

## 단기체류 기후변화 유발물질 중 대류권 오존에 대한 고찰

김진호<sup>1</sup>, 이종식<sup>2\*</sup>, 박규현<sup>2</sup>, 이찬욱<sup>3</sup>, 홍성창<sup>1</sup>, 김민욱<sup>1</sup>, 이혜민<sup>1</sup>

## Study on the Ozone in the Troposphere among Short Lived Climate Pollutants

Jin-Ho Kim <sup>1</sup>, Jong-Sik Lee <sup>2\*</sup>, Kyu-Hyun Park <sup>2</sup>, Chan-Wook Lee <sup>3</sup>, Sung-Chang Hong <sup>1</sup>,  
Min-Wook Kim <sup>1</sup> and Hye-Min Lee <sup>1</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과, <sup>2</sup>강원대학교 동물생명과학대학 동물산업융합학과,

<sup>3</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과

<sup>1</sup>Climate Change & Assessment Division, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration (RDA), Wanju 55365, Republic of Korea, <sup>2</sup>Department of Animal Industry Convergence, College of Animal Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea,

<sup>3</sup>Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration (RDA), Wanju 55365, Republic of Korea

\* Correspondence: jongslee61@kangwon.ac.kr

**Abstract:** Short Lived Climate Forcers (SLCF) are substances with relatively short lifetime in the atmosphere. Recently, it has become an object of attention, because SLCF such as black carbon (BC), methane (CH<sub>4</sub>), tropospheric ozone (O<sub>3</sub>), and hydro-fluorocarbons (HFCs) have a warming effect on climate, and some of them have detrimental impacts on human health and agriculture. In this study, it is necessary to provide basic data for establishing countermeasures in the agricultural sector against ozone, and the emission characteristics of ozone evaluated through various existing studies. As SLCF, the Radiative Forcing from increases in tropospheric ozone is estimated to be 0.35±0.15 Wm<sup>-2</sup>. Ozone damages photosynthesis, plant structure and function, as well as productivity. A common symptom of ozone injury is small stipple-like lesions on the leaf surface. Recently matured leaves are more susceptible than very young and old leaves. The optimum condition for ozone formation are high temperature and solar radiation, low relative humidity and wind speed. With these condition, early summer before the rainy season will be the worst time in Korea. It is important to understand the pollution level of ozone and various problems, which will be brought with climate change. It will be another element for agricultural management in the future.

<https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.03>

Korean J. Environ. Agric. 2024, 43, 22-31

Received: March 19, 2024

Revised: April 9, 2024

Accepted: May 3, 2024

Published: May 17, 2024

Online ISSN: 1233-4173

Print ISSN: 1225-3537



Check for updates

© The Korean Society of Environmental Agriculture 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Keywords:** agriculture, climate change, ozone, short lived climate pollutants

## 서론

단기체류 기후변화 유발물질(Short Lived Climate Pollutants, SLCP)은 기후변화 및 대기오염 유발물질로서 보건 및 사업 활동에 악영향을 미치며, 최근 관리

방안에 대한 국제적 관심이 증대하고 있다[1]. 농업은 전 지구적으로 증가하는 인구에 대응한 식량안보에 중요하며 기후변화로 인한 취약성이 큰 분야로서 기후변화 유발물질들의 특성을 고려한 대응책 마련이 중요하다. 기후변화 유발물질 중에서 CO<sub>2</sub>보다 대기 중에서 잔류하는 기간이 상대적으로 짧은 단기체류 기후변화 유발물질(SLCP 또는 Short Lived Climate Forcers, SLCF)에 대한 관심이 높아지고 있다. 지난 2017년 멕시코에서 개최되었던 제45차 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 총회에서는 특별보고서의 개요 승인과 함께 SLCF에 대한 제안서가 제출됨으로써 이에 대한 중요성이 드러났다. 이에 지난 2018년에는 World Meteorological Organization (WMO)가 주관하고 스위스 제네바에서 IPCC 국가 온실가스인벤토리 TF(TFI)와 IPCC 작업반(Working Group I)이 단기체류 기후변화 유발물질 관련 전문가 회의를 개최하였다. 이처럼 단기체류 기후변화 유발물질들에 관한 관심이 높아짐과 함께 발생 저감이 상대적으로 저비용이며 농업과 건강 문제에 대한 실질적인 동반 이익(co-benefits)을 달성할 수 있는 분야로 평가되고 있음에 따라 농업 분야에서도 이에 관한 연구가 요구된다[2]. 주요 단기체류 기후변화 유발물질은 기후변화와 대기오염을 동시에 유발할 수 있는 물질로서 생태계의 건강, 보건복지 및 농업생산력에 부정적인 영향을 미친다. 이러한 블랙카본(Black Carbon, BC), 메탄(CH<sub>4</sub>), 대류권 오존(Tropospheric Ozone, O<sub>3</sub>) 및 수소불화탄소(Hydrofluorocarbons, HFCs) 등이 포함된다[3].

오존은 대기 중에서 자외선에 의해 광분해된 산소분자가 원자 상태에서 다른 산소분자와 결합하여 생성되며, 지상 10~35 km 부근에 성층권 내에서 오존층을 형성하고 있다[4]. 특히 O<sub>3</sub>는 직접적인 배출원 없이 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 탄화수소(Hydrocarbon), 휘발성유기화합물(VOCs), 일산화탄소(CO)의 광화학 반응으로 생성된다. 이는 지구온난화와 월경성 오염 문제를 일으키며, 식물의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 줄이고 농작물의 생산성에 악영향을 미친다[1]. 오존은 대기오염물질인 동시에 온실가스이기 때문에 지구온난화를 더 가속하는 역할을 한다. 또한, 강한 산화력은 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 생성하는 데도 관여한다. 현재, 기후변화에 대응하기 위한 농업 부문의 온실가스 관련 연구 동향을 보면, 주로 배출량이 많은 CH<sub>4</sub>와 아산화질소(N<sub>2</sub>O)에 집중되어 있다. 그러나 발생원의 국지성과 작물에의 피해 등을 고려할 때 오존에 대한 평가가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 오존의 영향이 지역적인 작물 생육을 상당히 저해할 수 있으며 아울러 식물이 피해 받음에 따라 대기로부터 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 식물의 능력을 저하시켜 지구온난화가 가속된다는 보고도 있다[5]. 이처럼 기후변화는 현재 인류가 직면하고 있는 심각한 문제이며, SLCP 저감은 특히 아시아 지역에서 대기오염 문제뿐만 아니라 단기적 기후변화 완화를 위해 중요하다고 하였다[6]. 우리나라에서는 환경정책기본법에 따라 O<sub>3</sub> 배출기준을 정하고 있고, 대기환경보전법 시행령에 따라 오존경보제를 실시하고 있다. 이러한 O<sub>3</sub> 관련 연구 현황을 보면, 짧은 체류시간과 복잡한 발생기작 등의 O<sub>3</sub>의 특성에 따라 오존 예·경보, 관측 및 측정 등의 기술개발은 추진됐으나, 저감 기술은 주로 전구물질 저감에 초점을 맞추고 있다[1]. 다양한 전구물질 배출과 기후변화로 인한 광 에너지 증가로 지표면 오존 생성과 농도는 높아질 것으로 우려된다. 이에 따라 본 논문은 향후 관련 연구 수행을 위한 기초자료를 제공하고자 오존의 기후변화 유발물질 및 대기오염물질로서의 환경에 미치는 영향 등에 대한 자료들을 보고하고자 한다.

## 자료 및 방법

본 논문에서는 대기오염물질인 동시에 온실가스이며, 지구의 온난화에 따라 향후 그 발생이 증가할 것으로 예상되는 오존에 대한 농업 분야에서의 대응 방안 수립을 위하여 다양한 연구를 통해 평가된 배출 특성 그리고 농업 분야에서의 영향 및 피해 대책 등을 문헌조사를 통해 정리하였다. 기후 및 청정대기연합(The Climate and Clean Air Coalition, CCAC)이 발간한 ‘Time to Act’를 통해 지표면 오존의 발생원, 영향 범주와 체류기간 등을 다른 SLCP들과 비교하였다. CCAC는 대기 중의 단기체류 기후오염 물질을 줄이기 위한 최초의 전 지구적 노력으로 정부, 국제단체, 시민 사회단체와 민간 부문을 연합하는 자발적 파트너십이다. ‘Time to Act’에서는 오존 외에 기타 단기체류 기후오염 물질에 대한 특성과 지구환경 및 생태 그리고 인체 건강에 미치는 영향 등이 평가되었다. 아울러 이 물질들에 대한 저감 방안 및 효과에 관하여 기술하였다. 결과적으로 인간 복지를 위한 빠르고 다양한 혜택을 가져올 수 있는 비용 효율적이고 쉽게 적용할 수 있는 수단들을 제시하였다[7].

지표면 오존의 농업에 미치는 영향에 있어서는 작물에 대한 오존 피해에 관한 연구 사례 조사를 통해 다양한 작물에 대한 피해 증상들을 보고한 자료[8]와 함께 농업 분야에서는 또한 피해 농작물에 대한 눈에 보이지 않는 작물 세포의 기능 저하나 양분 용탈 그리고 피해 상승시에 대한 피해 저감 대책과 함께 축산에 미치는 영향 등에 관한 국내외 연구 결과들을 수집, 정리하였다. 오존이 기후변화에 미치는 영향에 대하여 주요 온실가스와의 복사강제력을 비교하였다. 이와 함께 오존 발생이 우려되는 기상 조건

과 오존 발생 현황 그리고 농업 분야에서의 피해 경감 방법 등에 관하여 기술하였다.

## 결과 및 고찰

### 단기체류 기후변화 유발물질(SLCP)로서의 오존

대기 중으로 배출되거나 대기 중에서 생성된 가스 및 에어로졸은 이화학적 특성에 따라 그 체류기간이 상이하다. IPCC에 따르면 대기 물질에 있어서 체류기간(lifetime)은 초기 농도의 37%로 감소하는 데 걸리는 시간으로 알려져 있다. SLCP는 lifetime 이 100년 또는 그 이상인 CO<sub>2</sub>에 비해 짧은 물질들을 의미하는데 BC는 3~8일, O<sub>3</sub>는 4~18일, CH<sub>4</sub>는 약 12년 정도로 보고되고 있다. 또한, 현재 존재 농도는 상대적으로 낮으나 향후 영향이 커질 것으로 예상되는 HFCs는 약 15년 정도로 평가하고 있다[1]. Fig. 1은 SLCP의 주요 발생원과 대기 중 체류기간 그리고 각각의 영향 범주를 보여주고 있다. 오염에 따른 영향은 CH<sub>4</sub>와 HFCs가 전 지구에 걸친 범주를 보이지만 BC와 O<sub>3</sub>는 지역적 영향이 큰 것으로 나타났다.

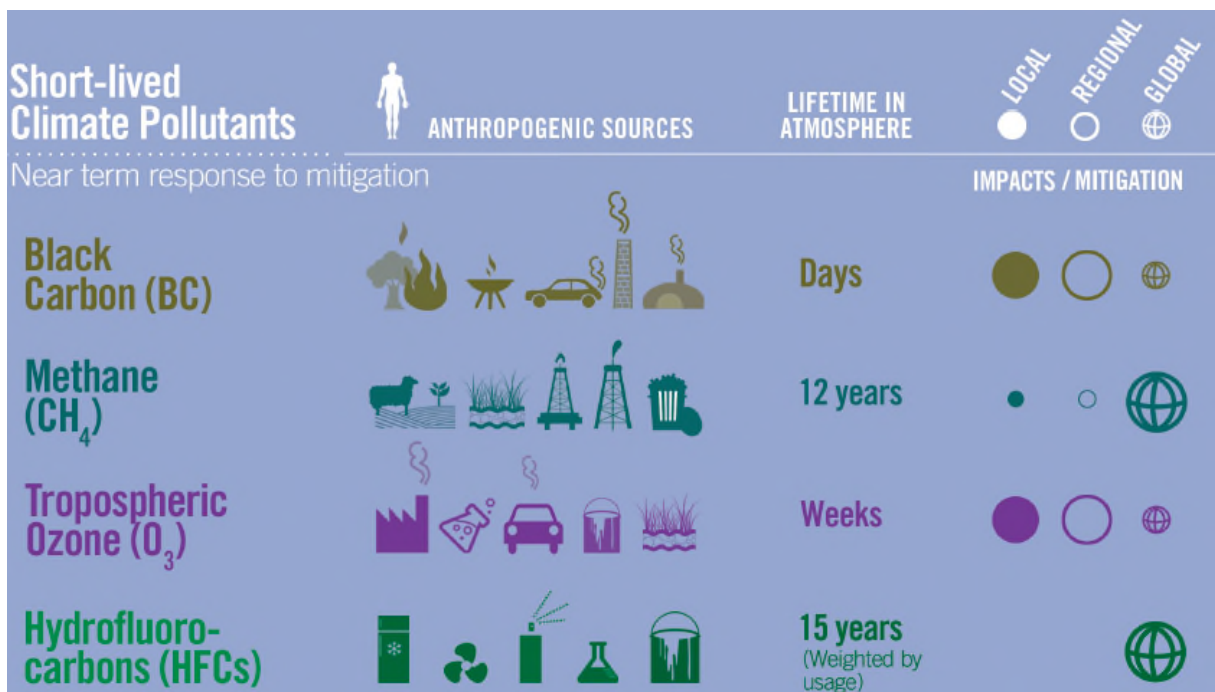


Fig. 1. Anthropogenic sources and impact category of Short Lived Climate Pollutants (SLCP). (Source: The Climate and Clean Air Coalition (CCAC), 2014)

이 중 CH<sub>4</sub>와 HFCs는 주요 온실가스로 주요 산업 부문별로 배출량이 산정되고 국제적으로 많은 논의가 진행되고 있다. CH<sub>4</sub>와 오존은 그 발생원 중의 하나가 농업에서 기인하는 것으로 알려져 있다. 특히, CH<sub>4</sub>는 오존 생성의 전구체로도 작용하며, 지구 전체적으로 인간 생활로 인한 발생량 중 농업 분야에서의 발생 비율이 높은 것으로 알려져 있다. 전 지구에 걸쳐 오존 농도 증가 요인 중 약 50%가 CH<sub>4</sub> 발생 증가에 기인하는 것으로 알려져 있다[7]. 이러한 CH<sub>4</sub>는 지구 전체적으로 인간 생활로 인한 발생량 중 농업 분야에서의 발생 비율이 높은 것으로 알려져 있다. 이러한 SLCP에 대한 모니터링으로는 대표적으로 WMO가 추진하고 있는 전 지구적 대기 감시 프로그램이 있다. 본 프로그램에 따르면 오존과 CH<sub>4</sub>는 1996년, HFCs는 2002년, 그리고 BC에 대해서는 2005년부터 실시되고 있다. 그러나 발생에 따른 영향으로 지역적 특성이 큰 오존에 대해서는 아직 관련 정보 공유가 미흡한 실정이다(<https://wmo.int/activities/global-atmosphere-watch-programme-gaw>).

### 지표면 오존의 생성

오존은 체류시간이 4~18일이며, 성층권에서는 유해 자외선을 흡수한 순기능을 보이지만, 대류권에서는 온난화를 유발하는 대기오염물질이다[9]. 대류권의 오존은 인위적이거나 자연적으로 발생하는 CO, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub> 및 VOCs 등 기체 간 반응을 통해 발생하며 O<sub>3</sub> 증가의 약 2/3는 전 지구적 메탄의 증가에 기인한다[3]. 오존층의 역할과는 달리 인간의 활동으로 인해 배출된 대기오염물질들이 대기 중에서 이차적으로 반응하여 만들어진 지구 표면의 오존은 강력한 산화제로서 인체 및 동·식물에 악영향을 주게 된다. 특히 식물에는 광합성을 저해함으로써 생산성을 저하하는 것으로 알려져 있다.

Emberson 박사는 오존이 지구의 중요한 문제라고 말하면서, 특히 아시아에서 오존의 농도가 증가해 왔다고 하였다[10]. 지표면에서의 오존 생성은 각종 시설과 자동차 내연기관의 연소 등 인위적 요소 또는 번개나 산불과 같이 자연적 요소로 인해 대기 중으로 배출된 탄화수소, 산화탄소 및 NO<sub>x</sub>들이 광 에너지에 의해 분해되어 산소원자를 생성한다. 반응성이 큰 산소원자는 대기 중에 자연 상태로 존재하는 다른 산소원자와 결합하여 오존을 형성하게 된다(Fig. 2). 이 과정에서 광분해를 위해서는 광 에너지의 세기가 중요한 인자로 작용하기 때문에 계절적 차이와 하루 중 태양광 세기 차이가 오존 생성에 중요한 인자로 작용한다[11]. 따라서 평균 오존 농도에 기초한 오존 관리는 작물 손실을 저평가할 수 있는 우려하고 있다.

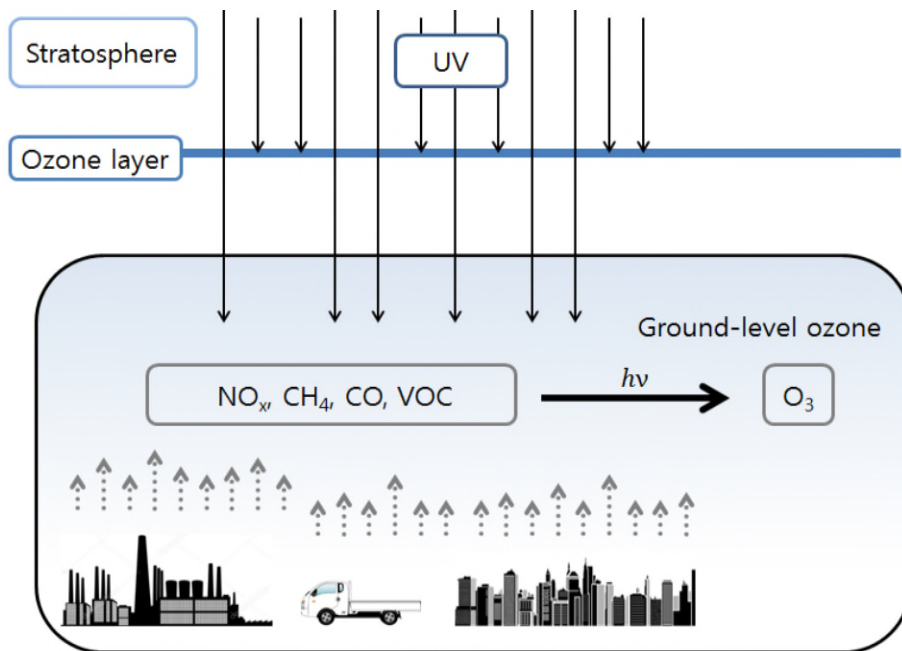


Fig. 2. Function of stratospheric ozone layer and formation of ground level ozone.

오존이 발생하기 쉬운 기상 조건으로는 다음과 같이 알려져 있다. 첫째, 기온이 25°C 이상이고, 상대습도가 75% 이하일 때, 둘째, 기압경도가 완만하여 풍속 4 m/s 이하의 약한 바람이 지속될 때, 셋째, 시간당 일사량이 5 MJ/m<sup>2</sup> 이상으로 햇빛이 강할 때, 넷째, 대기가 안정하고 전선성 혹은 침강성의 역전이 존재할 때 등이다. 우리나라의 경우, 월평균의 일사량은 4~6월에 높고, 기온은 6~9월에 높으며, 풍속은 6~9월에 낮으나 상대습도가 75% 이상인 일수는 7~8월에 높다. 따라서 기상 특성을 고려할 때, 6월은 오존 발생 측면에서 나쁜 기상요소가 중첩되어 그 발생에 대한 우려가 가장 크게 나타난다. 이처럼 오존은 NO<sub>x</sub>와 VOCs가 풍부한 지역에서 햇빛이 강한 조건에서 많이 발생하므로 주변에 오염물질 배출원이 존재하는 농촌지역에서는 오존 발생이 쉬운 기상요소가 중첩되는 시기에 농작물의 오존 피해에 대한 주의가 요구된다[12].



## 지표면 오존의 영향

### 작물 생육에 미치는 영향

오존이 식물에 미치는 피해는 아황산가스(SO<sub>2</sub>)보다 강하다고 보고되어 있다. 이와 같은 중요성 때문에 미국 환경청에서는 1980년 대부터 국가작물손실평가네트워크(National Crop Loss Assessment Network, NCLAN)라고 하는 대기오염이 작물생산에 미치는 단기 및 장기 경제적 영향을 평가하기 위해 연구에 협력 조직그룹을 구성하여 농작물에 대한 대기오염물질의 영향에 관하여 연구를 시작하였다([https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=38304&Lab=NHEERL](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=38304&Lab=NHEERL)).

CCAC에 따르면 SCLP로 인한 대기오염이 농업 생산성에 미치는 영향으로는 4대 작물의 생산량이 연간 1.1억 톤 피해를 받고 있으며, 지역별로는 남아메리카-카리브해 지역이 9.5%, 북아메리카-유럽이 52%, 아프리카 3.5%, 서남-중앙아시아 18.4% 및 동남아시아-태평양 지역 16.6%로 보고되어 있다[7]. 미국 MIT 연구팀이 에너지 정책에 발표한 논문에 따르면 기온상승과 CO<sub>2</sub>의 증가가 식물의 생장에 긍정적인 영향을 주지만, O<sub>3</sub>의 증가를 해결하지 않으면 농작물 생산량을 대폭 감소시키는 것으로 나타났다. 아울러 화석연료 사용으로 O<sub>3</sub>가 증가하면서 2100년까지 전 세계 농작물 생산량이 40%가량 줄어들 것이라고 연구 결과가 보도되었다[13]. 쌀의 경우, 2000~2005년 지표면 오존에 의한 영향으로 일본 쌀 생산량이 평균 9% 감소했다고 밝혔다[14]. 미국 MIT 소속 연구진이 벼, 밀, 옥수수과 콩 등 주요 식량작물에 대한 기후변화와 오존 오염의 상호작용을 구명한 결과, 옥수수는 열(heat)에 부정적인 영향을 받지만, 밀은 오존 노출에 매우 민감한 영향을 받는 것으로 나타났다[15]. Avnery 등의 연구 결과로 보면 2000년 한 해 동안 지표면 오존으로 인한 작물 생산량 피해는 대두, 밀, 옥수수가 각각 8.5~14.0%, 3.9~15.0% 및 2.2~5.5% 감소한 것으로 평가되었다[16]. 오존은 강력한 산화제로서 인체 및 동식물에 영향을 미친다. 작물의 광합성을 저해하는데 기공을 통해 식물체 내로 침입한 오존은 세포막 구조와 투과성에 영향을 미치며, 세포 내 효소와 세포기관에 작용하여 주요 대사 과정을 저해하고 엽록체 및 미토콘드리아 막을 산화시켜 기능을 저해한다[17]. 오존의 피해는 일반적으로 노화 잎보다는 생육이 활발한 잎이 민감하게 반응한다[18]. 잎의 표면 특히 책상조직과 표피에 피해를 주는 것으로 알려져 있다. 오존에 의한 식물체의 일반적인 피해증상은 잎맥 사이에 수많은 작은 반점들을 형성하며, 반점의 크기가 SO<sub>2</sub> 피해 반점보다 극히 작은 특징을 가지고 있다. 회백색 또는 갈색 반점이 형성되며, 피해 정도는 광도가 강하고 낮이 긴 여름과 통기가 좋은 사질 토양에서 심하다. 벼의 경우, Fig. 3에서 보는 바와 같이 잎맥 사이에 수많은 작은 반점들을 형성한다. 특히, 광도가 높은 조건에서는 은백색의 미세한 반점이 나타나며(왼쪽), 광도가 낮은 조건에서는 적갈색의 반점이 형성된다(오른쪽). 오존의 피해는 광도가 강하고 낮이 긴 여름과 통기가 좋은 사질 토양에서 심하다. 주간에도 그늘이 짙으므로 광도가 낮아짐에 따라 기공이 닫혀 피해가 감소한다. 토양 수분 상태에 따라서는 건조 상태보다 수분이 공급됨에 따라 공변세포를 팽창시켜 기공이 닫히지 않기 때문에 피해가 커진다. 오존 가스에 의한 피해 정도는 생육 시기별로 출수기 < 유수형성기 < 활착기 < 분얼최성기의 순으로 심한 경향이였다. 품종별 오존에 의한 피해 정도는 자포니카 품종보다 통일형 품종이 약간 더 심한 경향이였으며, 벼 영양상태에 따른 잎 피해 정도는 질소 증시에 따라 현저히 심해지고, 칼리질 비료부족에 의해 심해지는 경향이였다[19].

콩의 오존 피해증상도 벼와 마찬가지로 잎맥 사이에 작은 반점들을 형성하게 되며, 광도에 따라 차이를 나타낸다. Fig. 4에 나타난 것처럼 높은 광도에서는 은백색의 미세한 반점이 나타나며(왼쪽), 낮은 광도에서는 적갈색의 반점이 형성된다(오

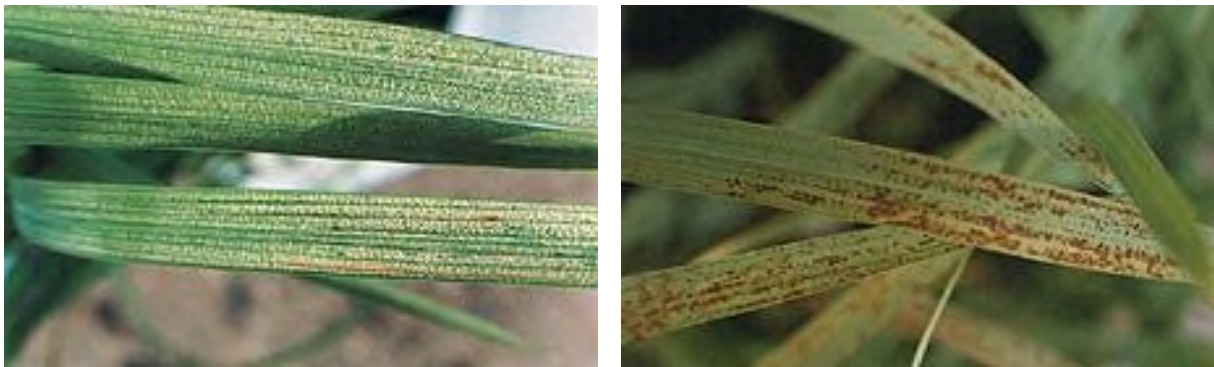


Fig. 3. Ozone injury symptom of rice plant (Left, high intensity of light; Right, low intensity of light). (Source: Kim et al., 1998)

른쪽). 그러나 이와 유사한 증상이 병원체나 다른 오염물질에 의해서도 나타나므로 오존의 피해 여부를 판단하기 위해서는 다양한 조건에서의 평가와 종에 따른 감수성 등을 비교할 필요가 있다. 눈에 보이지 않는 피해로는 세포 기능이 저해되고, 엽록소 기능이 장애를 받게 되는 현상을 들 수 있는데, 세포막이 손상되면 식물체는 이를 자체 복구하기 위해 호흡률을 증가시키게 되므로 이로 인하여 순 광합성률이 감소하게 되고 결국 영양물질로 활용할 탄소 축적량이 줄어들게 되는 것이다. 또한 오존의 영향을 받은 식물체는 세포막이 손상되어  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  및 일부 황산염이 용탈될 수도 있고, 토양으로부터 물과 영양분을 흡수할 수 있는 능력이 감소하게 되므로 생장도 억제된다고 알려져 있다[19]. 또한, 외부 환경으로부터 식물체를 보호하는 역할을 하는 잎 표면의 왁스층이 피해 받음에 따라 병충해 등 2차 피해에 대한 내성이 약화한다. 오존에 대한 작물 생육 피해를 최소화하기 위해서는 저항성 품종을 재배하고 칼리질 비료는 충분히 사용하며 질소비료 과다 사용은 피해야 한다.



Fig. 4. Ozone injury symptom of soybean plant (Left, high intensity of light; Right, low intensity of light). (Source: Kim et al., 1998)

#### 축산분야에 미치는 영향

축산분야에 미치는 오존의 영향으로는 강력한 살균제 역할과 장내  $CH_4$  생성을 감소시키는 방법으로서의 오존 활용 가능성과 함께 오존 농도의 증가로 인한 목초의 질 저하가 있다. 축산의 문제점 중 하나인 악취에 있어 오존 사용은 유해한 부산물 생성이 없는 자연 친화적 살균제로써 사용할 수 있다. 또한, 가축의 음용수와 함께 사용할 경우, 성장에 도움을 주고 질병을 낮출 수 있다. 이러한 이유로 돼지 콜레라와 같은 전염병 예방을 통해 고기의 질 향상에도 도움이 된다. 또한, 오존의 강한 산화력은 이론상으로 박테리아 및 기질과 산소 간의 상호작용으로 반추동물의 장내  $CH_4$  생성을 감소시킬 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 오존 처리는 기질로 사용된 옥수수 사일리지 또는 곡물 농축물의 건조 물질 소화율(DMD)을 손상하지 않으면서 총 가스 생산을 15.4%, 특히  $CH_4$  생산을 20.4% 감소시켰다[21]. 이처럼 오존 처리는  $CH_4$  생성 물질, 특히 methanomicrobium의 상대적 풍부함을 감소시켜 반추동물의 장내  $CH_4$  생성을 감소시키는 방법으로 잠재성을 보였다. 그러나 오존 농도의 증가는 초지의 조섬유 및 리그닌 함량을 증가시킴으로써 대사 에너지 함량 측면에서 사료 품질을 감소시킬 가능성이 있다[22].

#### 기후변화에 미치는 영향

복사강제력(Radiative Forcing, RF)은 기후변화를 일으키는 인간과 자연 요인의 힘을 정량화하는 데 사용되는 개념이다. Forster와 Ramaswamy의 보고에 따르면 2005년 전 지구적 평균  $CO_2$  농도는 379 ppm였으며, RF는  $1.66 \pm 0.17 \text{ Wm}^{-2}$ 로 나타났다.  $CH_4$  농도는 1,774 ppb로  $0.48 \pm 0.05 \text{ Wm}^{-2}$ 의 RF 기여도를 보였으며,  $N_2O$ 는 319 ppb의 농도에 도달하여  $0.16 \pm 0.02 \text{ Wm}^{-2}$ 의 RF에 기여하였다. 불소 함유 교토 프로토콜 가스(perfluorocarbons, PFCs; SF<sub>6</sub>)의 RF는  $0.017 \pm 0.002 \text{ Wm}^{-2}$ 이며,  $O_3$ 의 증가에 따른 RF는  $0.35 \pm 0.15 \text{ Wm}^{-2}$ 로 추정되었다[23].

또한, 오존은 식생의 바이오매스량을 감소시킴으로써 간접적으로 기후변화에 영향을 미치고 있다. 식물 생태계는 지구의 온도를 조절하고 탄소 저장 기능을 통해 기후변화의 속도를 늦추게 함으로써 기후시스템에서 중요한 역할을 한다. UN의 보고에 따르면 지난 10년 동안에만 육상 생태계는 화석연료 연소와 같은 인간 활동으로 생성된 탄소 배출량의 약 30%를 흡수했다고 하였다. 따라서 오존은

로 인한 생태계의 영향은 이러한 기능을 약화함으로써 식생에 의한 탄소격리 효과를 낮추게 된다. 지난 세기 동안 바이오매스에 대한 오존 영향으로 인한 CO<sub>2</sub>의 간접적인 증가는 오존 자체의 변화로 인한 것보다 복사강제력에 더 많이 기여했다고 보고하였다[24].

### 오존 발생 현황 및 작물 피해 대응

지표면 오존 농도는 산업화 이전의 10 ppb 정도에서 2000년대 여름철 낮 동안에는 평균 50 ppb 정도까지 발생하고 있다. 이러한 농도 증가는 지속되어 2050년에는 현재보다 20~50%, 2100년에는 40~60% 증가할 것으로 예측하였다[25]. 우리나라도 국립환경과학원의 대기환경조사 결과에 따르면 대기 중 아황산가스 및 이산화질소 농도는 2000년 각각 0.008과 0.024 ppm을 나타낸 이후 연도별 변화율은 낮으나 장기적으로 꾸준한 감소 추세에 있으며 2021년 오염도는 0.003 ppm을 나타내었다. 반면에 오존은 지속해서 증가 추세에 있으며 2021년에는 0.031 ppm을 기록하였다. 이는 2000년 농도 0.02 ppm보다 50% 이상 증가한 결과이다[26].

**Table 1. Yearly changes of sulfur dioxide, nitrogen dioxide and ozone concentration in Korea** (unit: ppm)

Item	2000	2005	2010	2015	2020	2021
SO <sub>2</sub>	0.008	0.006	0.005	0.005	0.003	0.003
NO <sub>2</sub>	0.024	0.024	0.024	0.023	0.018	0.018
O <sub>3</sub>	0.020	0.022	0.023	0.027	0.029	0.031

(Source: Ministry of Environment (MOE), 2022)

전 지구에 걸쳐 지표면 오존 농도는 UNEP가 보고한 세계환경전망6(The Global Environmental Outlook 6, GEO-6)에 따르면 국가별 인구 가중평균 오존 농도에 있어 인도가 가장 높은 농도를 보였다[27]. 이와 아울러 2015년 지역적 오존 분포 현황을 보면, 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 오존 농도도 높은 수준임을 알 수 있다[28]. 우리나라의 경우, 대기 중 오존으로부터 국민의 건강을 보호하기 위하여 정부는 농도에 따라 오존경보제는 총 3단계로, 시간당 대기 중 오존의 농도가 0.12 ppm 이상일 때 오존주의보, 0.3 ppm 이상일 때 오존경보, 0.5 ppm 이상일 때 중대경보를 발령하고 있다. 오존 농도가 0.05 ppm에서 1일 8시간, 20일 노출 시 무의 수확량이 50% 감소하고, 0.07 ppm에서 60일 노출 시 개화가 60% 감소하며, 0.1 ppm에서 5.5시간 노출 시 담배에서 꽃가루 생산의 50%가 감소한다[29]. 우리나라 오존경보 발령 현황은 2015년 133건, 2017년 276건, 2019년 498건 그리고 2021년에는 400건이 발령되어 오존 농도 증가와 함께 증가하고 있는 것으로 나타났다[26]. 그러나 이러한 오존경보 제도는 인체 건강에 대한 우려가 목적인 관계로 작물 피해 예방을 위한 모니터링과는 성격이 다르다. 또한, 오염에 대한 측정과 오염도 알림 전광판도 대도시 중심으로 제공되고 있어 상대적으로 노약자층이 많은 농촌지역에는 이러한 서비스가 미흡한 실정이다. 작물 피해 측면에 있어 2019년 우리나라 오존 평균 농도 0.03 ppm은 수치로 보면 높아보이지 않지만, 계절 및 지역 등 다양한 요인에 따라 일시적인 농도 차이가 크고 식물에 영향을 주는 농도가 40~50 ppb 수준이라는 보고를 고려하면 오존에 의한 식량 생산 피해는 문제를 가볍게 볼 수 없다[30]. 대기오염 피해 예방을 위해서는 오염원으로부터의 배출을 규제하는 것이 가장 좋은 대책이다. SLCP의 체류기간이 짧다는 것은 이 물질들의 배출을 중단하면 몇 주에서 몇 년 내에 대기 중 농도를 줄일 수 있다는 의미이다. 2011년 UNEP와 WMO가 함께 진행한 과학적 평가에서 Fig. 5와 같이 16개의 SLCP 저감방안을 확인했다[7]. 이러한 규제 방안에는 농업 등을 포함한 1차적인 SLCP 배출 부문이 대상으로 이미 존재하고, 전 세계적으로 시행되고 있는 기술과 방안들이 포함되어 있다.

2030년까지 전 세계적으로 이러한 조치를 시행하면 단기적인 기후 보호와 대기질 개선에 상당한 효과를 얻을 수 있다. BC와 오존 배출량을 줄이는 데 성공한다면 향후 지구 기온을 평균 0.5°C(0.2~0.7°C)까지 낮출 수 있다고 예측하였다.

그러나 오존은 다른 대기오염물질들과는 달리 대기 중에서 2차적으로 반응하여 만들어진 물질이므로 이러한 규제가 어렵다. 따라서 오존의 전구물질들 배출을 규제함으로써 오존 생성을 억제하거나 환경정화수를 심어 NO<sub>x</sub>를 흡수하는 방안 등이 있다. 특히, 농업 분야에서는 작물 피해에 대한 재배 측면의 대책으로 오존 피해에 저항성인 작물이나 품종을 재배하고 상습 피해지에는 질소비료 사용량을 줄이거나 칼리비료를 증시하여 피해를 줄이는 방법 등이 알려져 있다[30].



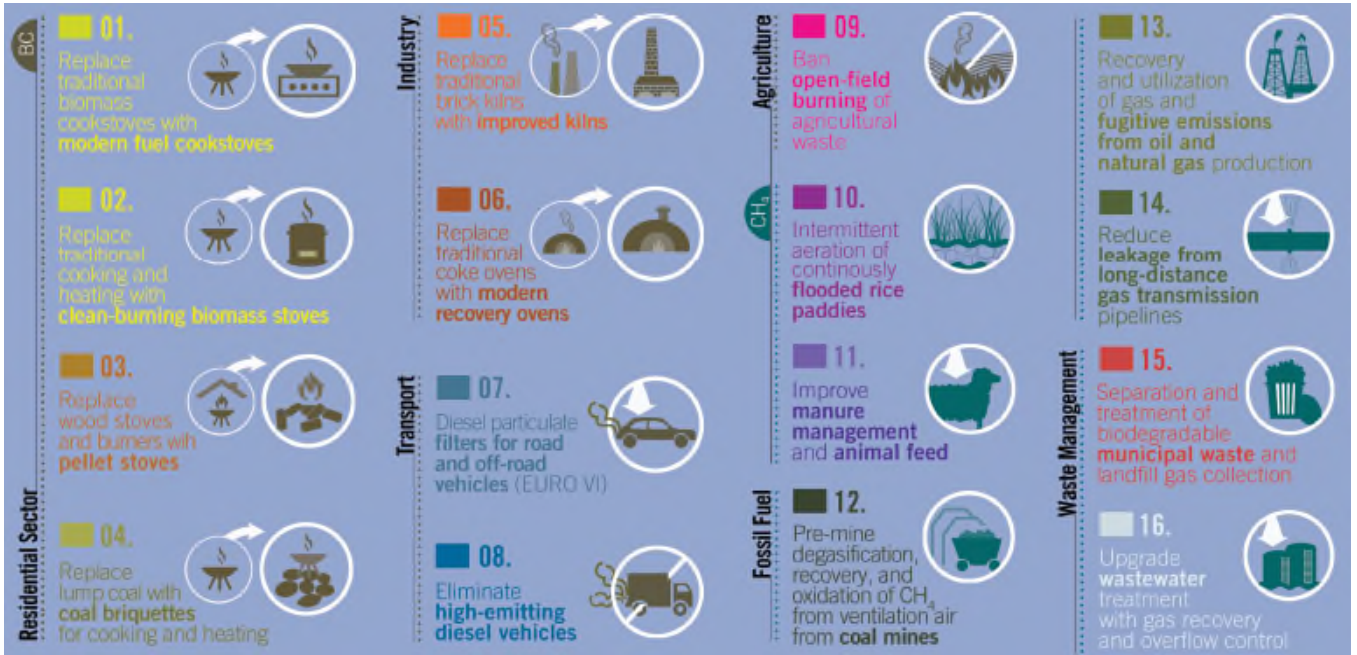


Fig. 5. Cost effective SLCP control measures. (Source: The Climate and Clean Air Coalition (CCAC), 2014)

## 결론

농업은 식량안보에 중요하며 기후변화로 인한 취약성이 큰 분야로서 기후변화 유발물질들의 특성을 고려한 대응책 마련이 중요하다. SLCP는 CO<sub>2</sub>보다 대기 중에 잔류하는 기간이 상대적으로 짧은 물질로서 대표적으로 BC, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub> 및 HFCs 등이 포함된다. 최근 국제적으로 기후변화 대응을 위한 방안으로 SLCP에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 중 BC와 오존은 인체 건강과 농업 및 생태계에 악영향을 미치고 있다. 지표면의 오존이 발생하기 쉬운 기상 조건으로는 기온과 일사량이 높고 상대습도와 풍속이 낮을 때로 알려져 있다. 이러한 조건을 고려할 때 우리나라의 기상 여건에서는 장마 이전의 초여름이 오존 발생에 취약한 시기일 것이다. SLCP로서 O<sub>3</sub>의 증가에 따른 RF는 0.35±0.15 Wm<sup>-2</sup>로 추정되었으며, 이는 N<sub>2</sub>O의 0.16±0.02 Wm<sup>-2</sup>보다 높은 값이다.

한편, 오존은 강력한 산화제로서 식물 표면에 피해를 주고 광합성을 저해함으로써 생산성을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 오존 농도는 지속해서 증가 추세에 있으며 2019년에는 0.03 ppm을 기록하였다. 이는 평균값으로 계절 및 지역 등 다양한 요인에 따라 일시적인 농도 차이가 크다는 점을 고려하면 오존에 의한 식량 생산 피해 문제를 가볍게 볼 수 없다. 특히, CH<sub>4</sub>는 전 지구적인 영향을 보이지만 지표면의 오존은 지역적 영향이 큰 특성을 가지고 있다. 따라서 우리나라 지역별 발생 현황과 대응 방안을 수립하는 것이 필요하다. 현재, 상대적으로 취약한 농촌지역 노약자의 건강 및 작물 생산성 보호를 위한 모니터링이 요구되는 이유이다.

오존으로 인한 농업분야의 피해 예방을 위해서는 모니터링과 함께 발생 저감이 필요하다. 그러나 오존은 대기 중에서 2차적으로 반응하여 만들어진 물질이므로 직접적인 규제가 어려우므로 오존 전구물질들의 관리가 요구된다. SLCP 특성상 이에 대한 저감은 짧은 시간 내에 기후 및 사회적 효과를 볼 수 있으며, 특히 지역 규모에서 그 효과가 기대된다. 따라서 오존의 오염도와 기후변화로 인한 다양한 문제들을 파악하는 것이 다가올 미래에 대한 농업 경영에 있어 중요한 역할을 할 또 하나의 요인이 될 것이다.

**Data Availability:** All data are available in the main text or in the Supplementary Information.

**Author Contributions:** J.-H.K. and J.-S.L. conceived and designed the study, wrote the first manuscript, revised the manuscript, K.-H.P. and C.-W.L. analysed the data, and C.-S.H., M.-W.K., and H.-M.L. collected and analysed related references.



**Copyright:** Figures 1, 2, 5 were written based on ‘Time to Act to reduce short-lived climate pollutants’ published by CCAC for the purpose of informing the importance of reducing SLCP in the agricultural sector, We appreciate permission to use the material for non-commercial purposes.

**Notes:** The authors declare no conflict of interest.

**Additional Information:**

**Supplementary information** The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.5338/KJEA.2024.43.03>

**Correspondence and requests for materials** should be addressed to Jong-Sik Lee.

**Peer review information** Korean Journal of Environmental Agriculture thanks the anonymous reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Reprints and permissions information** is available at <http://www.korseaj.org>

## References

1. Kim JH, Hwang ED, Lee HJ, Park JP, Ra JH (2015) Climate and Clean Air Alliance (CCAC) Discussion and Response Study, pp. 3-55, Ministry of Environment, Korea.
2. Allen M (2015) Short-Lived Promise? The Science and Policy of Cumulative and Short-Lived Climate Pollutants, p. 6, University of Oxford, Oxford, UK.
3. Lee SJ, OH DI (2015) Technology Development and Policy Trends Related to Short Lived Climate Pollutant, pp. 8-12, KISTEP Issue Paper 2015-11, Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP), Korea.
4. Walker JC (1991) Biogeochemical Cycles: Biogeochemistry. An Analysis of Global Change. William H. Schlesinger. Academic Press, San Diego, CA, 1991. xii, 443 pp., illus. Paper, \$39.95. Science, 253(5020), 686-687. <https://doi.org/10.1126/science.253.5020.686>.
5. Sitch S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C (2007) Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. Nature, 448(7155), 791-794. <https://doi.org/10.1038/nature06059>.
6. Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, Hanayama S, Janssens-Maenhout G, Fukui T, Kawashima K, Akimoto H (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(21), 11019-11058. <https://doi.org/10.5194/acp-13-11019-2013>.
7. Climate & Clean Air Coalition (CCAC) (2014) Time to Act to Reduce Short-Lived Climate Pollutants, pp. 1-46, 2nd edition, CCAC Secretariat, Paris, France.
8. Lee JS (2005) Crop damage due to ozone. Research and Extension Service, 46(3), 2-4.
9. United Nations Environmental Programme, World Meteorological Organization (WMO) (2011) Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers, p. 7, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
10. Emberson LD, Buker P, Ashmore MR, Mills G, Jackson LS, Agrawal M, Atikuzzaman MD, Cinderby S, Engardt M et al. (2009) A comparison of North American and Asian exposure? response data for ozone effects on crop yields. Atmospheric Environment, 43(12), 1945-1953. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.005>.
11. Shon ZH (2006) Photochemical analysis of ozone episodes in the metropolitan area of Seoul during the summer 2004. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(3), 361-371.
12. Lee GW, Park JH, Kim DG, Koh MS, Lee MH, Han JS, Kim JC (2020) Current status and future directions of tropospheric photochemical ozone studies in Korea. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(4), 419-441. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.419>.
13. Reilly J, Paltsev S, Felzer B, Wang X, Kicklighter D, Melillo J, Prinn R, Sarofim M, Sokolov A et al. (2007) Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone. Energy Policy, 35(11), 5370-5383. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.01.040>.
14. Amin N (2014) Effect of ozone on the relative yield of rice crop in Japan evaluated based on monitored concentrations. Water, Air, & Soil Pollution, 225, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1797-5>.
15. Tai AP, Martin MV, Heald CL (2014) Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution. Nature Climate Change, 4(9), 817-821. <https://doi.org/10.1038/nclimate2317>.
16. Avnery S, Mauzerall DL, Liu J, Horowitz LW (2011) Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage. Atmospheric Environment, 45(13), 2284-2296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.045>.
17. Mansfield TA, Pearson M (1993) Physiological Basis of Stress Imposed by Ozone Pollution, in: Fowden L, Mansfield TA, Stoddart

- J, Plant Adaptation to Environmental Stress. pp. 155-170, Chapman & Hall, London, UK.
18. Sohn JK, Lee SC (1997) Varietal difference of resistance to ozone injury in rice plant. Korean Journal of Crop Science, 42(2), 338-343.
  19. Lee JT, Sohn JK (2000) Symptom of leaf injury and varietal difference to ozone in rice and soybean plant. Korean Journal of Environmental Agriculture, 19(2), 154-159.
  20. Kim BY, Kim KS, Lee JS, Chung YK (1998) Analysis of Environmental Pollution Damage of Crops\_Illustrated book, pp. 62-65, Rural Development Administration (RDA), Korea
  21. Zhao L, Caro E, Holman DB, Gzyl KE, Moate PJ, Chaves AV (2020) Ozone decreased enteric methane production by 20% in an *in vitro* rumen fermentation system. Frontiers in Microbiology, 11, 571537. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.571537>.
  22. Hayes F, Mills G, Jones L, Abbott J, Ashmore M, Barnes J, Neil Cape J, Coyle M, Peacock S et al.(2016) Consistent ozone-induced decreases in pasture forage quality across several grassland types and consequences for UK lamb production. Science of the Total Environment, 543, 336-346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.128>.
  23. Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Bernsten T, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC et al. (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, pp. 129-234, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, New York, NY, USA.
  24. Sitch S, Cox PM, Collins WJ, Huntingford C (2007) Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. Nature, 448(7155), 791-794. <https://doi.org/10.1038/nature06059>.
  25. Feng Z, Kobayashi K (2009) Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. Atmospheric Environment, 43(8), 1510-1519. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.033>.
  26. Ministry of Environment (2022) 2021 Air Environment Yearbook, p. 27, Ministry of Environment.
  27. Ekins P, Gupta J, Boileau P (2019) Global Environment Outlook 6, p. 119, Cambridge University Press, New York, NY, USA.
  28. Health Effects Institute (2017) State of Global Air 2017. Special Report, p. 6, Health Effects Institute, Boston, MA, USA.
  29. Atmospheric Policy Division, Ministry of Environment (2001) Current Status of Ozone Pollution and Countermeasures, p. 4, Ministry of Environment, Korea.
  30. Calatayud A, Pomares F, Barreno E (2006) Interactions between nitrogen fertilization and ozone in watermelon cultivar Reina de Corazones in open-top chambers. Effects on chlorophyll  $\alpha$  fluorescence, lipid peroxidation, and yield. Photosynthetica, 44, 93-101. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0163-2>.