

논문

국내 오존의 장기변화를 활용한 WHO 계절 기준의 실효성 분석

Assessment of WHO Seasonal Ozone Standard Using Long-term Trends of Ambient Ozone in South Korea

박승명, 한진석¹⁾, 안준영, 박진수, 김대곤, 박정민, 유명수, 이강웅^{2),*}

국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과, ¹⁾안양대학교 환경에너지공학과,

²⁾한국외국어대학교 환경학과

Seung-Myung Park, Jin-Seok Han¹⁾, Jun-Young Ahn, Jin-Soo Park,
Dai-Gon Kim, Jung Min Park, Myungsoo Yoo, Gangwoong Lee^{2),*}

Climate and Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research,
Incheon, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental and Energy Engineering, Graduate School of Anyang University,
Anyang, Gyeonggi, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi, Republic of Korea

접수일 2024년 7월 31일
수정일 2024년 8월 8일
채택일 2024년 8월 8일

Received 31 July 2024
Revised 8 August 2024
Accepted 8 August 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-330-4273
E-mail : gwlee@hufs.ac.kr

Abstract This study aims to evaluate the need for an additional seasonal standard of ambient ozone in Korea's national air quality management policy, with the goal of controlling ozone concentrations and reducing human health risks. The current yearly standard in Korea, defined as the 99th percentile of the maximum daily 8-hour ozone (MDA8O3) concentrations, was analyzed and compared to the World Health Organization's (WHO) new seasonal MDA8O3 guideline. To assess the feasibility of implementing a new seasonal standard in Korea, we examined changes in ozone concentrations and nonattainment rates, focusing on regions with high ozone levels such as the Seoul metropolitan area, Chungnam, Daegu, and Gyeongnam. The analysis revealed that since the early 1990s, short-term MDA8O3 concentrations in Korea have consistently exceeded the WHO's short-term MDA8O3 standard. Seasonal MDA8O3 concentrations also began to exceed the new WHO standard around the same time. However, the current yearly standard is found to be more sensitive and stringent. Furthermore, the nonattainment rates for both the yearly and seasonal standards are similar and do not significantly differ from the new WHO seasonal standard. This suggests that the current yearly standard alone is adequate for tracking nonattainment and exceedance rates.

Key words: Air quality ozone standard, MDA8O3, WHO, Seasonal standard, Ozone management strategies

1. 서론

경계층 오존은 대기 중에서 질소산화물($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)과 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds)의 광화학적 반응에 의해 주로 형성되는 대표적인 2차 생성 대기오염물질이다(U.S. EPA, 2020). 오존은 대류권에서 일부가 광분해되어 강력한 산화제인 OH 라디칼의 생성으로 이어지며, 이는 대기로 유입되는 OH와 반응성이 있는 오염물질을 산화시켜 제거하는 대기 중 자정작용에 중요한 역할을 한다(Lee

et al., 2020; Han et al., 2013). 그러나, 오존은 인간 건강 및 동식물에 심각한 피해를 주는 대기오염물질로도 알려져 있다(Fleming et al., 2018; Silva et al., 2013). 대기 중 오존 농도가 기준치를 초과하여 단기 혹은 장기 노출될 경우 호흡기 질환 등 인체에 악영향을 미칠 수 있으며(Turner et al., 2016; Patz et al., 2005), 농작물 생산성도 감소시킬 수 있음이 잘 알려져 있다(Lee et al., 2023; Mills et al., 2018; Heagle, 1989).

이와 같은 이유로 세계보건기구(WHO)를 비롯한 대부분의 국가에서는 오존에 대한 기준을 설정하고

관리하여 대기질 개선을 위해 노력하고 있다(Kim *et al.*, 2021; WHO, 2021; European Commission, 2016; U.S. EPA, 2014). 우리나라 환경부에서도 1978년 이산화황 기준을 최초로 설정한 이후 1983년 처음으로 오존을 대기환경기준물질 항목에 추가하여 관리하고 있다(Kim *et al.*, 2023; NIER, 2023). 다른 대기환경 기준 오염물질들과 달리 오존 기준은 1993년 1차 개정 이후로 30년 동안 현행 기준을 유지하고 있다.

현재 국내 오존 대기환경기준은 하루 중 최대 8시간 평균치(MDA8O3)의 연간 99 백분위가 0.06 ppm, 1시간 평균치의 999 천분위가 0.1 ppm을 넘지 않도록 설정되어 있다. 선진국을 포함한 대부분의 국가에서는 우리보다 완화된 오존 환경기준을 설정하고 있으며 미국의 경우 8시간 평균 기준을 0.07 ppm로 설정하고 연중 4번째로 높은 날의 8시간 평균농도의 3년간 평균값을 기준으로 한다. 특히 국내의 대기환경규제지역 지정 기준과 관련된 환경부 해당 고시에서는 8시간 오존의 경우 95 퍼센타일로 정해져 있으며, 이를 적용하면 미국의 미달성 지역 지정 기준과 유사한 수준이라 판단된다. 유럽에서는 8시간 평균치 기준으로 3년에 25회 이상 0.06 ppm을 초과하면 미달성으로 정의하고 있다. 이러한 배경에서 국내 오존 기준의 개정 필요성을 제기한 연구들이 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2016).

최근 WHO는 오존의 장기 노출에 대한 대기질 기준(Air Quality Guideline, AQG)으로 계절 기준을 2021년 9월 새로 도입하였다. 국내에서도 가이드라인을 적용하기 위해서 우선적으로 4~9월로 정하기보다 연속적으로 8시간 이동평균이 가장 높은 달을 기준으로 적용이 필요하다. 특히 새롭게 도입된 기준은 오존 농도가 계절 중 가장 높은 6개월(보통 4~9월) 동안의 하루 중 8시간 평균 최고 농도를 30 ppbv(WHO의 AQG 단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0°C 1 atm 및 분자량 등 고려하여 ppbv로 환산)로 설정한 매우 엄격한 기준이다.

현재 우리나라의 오존 농도는 대도시 및 산업지역을 포함해 전국적으로 빠르게 증가하여 하루 중 8시간 평균 오존 최고 농도 기준에서 거의 모든 지역이

현행 기준을 초과하고 있다(Chang *et al.*, 2017). 국내 오존 연구는 주로 서울 등의 대도시 지역에서 고농도 오존의 생성 원인을 규명하거나 추이를 분석하고(Jeon *et al.*, 2021; Kim and Yeo, 2013), 시공간적 변화 특성을 파악하거나(Kim and Son, 2020) 장기간 추세를 분석한(Yeo and Kim, 2021) 연구들이 주를 이루고 있다. 그러나 새로운 오존 기준 적용 시 현행 오존 기준과의 차별성과 공통성을 평가하는 연구는 아직 부족하다.

따라서, 국내 오존 농도의 발생 원인 규명뿐만 아니라 체계적인 분석과 대기질 관리 및 오존 피해 저감 차원에서 오존 계절평균에 대한 종합적인 평가가 필요하다. 본 연구에서는 WHO 오존 계절 기준 적용 시 현행 기준과의 차이를 장기적인 오존 기준 미달성률 변화를 중심으로 평가하여, 오존 계절 기준의 국내 도입 타당성을 검토하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 측정 장소 및 분석 기간

본 연구에서는 환경부와 지방자치단체에서 운영하고 있는 총 12개 종류(919개소)의 대기환경측정망 중 도시대기(521개), 교외대기(27개), 국가배경농도

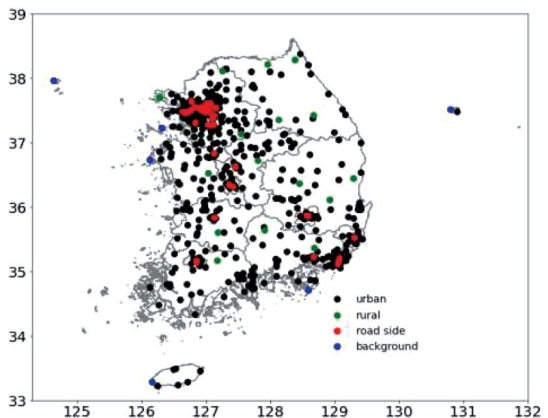


Fig. 1. Classification and distribution of air pollution monitoring network in Korea (NIER, 2023).

(46개 - 도서11개, 선박35개), 도로변대기 (56개) 측정망 자료 ('22년 12월말 기준)를 활용하여 1990년부터 2020년까지 약 30년간 측정된 시간자료를 통해 오존 농도에 대한 상세한 분석을 수행하였다(NIER, 2023). 그림 1에 전국적인 오존의 측정망 개수가 나타나 있다. 도시대기와 도로변대기 측정망은 수도권을 중심으로 공간적으로 균일하게 분포되어 있지 않으나 교외대기 측정망은 비교적 전국적으로 잘 분산되어 있으며, 국가배경농도 측정망은 해안가 주변에 위치하여 각 측정망별 지역적 농도 특성에 따라 잘 구분되었다.

2.2 자료 분석

오존의 자료는 각 측정망에서 산출되고 있는 시간별 자료를 사용하여 계절별 및 연도별로 장기 분석을 수행하였다. 일반적으로 우리나라를 비롯한 세계 주요 국가에서 오존의 기준치는 MDA8O3를 대기환경기준으로 설정하고 있으며, MDA8O3를 계산하기 위해 각 측정소에서 산출된 시간별 오존 자료에서 가능한 24개의 8시간 평균농도값 중 최대값을 사용하였고, 하루 중 시간별 오존 자료 중 25% 이상이 유효하지 않은 경우 해당 날짜의 MDA8O3는 포함하지 않았다. 하루 중 16시간 이상의 자료가 확보되더라도 낮

시간 동안의 자료가 빠지면 MDA8O3가 과소평가될 수 있다. 특히 거의 모든 장비의 교정이 오존 농도가 상대적으로 높은 낮 시간대에 이루어지기 때문이다. 본 연구에서는 이를 선별하지 않았기 때문에 MDA8O3의 농도가 과소평가될 여지가 있다. 계절별 및 연도별 MDA8O3 평균은 일별 값으로 계산하였고, 해당 날짜의 MDA8O3 자료가 75% 미만인 측정소도 제외하였다(Lee *et al.*, 2023). 또한 모든 자료의 통계 분석과 표출은 python 프로그램(ver 3.7.6)과 numpy, pandas, matplotlib, geopandas 등의 라이브러리를 사용하였다.

3. 결 과

3.1 우리나라 대기환경기준과 세계보건기구(WHO)의 변천

표 1은 WHO 및 국내 오존 환경기준의 변화를 나타낸 것이다. 대기환경기준의 개정은 관측망의 확대, 노출 평가 역량의 향상, 경제 사회적 여건 및 환경 오염에 대한 시민의 인식 변화가 복합적으로 작용한다. WHO도 1987년 처음 1시간 평균 65~100 ppbv와

Table 1. Historical Changes of Ozone air quality standard of Korea and Ozone guideline of WHO.

Update of AQG	Average time	Level (ppbv)	Interim target (ppbv)		Form
			1	2	
1983 (Korea)	1h	100			
	1y	20			
1987 (WHO)	1h	65~100	-	-	
	8h	55~60	-	-	
1993 (Korea)	1h	100			The maximum of day value
	8h	60			
2000 (WHO)	8h	60	-	-	
2005 (WHO)	8h	50	80		
2021 (WHO)	8h ^a	50	80	60	A high percentile
	Peak season ^b	30	50	35	

^a99th percentile: the exceeded number of days per calendar year with maximum hourly average concentrations above the guideline is equal to 3 to 4 days.
^bAverage of daily maximum 8h mean O₃ concentration in the six consecutive months with the highest 6 months running-average O₃ concentration

MDA8O3 55~60 ppbv 오존 기준을 마련하였고, 2000년에는 1시간 기준은 삭제하고 MDA8O3 기준을 60 ppbv로 조정된 뒤 2005년 이를 다시 50 ppbv로 강화하여 현재까지 유지하면서, 2021년 새롭게 peak season에 대한 기준인 30 ppbv를 추가하였다. 우리나라에서 오존의 경우는 일반대기오염물질과 다르게 WHO보다 먼저인 1983년 오존 기준을 처음 마련하였고, 2005년 WHO가 기준을 강화하기 전과 유사한 MDA8O3 기준을 WHO보다 7년 먼저 도입하고 이를 현재까지 유지하고 있다.

3.2 국내 MDA8O3의 장기 추세

현재 연간 99 퍼센타일에 해당하는 MDA8O3 국내 농도는 1990년 관측이 시작된 이래 꾸준히 증가하여 100 ppbv를 상회하는 수준이었으나, 최근 몇 년간은 팬데믹 효과로 인해 농도가 약간 감소한 경향을 보이고 있다(그림 2-a). 이와 유사하게 WHO에서 제시한 방법의 계절평균 MDA8O3도 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다(그림 2-b). 최근의 팬데믹 기간을 제외하면 장기 변동 양상이 상당히 유사함을 알 수 있다. 하지만 연간 기준인 99 퍼센타일 MDA8O3는 이미 1990년대 초에 WHO 기준치를 초과한 반면, 계절 기준은 1990년 중반 이후에 초과된 것으로 나타나, 국내 상황에서는 현 연간 기준이 장기 기준인 계절 기준보다 더 엄격한 것을 알 수 있다.

오존은 건강 위험에 대한 인식이 단순한 호흡기의 병리적 변화만이 아니라 질환의 이환율과 사망률 증가 및 기타 비사고성 질환으로 확대되고 있다(Xue and Zhang, 2023). 이런 이유로 2005년 개정된 WHO의 오존 기준인 MDA8O3의 연중 99 퍼센타일 값 50 ppbv의 경우 다양한 비사고 사망률 연구를 통해 5 ppbv 증가당 상대 위험치가 1.0043으로 추정되었고 이는 메타 효과 추정치를 바탕으로 하고 있다(Orellano *et al.*, 2020). 하지만 최근 Huangfu와 Atkinson (2020)은 오존을 포함한 모든 비사고성 사망률에 대한 추가적인 연구문헌들의 체계적 고찰을 통해 MDA8O3의 계절 평균의 경우, 5 ppbv 증가할 때마다 상대 위험도는 1.01이라는 상대적으로 높은 메타 효과 추정치를 보고하였다. 이에 따라 이 연구에서 인용된 하위 5% 백분위수 평균농도인 30 ppbv가 계절평균의 기준치로 2021년 새롭게 설정되었다(Pinault *et al.*, 2017). 따라서 오존의 상대위험도를 기준으로 본다면 계절평균의 농도를 줄이는 것이 이환율과 사망률을 낮추는 데 더 효과적이라 할 수 있다. 그러나 국내 계절평균이 현재 45 ppbv 정도로 WHO 계절 기준 30 ppbv의 약 70% 정도를 상회하는 것으로 나타나고 있지만, 현행 연간 MDA8O3 기준에서는 100% 넘게 초과하는 것으로 나타나 국내에서는 연간 기준의 초과율이 관리 필요성 차원에서 볼 때 더 심각한 지표임을 알 수 있다.

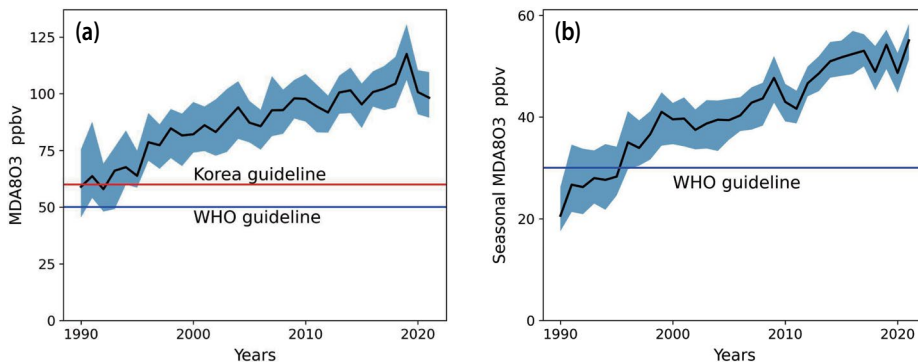


Fig. 2. Annual variations in (a) daily mean of MDA8O3 and (b) seasonal mean of MDA8O3 in Korea. The blue and red horizontal lines indicate the WHO and South Korean guideline values, respectively. The shaded areas in the plots represent the 1st and 3rd quartile values for each year. The black line represents the mean values and shows a general increasing trend over time.

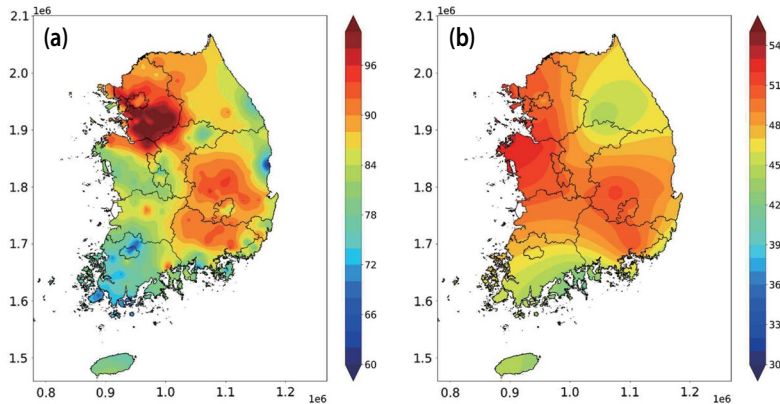


Fig. 3. Spatial distribution of 99 percentile MDA8O3 concentrations in (a) 1990 and (b) 2020 in Korea.

3.3 국내 MDA8O3의 공간적 변동

1990년에는 대부분 지역에서 MDA8O3 값이 60 ppbv 수준 이하로 나타났다(그림 3-a). 하지만 2000년 이후에는 거의 모든 지역에서 국내 및 WHO 기준을 넘는 것으로 나타났다. 이후에도 꾸준한 증가를 보여 수도권, 충남, 대구, 경남 등 오존 오염이 심각한 지역을 중심으로 최근에는 MDA8O3 농도가 100 ppbv를 넘는 상황이 지속되고 있다. 이는 WHO 기준의 거의 2배에 육박하여 국내 오존 오염의 심각성을 잘 나타내는 것으로 평가된다. 특이한 것은 지역별 농도가 상당히 크게 변화하는 것으로 보이는데 2010년까지의 경우 충청 내륙지역이 수도권지역보다 오존이 가장 높은 지역이었으나, 2020년에는 서울을 포함한 수도권과 충남 서해안이 가장 심각한 지역으로 나타나고 있다(그림 3-b). 이는 수도권 대부분의 도시지역에서 질소산화물인 NO의 감축 효과가 지난 10년간 가장 뚜렷하게 나타난 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2023). 이에 따라 오존의 농도 증가가 가장 두드러진 것으로 평가된다.

3.4 환경기준 달성도 분석

그림 4-a는 전국에서 관측된 오존 계절평균 농도와 WHO 기준에 근거한 오존 계절평균의 환경기준 미달성을 나타낸 것이다. 계절농도는 1995년부터 2000

년까지 서서히 증가하다가 2000년부터 2005년까지 거의 같은 농도 수준을 유지하였으나 2005년부터 2015년까지 가파르게 증가하였으며 2016년 이후에는 약간 정체되는 양상을 보였다. 이와 같은 최근의 오존 계절농도 정체는 이 시기부터 마련된 미세먼지 감축을 위한 집중적인 NOx 배출 감소에 따라서 오존 생성에 NOx가 제한인자로 작용하는 도시 외곽지역이나 농촌지역의 오존의 감소에 영향을 주는 것으로 추측된다(Colombi *et al.*, 2023). NOx 배출 감소는 도심지역에서는 오존의 적정효과를 억제해 순 오존 증가를 유발하지만 오존 생성이 NOx에 제한적인 도시 외 지역에서는 NOx의 감소가 오존 감소에 기여할 수 있기 때문이다. 하지만 최근의 오존 농도변화는 COVID-19에 따른 효과도 포함되어 있어서 이와 같은 오존 농도의 감소가 정책적 효과인지 아니면 배출량의 일시적 변화 효과인지 추후에 좀 더 심층적인 분석이 필요하다.

동일한 그림에서 오존 계절평균 농도 변화는 60 ppbv를 초과하는 MDA8O3 일수와 상당히 유사하게 변화하는 것을 알 수 있다(그림 4-b). 또한 같은 그림에서 WHO 오존 계절 기준 대비 미달성을 변화는 기존의 국내 MDA8O3 기준의 미달성을 변화와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 관측망 운영 초기인 1990년대부터 두 가지 환경기준에 근거한 미달성은 모두 꾸준히

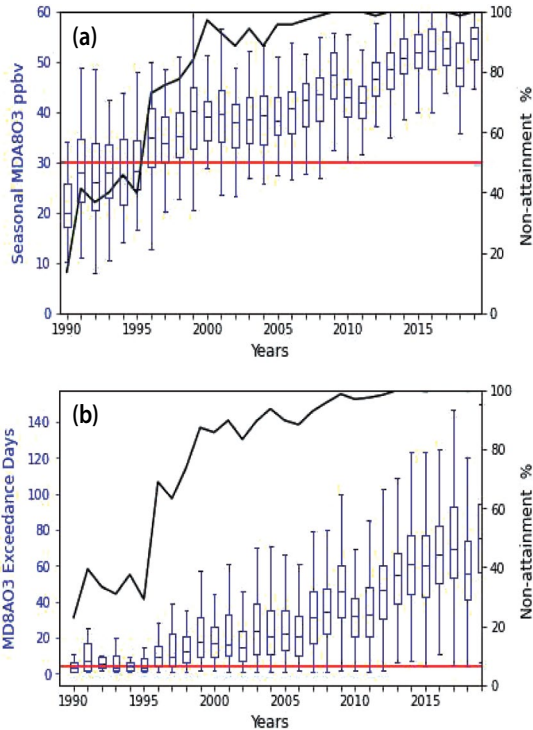


Fig. 4. Long-term trends of (a) seasonal mean ozone and (b) daily maximum 8-hour mean ozone in Korea. The red horizontal lines indicate the WHO seasonal standard of 30 ppbv (a) and the four days per year that are allowed to exceed 60 ppbv in the Korean standard (b). The box plots show the distribution of the data for each year, with the central line in each box for the median, the edges of the box for the 1st and 3rd quartiles, and the whiskers extending to 1.5 times the interquartile range. The black lines illustrate the percentage nonattainment rates on the secondary y-axis over time.

준히 증가해 2010년에는 모두 미달성률이 거의 100%에 도달하였고 이 수준이 현재까지 유지되고 있다. 오존 관리의 핵심은 기준 미달성지역의 대기질 개선효과를 평가하는 것인데 두 지표가 거의 동일한 미달성률 분포를 보여준다는 것은 새로운 계절평균이 현재 국내에서 시행하는 연간 MDA8O3 기준과 차별성이 없음을 지시한다. 결국 기준 농도의 변화 양상과 기준 초과율에서 새로운 WHO 기준은 현재 국내 오존 미달성률 상황과 농도변화 추이를 추가적으로 반영하거나 또는 반대로 완화하는 근거가 되지 못하며 기존의 기준과 거의 중복되는 수준으로 나타났다.

WHO의 새로운 오존 계절 기준을 국내 전국 오존 농도를 이용하여 장기 평가한 결과, 현행 8시간 이동평균의 하루 중 최고농도 기준인 99 퍼센타일 MDA8O3 결과와 거의 유사하게 2000년 이후 전국적으로 거의 대부분 지역에서 기준을 초과하는 양상으로 나타났다. 이와 같은 미달성률의 장기간 변화는 현재 운영 중인 국내 환경기준인 연간 99퍼센타일 MDA8O3와 매우 유사한 형태를 보여 추가적인 환경 기준으로 고려할 시 활용할 수 있는 정책적 수단으로 유의성은 크지 않은 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 국내 오존 기준을 국제 및 국내 가이드라인과 비교하여 평가하였다. 일차적으로 WHO와 국내의 오존 대기질 기준이 관측망 확대, 노출 평가 역량 향상, 경제적 및 사회적 여건, 환경 오염에 대한 시민 인식 변화 등의 복합적인 요인으로 어떻게 변화해 왔는지를 살펴보았다. WHO는 1987년에 처음으로 오존 기준을 설정한 이후 선도적으로 여러 차례 개정하였으며, 최근 2021년에는 새로운 계절 기준을 도입했다. 반면, 한국은 1983년에 오존 기준을 처음 마련하였고, 2005년에 WHO가 기준을 강화하기 전과 유사한 수준의 MDA8O3 이미 도입하여 현재까지 유지하고 있다.

국내의 연간 기준 MDA8O3 99 퍼센타일 전국 평균농도는 1990년대 초부터 WHO 기준을 초과했으며, 최근 몇 년간 팬데믹의 영향으로 농도가 일시적으로 감소했지만, 장기적으로는 증가 추세를 보이고 있다. 계절평균 농도도 기준 초과시점이 약간 늦어지는 경향이 있었으나 유사한 증가 추세를 보였다. 또한 현재 계절평균이 45 ppbv 정도로 계절 기준 30 ppbv의 약 70% 정도를 상회하는 것으로 나타나고 있지만, 현행 연간 MDA8O3 기준에서는 100% 넘게 초과하는 것으로 나타나 연간 기준에서 농도 초과율이 더 심각한 상황임을 알 수 있다. 이러한 결과는 현행

국내 연간 MDA8O3 기준이 새로운 계절 기준보다 더 민감하게 작동되고 있음을 시사한다. 오존 농도의 연간 및 계절 평균에 대한 미달성률 분석은 두 기준이 유사한 변동 양상을 보이며, WHO의 새로운 계절 기준이 국내 연간 기준과 큰 차이가 없음을 확인시켜 주었다. 또한 미국이나 WHO처럼 건강 영향 평가 등을 통해 그 수치를 정하는 방법을 제시하고, 환경기준 달성 여부를 판단하고, 지속적인 코호트 연구를 수행하여 그 수치를 변경하는 ‘시스템’ 자체에 대한 도입과 국내화가 필요한 시점이라고 판단된다. 따라서, 현재 적용 중인 국내 오존 환경기준은 오존의 기준 초과를 추적하고 평가하는 데 충분히 유효하기 때문에 추가적인 환경기준 설정의 필요성은 낮은 것으로 판단되었다.

하지만, 본 연구의 분석 시기가 최근 몇 년간 오존 농도 변화의 중요한 변화 원인으로 추정되는 COVID-19의 영향도 포함되기 때문에, 이를 고려한 좀 더 장기적인 추가 심층 분석이 필요하다. 이를 통해서 정책적 조치와 기상 변화의 영향을 구분하고, 효과적인 오존 관리 방안을 도출하는 데 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원(NIER-2024-01-01-005)과 한국연구재단(NRF-2022R1A2C2010179)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Chang, K.L., Petropavlovskikh, I., Cooper, O.R., Schultz, M.G., Wang, T. (2017) Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring networks in eastern North America, Europe and East Asia, *Elementa*, 5, 1-22. <https://doi.org/10.1525/elementa.243>
- Colombi, N.K., Jacob, D.J., Yang, L.H., Zhai, S., Shah, V., Grange, S.K., Yantoska, R.M., Kim, S., Liao, H. (2023) Why is ozone in South Lorea and the Seoul metropolitan area so high and increasing?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 4031-4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
- European Commission (EC) (2016) <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed on Aug. 18, 2016).
- Fleming, Z.L., Doherty, R.M., Von Schneidemeser, E., Malley, C.S., Cooper, O.R., Pinto, J.P., Colette, A., Xu, X., Simpson, D., Schultz, M.G., Lefohn, A.S., Hamad, S., Moolla, R., Solberg, S., Feng, Z. (2018) Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day ozone distribution and trends relevant to human health, *Elementa*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.273>
- Han, J.-H., Kim, H.-Y., Lee, M.-H., Kim, S.-Y., Kim, S.-W. (2013) Photochemical Air Pollution of Seoul in the Last Three Decades, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, 390-406. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.390>
- Heagle, A.S. (1989) Ozone and crop yield., *Annual Review of Phytopathology*, 27, 397-423. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.27.090189.002145>
- Huangfu, P., Atkinson, R. (2020) Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis, *Environment International*, 144, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>
- Jeon, S.-H., Chae, C.-B., Park, J.-E., Young, S.-W. (2021) Analysis of ozone secondary pollution integrated management in Seoul due to emissions reduction during heat wave episodes, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 612-625. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.4.612>
- Kim, D.-H., Son, Y.-S. (2020) Spatial-temporal variations in air pollution in busan metropolitan city (2020-2018), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 309-328. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.309>
- Kim, J.-H., Lee, J.-M., Han, J.-S., Choi, J.-S., Kim, D.-G., Park, J.-S., Lee, G.-W. (2021) Long-term Assessment of Ozone Nonattainment Changes in South Korea Compared to US, and EU Ozone Guidelines, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(4), 24-32. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.098>
- Kim, K.-C., Lee, C.-S., Choi, D.-Y., Joo, H.-S., Hong, Y.-D., Kim, S.-T., Lee, G.W, Park, J.S., Park, J-M., Han, J.-S. (2023) Historical Changes of Air Quality Standards and Air Pollution of Korea, and Challenges for Their Improvements, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(5), 807-829. <https://doi.org/10.5572/>

- kosae.2023.39.5.807
- Kim, Y.-P., Yeo, M.-J. (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 369-377. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.369>
- Lee, G., Park, J.-H., Kim, D.-G., Koh, M.S., Lee, M., Han, J.-S., Kim, J.-C. (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>
- Lee, J.M., Han, J.-S., Park, J.S., Ahn, J.-Y., Lee, G.W. (2023) Long-term changes of rice yield loss estimated with AOT40 and M7 metrics using comprehensive ozone and rice cultivation data over South Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17, 21. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00021-w>
- Mills, G., Pleijel, H., Malley, C.S., Sinha, B., Cooper, O.R., Schultz, M.G., Neufeld, H.S., Simpson, D., Sharps, K., Feng, Z., Gerosa, G., Harmens, H., Kobayashi, K., Saxena, P., Paoletti, E., Sinha, V., Xu, X. (2018) Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day tropospheric ozone distribution and trends relevant to vegetation, *Elementa-Science of the Anthropocene*, 6. <https://doi.org/10.1525/elementa.302>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual Report of Air Quality in Korea 2022, NIER-GP2023-046.
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., Ciapponi, A. (2020) Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: systematic review and meta-analysis, *Environment International*, 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- Park, M.-B., Lee, T.-J., Lee, E.-S., Kim, D.-S. (2016) A Comparative Study on the Ambient Air Quality Standard Strength among Korea, the U.S.A. and the EU, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 559-574. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.6.559>
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., Foley J.A. (2005) Impact of regional climate change on human health, *Nature*, 438(7066), 310-317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>
- Pinault, L.L., Weichenthal, S., Crouse, D.L., Brauer, M., Erickson, A., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Hystad, P., Chen, H., Finès, P., Brook, J.R., Tjepkema, M., Burnett, R.T. (2017) Associations between fine particulate matter and mortality in the 2001 Canadian census health and environment cohort, *Environmental Research*, 159, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.037>
- Silva, R.A., West, J.J., Zhang, Y., Anenberg, S.C., Lamarque, J.-F., Shindell, D.T., Collins, W.J., Dalsoren, S., Faluvegi, G., Folberth, G., Horowitz, L.W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S., Skeie, R., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., Doherty, R.M., Eyring, V., Josse, B., MacKenzie, I.A., Plummer, D., Righi, M., Stevenson, D.S., Strode, S., Szopa, S., Zeng, G. (2013) Global Premature Mortality due to Anthropogenic Outdoor Air Pollution and the Contribution of Past Climate Change, *Environmental Research Letters*, 8(3), 034005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034005>
- Turner, M.C., Jerrett, M., Arden Pope III, C., Krewski, D., Gapstur, S.M., Ryan Diver, W., Beckerman, B.S., Marshall, J.D., Crouse, D.L., Burnett, R.T. (2016) Long-Term Ozone Exposure and Mortality in a Large Prospective Study, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 193(10), 1134-1142. <https://doi.org/10.1164/rccm.201508-1633OC>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2014) Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standard. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-qualitystandards> (accessed 10.6.17).
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2020) Integrated science assessment for ozone and related photochemical oxidants. EPA/600/R-20/012.
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- Xue, K., Zhang, X. (2023) The rationales of ambient ozone guidelines and standards updates, *Frontiers in Public Health*, 11, 1273826. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1273826>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2021) Long-term trends of surface ozone in Korea, *Journal of Cleaner Production*, 294, 125352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125352>

Authors Information

박승명 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 전문위원)
(psm5555@korea.kr)

한진석 (안양대학교 환경에너지공학과 교수)
(nierhan@hanmail.net)

안준영 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관)
(nierair@korea.kr)

박진수 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관)
(airchemi@korea.kr)

김대곤 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 연구관)
(nierkdg@korea.kr)

박정민 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 과장)
(ilikepaul@korea.kr)

유명수 (국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 부장)
(winmsy@korea.kr)

이강웅 (한국외국어대학교 환경학과 교수)
(gwlee@hufs.ac.kr)