

논문

# 오존존데 관측을 활용한 2021~2022년 여름철 안면도 대류권 오존 분석

## The Analysis of Summertime Tropospheric Ozone at Anmyeon Using Ozonesonde Measurements in 2021~2022

구자호, 김주완<sup>1)\*</sup>, 이동희, 이나현, 이다영<sup>2)</sup>, 박민주, 이소정, 김상준, 강현규<sup>1)</sup>, 김형규<sup>1)</sup>, 박진수<sup>2)</sup>, 이원진<sup>2)</sup>

연세대학교 대기과학과, <sup>1)</sup>공주대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>국립환경과학원 기후대기연구부

Ja-Ho Koo, Joowan Kim<sup>1)\*</sup>, Donghee Lee, Nahyun Lee, Dayeong Lee<sup>2)</sup>, Minju Park, So-Jeong Lee, Sang Jun Kim, Hyungyu Kang<sup>1)</sup>, Hyeong-Gyu Kim<sup>1)</sup>, Jinsoo Park<sup>2)</sup>, Won-Jin Lee<sup>2)</sup>

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Republic of Korea

<sup>2)</sup>National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Republic of Korea

접수일 2024년 5월 27일  
수정일 2024년 6월 2일  
채택일 2024년 6월 7일

Received 27 May 2024  
Revised 2 June 2024  
Accepted 7 June 2024

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-850-8528

E-mail : joowan.k@gmail.com

**Abstract** This study shows the analysis result of ozonesonde measurements at Anmyeon (located at western coast in the Korean peninsula) during August 2021 and 2022. Using total 56 measurement profiles, we find that the stratospheric ozone intrusion to the troposphere is quite strong in August 2021, but weak in August 2022. Interestingly, surface ozone at Anmyeon is higher in August 2021. Correlation analyses indicate that the variation of ozone near the tropopause is rather associated with that in the free troposphere, even at 3 km height, but the variation of ozone at the surface is usually limited in the boundary layer. Also, ozone tropopause height in 2021 is lower than that in August 2022. Considering all these results together, we would suggest that the stratospheric ozone intrusion to the troposphere can relate to the enhancement of near-surface ozone in the Korean peninsula. Although this finding is only based on 2-year measurements in summer, and the relationship between surface and free-tropospheric ozone mixing ratio in whole South Korea is not clear at the present moment, the possible influence of stratospheric ozone intrusion should be further examined for better understanding the high surface ozone and its increasing trend in the Korean peninsula.

**Key words:** Ozone, Ozonesonde, Ozone vertical profile, Anmyeon

### 1. 서론

한반도 지표 대기의 오존농도는 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다(Yeo and Kim, 2021). 이 지표 오존 증가 경향은 지역과 계절에 상관없이 일관성 있게 나타나고 있다는 점에서(Lee et al., 2022) 그 심각성이 잘 드러나고 있다. 동시에 한반도의 높은 오존 농도는 지표 부근 대기경계층에 국한되지 않고 자유 대류권(free troposphere)에서도 확인되고 있는데 2016년 한-

미 공동 대기질 조사 캠페인 결과 한반도 상공 약 4 km 고도에서도 75~80 ppb 수준의 오존량이 확인되어(Crawford et al., 2021) 전 세계 오존 연구자들의 관심을 크게 받고 있는 상황이다. 성층권의 오존은 강한 자외선 흡수 특성으로 인해 우주에서부터 유입되는 유해 자외선이 지표에 도달하는 것을 막아주는 역할을 하기에 보존되어야 할 대상이지만 대류권에서는 오존 자체가 가진 높은 반응성에 의해 인간의 건강 및 작물의 작황 등에 악영향이 가해질 수 있는 만큼 최대

한 그 농도를 낮추어야 한다. 그러므로 최근 관측을 통해 확인되는 한반도 대류권의 높은 오존량과 지속적인 증가추세는 시급하게 해결해야 할 문제로 떠오르고 있다.

문제는 왜 한반도 대류권에서 이렇게 높은 오존 농도가 나타나는지, 그리고 왜 지속적인 증가추세를 가지는지에 대해서 아직 원인을 명쾌하게 이해하지 못하고 있다는 점이다. 특히 최근의 모델링 실험에 따르면 한반도, 동아시아 지역의 인위적인 배출량을 전혀 고려하지 않은 경우에도 약 50~60 ppb 수준의 높은 오존의 배경농도가 확인된다는 점에서 (Colombi *et al.*, 2023), 심지어 배출량을 고려할 경우 오히려 오존의 농도가 감소하는 실험 결과도 일부 계절에 나타나고 있다는 점에서 (Lee and Park, 2022) 이 문제의 어려움이 확인된다. 관련해서 최근 여러 가능한 원인에 대한 연구 결과들이 제시되고 있는데, 대기화학 이론적인 관점에서 최근 한반도, 동아시아 지역의 미세먼지 농도 감소에 따라 HOx 라디칼이 입자상으로 흡수(uptaking)되는 정도가 약해지면서 대기 산화력이 증가하여 오존 농도 증가에 기여한다는 연구 결과 (Gaudel 2022), 최근 동아시아 지역의 질산염 농도 증가 특성 (Bae *et al.*, 2021)과 연계하여 질산염의 광화학 과정에서 생성되는 HONO에 의해 동아시아 대류권 오존 증가를 어느 정도 설명할 수 있다는 연구 결과 (Shah *et al.*, 2024) 등을 대표적으로 꼽을 수가 있다. 다만 이런 연구 결과들은 아직 가설의 영역에서 다루어지고 있으며 모델링 결과 중심으로 설명되고 있기 때문에 좀 더 많은 검증을 거칠 필요가 있다.

대류권 오존의 고농도를 설명할 수 있는 또 하나의 가능한 영향 인자로서 성층권 오존의 하층 유입을 꼽을 수 있다. 이론적으로도 대류권 오존의 지배적인 기원을 성층권 오존의 하층 수송에 두고 있는데다, 최근 일부 연구 결과들 역시 성층권 오존이 대류권으로 내려오는 과정을 통해 한반도, 동아시아 지역 오존의 고농도를 설명하고 있기도 하다 (Neu *et al.*, 2014). 심지어 태풍이 지나가는 과정에서 강한 연직 대류가 성층권 오존의 대류권 유입에 영향을 주어 그에 따라 여름

철 대류권 오존의 고농도가 발견될 수 있다는 새로운 관점들이 모델링을 넘어 관측 자료를 근거로 하여 제시되는 상황이다 (Chen *et al.*, 2021). 다만 이런 논리들이 정량적인 변화량을 정확하게 표현하는지, 장기적으로 유의미한 추세가 있음을 설명할 수 있는지 등 여러 측면에서 역시 모호한 부분들이 많이 있어 아직은 좀 더 깊은 연구를 바탕으로 다각도의 검증을 필요로 하고 있다. 하지만 관측을 통한 분석 결과가 제시되고 있는 만큼, 한반도 대류권 오존 문제 이해를 위해 오존존데 관측을 이용하여 성층권 오존의 대류권 유입 여부를 살펴보는 연구를 수행할 이유와 필요성은 매우 충분해 보인다.

이에 본 연구는 2021년과 2022년 여름에 있었던 오존존데 관측 수행 결과를 중심으로 한반도 오존 연직 분포 특성이 지표 오존 변동성과 어떤 관계를 가지는지 살펴보았다. 국내에서는 1995년부터 포항기상대에서 오존존데의 상시관측이 이루어져 왔지만 (Kim *et al.*, 2001) 서해안 지역에서는 경년 변동을 살펴볼 수 있을 정도의 오존존데 관측이 2020년까지 이루어진 바가 없다. 즉, 본 연구는 발전소 및 산업 공단에서의 대기 오염 배출 영향과 중국발 대기 오염 물질의 월경성 수송의 영향력 아래에 있는 서해안 지표 오존과 그 상층의 오존 패턴의 관계를 경년 변동 관점에서 살펴보는 새로운 시각을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 앞서 언급한 한반도 지역 오존의 고농도 현상 및 증가 추이를 이해하는 데도 여러모로 유의미한 참고자료가 될 수 있을 것이다.

## 2. 관측 정보 및 방법

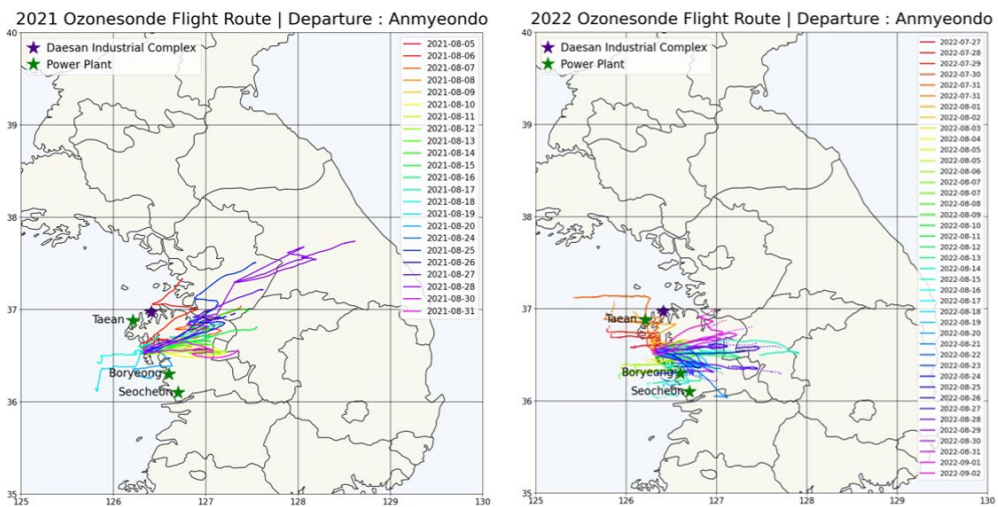
본 연구팀이 수행하는 오존 존데 관측은 WMO (World Meteorological Organization)의 GAW (Global Atmospheric Watch)에 등록된 오존 관측 네트워크에서 주로 활용하는 ECC (Electrochemical Concentration Cell) 기기를 (Komhyr, 1969) 이용하여 진행되었다. ECC 기기를 활용한 오존존데 관측의 세부 준비

과정들에 대해서는 이미 Ryu *et al.* (2022)에서 상세하게 설명한 바 있다. Ryu *et al.* (2022)은 2021년 가을에 수행된 GMAP (The GEMS Map of Air Pollution) 2021 캠페인의 일환으로 용인에서 오존존데 관측을 수행한 내용을 다룬 기술노트(technical note)로서 오존존데 관측을 수행하기 위한 전반의 절차를 매우 자세하게 제시하고 있다. 본 연구 논문이 다루고자 하는 2021년 및 2022년 안면도에서 수행된 오존존데 관측 역시 같은 방법으로 수행되었기 때문에 이 연구의 관측 절차에 대한 세부 설명은 Ryu *et al.* (2022) 연구를 인용하는 것으로 대체하고자 한다. 간략히 요약하면, 전체적인 세부 핵심 과정은 WMO의 ASOPOS (Assessment of Standard Operating Procedures for OzoneSonde, GAW Report #201)에서 제시되는 사항들에 (Smit *et al.*, 2007) 맞추어 준비된다. 그중 오존존데 비양을 위한 사전 준비 절차 3단계를 문제 없이 수행하는 것이 관측에 있어 가장 중요한 부분이며 비양일로부터 약 10~14일 전의 초기화 준비 과정 (initial preparation), 3~7일 전의 중간 준비 과정 (mid preparation), 비양 당일 수행되는 최종 준비 과정 (final preparation)으로 구성된다. 이 모든 절차에 문제가 없다고 판단될 시 오존존데 비양을 시도하게 된다.

본 연구에 활용한 오존존데 관측 자료는 2021년과 2022년 여름(주로 8월) 안면도에서 수행한 모든 오존존데 관측 실험 중 자료 품질 검사 과정에서 이상이 없다고 판단된 경우만 선정한 것으로 2021년 여름에 23회, 2022년 여름에 총 33회, 총 56회의 오존 연직 분포 자료를 활용하여 분석이 수행되었다. 한반도 서해안에서 이렇게 밀도 높은 오존 연직 분포 관측이 집중적으로 이루어진 전례가 없었기에 본 자료는 상당히 귀한 가치를 지니며 2022년 여름철(주로 8월) 중심으로 국내 최초 고고도 항공기 기반 대류권 상층 & 성층권 하층(Upper Troposphere & Lower Stratosphere, 이하 UTLS) 대기 조성을 측정한 미국 연구팀의 항공관측 캠페인 ACCLIP (Asian Summer Monsoon Chemical and Climate Impact Project)의 협업으로 진행되었기에 (Pan *et al.*, 2024) 국제 공동 연구라는 측면에서도 큰 의미를 가진다.

### 3. 결과 및 분석

2021년과 2022년에 관측한 모든 오존존데의 이동 경로를 그림 1에 나타내었다. 보통 오존존데는 고도



**Fig. 1.** Trajectories of launched ozonesonde balloons in August 2021 (left) and 2022 (right). Different colors indicate each launching date.

가 약 30 km까지 상승한 이후 풍선이 터지면서 하강하게 된다. 상승하는 동안 편서풍의 영향을 받아 조금씩 동쪽으로 이동하게 되지만 겨울에 비해 여름에는 일반적으로 풍속이 강하지 않기 때문에 (Koo *et al.*, 2007) 대다수의 경우 충청남도 범위 내에서 관측을 수행하게 되며 일부 경우는 충청북도, 경기도, 심지어 강원도까지 이동하여 낙하하게 된다. 2021년과 2022년 여름철의 오존존데 관측 경로는 전반적으로 비슷하게 나타나는 편이나 2021년의 경우 좀 더 동쪽으로 많이 이동하는 것을 확인할 수 있는데 이는 상층에서 좀 더 대기가 역동성을 가지고 있음을 의미한다.

측정한 모든 오존존데 자료를 이용하여 오존 및 기온의 연직 분포가 어떻게 나타나는지를 비교해 보았다(그림 2). 기온의 경우 지표에서 약 15 km 고도까지 거의 큰 변화 없이 약 1 km당 6 K 정도의 기온감소를 일정하게 보이면서 감소하는 것을 보여준다. 이 기온감소는 약 16~17 km 고도까지 유지되다가 그 이상 고도가 높아짐에 따라 반대로 증가하는 경향을 보여주는 것으로 보아 16~17 km 고도를 경계로 대류권과 성층권이 구분되는 것을, 즉 대류권계면이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 대류권계면 고도의 경우 추정하는 방법론과 활용하는 자료의 연직해상도에 따라 추정값 사이의 차이가 크게 나타날 수 있지만 (Lee, 2008), 전반적인 기온의 연직 분포가 보여주는 일관성을 바탕

으로 이 16~17 km 고도를 이 지역의 여름철(8월) 평균 대류권계면 높이로 간주할 수 있다. 특별히 2021년과 2022년의 차이가 크게 발견되지는 않지만 대류권계면 인근에서는 2021년에 비해 2022년의 기온이 수 K 정도 더 낮아지는 것이 확인된다. 즉 2022년에 상대적으로 대류권과 성층권의 구분이 좀 더 분명하게 나뉘어지는 경향이 있다고 해석할 수 있다.

오존 혼합비의 경우 대류권에서는 수십 ppb에서 100 ppb 영역 내에서 변화를 가지는데 각 오존존데 관측마다 다소 차이는 있지만 지표에서 대류권계면 고도까지 점진적으로 증가하는 특징이 확인된다. 이는 대류권 오존의 가장 기본적인 기원은 성층권 오존의 유입이라는 이론적 배경을 잘 보여준다 (Neu *et al.*, 2014). 대류권계면 이상으로 고도가 높아지면 급격하게 오존 혼합비가 지수함수적으로 증가하여 약 25~30 km에서 가장 최고 수치를 나타내는데 이는 전형적인 성층권 오존층 특성을 가리킨다. 대류권에서 오존 혼합비의 차이를 2021년과 2022년으로 구분해 보면 모든 고도에서 2021년의 관측값이 수 ppb 정도 높게 나타남을 볼 수 있다. 현재까지의 기본적인 관측 자료의 특징을 모아보면 2021년 여름은 2022년 여름에 비해 상층 대기의 바람이 좀 더 강하게 발생할 정도로 대기의 역동성이 좀 더 존재하였고, 대류권과 성층권의 구분이 상대적으로 덜 두드러졌으며, 대류권의 오존이

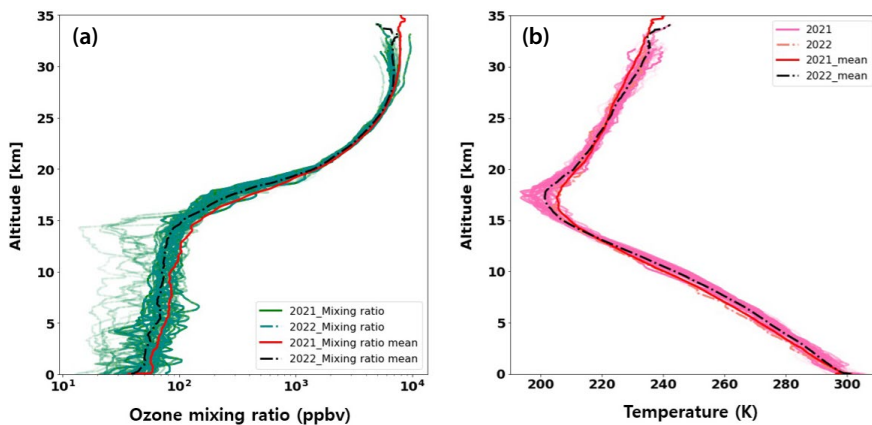


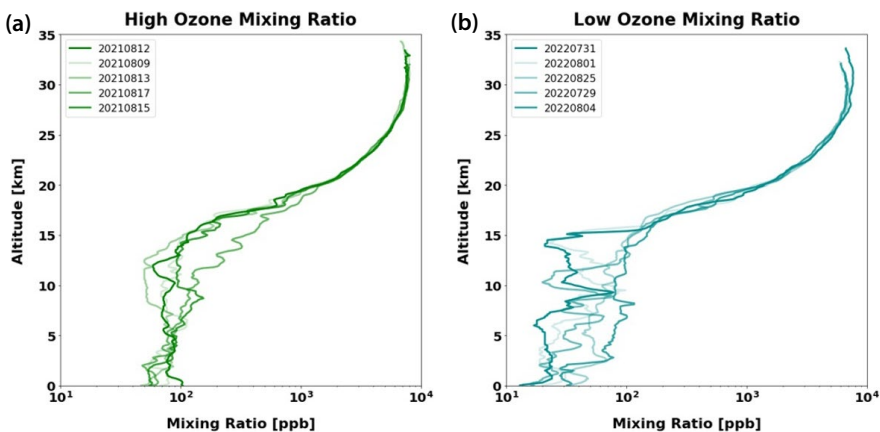
Fig. 2. All vertical ozone (a) and temperature (b) profiles measured in August 2021 (solid line) and 2022 (dotted line).

좀 더 높게 나타나는 특징이 있었다고 추정해 볼 수 있다.

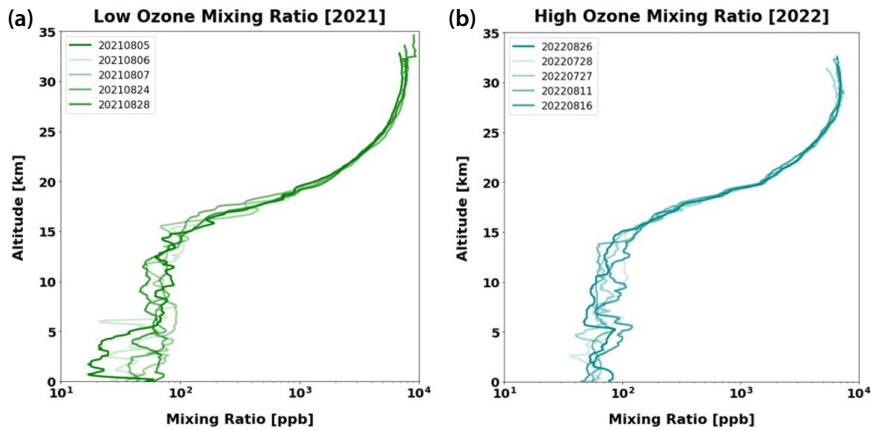
이렇게 확인된 2021년과 2022년 여름의 차이점이 환경부 지표 관측망에서 측정되는 지표 오존의 특성과 어떤 관련성이 있는지를 좀 더 상세하게 살펴보고자 한다. 환경부 에어코리아 (<https://www.airkorea.or.kr/>) 시스템에서 제공하는 안면도 지역 지표 오존 관측 자료를 이용하여 2021년과 2022년 여름에 오존존데 관측을 수행한 총 기간 중 안면도 지표 오존 혼합비가 가장 높게 나타난 5일과 가장 낮게 나타난 5일을 선정하여 가장 극단적으로 반대되는 상황을 대조하여 살펴보았다. 흥미롭게도, 지표 오존 혼합비가 가장 높게 나타난 5일은 모두 2021년에(2021년 8월 9일, 12일, 13일, 15일, 17일), 가장 낮게 나타난 5일은 모두 2022년의 사례인 것으로(2022년 7월 29일, 31일, 8월 1일, 4일, 25일) 나타났다. 오존 농도가 가장 높았던 5일간 평균 오존 혼합비는 51.8 ppb였고 가장 낮았던 5일간 평균 오존 혼합비는 34.8 ppb로서 18 ppb라는 작지 않은 차이를 보였다. 앞서 2021년 여름의 대류권 오존이 2022년보다 높았다는 사실을 감안하면 대류권 상층(대기 경계층 위 자유 대류권)에서의 오존 혼합비와 지표 오존 혼합비 크기 사이에 어떤 연관성이 있다고 볼 여지가 존재한다.

이에 각 선정된 5일에 대한 오존 혼합비의 연직 프로파일을 묶어 서로 비교해 보았다(그림 3). 비교 결과 두 연직 분포의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있는데, 지표 오존 혼합비가 높았던 경우에 비해 낮게 나타나는 경우에 앞서 언급한 성층권과 대류권의 경계(대류권계면)가 되는 약 16~17 km 위아래 범위에서 오존 혼합비 농도 변화가 훨씬 더 급격하게 나타나는 것이 확인된다. 구체적으로 지표 오존이 높았던 경우 대류권 아래 자유대류권에서도 오존 혼합비가 대부분 50 ppb 이상 나타나고 있었지만 지표 오존이 낮은 경우는 반대로 대부분의 경우 대류권계면 아래에서 오존 혼합비가 50 ppb 이하로 급격하게 낮아짐이 확인되었다. 대류권에서는 지표와 대류권계면 바로 하층의 오존 혼합비 값의 크기가 급격하게 나타나지 않는 특징이 나타남을 감안하면, 성층권과 대류권의 공기가 서로 잘 섞이지 않고 뚜렷하게 분리되어 있을 때 높은 오존 혼합비를 보이는 성층권 공기가 대류권에 영향을 크게 주지 못하는 것이 지표 오존 혼합비의 낮은 값의 원인이 될 수 있다는 식으로 설명이 가능할 것으로 보인다.

이와 같이 지표 오존 혼합비가 가장 높고 낮았던 5일을 선정해서 비교하여 얻은 결과는 실제 상황에서 유의미하게 나타나는 특징을 반영하는 것이 아닌 그



**Fig. 3.** Vertical ozone profiles of 5 days for highest (a) and lowest (b) daily surface ozone mixing ratio among all ozonesonde measurement days in August 2021 and 2022.

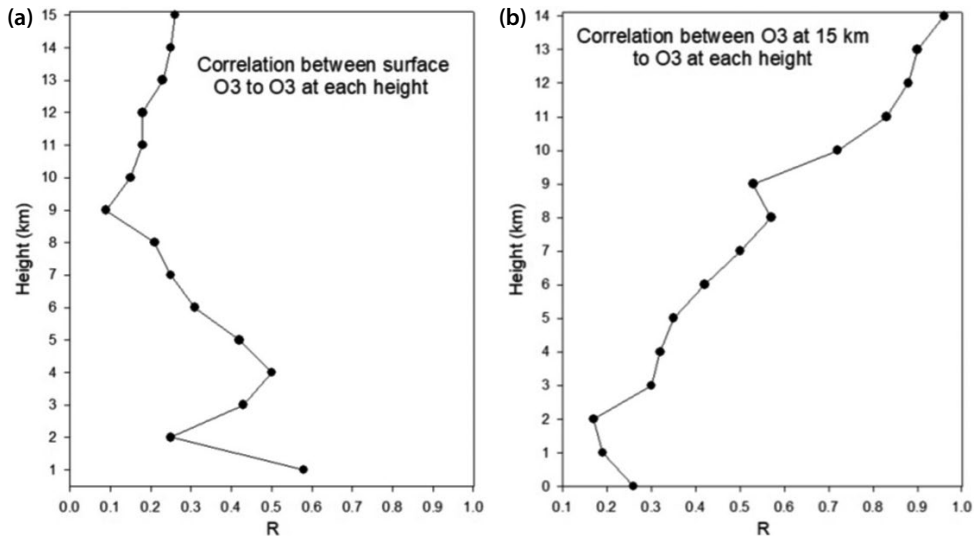


**Fig. 4.** (a) Vertical ozone profiles of 5 days showing lowest surface ozone mixing ratio among all ozonesonde measurement days in August 2021. (b) Vertical ozone profiles of 5 days showing highest surface ozone mixing ratio among all ozonesonde measurement days in August 2022.

저 우연히 나타난 특징일 가능성도 배제할 수 없다. 이에 같은 방식의 비교를 2021년과 2022년 각각 별도로 나누어 수행해 보았다. 먼저 2021년에 관측이 이루어진 총 23일 중 상대적으로 가장 지표 오존 혼합비가 낮게 나타난 5일에 대해서(2021년 8월 5일, 6일, 7일, 24일, 28일) 연직 분포를 모아서 살펴보면(그림 4a) 지표 오존이 높았던 5일에 대비하여(그림 3a) 대류권 계면 아래 및 지표에서 오존 혼합비가 크게 떨어지는 부분이 확인된다. 같은 방법으로 2022년에 측정이 수행된 기간 중 오존 혼합비가 높게 나타난 5일에 대해서(2022년 7월 27일, 28일, 8월 11일, 16일, 26일) 같은 방법으로 오존 연직 분포를 모아서 비교해 보면(그림 4b) 지표 오존이 낮았던 사례에 비해(그림 3b) 대류권 전 범위에서 오존 혼합비가 뚜렷하게 높아지는 현상이 잘 확인된다. 이를 통해 지표 오존 혼합비가 가장 높고 낮게 나타나는 사례를 기준으로 오존 연직 분포를 대조해 보았을 때 나타나는 차이점은 어느 정도 실제 현상을 반영하는 것으로 생각해 볼 수 있다.

지금까지의 분석 결과를 조금 더 정량적으로 살펴보고자 지표 오존과 상층 고도별 오존과의 상관성 및 대류권계면 인근의 오존과 하층 고도별 오존과의 상관성을 비교해 보았다. 이 상관성 분석은 1 km 간격으

로 살펴보았으며 어떤 고도  $X$  km의 오존 혼합비는  $X-0.5$  km에서  $X+0.5$  km 고도 범위에서 오존존데가 측정한 모든 오존 혼합비의 평균값으로 정의하였다. 먼저 지표 오존이 각 고도별 오존량과 갖는 선형 상관 계수( $R$ ) 값의 연직 분포를 살펴보면(그림 5a) 1 km 상공의 오존과의 상관관계가 가장 높게 나타남에도 상관관계수가 0.6을 넘지 않는다.  $R=0.3$  이상인 경우 경험적으로 상관성을 어느 정도 의미하게 볼 수 있다는 경험적 가정하에 살펴봐도 지표 오존량의 상관성은 고도 5 km 정도까지 겨우 유지되는 데 국한된다. 그러나 반대로 대류권계면에 인접한 15 km 상공의 오존량이 아래 하층 대기의 오존량과 갖는 상관성의 분포를 1 km 간격으로 살펴보면(그림 5b) 높은 상관성이 좀 더 넓은 고도 범위에서 나타남이 확인된다. 구체적으로 살펴보면 10 km 고도까지는 상관관계수가 0.7 이상으로 높게 나타나고  $R=0.3$  이상의 상관성이 무려 3 km 고도까지 지속적으로 나타난다. 비록 비교되는 고도가 낮아질수록 상관성은 조금씩 약해지지만 이는 자연스러운 특성으로 볼 수 있기에 오히려 유의미한 상관성이 지표 인근 대기경계층(boundary layer) 바로 윗부분까지 이어질 수 있다는 점에 좀 더 무게를 두고 살필 필요가 있다 여겨진다. 즉, 비록 대



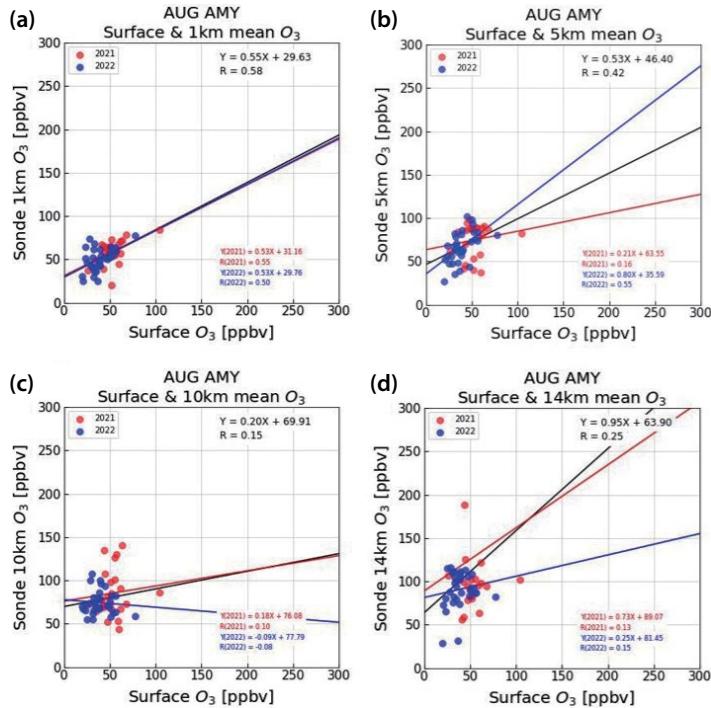
**Fig. 5.** (a) Vertical profiles of correlation coefficient (R) between surface ozone mixing ratio and ozone mixing ratio at each height per 1 km (e.g., ozone at 1 km, 2 km, and so on). (b) Vertical profile of correlation coefficients (R) between ozone mixing ratio at 15 km height (near the tropopause) and ozone mixing ratio at each height per 1 km (e.g., ozone at 14 km, 13 km, and so on).

류권계면 인근의 대기가 지표까지 직접 내려오진 않는다 하더라도 자유 대류권 전반적인 오존의 변동성과는 어느 정도 관계가 있다는 의미로 볼 수 있으며 이는 대류권 오존의 배경 농도의 변화와 관련이 있다고 볼 수 있기 때문이다. 좀 더 성층권 오존의 대류권 유입이 많이 발생한다면 배경 오존 농도가 높아지기 때문에 지표에서 전구물질의 배출 및 광화학 반응에 의한 오존 생성이 유사하게 일어나더라도 좀 더 고농도 사례로 나타날 확률이 커질 수 있을 것이다.

이 상관관계의 의미를 고도별 산포도를 통해 조금 더 상세하게 살펴보고자 한다. 그림 6은 지표 오존이 1, 5, 10, 14 km 고도의 오존과 갖는 상관관계를 보여주는 산포도로서 2021년과 2022년의 사례를 구분하여 살펴보았다. 앞서 우리는 그림 5를 통해 지표 오존이 최대 5~6 km 고도의 오존과 어느 정도 유의미한 상관성이 있다고 보았는데, 2021년과 2022년 사례를 나누어 보면 두 해 모두 지표 오존과 1 km 상공 오존의 상관성에는 큰 차이 없이 유사함을 보이나(그림 6a), 지표와 5 km 고도의 오존의 상관성의 경우 2021

년에는  $R=0.16$ 으로 크게 떨어지는 반면 2022년에는  $R=0.55$ 로 지표수준과 유사한 상관성을 갖는 것이 확인된다(그림 6b). 앞서 여러 결과를 바탕으로 2021년에 비해 2022년에 성층권과 대류권의 분리가 더 강하게 일어났음을 확인한 부분을 감안하면, 2022년에는 지표 오존이 좀 더 상층까지 관계성을 넓혔다고 볼 수 있는 여지가 존재한다.

같은 방식으로 이번엔 대류권계면 인근 15 km 고도의 오존량이 1, 5, 10, 14 km 고도의 오존과 갖는 상관관계를 산포도를 통해 살펴보면(그림 7) 바로 아래 14 km 오존량 사이 양의 상관성은 2021, 2022년 모두 높게 나타나지만 10 km 오존량과의 상관성의 경우 2021년에는 상관계수가  $R=0.79$ 로 여전히 높게 나타나는 반면 2022년에는  $R=0.34$ 로 급감하는 것으로 나타난다. 즉, 2021년에는 대류권계면의 오존이 하층에 미치는 영향이 훨씬 더 선명하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 6과 7의 분석을 비교하면 2021년에는 성층권의 오존이 대류권으로 좀 더 많이 또는 빈번히 유입되어 자유대류권 하부까지 깊숙하게 영향을 주었음을,



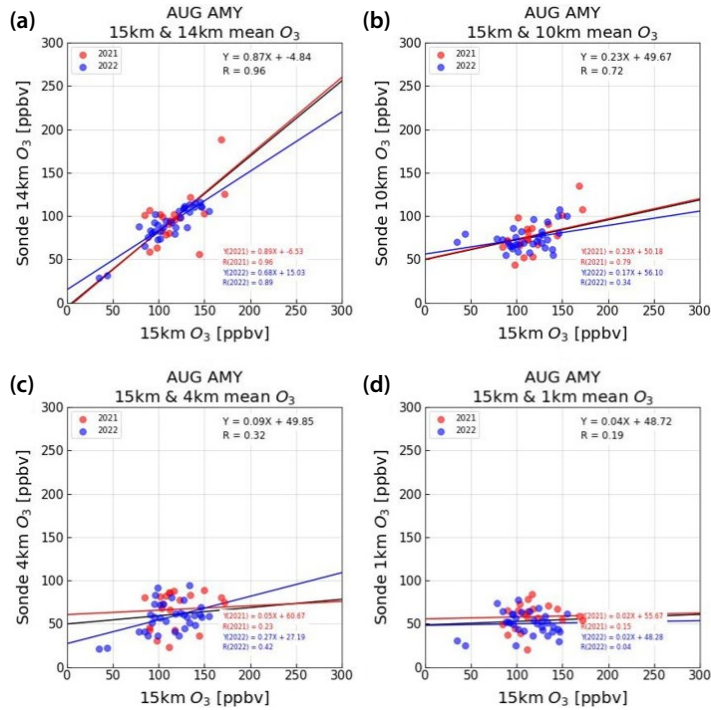
**Fig. 6.** Scatter-plots showing the correlation between observed ozone mixing ratio at surface and that at (a) 1 km, (b) 4 km, (c) 10 km, and (d) 14 km height. Data in 2021 (red) and 2022 (blue) are shown separately. Linear regression lines for the case of 2021 (red), 2022 (blue), and all periods (2021 and 2022, black) are included.

2022년에는 반대로 대기경계층의 오존이 조금 더 자유대류권까지 상승하여 성층권 오존의 하층 유입이 약화됨을 확인할 수 있다. 이는 2021년 여름에 지상 오존 농도가 2022년보다 더 높은 이유를 성층권 오존의 유입 정도로 해석해 볼 수 있는 또 하나의 근거로 볼 수 있다.

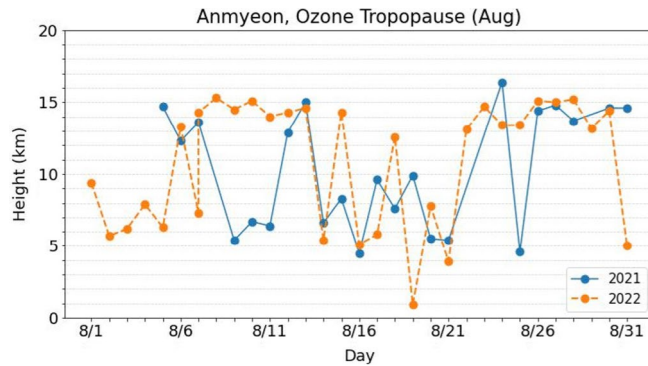
끝으로 2021년과 2022년의 오존 대류권계면(ozone tropopause) 고도를 추정하여 비교해 보았다(그림 8). 일반적으로 오존 대류권계면 고도 계산 과정은 Bethan *et al.* (1996)을 기초로 하여 계산된다. 오존 대류권계면은 오존층을 포함하는 성층권과 그렇지 않은 대류권 사이의 오존의 농도가 급격하게 변하는 특징을 이용하면 성층권-대류권 경계고도, 즉 대류권계면 고도를 추정할 수 있다는 논리하에 고안된 개념으로서 WMO에서 공식적으로 대류권계면 추정 기준으로 제시하는 기온의 연직 변화 분석을 기반으로 하는

Lapse-Rate Tropopause (LRT)와 일반적으로 높은 상관성을 보이고 있는 것으로(Sivakumar *et al.*, 2006) 알려져 있다. 성층권 오존의 하층 대류권 유입과 관련해서는 오존 대류권계면이 좀 더 직접적인 정보를 제공할 수 있기에 오존 대류권계면을 추정하여 2021년과 2022년 상황을 비교해 보았다. 그 결과 이 지역의 오존 대류권계면은 보통 13~15 km 고도에서 형성되다가 성층권 대기의 하층 유입 발생 시 낮아지는 것이 보이는데, 13 km 이하로 오존 대류권계면이 나타나는 경우가 2021년에는 약 61%, 2022년에는 약 44%로 확인되었다. 즉 2022년에 비해 2021년에 오존 대류권계면이 비교적 더 낮게 나타나는 경우가 빈번함이 확인된다. 이는 2022년 여름보다 2021년 여름에 성층권 오존이 대류권에 좀 더 많이 유입되었음을 보여주는 또 하나의 간접적 증거로 간주될 수 있어 보인다.





**Fig. 7.** Scatter plots showing the correlation between observed ozone mixing ratio at 15 km height and that at (a) 14 km, (b) 10 km, (c) 4 km, and (d) 1 km height. Data in 2021 (red) and 2022 (blue) are shown separately. Linear regression lines for the case of 2021 (red), 2022 (blue), and all periods (2021 and 2022, black) are included.



**Fig. 8.** Time series of ozone tropopause height in August 2021 (blue) and 2022 (orange) at Anmyeon.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 국내에서 최초로 한반도 서해안(안면도) 지역 여름철 오존의 연직 분포의 경년 변동성을 오존존데 관측 자료를 기반으로 분석을 수행하였으며, 같

은 여름(8월)이지만 2021년과 2022년 사이에 오존 연직 분포 특성의 차이가 제법 존재함을 포착하였다. 흥미롭게도 2021년에 비해 2022년 안면도 지표 오존량이 비교적 낮게 나타났기에 오존의 연직 분포 차이를

통한 설명 가능성에 주목하였으며, 지표 오존 농도에 따른 오존 연직 분포 형태 비교, 지표 및 대류권계면 인근의 오존량이 대류권 고도별 오존량과 갖는 상관성 분석, 오존 대류권계면 추정 등의 분석을 통해 2021년 안면도 지표 오존이 더 높은 이유를 성층권 오존의 대류권 유입 강화라는 측면에서 설명 가능한 부분이 있음을 보였다. 물론 이 연구 결과는 2021년, 2022년 여름에 국한된 분석이라 아직 일반화하기는 어렵지만 기존에 획득된 바 없는 자료를 바탕으로 새롭게 확인된 결과인 만큼 향후 한반도 대류권 오존의 특성 분석에서 성층권의 영향력을 좀 더 집중해서 살펴볼 필요가 있다는 중요한 교훈을 제시한다. 그러므로 한반도 오존 문제를 이해하는 과정에서 배출량 문제, 대기화학 특성 분석 문제와 더불어 오존의 연직 분포 특성 역시 함께 고려할 필요가 있다고 제안하는 바이다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 국립환경과학원의 연구비(NIER 2023-01-01-142 및 NIER-2022-01-02-045) 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2021) Role of emissions and meteorology in the recent PM<sub>2.5</sub> changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Bethan, S., Vaughan, G., Reid, S.J. (1996) A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(532), 929-944. <https://doi.org/10.1002/qj.49712253207>
- Chen, Z., Liu, J., Cheng, X., Yang, M., Wang, H. (2021) Positive and negative influences of typhoons on tropospheric ozone over southern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(22), 16911-16923. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16911-2021>
- Colombi, N.K., Jacob, D.J., Yang, L.H., Zhai, S., Shah, V., Grange, S.K., Yantosca, R.M., Kim, S., Liao, H. (2023) Why is ozone in South Korea and the Seoul metropolitan area so high and increasing?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(7), 4031-4044. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4031-2023>
- Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L.K., Kim, J., Lee, G., Park, J.-H., Park, R.J., Woo, J.H., Song, C.-K., Hong, J.-H., Hong, Y.-D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.-E., Yum, S.S., Shin, H.J., Kim, Y.-W., Choi, J.-S., Park, J.-S., Szykman, J.J., Long, R.W., Jordan, C.E., Simpson, I.J., Fried, A., Dibb, J.E., Cho, S., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9, 00163. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00163>
- Gaudel, A. (2022) A step forward to mitigate ozone, *Nature Geoscience*, 15, 513-514. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00975-6>
- Kim, J.H., Lee, S.-H., Kim, Y.-K., Lee, H.W., Song, S.-K. (2001) Characteristics of troposphere ozone over the Korean peninsula measured from Pohang ozonesonde, *Atmosphere*, 11, 98-102.
- Komhyr, W.D. (1969) Electrical concentration cells for gas analysis, *Annales Geophysicae*, 25, 203-210.
- Koo, J.-H., Kim, J., Kim, M.-J., Cho, H.-K., Aoki, K., Yamono, M. (2007) Analysis of aerosol optical properties in Seoul using skyradiometer observation, *Atmosphere (KMS)*, 17(4), 407-420.
- Lee, H.-M., Park, R.J. (2022) Factors determining the seasonal variation of ozone air quality in South Korea: Regional background versus domestic emission contributions, *Environmental Pollution*, 308, 119645. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119645>
- Lee, T., Go, S., Lee, Y.G., Park, S.S., Park, J., Koo, J.-H. (2022) Temporal variability of surface air pollutants in megacities of South Korea, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 915531. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.915531>
- Lee, Y.J. (2008) Regional and seasonal variations of tropopause observed by radiosonde and ozonesonde, M.S. thesis, Yonsei university.
- Neu, J.L., Flury, T., Manney, G.L., Santeem, M.L., Livesey, N.J., Worden, J. (2014) Tropospheric ozone variations governed by changes in stratospheric circulation, *Nature Geoscience*, 7, 340-344. <https://doi.org/10.1038/ngeo2138>
- Pan, L.L., Atlas, E.L., Honomichl, S.B., Smith, W.P., Kinnison, D.E.,

- Solomon, S., Santee, M.L., Saiz-Lopez, A., Laube, J.C., Wang, B., Ueyama, R., Bresch, J.F., Hornbrook, R.S., Apel, E.C., Hills, A.J., Treadaway, V., Smith, K., Schauf-  
fler, S., Donnelly, S., Hendershot, R., Lueb, R., Campos, T., Viciani, S., D'Amato, F., Bianchini, G., Barucci, M., Podolske, J.R., Iraci, L.T., Gurganus, C., Bui, P., Dean-  
Day, J.M., Millán, L., Ryoo, J.-M., Barletta, B., Koo, J.-H., Kim, J., Liang, Q., Randel, W.J., Thornberry, T., New-  
man, P.A. (2024) East Asian summer monsoon delivers large abundances of very-short-lived organic chlorine substances to the lower stratosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(12), e2318716121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2318716121>
- Ryu, H., Koo, J.-H., Kim, H.-G., Lee, N., Lee, W.-J., Kim, J.-W. (2022) The Observation of Ozone Vertical Profile in Yongin, Korea During the GMAP 2021 Field Campaign, *Atmosphere (KMS)*, 32(3), 247-261. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.3.247>
- Shah, V., Keller, C.A., Knowland, K.E., Christiansen, A., Hu, L., Wang, H., Lu, X., Alexander, B., Jacob, D.J. (2024) Particulate Nitrate Photolysis as a Possible Driver of Rising Tropospheric Ozone, *Geophysical Research Letters*, 51(5), e2023GL107980. <https://doi.org/10.1029/2023GL107980>
- Sivakumar, V., Baray, J.-L., Baldy, S., Bencherif, H. (2006) Tropopause characteristics over a southern subtropical site, Reunion Island (21°S, 55°E): Using radiosonde-ozone-sonde data, *Journal of Geophysical Research*, 111, D19111.
- Smit, H.G.J., Straeter, W., Johnson, B.J., Oltmans, S.J., Davies, J., Tarasick, D.W., Hoegger, B., Stubu, R., Schmidlin, F.J., Northam, T., Thompson, A.M., Witter, J.C., Boyd, I., Posny, F. (2007) Assessment of the performance of ECC-ozonesondes under quasi-flight conditions in the environmental simulation chamber: Insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE), *Journal of Geophysical Research*, 112(D19), D19306. <https://doi.org/10.1029/2006JD007308>
- 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

- 구자호 (연세대학교 대기과학과 조교수)  
(zach45@yonsei.ac.kr)
- 김주완 (공주대학교 대기과학과 부교수)  
(joowan@kongju.ac.kr)
- 이동희 (연세대학교 대기과학과 연구원)  
(awzsseed@yonsei.ac.kr)
- 이나현 (연세대학교 대기과학과 연구원)  
(zksch25@naver.com)
- 이다영 (국립환경과학원 전문위원)  
(ldy1205@korea.kr)
- 박민주 (연세대학교 대기과학과 연구원)  
(par0821@yonsei.ac.kr)
- 이소정 (연세대학교 대기과학과 연구원)  
(fig30@yonsei.ac.kr)
- 김상준 (연세대학교 대기과학과 연구원)  
(smature@yonsei.ac.kr)
- 강현규 (공주대학교 대기과학과 연구원)  
(hyungyu.m.k@gmail.com)
- 김형규 (공주대학교 대기과학과 연구원)  
(hyeonggyu.kim01@gmail.com)
- 박진수 (국립환경과학원 연구관)  
(airchemi@korea.kr)
- 이원진 (국립환경과학원 연구관)  
(wjleeleo@korea.kr)