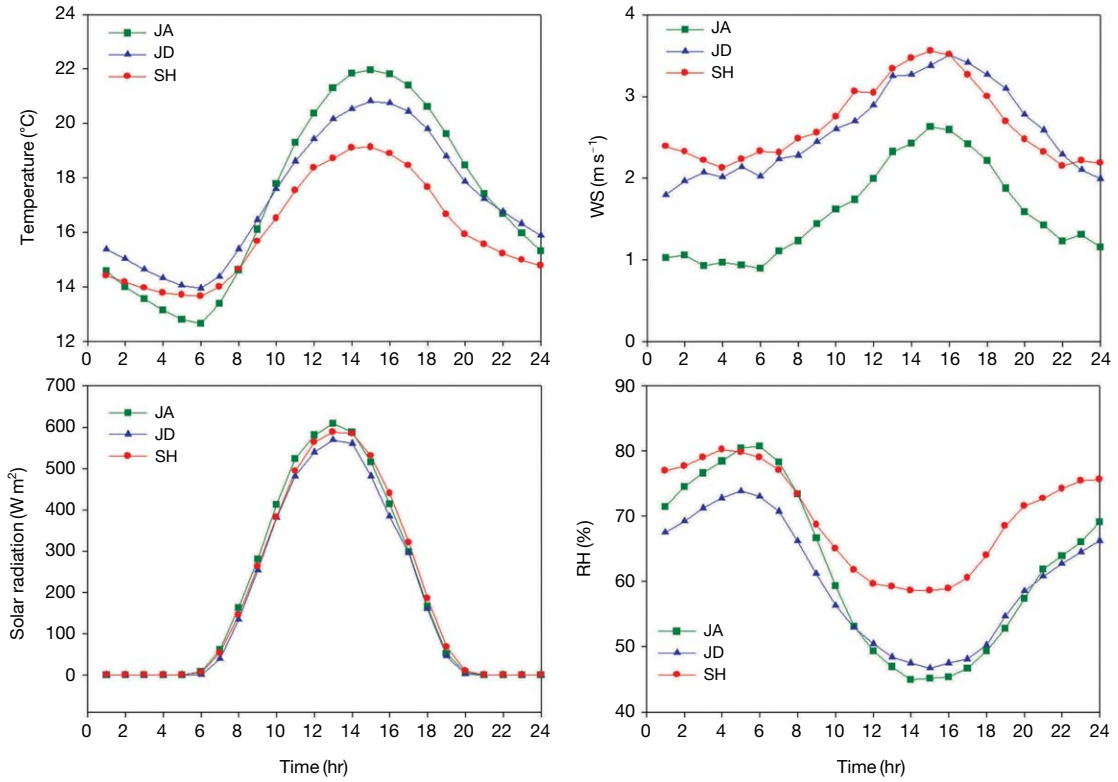


Fig. 5. Diurnal variation of Temperature, Wind speed, Solar radiation and Relative humidity for wheat at 3 sites (April 1 ~ June 30, 2006).

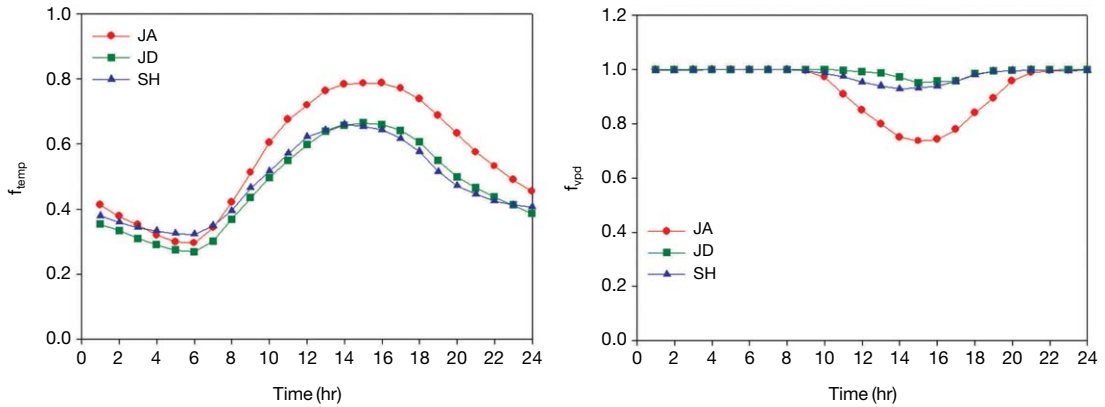


Fig. 6. Diurnal variation of the parameters f_{temp} and f_{vpd} at 3 sites (April 1 ~ June 30, 2006).

오존 흡수를 보전하는 파라미터 가운데 f_{temp} 와 f_{VPD} 의 일변화를 선택된 3개 지점에 대해 그림 6에 나타내었다. f_{temp} 와 f_{VPD} 는 공간적, 시간적 변화에 따라 기

공의 오존 흡수에 영향을 주는 것으로 나타났다. 3개 지점 중 JA에서 f_{temp} 에 의한 영향 수준은 다른 지점들보다 기온이 더 높았기 때문에 가장 강하게 나타

났다. f_{VPD} 에 의한 제한 수준은 다른 지점들보다 더 크게 나타났고 f_{VPD} 의 시간별 평균값은 주간시간 동안에 0.74~0.81까지 감소하였다. 다른 2지점의 경우 하루 동안 0.93~1.0로 거의 일정하게 유지되었다.

3개 지점에서 대상기간동안 밀에 대한 평균 f_{temp} 는 0.48~0.56의 범위를 나타낸 반면에, 평균 f_{VPD} 는

0.92~0.99의 범위를 나타내, Harmens *et al.* (2007)이 1997년 유럽의 5개의 다른 기후지역에 대하여 제시한 평균 f_{temp} 인 0.31~0.59와 평균 f_{VPD} 인 0.93~0.99와 유사한 결과를 나타냈다.

본 연구에서 $AF_{st}Y$ 는 정확한 토양수분포텐셜을 계산하기 어렵기 때문에 토양수분결핍이 없다는 가정

Table 3. Summary of present ozone standards for vegetation in Europe and the United States (Paoletti and Manning, 2007).

Area	Receptor	Indicator	Time window	Effect to be evaluated	Value
European Union	Any kind of vegetation	AOT40 ^a	May~ July (08:00~20:00)	Any kind	9 ppmh ^b as 5-yr (or 3-yr) average
UNECE	Agricultural crops	AOT40 ^a	3-month growing season (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Yield reduction	3 ppmh in a year
UNECE	Horticultural crops	AOT40 ^a	3.5-month growing season (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Yield reduction	6 ppmh in a year
UNECE	Annual-dominated (semi-) natural vegetation	AOT40 ^a	3 months or growing season, if shorter (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Seed reduction	3 ppmh in a year
UNECE	Perennial-dominated (semi-) natural vegetation	AOT40 ^a	6 months (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Growth reduction	5 ppmh in a year
UNECE	Forests	AOT40 ^a	Growing season (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Growth reduction	5 ppmh in a year
UNECE	crops	AOT30 _{vpd} ^c	Preceding 8 days (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Visible injury	0.16 ppmh in selected time windows
UNECE	Wheat	$AF_{st}6^d$	either 970°C days starting 270°C days before mid-anthesis (flowering) or 55 days starting 15 days before mid-anthesis (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Yield reduction	1 mmol m ⁻² PLA in a year
UNECE	Potato	$AF_{st}6^d$	either 1130°C days starting at plant emergence or 70 days starting at plant emergence (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Yield reduction	5 mmol m ⁻² PLA in a year
UNECE	Beech and Birch	$AF_{st}1.6^d$	Growing season (daytime hours > 50 W m ⁻²)	Growth reduction	4 mmol m ⁻² PLA in a year
USA	Any kind of vegetation	Fourth highest value in the array of the highest daily maximum 8-h averages	One year (all the hours)	Crop yield reduction, seedling growth reduction	80 ppb as 3-yr average

^aCumulative exposure above a threshold of 40 ppb O₃.

^b3 ppmh AOT40 as long-term target value.

^cVPD-modified concentrations accumulated over a threshold O₃ concentration of 30 ppb.

^dCumulative stomatal flux of O₃ above a threshold of Y nmol m⁻² s⁻¹.

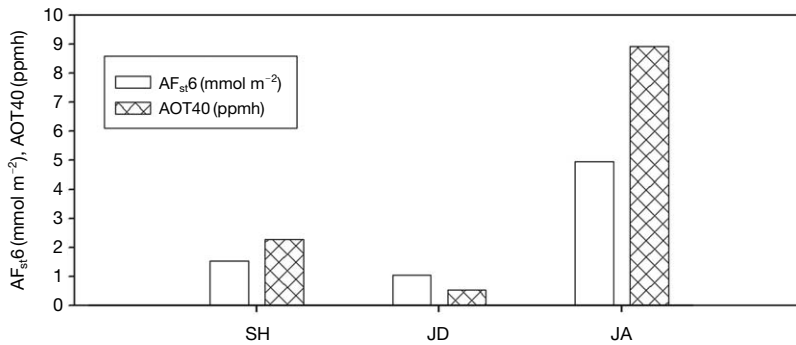


Fig. 7. Comparison of ozone indices (AF_{st6} and AOT40) at 3 sites in the central region of the Korean Peninsula (wheat).

($f_{SWP}=1$)하에 추정되었다. 고농도 오존이고 그것의 영향으로 높은 AOT40 값을 나타내는 따뜻하고 건조한 기후 상태에서 가뭄은 기공흡수를 저해하므로, 장래의 연구에 기공전도도에 대한 토양수분포텐셜의 보정 파라미터인 f_{SWP} 가 포함된다면, AF_{st6}와 AOT40 간의 차이는 더 커질 것으로 (Simpson *et al.*, 2007) 예상된다.

3.3 오존지표 AOT40과 AF_{st6}의 비교

밀에 대한 오존 지표의 한계수준은 표 3에 제시하였다. 이것은 Paolletti and Manning (2007)이 유럽과 미국에서 식생에 대한 현재의 오존 기준을 정리한 것이다. 농작물에 대한 한계수준은 오존농도기반 한계수준과 기공 플럭스 기반 한계수준 둘 다 손실 기준으로서 5% 생산량 감소를 사용한다. 그림 7은 한반도 중부지역 3개 측정소에 대하여 밀의 농도기반 오존지표, AOT40과 플럭스 기반 오존지표 AF_{st6}의 계산결과를 나타낸 것이다. UNECE에 따르면 밀에 대한 AF_{st6} 누적 대상 시간범위 계산 방법을 제시하고 있으나, 본 연구에서는 2006년 4월 1일부터 6월 30일까지의 고정된 생육기간을 대상으로 밀의 오존 지표를 계산하였다. 측정지점들은 모두 위도 36°46'에서 37°54' 사이에 위치하고 있어 위도에 따른 기후의 차이는 적다. 하지만 해륙풍 등 국지적인 미기상의 차이는 존재할 수 있다.

3개의 측정지점에 대한 AOT40은 0.5~9.0 ppmh로 Yun and Kim (2004)에서 제시한 서울 9.4 ppmh, 인천 8.7 ppmh, 강원 11.6 ppmh보다 낮았다. 이는 년도별 오존농도의 차이에 기인할 수도 있지만 본 연

구에서는 오존지표 계산을 위해 10 m 높이에서 측정된 오존농도를 밀의 canopy 높이인 1 m 높이에서의 오존농도로 변환함에 따라 오존농도가 감소하였기 때문으로 사료된다.

Mills *et al.* (2007)과 UNECE (2004)는 밀의 AOT40에 대한 한계수준을 3개월 생육기간 동안 각각 3.3 ppmh와 3 ppmh로 제시하고 있으며, 오존에 민감한 농작물로 구분하고 있다. 따라서 3개의 측정지점에 대한 AOT40은 이중 교외지역에 해당하는 JA이 Mills *et al.* (2007)과 UNECE에서 제시한 AOT40의 한계수준을 초과하는 것으로 나타났다. 특히 서울, 경기 등의 대도시 지역보다는 대도시의 풍하측에 해당하는 강원도에서 다른 지역보다 더 높은 것으로 나타났다.

밀에 대한 AF_{st6}의 한계수준은 UNECE에서 제시한 1 mmol m⁻²PLA이다. 본 연구의 대상지점에 대한 AF_{st6}는 0.5~8.9 mmol m⁻²PLA를 나타냈으며, AOT40과 동일한 JA가 이 기준을 초과하여 오존이 밀에 대해 피해를 줄 가능성이 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 실측 기상자료와 오존농도자료를 이용하여 오존농도기반 오존지표인 AOT40과 오존 플럭스기반 오존지표인 AF_{st6}, 두 오존 지표를 계산할 수 있는 모델을 개발하였다. 또한 이 모델을 이용하여 한반도 중부지역에서 밀에 대한 오존 위험도를 평가하고, 두 지표간의 상관성을 분석하였다. 본 연구는 한반도 지역에서 식생에 대한 오존의 위험도 평가하

기 위해 기공 플럭스기반 오존 지표인 $AF_{st}Y$ 를 적용한 첫 번째 연구단계로서 고려되어야만 한다. 오존 플럭스기반 지표인 $AF_{st}Y$ 를 추정하기 위하여, 기존 문헌에서 제시한 알고리즘과 밀에 대한 기공전도도 파라미터들을 사용했다. 위의 오존 지표들의 추정은 토양수분결핍이 없고 ($f_{SWP}=1$), 기공전도도에 대한 오존의 파라미터도 (fO_3) 또한 1.0으로 가정하여 수행되었다. 본 연구에서 Monin-Obukhov 길이를 추정하기 위해 난류측정자료 대신 지상기상측정소에서 상시 관측하는 지상기상자료를 이용하여 추정할 수 있도록 Pasquill 안정도 계급을 사용하였으며, $AF_{st}Y$ 는 Pasquill 안정도 계급을 사용하여 타당하게 추정될 수 있음을 보였다.

또한 본 연구에서 개발한 모델을 밀에 적용하여 계산한 두 가지 오존지표 AOT40와 $AF_{st}6$ 에 대한 결과는 오존이 밀 등의 농작물에 큰 피해를 줄 가능성이 있는 것으로 나타났다. 밀에 대한 3지점에 대한 $AF_{st}6$ 는 $0.5 \sim 8.9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ 로 나타났고, 이중 강원지역에 위치한 JA에서 밀의 한계수준 (CLef)인 $1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ 를 초과하였다.

향후 본 연구에서 고려하지 못한 대기오염 측정소의 높이뿐만 아니라 기공전도도에 대한 보정 파라미터인 토양수분포텐셜 파라미터 (f_{SWP})와 오존 파라미터 (fO_3) 등의 함수, 토지이용도 모델이 추가되고 농작물 및 산림 등의 해당 식생종에 대한 보다 정확한 기공전도도 및 생육정보를 이용할 수 있다면 본 모델의 성능이 크게 향상되어 현재보다 더 정확한 식생에 대한 오존 위해도를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 개발한 오존지표 $AF_{st}Y$ 모델은 상시 측정 기상자료를 이용하여 계산할 수 있는 방법을 개발하였지만 모델의 성능에 대한 평가가 부족한 실정이다. 따라서 실측한 난류자료를 이용하여 본 모델의 성능에 대한 평가가 수행되어지고, 모델의 성능이 양호하다면 본 모델은 상시측정 기상자료를 이용하여 식생에 대한 오존 위해도 평가를 위한 도구로서 실용적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 강원대학교 학술연구조성비 (과제번호 C1009653-01-01)로 연구하였습니다.

References

- Ashmore, M.R. (2005) Assessing the future global impacts of ozone on vegetation, *Plant and cell and Environment*, 28, 949-964.
- Cho, S.Y. (2007) Effect of Surface Ozone on Vegetation in Korea, *J. KSAE*, 23(1), 29-38. (in Korean with English abstract)
- Emberson, L.D., D. Simpson, J.-P. Tuovinen, M.R. Ashmore, and H.M. Cambridge (2000) Towards a model of ozone deposition and stomatal uptake over Europe. EMEP/MSC-W 6/2000.
- Emberson, L.D., P. Büker, and M.R. Ashmore (2007) Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across climate different regions, *Environmental Pollution*, 147, 454-466.
- Erismann, J.W., A. van Pul, and P. Wyers (1994) Parameterization of surface resistance for the quantification of atmospheric deposition of acidifying pollutants and ozone, *Atmospheric Environment*, 28, 2595-2607.
- Fuhrer, J., L. Skärby, and M.R. Ashmore (1997), Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe, *Environmental Pollution*, 97, 91-106.
- Golder, D. (1972) Relations among stability parameters in the surface layer, *Boundary Layer Meteorology*, 3, 47-58.
- Harmens, H., G. Mills, L.D. Emberson, and M.R. Ashmore (2007) Implications of climate change for the stomatal flux of ozone: A case study for winter wheat, *Environmental Pollution*, 146, 763-770.
- Hong, N.-G. (2008) A study on the application of CMAQ modeling for assessment of ozone risk for wheat and potato in the Korean Peninsula, Kangwon National University, Graduate School doctoral thesis.
- Hong, N.-G., C.B. Lee, T.-H. Cheon, and J.-C. Kim (2009) Assessment of Ozone Risk for Wheat and Potato in the Central Region of the Korean Peninsula, *Journal of Nature Conservation*, 4(1), 33-42. (in Korean with English abstract)
- Karlsson, P.E., S. Braun, M. Broadmeadow, S. Elvira, L. Emberson, B.S. Gimeno, D. Le Thiec, K. Novak, E. Oksanen, M. Schaub, J. Uddling, and M. Wilkinson (2007) Risk assessment for forest trees: The performance of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environmental Pollution*, 146, 608-616.
- Lamaud, E., A. Carrara, Y. Brunet, A. Lopez, and A. Druilhet

- (2002) Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions, *Atmospheric Environment*, 36, 77-88.
- Lee, C.B. and E.Y. Song (2006) A Simulation of High Ozone Episode in Downwind Area of Seoul Metropolitan Using CMAQ Model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 15(3), 193-206. (in Korean with English abstract)
- Mills, G., A. Buse, B. Gimeno, V. Bermejo, M. Holland, L. Emberson, and H. Pleijel (2007) A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops, *Atmospheric Environment*, 41, 2630-2643.
- Panek, J.A., M.R. Kurpius, and A.H. Goldstein (2002) An evaluation of ozone exposure metrics for a seasonally drought-stressed ponderosa pine ecosystem, *Environmental Pollution*, 117, 93-100.
- Panofsky, H.A. and J.A. Dutton (1984) *Atmospheric turbulence: Models and methods for engineering applications*. chapter 6. Profiles and fluxes in the surface layer. 119-155.
- Paoletti, E. and W.J. Manning (2007), Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants, *Environmental Pollution*, 150, 85-95.
- Percy, K.E., M. Nosal, W. Heilman, T. Dann, J. Sober, A.H. Legge, and D.F. Karonsky (2007) New exposure-based metric approach for evaluating O risk to North American aspen forests, *Environmental Pollution*, 147, 554-566.
- Simpson, D., H. Fagerli, J.E. Jonson, S. Tsyro, P. Wind, and J.-P. Tuovinen (2003) Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe, Part I Unified EMEP model description, EMEP report 1/2003.
- Simpson, D., M.R. Ashmore, L. Emberson, and J.-P. Tuovinen (2007) A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study, *Environmental Pollution*, 146, 713-725.
- Skärby, L., S. Ottosson, P.E. Karlsson, G. Wallin, G. Sellden, E.L. Medin, and H. Pleijel (2004) Growth of Norway spruce (*Picea abies*) in relation to different ozone exposure indices: a synthesis, *Atmospheric Environment* 38, 2225-2236.
- UNECE (2004) *Mapping manual 2004 : Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends*, Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation. EMEP report 2004.
- USEPA (1996) *Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants*. EPA/600/P-93/0044a-cF.
- Wang, H., C.S. Kiang, X. Tang, X. Zhou, and W.L. Chameides (2005) Surface ozone: A likely threat to crops in Yangtze delta of China, *Atmospheric Environmental*, 39, 3843-3850.
- Yun, S.-C. and B.-S. Kim (2004) Tropospheric Ozone Pollutions in Korea during 1998-2002 Using Two Ozone Indices for Vegetation Protection, *J. Agricultural and Forest Meteorology*, 6(1), 38-48. (in Korean with English abstract)
- Yun, S.-C., E.W. Park, and Y.-K. Jang (1999) Tropospheric Ozone Patterns in the Metropolitan Seoul Area During 1990~1997 Using Two Ozone Indices of Accumulation over the Threshold Concentrations, *J. KSAE*, 15(4), 429-439. (in Korean with English abstract)