



논문

2017년 서울시 O₃과 PM_{2.5}의 계절별 상관분석 연구

A Study on the Seasonal Correlation between O₃ and PM_{2.5} in Seoul in 2017

이하경, 최은락, 이현지¹⁾, 이수영, 이지이*

이화여자대학교 환경공학과, ¹⁾성균관대학교 방재안전공학협동과정

Ha Kyung Lee, Eun Lak Choi, Hyun Ji Lee¹⁾, Su Young Lee, Ji Yi Lee*

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Republic of Korea

¹⁾Interdisciplinary Program in Crisis, Disaster and Risk Management, Sungkyunkwan University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2020년 7월 22일
수정일 2020년 8월 10일
채택일 2020년 8월 19일

Received 22 July 2020
Revised 10 August 2020
Accepted 19 August 2020

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3277-5945
E-mail : yijiyi@ewha.ac.kr

Abstract To characterize the correlation between tropospheric O₃ and PM_{2.5} by season, a comprehensive analysis for the interaction between tropospheric O₃ and PM_{2.5} has been performed over 25 sites in Seoul in 2017. Highly positive correlation between O₃ and PM_{2.5} was observed during the summer period (June, July, and August) and this is related to the simultaneous formation of O₃ and PM_{2.5} due to an increase of the atmospheric oxidation ability. While, correlations of O₃ and PM_{2.5} were negative in the winter period (January, February, and December), showing the opposite trend with summer. The negative correlation for O₃ and PM_{2.5} in winter might be due to both aerosol-radiation interactions and the O₃ titration effect by NO_x. We also found that NO_x plays a more significant role to decrease O₃ concentration than PM_{2.5} on a low concentration of O₃ in winter. It indicates that there are seasonal difference for the mechanisms of O₃ and PM_{2.5} interaction. Therefore, it is required on a different O₃ and PM_{2.5} reduction approach for each season.

Key words: O₃, PM_{2.5}, Aerosol radiation interactions, NO_x titration effect, Air pollution of Seoul

1. 서론

대류권 오존(O₃)은 대기 중 오염물질의 화학반응을 통해 생성되는 대표적인 2차 대기오염물질로, NO_x와 VOC의 광화학 반응으로 인해 생성된다(Logan, 1985). 대류권 O₃은 자극성과 산화력이 강하여 사람과 식물에 악영향을 미치고 광화학스모그를 유발한다. 이러한 위해성에도 불구하고 우리나라의 O₃의 연평균 농도는 1991년 0.013 ppm에서 2017년 0.029 ppm까지 꾸준한 증가추세를 보이고 있으며, 전국 261개의 대기오염측정소 중 2017년에 O₃의 8시간 대기환경기준을 달성한 곳은 없다(미달성률 100%) (NIER, 2017).

PM_{2.5}는 크기가 2.5 μm 이하인 초미세먼지로 발생원에서 직접 배출되는 1차 입자와 대기 중 응집, 응축, 가스상 물질의 화학반응에 의해 생성되는 2차 입자로 구분된다. PM_{2.5}는 이온성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Cl⁻ 등)과 원소성분(K, Fe, Ca, Mn 등), 유기물질(organic matter, OM)과 원소탄소(elementary carbon, EC)로 구성되며, 1차 입자는 주로 자연에서 발생하는 원소성분이나 연료 연소 배출원에서 직접 발생하는 1차 유기물질(primary organic matter, POM)과 원소탄소로 구성되어 있다. 반면, 2차입자는 SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺와 2차유기물질(secondary organic matter, SOM) 성분이 주를 이룬다(Park *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2010). PM_{2.5}는 작은 입자크기로 인해 흡입 시 호흡기와 심혈관 질

환 등을 초래하여 WHO에서 지정한 1군 발암물질이다. 전국의 대기오염측정소 중 2017년에 PM_{2.5} 대기환경기준을 달성하지 못한 곳은 91.4% (24시간 기준)로 O₃과 PM_{2.5}에 대한 효과적인 관리전략이 절실한 상황이다(NIER, 2017).

대기 중 O₃과 PM_{2.5}의 화학적 거동은 서로 복잡하게 연결되어 있다. NO_x와 휘발성유기화합물(volatile organic carbons, VOCs)이 대기 중 화학반응을 거쳐 PM으로 전환되는 메커니즘에는 O₃이 중요한 역할을 하며(Meng *et al.*, 1997), O₃에 의해 개시되는 대기의 산화반응은 2차유기 에어로졸(secondary organic aerosol, SOA) 생성에도 결정적 역할을 한다(Liu *et al.*, 2011). 또한 NO_x와 VOCs는 O₃과 PM_{2.5} 생성의 공통적인 원인물질이기 때문에 Geng *et al.* (2019)과 Wu *et al.* (2017)는 이 두 오염물질들의 상관성 분석 연구를 수행하였고, O₃과 PM이 뚜렷한 양의 상관관계를 보이는 것을 발표하였다.

한편 PM_{2.5}은 표면에서의 비균질반응을 통해 다시 대류권 O₃ 형성에 영향을 미친다(Jacob, 2000). 최근 중국에서는 PM_{2.5}가 오히려 O₃ 생성을 억제한다는 연구 결과가 발표되고 있다. Li *et al.* (2019)은 여름철에 PM_{2.5}가 대기 중 라디칼을 흡수하여 O₃ 생성을 억제하는 현상을 보고하였으며, Feng *et al.* (2016)과 Li *et al.* (2011)은 여름철에 고농도의 에어로졸이 대기로 유입되는 빛의 투과율을 약화시킴으로써 오존 생성을 약화시켰다고 발표했다. Jia *et al.* (2017)은 겨울철 고농도 PM_{2.5}가 일사량을 차단하여 O₃를 감소시킨다고 하였다. 이렇게 상반된 O₃과 PM_{2.5} 상관관계에 대한 연구 결과들은 O₃과 PM_{2.5}의 상호작용이 매우 복잡하며, 이 두 오염물질 간의 상관관계가 계절마다 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

대류권 O₃과 PM_{2.5}의 생성은 서로 긴밀하게 연결되어 있음에도 불구하고 국내 연구는 O₃의 기상학적 요인과 PM_{2.5}의 화학적 조성에 각각 분리되어 집중되어 온 경향이 있다. 2018년 서울연구소에서는 O₃과 PM_{2.5}를 개별적으로 관리하는 현행 정책의 한계를 지적하며, O₃과 PM_{2.5}의 통합관리와 2차 대기오염물질

의 주요 원인물질인 VOCs와 NO_x 관리전략의 필요성을 제시하였다(The Seoul Institute, 2018). 이에 본 연구에서는 대류권 O₃과 PM_{2.5}의 계절별 상관성의 특성 파악과 이를 결정하는 주요요인을 파악하기 위해 2017년 서울의 O₃과 PM_{2.5}의 계절별 상관관계를 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 대기오염물질 측정자료

본 연구에서는 서울 25개 구에 위치한 도시대기측정망의 2017년 1월 1일 1시부터 2017년 12월 31일 24시까지의 시간자료를 활용하여 O₃, PM_{2.5}, NO₂ 농도를 분석하였다. PM_{2.5}와 NO₂는 각 구별 1시간 평균자료를 이용하여 일평균농도를 계산하였다. O₃은 환경기준에 8시간 기준이 설정된 오염물질이므로, 본 연구에서도 하루 평균 최대 8시간 평균치(maximum daily 8hour average ozoen, MDA8)를 일평균농도로 사용하였다. MDA8은 하루를 기준으로 총 17개의 8시간 평균농도값 중 자료 개수가 6개 이상인 것을 구하고, 이중 최대값으로 계산되었다. 이는 O₃이 주로 햇빛이 강한 낮 시간대에 많이 생성되고 밤에는 소멸되는 특성을 가지므로, 밤에 나타나는 낮은 O₃ 농도로 인해 일평균 농도를 과소평가하지 않기 위함이다. O₃, PM_{2.5}, NO₂의 월평균농도와 대기오염물질 간 상관계수는 구별 일평균 자료를 이용하여 월별로 계산되었으며, IBM SPSS (ver.25.0)을 통해 Pearson 이변량 상관분석으로 수행하였다. 각 측정값은 환경부·국립환경부의 통계처리법(NIER, 2018)에 준하여 유효측정값의 처리비율이 75% 이상일 경우에만 분석에 사용하였다.

2.2 기상자료

O₃과 PM_{2.5}는 일사량과 온도, 습도, 운량 등 기상요소들과 복합적인 영향을 주고 받으므로, 이를 고려하기 위해 기상청에서 종관기상관측장비(ASOS, Automated Synoptic Observing System)를 이용하여 관측

한 2017년 서울(북위 37°57' 동경 126°97')의 시간별 기상자료를 활용하여 분석하였다. O₃과 PM_{2.5}의 상관관계와 관련성이 높은 기상요소로는 일사량과 운량이 있다. 매시 일사량 자료는 1시간 동안 단위면적이 받은 복사량의 총열량(MJ/m²)이며, 운량은 관측지점의 하늘 전체를 100으로 하여 구름으로 덮여있는 부분을 하늘 전체에 대한 퍼센트(%)로 표시하였다. 기상요소의 일 평균값은 기상청의 통계처리 방법에 따라 산출 기간 내에 자료량이 80% 이상인 경우에 산출되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 O₃과 PM_{2.5}의 계절별 농도분포 및 상관관계

O₃과 PM_{2.5}의 계절별 상관관계를 파악하기 위해 서울 25개 구에서 측정된 O₃과 PM_{2.5}의 월별 농도분포를 파악하였다(그림 1). O₃은 햇빛이 강한 봄철과 여름철에 농도가 증가하고 겨울철에는 감소하는 경향을 보였으며, 이는 국내 타지역에서도 동일하게 관찰되는 경향이다(Lim and Lee, 2011; Shin *et al.*, 2007; Choi and Doh, 2000; Chung *et al.*, 2000; Kim and Park, 1998). PM_{2.5}은 연료사용량이 많고 복사량이 우세한 봄과 겨울에 농도가 증가하고 강수량이 증가하는 여름철에는 감소하는 것으로 나타났다. 이 역시 기존 국

내 연구들과 일치하는 결과이다(Park and Shin, 2017; ME, 2016; Kim and Kim, 2008). 8월에는 강수에 의해 O₃과 PM_{2.5} 모두 농도가 급감하는 것으로 나타났다.

그림 2는 O₃과 PM_{2.5}의 일평균농도를 바탕으로 25개 구의 월별 상관관계수 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 3~9월에는 모든 구에서 O₃과 PM_{2.5}가 양의 상관관계를 보였으며, 특히 여름철(6, 7, 8월) 각 구의 상관관계수 평균은 0.59~0.73 범위의 높은 수치와 작은 표준편차를 나타냈다. 반면, 1월과 2월, 12월에는 모든 구에서 O₃과 PM_{2.5}가 평균 -0.44~-0.23의 음의 상관관계를 보였다. 따라서, 본 연구에서는 O₃과 PM_{2.5}의 상관관계 차이가 뚜렷하게 나타나는 여름철(6, 7, 8월)과 겨울철(1, 2, 12월)로 대상기간을 나누어 O₃과 PM_{2.5}이 계절별로 다른 상관관계를 나타내는 주요 원인을 파악하고자 하였다.

3.2 여름철(6~8월) O₃과 PM_{2.5}의 상관관계 특성

계절풍의 영향을 받는 우리나라의 기후학적 특성 및 대기온도에 따라 6월과 7월, 8월을 여름철로 선정하였다. 신뢰수준 99%에서 서울 평균 O₃과 PM_{2.5}의 상관관계수는 각각 0.56, 0.66, 0.77로 높은 양의 상관관계를 보였다. 서울의 여름철 PM_{2.5}의 화학조성은 SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, OM이 65~75%를 차지하고 있

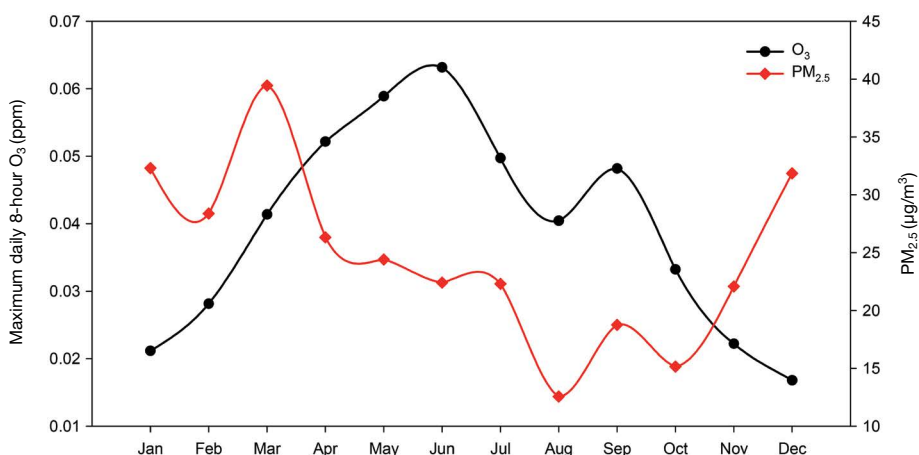


Fig. 1. Monthly variation of averaged maximum daily 8-hour O₃ and PM_{2.5} in Seoul during 2017.

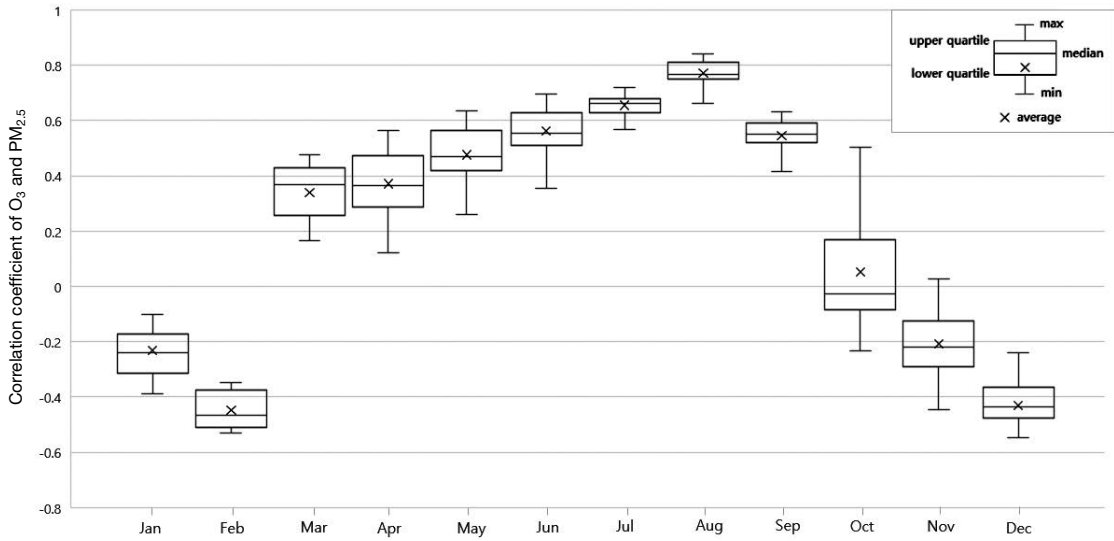


Fig. 2. Monthly correlation coefficient ($p < 0.01$) between O_3 and $PM_{2.5}$ in 25 administration district of Seoul, 2017.

며, 이 중에서도 특히 OM이 가장 많은 부분을 차지하고 있다(NIER, 2017; ME, 2016). 이들 성분은 주로 대기에서 광화학반응에 의해 생성된 2차 오염물질이므로 여름철에는 대기의 산화력이 $PM_{2.5}$ 생성에 중요하게 작용하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 이차생성에 의한 $PM_{2.5}$ 의 영향을 파악하기 위해 O_x ($O_3 + NO_2$)과 $PM_{2.5}$ 와의 상관성을 분석하였다. O_x 는 대기의 광화학 과정에 영향을 주는 O_3 과 NO_2 를 함께 고려함으로써 대기의 산화력을 예측하는 지표로 사용되며(Kim *et al.*, 2018; Clapp and Jenkin, 2001), 2차 유기에어로졸과 높은 상관성을 나타낸다(Xu *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2016; Wood *et al.*, 2010; Herndon *et al.*, 2008). 그림 3은 서울의 여름철 O_x 와 $PM_{2.5}$ 의 관계를 나타낸 것으로 O_x 와 $PM_{2.5}$ 가 양의 상관성($r = 0.69$)을 가진다. Sun *et al.* (2016)과 Wood *et al.* (2010)이 각각 홍콩과 멕시코시티에서 관찰한 O_x 와 유기에어로졸 사이의 상관계수는 이보다 높은 0.78, 0.82로, 이는 $PM_{2.5}$ 성분 중에서도 OM이 대기의 산화력에 큰 영향을 받기 때문으로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 성분 중에서 2차 생성량만을 따로 파악하지는 않았으나, 우리나라 여름철 $PM_{2.5}$ 도

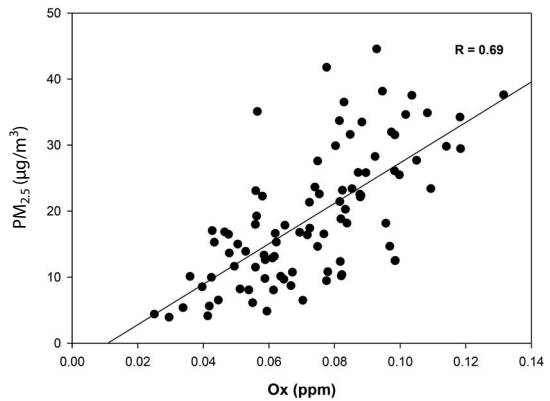


Fig. 3. Correlation of daily averaged concentration of O_x and $PM_{2.5}$ during summer in Seoul, 2017 (confidence level of 99%).

O_x 와의 상관성이 높은 것을 바탕으로 대기의 산화력에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 여름철에는 강한 빛과 높은 온도에 의해 겨울철에 비해 증가한 O_3 이 대기의 산화력을 증가시켰고, 그에 따라 $PM_{2.5}$ 의 이차생성을 촉진하여 O_3 과 $PM_{2.5}$ 가 양의 상관관계를 보인다고 판단된다.

한편 NO_2 는 발생원에서 직접 1차적으로 발생하기

도 하므로, O_x 중 NO₂ 비율이 90% 이상으로 높을 경우에는 O_x가 대기의 산화력을 나타내는 지표의 역할을 하지 못한다(Xu *et al.*, 2017). 우리나라의 O_x 중 NO₂가 차지하는 비중의 월별 분포를 파악한 결과, NO₂의 비중이 여름철(약 35%)에서 겨울철(약 55%)로 갈수록 높아짐을 확인하였다. 따라서 여름철과는 다르게 겨울철에는 O_x로 대기의 산화력을 평가하기에 무리가 있다고 판단되며, 겨울철 O₃과 PM_{2.5}의 관계는 대기의 산화력이 아닌 다른 방법을 통해 설명하고자 한다.

3.3 겨울철(1, 2, 12월) O₃과 PM_{2.5}의 상관관계 특성

3.3.1 PM_{2.5}의 O₃ 생성 억제 효과 검토

O₃은 광화학반응에 의해 생성되므로 일사량 및 온도에 많은 영향을 받는다(Boleti, 2019; An, 2012). 한편 PM_{2.5}은 직접적으로 자외선을 흡수 및 차단하여 대기 중 광화학반응과 오존 생성을 억제시킬 수 있으며(Tian *et al.*, 2019; Xing *et al.*, 2017; Dickerson *et al.*, 1997), PM_{2.5}가 구름 응집핵으로 작용하여 운량을 증가시킬 경우, 자외선 차단과 전구물질의 습식침적 효

과를 통해 간접적으로도 오존 생성에 영향을 미친다는 선행연구들이 발표되고 있다(Unger *et al.*, 2009; Menon *et al.*, 2008). 또한 PM_{2.5}와 자외선 및 복사에너지와의 상호작용은 대기 안정도 및 대기경계층의 고도와도 밀접한 연관을 가지기 때문에 에어로졸-구름-복사 간의 피드백 메커니즘은 복잡하게 대기환경에 영향을 미친다고 보고되고 있다(Su *et al.*, 2020; Brune *et al.*, 2019). 본 연구에서 에어로졸이 대기환경의 각 요소들과 가지는 메커니즘을 상세 구분하여 분석하기에는 한계가 있지만, 겨울철 PM_{2.5}가 나타내는 일사량과 운량과의 상관관계를 바탕으로 구름과 O₃, PM_{2.5}의 생성영향을 결과론적으로 설명해 보고자 하였다.

그림 4에서는 겨울철 서울 PM_{2.5}의 농도를 대기환경기준에 따라 보통($16 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{PM}_{2.5} < 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 나쁨($36 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{PM}_{2.5} < 76 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 매우나쁨($76 \mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{PM}_{2.5}$) 등급으로 구분하고, 일사량과 운량이 각 PM_{2.5} 등급에 따라 어떻게 변화하는지를 나타내었다. 그 결과 PM_{2.5} 농도가 높은 등급일수록 운량이 많고, 지표면에 도달하는 일사량이 확연하게 줄어들음을 확인할 수 있다. 하루 중 최고 일사량은 PM_{2.5}가 보통등급

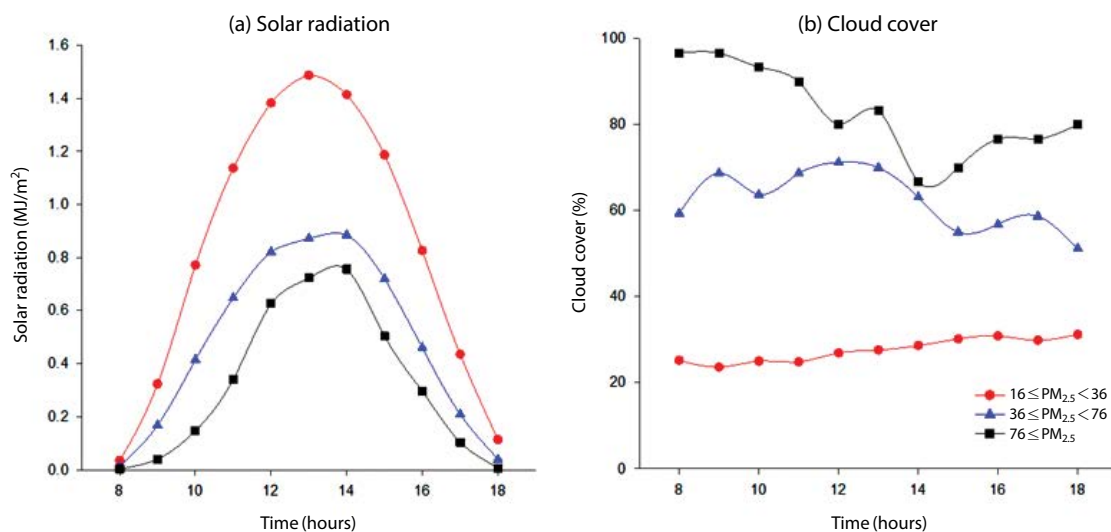


Fig. 4. Diurnal change of (a) Solar radiation and (b) Cloud cover under three PM_{2.5} levels over $16 \sim 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $36 \sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and exceeding $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ during winter in Seoul, 2017.

일 때 1.49 MJ/m²에서 매우나뭇등급일 때는 0.76 MJ/m²까지 48% 이상 감소했으며, 특히 일사량의 차이는 오존이 많이 발생하는 낮 시간대에 가장 컸다. 반대로 하루 평균 운량은 PM_{2.5}가 보통등급일 때 30%에서 매우나뭇등급일 때는 70%까지 증가하였다. 따라서 겨울철의 PM_{2.5} 농도 증가는 높은 운량과 관계되어 일사량을 감소시키고 오존 생성을 억제하는 효과가 있음을 예상할 수 있다.

3.3.2 NO_x의 O₃ 감쇠 효과 검토

대류권 O₃의 생성과 소멸은 NO₂의 광분해 순환(photolytic cycle)에 따라 발생하며, VOCs가 존재할 경우 이 순환에 참여해 오존의 농도를 증가시키는 역할을 한다. 그러나 NO_x와 VOCs의 비율에 따라 NO_x 또는 VOCs 배출량 저감이 O₃ 농도를 증가시킬 수 있다. VOCs/NO_x 비가 높은 경우 O₃의 생산율은 NO 농도에 따라 선형적으로 변화하지만 VOCs와는 무관하기 때문에 NO_x-limited regime이라 한다. VOCs/NO_x 비가 낮은 경우에는 O₃의 생산율이 VOCs 농도에 따라 선형적으로 증가하지만 NO_x 농도에는 반비례하며, VOCs-limited regime이라 한다. 우리나라 수도권 지역은 VOCs-limited에 가까운 것으로 알려져 있어 (An *et al.*, 2015; Park and Kim, 2002), NO_x의 증가가

O₃의 생성효율을 감소시키는 방향으로 작용하였을 가능성이 있다. 또한 NO_x는 PM_{2.5}의 중요한 원인물질로, PM_{2.5}의 질산염 성분 형성에 기여하여 함께 증가한다. 현재 도시대기측정소에서는 NO 농도 자료를 제공하지 않아 NO_x를 계산하기 어려운 상황이기 때문에 본 연구에서는 NO₂로 계산을 대신하였다. 그림 5은 2017년 겨울철 기간 중 서울의 NO₂와 O₃, PM_{2.5} 간의 상관성을 나타낸 것으로, NO₂가 O₃과는 높은 음의 상관성($r = -0.66$)을, PM_{2.5}와는 양의 상관성($r = 0.64$)을 가지는 것을 확인할 수 있다. 즉 겨울철 고농도의 NO₂는 O₃을 감소시키고 PM_{2.5}를 증가시키는 역할을 하며, 결과적으로 겨울철 O₃과 PM_{2.5}의 음의 상관관계에 기여했을 것으로 판단된다.

3.3.3 겨울철 O₃에 대한 NO_x와 PM_{2.5}의 영향력 비교

3.3.1과 3.3.2를 통해 겨울철에 O₃을 감소시키는 역할을 하는 물질로 PM_{2.5}와 NO_x를 제시하였다. 본 연구에서는 겨울철에 나타나는 O₃과 PM_{2.5}의 음의 상관관계에 대한 원인을 더욱 명확히 하기 위하여 겨울철 O₃에 대한 PM_{2.5}와 NO₂의 상관분석을 실시하였다(표 1). O₃과 NO₂의 상관계수 절대값(-0.56 ~ -0.73)이 O₃과 PM_{2.5}의 상관계수 절대값(-0.23 ~ -0.48)보

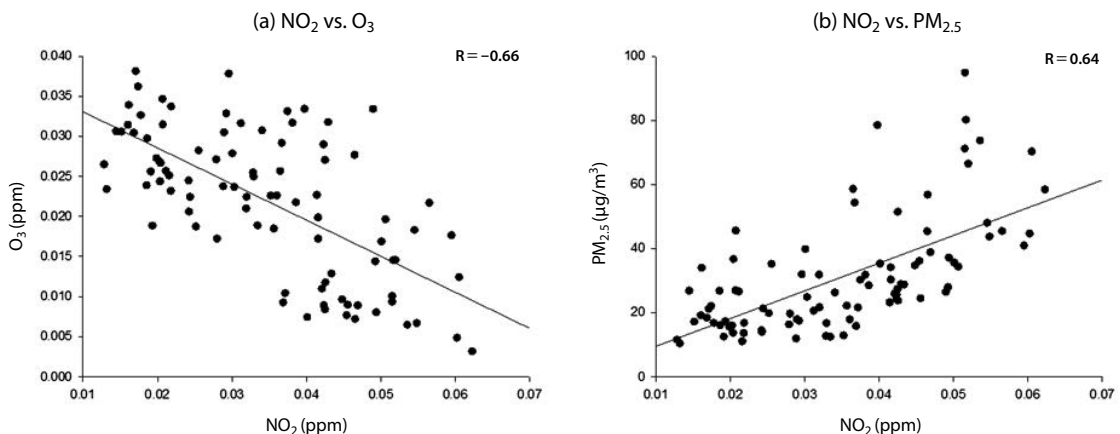


Fig. 5. Correlation of daily averaged concentration of NO₂ with (a) O₃ and (b) PM_{2.5} during winter in Seoul, 2017 (confidence level of 99%).

Table 1. Correlation coefficient of O₃ with PM_{2.5} and NO₂ (confidence level of 99%) during winter in Seoul, 2017.

	Jan	Feb	Dec
O ₃ -PM _{2.5}	-0.23	-0.48	-0.43
O ₃ -NO ₂	-0.66	-0.56	-0.73

다 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으므로, 겨울철 O₃농도 감소에는 PM_{2.5}보다 NO_x가 더 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 중국에서는 PM_{2.5}가 직간접적으로 대류권 O₃ 농도를 감소시키는 영향력이 크다는 연구 결과들이 나와 있으나 (Jia *et al.*, 2017; Xing *et al.*, 2017), 우리나라의 겨울철 PM_{2.5} 농도는 중국에 비해 낮아 이러한 영향이 크지는 않은 것으로 판단된다. 따라서 서울의 겨울철 O₃과 PM_{2.5}의 음의 상관관계는 PM_{2.5}의 일사량 차단 효과보다 NO_x의 O₃ 적정 효과가 더욱 중요한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2017년 서울시 25개 구의 대류권 O₃과 PM_{2.5}의 농도자료 분석을 통해 O₃과 PM_{2.5}의 계절별 상관관계를 연구하였다. O₃과 PM_{2.5}는 여름철(6, 7, 8월)에 평균 0.66의 높은 상관계수를 나타냈으며, 겨울철(1, 2, 12월)에는 이와 반대로 평균 -0.37의 음의 상관계수를 나타내었다. 이처럼 계절별로 다르게 나타나는 O₃과 PM_{2.5}의 상관성의 원인을 규명하기 위하여 O₃과 PM_{2.5}와 더불어 NO₂와 기상요소들을 분석하였다. 여름철에는 강한 일사량에 의해 발생한 고농도 O₃이 대기의 산화력(O_x)을 증가시켜 PM_{2.5}의 2차 생성을 촉진하므로 O₃과 PM_{2.5}가 양의 상관관계를 가지는 것으로 파악되었다. 반면 겨울철에 나타나는 O₃과 PM_{2.5}의 음의 상관관계는 PM_{2.5}의 일사량 차단 효과보다 NO_x의 O₃ 적정 효과에 의한 것이 더 우세한 것으로 나타났다.

O₃과 PM_{2.5}의 생성과 소멸 기작은 보다 복잡하여서 둘의 상관관계에는 VOCs를 비롯한 RO₂, HO₂ 등의

라디칼과 대기 안정도를 포함한 여러 기상인자 또한 영향을 미친다. 따라서 O₃과 PM_{2.5}의 상호작용을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 보다 다양한 영향인자들을 고려한 연구가 필요하다. 본 연구에서 제시한 계절별 O₃과 PM_{2.5}의 상관분석은 계절별로 기상조건에 따라 O₃과 PM_{2.5}의 상호작용에 다르게 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 O₃과 PM_{2.5}에 대한 계절별로 다른 저감방안이 모색되어야 효과적인 대기관리가 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092015)의 지원을 받아 수행하였음.

References

- An, H., Han, J., Lee, M., Kang, E. (2015) The long-term variations of ozone and nitrogen oxides in Suwon city during 1991-2012, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 378-384, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.4.378>
- An, J.H. (2012) Correlation analysis of solar radiation and meteorological parameters on high ozone concentration, *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 12(6), 93-98, (in Korean with English abstract).
- Boleti, E., Hueglin, C., Takahama, S. (2019) Trends of surface maximum ozone concentrations in Switzerland based on meteorological adjustment for the period 1990-2014, *Atmospheric Environment*, 213(15), 326-336. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.018>
- Bruine, M., Krol, M., Arellano, J.V.G., Rockmann, T. (2019) Explicit aerosol-cloud interactions in the Dutch atmospheric large-eddy simulation model DASLES4.1-M7, *Geoscientific Model Development*, 12, 5177-5196. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5177-2019>

- Choi, S.W., Doh, S.H. (2000) The study on the characteristic and contributed factor of ozone's concentration in Daegu city, *Journal of Nakdonggang Environmental Research Institute*, 5(1), 33-45.
- Chung, H.J., Kim, D.S., Baek, S.H., Seo, W.H., Kim, J.H. (2000) Study on seasonal characteristics of ozone concentration in the air in Taejeon city, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 6(1), 51-62, (in Korean with English abstract).
- Clapp, L.J., Jenkin, M.E. (2001) Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK, *Atmospheric Environment*, 35(36), 6391-6405. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8)
- Dickerson, R.R., Kondragunta, S., Stenchikov, G., Civerolo, K.L., Doddridge, B.G., Holben, B.N. (1997) The impact of aerosols on solar ultraviolet Radiation and Photochemical Smog, *Science*, 278(5339), 827-830. <https://doi.org/10.1126/science.278.5339.827>
- Eck, T.F., Holben, B.N., Kim, J., Beyersdorf, A.J., Choi, M., Lee, S., Koo, J.-H., Giles, D.M., Schafer, J.S., Sinyuk, A., Peterson, D.A., Reid, J.S., Arola, A., Slutsker, I., Smirnov, A., Sorokin, M., Kraft, J., Crawford, J.H., Anderson, B.E., Thornhill, K.L., Diskin, G.S., Kim, S.W., Park, S. (2020) Influence of cloud, fog, and high relative humidity during pollution transport events in South Korea: Aerosol properties and PM_{2.5} variability, *Atmospheric Environment*, 232, 117530. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117530>
- Feng, T., Bei, N., Huang, R.J., Cao, J., Zhang, Q., Zhou, W., Tie, X., Liu, S., Zhang, T., Su, X., Lei, W., Molina, L.T., Li, G. (2016) Summertime ozone formation in Xian and surrounding areas, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4322-4342. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4323-2016>
- Geng, C., Yang, W., Sun, X., Wang, X., Bai, Z., Zhang, X. (2019) Emission factors, ozone and secondary organic aerosol formation potential from industrial biomass boilers, *Journal of Environmental Sciences*, 83, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.012>
- Herndo, S.C., Onasch, T.B., Wood, E.C., Kroll, J.H., Canagaratna, M.R., Jayne, J.T., Zavala, M.A., Knighton, W.B., Mazzoleni, C., Dubey, M.K., Ulbrich, I.M., Jimenez, J.L., Seila, R., Gouw, J.A., Foy, B., Fast, J., Molina, L.T., Kolb, C.E., Worsnop, D. R. (2008) Correlation of secondary organic aerosol with odd oxygen in Mexico City, *Geophysical Research Letters*, 35(15). <https://doi.org/10.1029/2008GL034058>
- Jacob, D.J. (2000) Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone, *Atmospheric Environment*, 34(12), 2131-2159. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00462-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00462-8)
- Jia, M., Zhao, T., Cheng, X., Gong, S., Zhang, X., Tang, L., Liu, D., Wu, X., Wang, L., Chen, Y. (2017) Inverse relations of PM_{2.5} and O₃ in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of east China, *Atmosphere*, 8(3), 59. <https://doi.org/10.3390/atmos8030059>
- Kim, C.H., Park, S.U. (1998) Characteristics of the seasonal variation of surface ozone concentrations observed in the Kyongin region, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 34(4), 560-569.
- Kim, H.J., Ahn, J.Y., Moon, K.J., Kim, J.C., Kim, J.S., Lee, M.D., Lee, S.J., Jeon, H.E., Oh, J., Chio, J.S., Park, S.M., Park, J.S., Lee, S.U., Loka, A.R.L., Shin, E.S. (2010) Study on the characteristic on physical and chemical properties on PM_{2.5}, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 16(2), 81-88, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Ghim, Y.S., Han, J.S., Park, S.M., Shin, H.J., Lee, S.B., Kim, J.S., Lee, G.W. (2018) Long-term trend analysis of Korean air quality and its implication to current air quality policy on ozone and PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 1-15, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.001>
- Kim, S.D., Kim, C.H. (2008) The phyco-chemical character of aerosol particle in Seoul metropolitan area, *Seoul Studies*, 9(3), 23-33.
- Li, J., Wang, Z., Wang, X., Yamaji, K., Takigawa, M., Kanaya, Y., Pochart, P., Liu, Y., Irie, H., Hu, B., Tanimoto, H., Akiyama, H. (2011) Impacts of aerosols on summertime tropospheric photolysis frequencies and photochemistry over Central Easter China, *Atmospheric Environment*, 45(10), 1817-1829. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.016>
- Li, K., Jacob, D.J., Liao, H., Shen, L., Zhang, Q., Hates, K.H. (2019) Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China, *PNAS*, 116(2), 422-427. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812168116>
- Lim, H.J., Lee, Y.J. (2011) Characterization of ozone distributions in pohang: measurement data during 2002-2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 50-62, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.1.050>
- Liu, S., Day, D.A., Shields, J.E., Russell, L.M. (2011) Ozone driven daytime formation of secondary organic aerosol containing carboxylic acid groups and alkane groups, *Atmosphere Chemistry and Physics*, 11(16), 8321-

8341. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8321-2011>
- Logan, J.A. (1985) Tropospheric ozone: Seasonal behavior, trends, and anthropogenic influence, *Journal of Geophysical Research*, 90(6), 10463-10482. <https://doi.org/10.1029/JD090iD06p10463>
- Meng, Z., Dabdub, D., Seinfeld, J.H. (1997) Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter, *Science*, 277(5332), 116-119. <https://doi.org/10.1126/science.277.5322.116>
- Menon, S., Genio, A.D.D., Kaufman, Y., Bennartz, R., Koch, D., Loeb, N., Orlikowski, D. (2008) Analyzing signatures of aerosol-cloud interactions from satellite retrievals and the GISS GCM to constrain the aerosol indirect effect, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(14). <https://doi.org/10.1029/2007JD009442>
- Ministry of Environment, (2016) Particulate matter, what is it?, Copyrights Ministry of Environment, Republic of Korea, 8pp.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) An international cooperative air quality field study in Korea, <https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/KORUS-AQ-RSSR.pdf> (accessed on May. 23, 2019).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual report of air quality in Korea 2017, https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (accessed on May. 4, 2019).
- Park, J.S., Song, I.H., Park, S.M., Shin, H., Hong, Y. (2015) The characteristics and seasonal variations of OC and EC for PM_{2.5} in Seoul metropolitan area in 2014, *Journal of Environment Impact Assessment*, 24(6), 578-592, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2015.24.6.578>
- Park, J.Y., Kim, Y.P. (2002) On the optimum ozone control strategy in Seoul: case studies using OZIPR, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(5), 427-433, (in Korean with English abstract).
- Park, S.N., Shin, H.J. (2017) Analysis of the factors influencing PM_{2.5} in Korea : Focusing on seasonal factors, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(1), 227-248, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.1.227>
- Shin, B.C., Lee, M.H., Lee, J.H., Shim, J.S. (2007) Seasonal and diurnal variations of surface ozone at leodo in the east China sea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 23(6), 631-639, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2007.23.6.631>
- Su, T., Li, Z., Li, C., Li, J., Han, W., Shen, C., Tan, W., Wei, J., Guo, J. (2020) The significant impact of aerosol vertical structure on lower atmosphere stability and its critical role in aerosol-planetary boundary layer (PBL) interactions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 3713-3724. <https://doi.org/10.5194/acp-20-3713-2020>
- Sun, C., Lee, B.P., Huang, D., Li, Y.J., Schurman, M.I., Louie, P.K.K., Luk, C., Chan, C.K. (2016) Continuous measurements at the urban roadside in an Asian megacity by Aerosol Chemical Speciation Monitor (ACSM): particulate matter characteristics during fall and winter seasons in Hong Kong, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 1713-1728. <https://doi.org/10.5194/acp-16-1713-2016>
- The Seoul Institute (2018) A study for developing an integrated air quality (ozone and PM_{2.5}) management framework in Seoul, <https://www.si.re.kr/node/62137> (accessed on Aug. 01, 2020).
- Tian, R., Ma, X., Jia, H., Yu, F., Sha, T., Zan, Y. (2019) Aerosol radiative effects on tropospheric photochemistry with GEOS-Chem simulations, *Atmospheric Environment*, 208, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.03.032>
- Unger, N., Menon, S., Koch, D.M., Shindell, D.T. (2009) Impacts of aerosol-cloud interactions on past and future changes in tropospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(12), 4115-4129. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4115-2009>
- Wood, E.C., Canagaratna, M.R., Herndon, S.C., Kroll, J.H., Onasch, T.B., Kolb, C.E., Worsnop, D.R., Knighton, Seila, R., Zavala, M., Molina, L.T., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Weinheimer, A.J., Knapp, D.J., Jobson, B.T., Stutz, J., Kuster, W.E., Williams, E.J. (2010) Investigation of the correlation between odd oxygen and secondary organic aerosol in Mexico City and Houston, *Atmospheric Chemistry*, 10(18), 8947-8968. <https://doi.org/10.5194/acp-10-8947-2010>
- Wu, W., Zhao, B., Wang, S., Hao, J. (2017) Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China, *Journal of Environmental Sciences*, 53, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.025>
- Xing, J., Wang, J., Mathur, R., Wang, S., Sarwar, G., Pleim, J., Hogrefe, C., Zhang, Y., Jiang, J., Wong, D.C., Hao, J. (2017) Impacts of aerosol direct effects on tropospheric ozone through changes in atmospheric dynamics and photolysis rates, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 9869-9883. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9869-2017>

5194/acp-17-9869-2017

Xu, W., Han, T., Du, W., Wang, Q., Chen, C., Zhao, J., Zhang, Y., Li, J., Fu, P., Wang, Z., Worsnop, D.R., Sun, Y. (2017) Effects of aqueous-phase and photochemical processing on secondary organic aerosol formation and evolution in Beijing, China. *Environmental Science & Technology*, 51(2), 762-770. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04498>

Authors Information

이하경 (이화여자대학교 환경공학과 석사과정)

최은락 (이화여자대학교 환경공학과 석박사통합과정)

이현지 (성균관대학교 방재안전공학협동과정 석사과정)

이수영 (이화여자대학교 환경공학과 졸업)

이지이 (이화여자대학교 환경공학과 교수)