

여름철 도심 공원의 O₃과 NO₂ 농도의 일변화: 기온과 풍속의 영향

Diurnal Variations of O₃ and NO₂ Concentrations in an Urban Park in Summer: Effects of Air Temperature and Wind Speed

한 범 순 · 곽 경 환^{1)*} · 백 종 진

서울대학교 지구환경과학부, ¹⁾강원대학교 환경융합학부

(2016년 9월 20일 접수, 2016년 10월 3일 수정, 2016년 10월 5일 채택)

Beom-Soon Han, Kyung-Hwan Kwak^{1)*} and Jong-Jin Baik

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

¹⁾*School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University*

(Received 20 September 2016, revised 3 October 2016, accepted 5 October 2016)

Abstract

The diurnal variations of O₃ and NO₂ in an urban park and the effects of air temperature and wind speed on the diurnal variations are investigated. O₃ and NO₂ concentrations were observed at a site in an urban park of Seoul from 27 July 2015 to 9 August 2015. The O₃ and NO₂ concentrations observed in the urban park are compared to those observed at the Gangnam air quality monitoring station (AQMS). The O₃ concentration is higher in the urban park than at the Gangnam AQMS in the daytime because the amount of O₃ dissociated by NO is smaller as well as partly because the amount of O₃ produced in the oxidation process of biogenic volatile organic compounds (VOCs) is larger in the urban park than at the Gangnam AQMS. The NO₂ concentration is lower in the urban park than at the Gangnam AQMS during day and night because the observation site in the urban park is relatively far from roads where NO_x is freshly emitted from vehicles. The difference in NO₂ concentration is larger in the daytime than in the nighttime. To examine the effects of air temperature and wind speed on the diurnal variations of O₃ and NO₂, the observed O₃ and NO₂ concentrations are classified into high or low air temperature and high or low wind speed days. The high O₃ and NO₂ concentrations in the daytime appear for the high air temperature and low wind speed days. This is because the daytime photochemical processes are favorable when the air temperature is high and the wind speed is low. The scatter plots of the daytime maximum O₃ and minimum NO₂ concentrations versus the daytime averages of air temperature and wind speed show that the daytime maximum O₃ and minimum NO₂ concentrations tend to increase as the air temperature increases or the wind speed decreases. The daytime maximum O₃ concentration is more sensitive to the changes in air temperature and wind speed in the urban park than at the Gangnam AQMS.

Key words : Ozone, Nitrogen dioxide, Diurnal variation, Urban park, Air temperature, Wind speed

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-8575, E-mail : khkwak@kangwon.ac.kr

1. 서 론

O₃과 NO₂는 도시 지역의 주요한 오염물질로써 이에 어린이가 장기간 노출될 경우 천식 등의 호흡기 질환이 악화되는 악영향을 미치며, 식물이 장기간 노출될 경우 잎이 손상되는 피해가 알려져 있다(Lin *et al.*, 2008; Arya, 1999). 따라서 우리나라에서는 O₃과 NO₂를 대기 환경기준물질로 지정하고 1시간 평균 기준을 0.1 ppm 이하로 정해 관리하고 있다. 대기질 경보제에 따르면 오존주의보는 1시간 평균 농도가 0.12 ppm 이상일 때 발령된다. 서울시의 오존주의보 발령일수는 2011년 4일, 2012년 3일, 2013년 9일, 2014년 8일, 2015년 3일, 2016년 16일로 최근 들어 증가하는 추세를 보이며 (<http://www.airkorea.or.kr/index>), 서울시의 연평균 농도 역시 증가하는 추세를 보인다(Kim and Yeo, 2013). NO₂는 여러 환경 정책에도 불구하고 연평균 농도가 정체하거나 오히려 증가하는 추세를 보이며, 2011~2015년 서울시의 연평균 NO₂ 농도는 대기환경기준인 연평균 0.030 ppm을 웃도는 0.030~0.033 ppm으로 전국 17개 시도에서 가장 높다(<http://www.airkorea.or.kr/index>).

도시에서 O₃과 NO₂ 농도를 관측한 연구에 따르면 중심 지역, 외곽 지역, 도심 공원, 주요 도로 등 관측 지점에 따라 다른 특성이 나타난다(Mazzeo *et al.*, 2005; Clapp and Jenkin, 2001; Lal *et al.*, 2000). 도시 중심 지역은 외곽 지역보다 NO₂ 농도가 높고 O₃ 농도가 낮는데 이는 NO_x (NO+NO₂)가 자동차에서 배출되는 동시에 이 중 NO가 O₃을 분해하기 때문이다(Nguyen and Kim, 2006; Clapp and Jenkin, 2001). 도시 외곽 지역(Hassan *et al.*, 2013; Geng *et al.*, 2008)이나 도심 공원(Cohen *et al.*, 2014; Kuttler and Strassburger, 1999)에서는 대체로 도시 중심 지역보다 높은 O₃ 농도와 낮은 NO₂ 농도가 관측되었다. 이는 도시 중심 지역에 비해 교통량이 적어서 자동차에서 직접 배출되는 NO_x의 양이 적기 때문이다. 주요 도로변(Kwak *et al.*, 2016; Costabile and Allegrini, 2007)에서는 자동차 배출 영향 때문에 주변 건물 옥상보다 O₃ 농도가 낮았고 NO_x 농도는 높았다.

도시 지역의 O₃과 NO₂ 농도는 풍속 및 기온과 일정한 상관성을 갖는다고 알려져 있다(Satsangi *et al.*, 2004; Raddatz and Cummine, 2001; Gunthe *et al.*, 1994). Dueñas *et al.* (2002)과 Tu *et al.* (2007)에 의하면 O₃은

기온, 풍속과 양의 상관관계를 보인다. Dueñas *et al.* (2002)은 기온이 상승할수록 O₃ 생성 반응이 활발해지며, 풍속이 강해질수록 경계층의 안정성이 낮아져 상층의 O₃이 지표 근처까지 하강한다고 분석하였다. 한편, 풍속이 증가함에 따라 O₃ 농도가 낮아지는 관측 결과도 보고된 바 있다(Oh and Kim, 2002). Grinn-Gofroń *et al.* (2011)과 Tu *et al.* (2007)에 의하면 NO₂는 풍속, 기온과 음의 상관관계를 보인다. 이는 풍속이 강할수록 다른 지역으로의 분산이 활발해지며, 기온이 증가할수록 경계층 높이가 높아져 NO₂ 농도가 희석되기 때문이다. 다만, 기온이 증가할수록 여름철 NO₂ 농도가 높아지는 관측 결과도 보고된 바 있다(Elminir, 2005).

서울은 대한민국의 수도이며, 천만 명에 가까운 인구가 집중된 대도시다. 서울의 중심 지역에서 NO₂ 농도는 주로 자동차로부터의 배출과 대기 중 NO와 O₃의 반응에 의해 증가하였다(Kim *et al.*, 2016b; Pandey *et al.*, 2008). Oh and Kim (2002)에 의하면 서울에서 O₃의 일최저농도는 NO가 많이 배출되는 출근시간에, 일최고농도는 광화학 반응에 의한 O₃ 생성이 활발한 한낮에 나타났다. 낮 동안 O₃의 다른 전구물질인 VOCs (Volatile Organic Compounds)는 산화되어 라디칼을 만들고 이 라디칼이 NO와 반응해 NO₂를 생성하며, NO₂는 다시 광화학 반응으로 O₃을 생성한다(Kim *et al.*, 2016a; Finlayson-Pitts and Pitts, 1986).

도시의 중심 지역에 조성된 도심 공원은 시민에게 쾌적한 휴식 공간을 제공해주며, 여름철 도시 열섬 효과를 완화하고 대기질을 개선하는 데 도움을 준다(Konarska *et al.*, 2016; Cohen *et al.*, 2014). 도심 공원은 대기오염물질 배출원으로부터 떨어져 있으며, 숲의 자정작용이 대기질을 개선하는 데 기여한다고 알려져 있다(McDonald *et al.*, 2007; Freiman *et al.*, 2006). 앞으로도 편리한 접근성과 쾌적한 환경으로 인해 도심 공원을 조성하고 활용하려는 다각적인 노력이 지속될 것으로 기대되는 가운데, 야외 활동을 하는 시민의 건강과도 직결되는 도심 공원의 대기질 연구가 필요하다. 본 연구에서는 여름철 서울 도심 공원에서의 O₃과 NO₂ 농도를 관측하였고 인근 도시 대기 측정소(Air Quality Monitoring Station, AQMS)의 관측 결과와 비교하였다. 그리고 여름철 기상 조건 중 기온과 풍속이 도심 공원과 AQMS에서 관측한 O₃과 NO₂ 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 관측 지점

본 연구의 도심 공원 O₃과 NO₂ 관측 지점은 서울 강남구 삼성동에 위치한 선릉공원 내 숲(37.51°N, 125.05°E)이다(그림 1(a), Urban park). 선릉공원은 면적이 240,589 m²으로 대부분 숲으로 이루어져 있으며, 주변에는 도로, 주거 및 업무용 건물 등이 분포한다. O₃과 NO₂ 관측 장비는 지면으로부터 약 0.7 m 높이에 설치되었고 같은 지점의 지면으로부터 약 1.5 m 높이에서 기온과 풍속을 관측하였다(그림 1(b), (c)). 도심 공원 O₃과 NO₂ 관측과 비교하기 위해 도심 공원 관측 지점으로부터 약 1.2 km 떨어진 강남구 AQMS의 관측 자료를 사용하였다(그림 1(a), AQMS). 강남구 AQMS는 지면으로부터 약 20 m 높이인 강남구청 옥상에 있으며, 주로 고층 아파트로 이루어진 주거지에 둘러싸여 있다. 도심 공원과 강남구 AQMS에서 O₃ 농도는 자외선 흡수법(ultraviolet absorption)을, NO₂ 농도는 화학발광법(chemiluminescence)을 이용해서 측정되었다. 표 1에 각 관측 지점에서의 O₃과 NO₂ 농도 측정기기의 개요를 정리하였다. 기온과 풍속 관측은 도심 공원 관측 지점과 강남구 AQMS로부터 각각 약 0.7 km와 약 0.5 km 떨어진 강남 자동 기상 관측소(Automatic Weather Station, AWS)에서 이루어졌다(그림 1(a), AWS). 강남 AWS는 지면으로부터 약 20 m 높이인 삼성초등학교 옥상에 있으며, 저층 주택으로 이루어진 주거 지역에 위치한다.

2.2 관측 자료 수집 및 기상 개요

도심 공원에서 O₃과 NO₂를 관측한 기간은 2015년 7월 27일부터 8월 9일까지 14일간이다. 도심 공원에서 관측된 농도가 음수인 경우는 분석에서 제외되었다. 또한 도심 공원의 NO₂ 농도 중 8월 2일 이전 자료는 관측 장비의 교정 문제로 인해 분석에서 제외되었다. 강남구 AQMS 관측 자료는 별도의 대기질 측정 규정에 의해서 처리되었으며(<http://www.airkorea.or.kr/index>), 관측 장비에 이상이 있는 경우, 오염물질 농도가 너무 크거나 작은 경우, 오염물질 농도의 변화율이 너무 크거나 장기간 동일한 값이 측정되는 경우 등의 자료는 제외되었다. 관측 기간 중 7월 27일과 29일, 8월 2일과 8일에는 각각 0.5 mm, 16.5 mm, 31.0 mm, 0.5



Fig. 1. (a) Satellite image including observation locations (Google map and Naver map), and photos of (b) a thermometer and an anemovane and (c) ozone and nitrogen dioxide analyzers installed in the Seolleung park.

Table 1. Overview of instruments.

Location	Observation variable	Instrument	Precision
Urban park	O ₃	Teledyne T400	<0.5%
	NO ₂	Teledyne T200	0.5%
AQMS	O ₃	Kimoto OA-683	not available
	NO ₂	Kimoto NA-623	not available

mm의 비가 내렸다. 강수 조건에서는 여름철 일사가 강한 전형적인 기상 조건과는 현저히 다른 O₃과 NO₂ 농도의 일변화가 나타나므로, 본 연구에서는 강수가 없는 날의 관측 자료에 대해 O₃과 NO₂ 농도의 일변화를 분석하였다. 표 2에 각 관측 지점에서의 관측 개요를 정리하였다. 도심 공원에서 기온과 풍속은 10초 간격으로 관측되었으며, 비가 온 날의 자료를 제외한 모

Table 2. Overview of air temperature, wind speed, O₃, and NO₂ concentrations at the urban park, AWS, and AQMS locations.

Location	Observation variable	Total number of data	Number of used data	Data interval	Average*	Standard deviation*
Urban park	Air temperature	120960	86400	10 s	28.4°C	2.3°C
	Wind speed	120960	86400	10 s	0.1 m s ⁻¹	0.3 m s ⁻¹
	O ₃	2016	1389	10 min	32.3 ppb	25.0 ppb
	NO ₂	2016	806	10 min	12.5 ppb	11.0 ppb
AWS	Air temperature	2016	1439	10 min	28.9°C	2.3°C
	Wind speed	2016	1438	10 min	1.8 m s ⁻¹	0.8 m s ⁻¹
AQMS	O ₃	336	238	1 h	28.5 ppb	19.6 ppb
	NO ₂	336	238	1 h	22.9 ppb	10.9 ppb

*Average and standard deviation values of used data

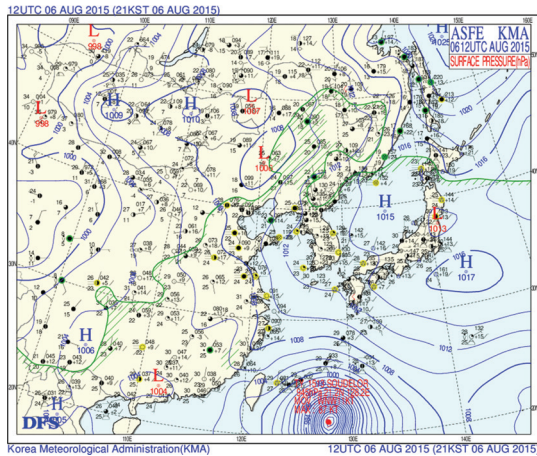


Fig. 2. Surface weather map at 21 KST on 6 August 2015.

든 자료(전체 자료 중 71%)를 사용하였다. 도심 공원의 O₃과 NO₂ 농도는 10분 간격으로 관측되었으며, 각각 전체 자료의 69%, 40%를 사용하였다. 강남 AWS와 강남구 AQMS의 관측 자료들은 각각 10분과 1시간 간격으로 관측되었으며, 비가 온 날의 자료를 제외한 대부분의 자료(전체 자료 중 71%)를 사용하였다.

그림 2는 관측 기간 중 대표적인 여름철 종관 기상장에 해당하는 8월 6일 21 KST 지상 일기도다. 한반도는 북태평양 고기압의 영향권에 있어 대체로 고온다습하고 맑은 날씨를 보였다. 전반적으로 종관 강제력이 강하지 않아 전형적인 여름철 도시 기상 및 대기질을 연구하는 데 적합하였다. 관측 기간 동안 강남 AWS의 주 풍향은 남서풍 계열이었으며(그림 3), 도심 공원의

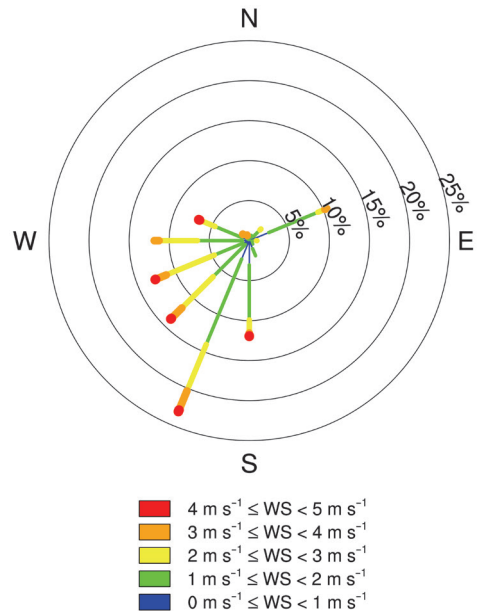


Fig. 3. Wind-rose diagram at Gangnam AWS during the observation period.

남서쪽에 위치한 테헤란로 등 주요 도로에서 배출되는 NO_x의 이류가 주된 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

3. 결과 및 고찰

관측 전 기간에 대해 강수 유무와 관계없이 평균한 기온과 풍속, O₃과 NO₂ 농도의 일변화를 그림 4에 나타

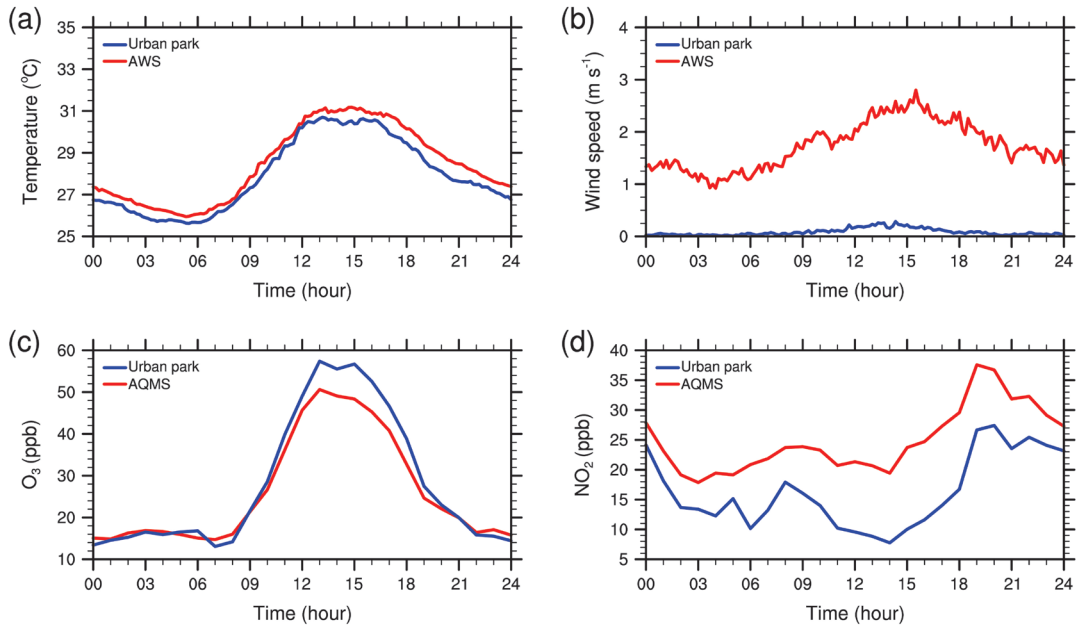


Fig. 4. Diurnal variations of average (a) air temperature, (b) wind speed, and (c) O₃ concentration from 27 July to 9 August and (d) average NO₂ concentration from 2 August to 9 August.

Table 3. Air temperature, wind speed, O₃, and NO₂ concentrations at the urban park, AWS, and AQMS locations during 09 to 21 KST.

Location	Average air temperature (°C)	Average wind speed (m s ⁻¹)	Average O ₃ (ppb)	Maximum O ₃ (ppb)	Average NO ₂ (ppb)	Minimum NO ₂ (ppb)
Urban park	29.4	0.1	39.8	117.8	15.1	2.9
AWS	30.0	2.1	—	—	—	—
AQMS	—	—	35.6	75.0	26.2	13.0

내었다. 기온과 풍속, O₃ 농도의 자료는 7월 27일부터 8월 9일까지의 자료를, NO₂ 농도의 자료는 8월 2일부터 8월 9일까지의 자료를 사용하였다. 기온과 풍속은 10분 평균값이며, O₃과 NO₂ 농도는 1시간 평균값이다. 도심 공원과 강남 AWS의 기온은 한낮(12~16 KST)에 일최고기온을, 일출 직후(05~06 KST)에 일최저기온을 보였다. 도심 공원과 강남 AWS의 풍속은 한낮에 높아지는 경향을 보였다. 도심 공원과 강남구 AQMS의 O₃ 농도는 전형적인 여름철 일변화와 유사하게 13 KST에 일최고농도를, 07 KST에 일최저농도를 보였다. 도심 공원과 강남구 AQMS의 NO₂ 농도는 출퇴근 시간대(08~09 KST, 19~20 KST)에 높았으며, 한낮에 낮아지는 경향을 보였다. 기온과 풍속, O₃과 NO₂ 농도

의 일변화 중에서 09~21 KST에 대한 각 관측 지점에서의 평균값을 표 3에 정리하였다. 도심 공원의 관측 지점이 숲 속에 위치하였기 때문에 햇빛과 바람의 차폐 현상이 나타나 도심 공원의 기온과 풍속은 강남 AWS보다 낮았다(각각 09~21 KST 평균 0.6°C와 2.0 m s⁻¹ 차이). 도심 공원의 O₃ 농도는 밤 시간에는 강남구 AQMS에서와 거의 비슷한 반면, 낮 시간에는 강남구 AQMS보다 높았다(09~21 KST 평균 4.2 ppb 차이). 도심 공원의 NO_x 농도가 주변 지역보다 낮아 NO에 의한 O₃ 분해가 적게 일어나기 때문으로 추정되며(Kuttler and Strassburger, 1999), 또한 도심 공원에서 배출된 VOCs에 의해 O₃ 생성이 주변 지역보다 더 활발히 일어날 가능성도 충분하다(Kim *et al.*, 2016a; Filella

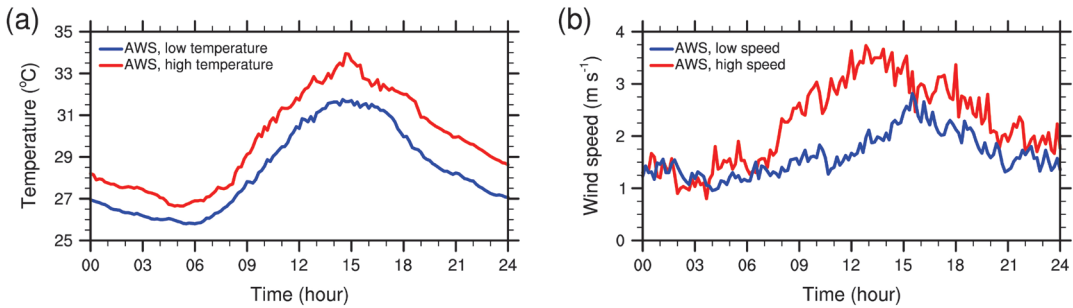


Fig. 5. Diurnal variations of (a) average air temperature during low/high temperature days and (b) average wind speed during low/high speed days.

Table 4. Air temperature and wind speed averaged over 09 to 21 KST during high/low temperature days and high/low speed days.

	High temperature	Low temperature	High speed	Low speed
Air temperature (°C)	31.7	30.1	30.5	30.8
Wind speed (m s ⁻¹)	2.0	2.3	2.9	1.9

and Peñuelas, 2006). 도심 공원의 NO₂ 농도는 전반적으로 강남구 AQMS보다 낮았으며, 낮 시간에 그 차이가 상대적으로 더 컸다(09~21 KST 평균 11.1 ppb 차이). 이는 도심 공원에서는 주거 지역에 위치한 강남구 AQMS보다 자동차 배출의 직접적인 영향을 덜 받기 때문이다(Cohen *et al.*, 2014).

도심 공원에서 O₃과 NO₂ 농도의 일변화가 기온이나 풍속에 따라 어떻게 달라지는지 분석하기 위해 먼저 강남 AWS의 일 평균 기온과 풍속을 기준으로 관측일을 분류하였다. 일 평균 기온이 29°C 이상인 날(7월 30일, 8월 5, 6, 7일)과 미만인 날(7월 28, 31일, 8월 1, 3, 4, 9일)을 각각 고온(high temperature)과 저온(low temperature)으로 구분하였다. 또한 일 평균 풍속이 2 m s⁻¹ 이상인 날(7월 30일, 8월 3, 4, 5일)과 미만인 날(7월 28, 31일, 8월 1, 6, 7, 9일)을 각각 높은 풍속(high speed)과 낮은 풍속(low speed)으로 구분하였다.

강남 AWS에서 기상 조건에 따라 분류한 기온과 풍속의 평균 일변화를 그림 5에, 09~21 KST 평균값을 표 4에 나타내었다. 높은 기온으로 분류된 날과 낮은 기온으로 분류된 날은 05~06 KST에 일최저기온을, 15 KST에 일최고기온을 보여 일변화 양상이 비슷하게 나타났다. 높은 기온으로 분류된 날의 기온은 낮은 기온으로 분류된 날보다 09~21 KST 평균 1.6°C 높았다.

반면, 높은 풍속으로 분류된 날과 낮은 풍속으로 분류된 날의 기온 차이(09~21 KST 평균 0.3°C)는 이보다 상당히 작았다. 각 시간 평균에 대한 표준편차는 높은 기온으로 분류된 날에 1.0°C, 낮은 기온으로 분류된 날에 0.6°C로, 09~21 KST 평균 기온 차이(1.6°C)보다 작다. 따라서 높은 기온으로 분류된 날과 낮은 기온으로 분류된 날의 차이가 각 분류된 날의 변동폭보다 대체적으로 크므로, 기온에 따른 관측 자료 분류는 유의미한 것으로 보인다. 높은 풍속으로 분류된 날과 낮은 풍속으로 분류된 날 모두 새벽에 풍속이 낮고 한낮에 풍속이 높았다. 하지만 높은 풍속으로 분류된 날은 풍속이 오전부터 증가하기 시작하여 12~13 KST에 최대 풍속이 나타난 반면, 낮은 풍속으로 분류된 날은 15~16 KST에 최대 풍속이 나타났다. 높은 풍속으로 분류된 날의 풍속은 낮은 풍속으로 분류된 날보다 09~21 KST 평균 1.0 m s⁻¹ 높은 반면, 높은 기온으로 분류된 날과 낮은 기온으로 분류된 날의 풍속 차이(09~21 KST 평균 0.3 m s⁻¹)는 이보다 상당히 작았다. 각 시간 평균에 대한 표준편차는 높은 풍속으로 분류된 날에 0.5 m s⁻¹, 낮은 풍속으로 분류된 날에 0.6 m s⁻¹로 09~21 KST 평균 풍속 차이(1.0 m s⁻¹)보다 작다. 따라서 높은 풍속으로 분류된 날과 낮은 풍속으로 분류된 날의 차이가 각 분류된 날의 변동폭보다 대체적으로 크

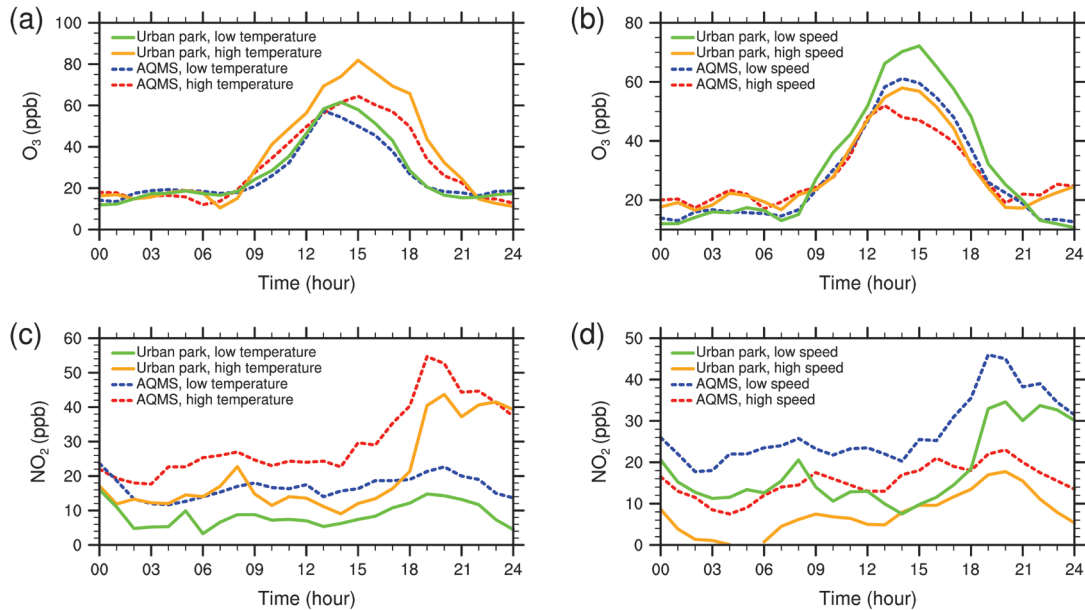


Fig. 6. Diurnal variations of average O₃ concentration during (a) low/high temperature days and (b) low/high speed days, and average NO₂ concentration during (c) low/high temperature days and (d) low/high speed days.

Table 5. O₃ and NO₂ concentrations analyzed over 09 to 21 KST at the urban park and AQMS locations during high/low temperature days and high/low speed days.

Location	Observation variable	High temperature	Low temperature	High speed	Low speed
Urban park	Average O ₃ (ppb)	54.7	37.5	37.9	47.2
	Maximum O ₃ (ppb)	73.7	72.5	56.3	72.5
	Average NO ₂ (ppb)	19.9	9.5	10.2	16.9
	Minimum NO ₂ (ppb)	13.0	3.1	3.1	13.0
AQMS	Average O ₃ (ppb)	45.1	34.8	35.7	40.2
	Maximum O ₃ (ppb)	59.0	73.0	59.0	73.0
	Average NO ₂ (ppb)	33.0	18.1	17.8	29.3
	Minimum NO ₂ (ppb)	24.0	13.0	13.0	24.0

로, 풍속에 따른 관측 자료 분류는 유의미한 것으로 보인다. 또한 각 기상 조건에 따라 분류된 자료는 해당 기상 조건의 차이는 크지만 다른 기상 조건의 차이는 작기 때문에 이러한 분류를 통해 기온에 따른 영향과 풍속에 따른 영향을 어느 정도 독립적으로 분석할 수 있다고 판단된다.

각 기상 조건의 분류에 따라 평균한 O₃과 NO₂ 농도의 일변화를 그림 6에 나타내었다. 또한 각 기상 조건에 따라 분류한 O₃과 NO₂ 농도에 대해 각 관측 지점에서의 09~21 KST 평균 O₃과 NO₂ 농도를 표 5에 나타

내었다. O₃는 관측 지점과 기상 조건에 관계없이 12~15 KST에 일최대농도를, 밤 또는 이른 아침 시간에 일최저농도를 보였다. NO₂는 관측 지점이나 기상 조건에 관계없이 퇴근 시간대(19~20 KST)에 높은 농도를 보였다. 한편, 출근 시간대의 높은 농도와 한낮의 낮은 농도는 관측 지점이나 기상 조건에 따라 나타나지 않기도 하였다. 도심 공원의 O₃ 농도는 밤 시간에는 기상 조건에 관계없이 모두 비슷했지만, 낮 시간에는 기온이 높고 풍속이 낮은 조건에서 더 높았다. 이는 기온이 높을 때 낮 시간의 광화학 반응으로 인한 O₃ 생성이 활발하

고(Tu *et al.*, 2007) 풍속이 낮을 때 주변 지역으로의 분산이 적기 때문이다(Oh and Kim, 2002). 기상 조건 중에서 기온에 따른 차이(09~21 KST 평균 17.2 ppb)가 풍속에 따른 차이(09~21 KST 평균 9.3 ppb)보다 더 컸다. 도심 공원의 09~21 KST 최대 O₃ 농도도 낮 시간에 기온이 높고 풍속이 낮은 때에 더 높은 경향을 보였으나 그 차이는 반대로 기온에 따른 차이(1.2 ppb)보다 풍속에 따른 차이(16.2 ppb)가 더 크게 나타났다. 도심 공원의 NO₂ 농도도 O₃ 농도와 마찬가지로 기온이 높고 풍속이 낮은 조건에서 전반적으로 더 높았다. 풍속이 낮을 때 NO₂ 농도가 더 높은 현상은 주변 지역으로의 분산이 적기 때문이다(Grinn-Gofroń *et al.*, 2011). 기상 조건 중에서 기온에 따른 차이(09~21 KST 평균 10.4

ppb)가 풍속에 따른 차이(09~21 KST 평균 6.7 ppb)보다 더 컸다. 강남구 AQMS의 결과를 도심 공원의 결과와 비교해보면 O₃ 농도의 일변화는 도심 공원과 같은 경향을 보였으나 09~21 KST 최대 O₃ 농도는 도심 공원에서와는 다르게 기온이 낮을 때 더 높게 나타났다. 한편, 강남구 AQMS의 NO₂ 농도는 일변화와 최소 농도 모두 도심 공원과 비슷한 경향을 나타냈다. 이를 통해, 주변 환경에 따라 최대 O₃ 농도에 미치는 기상 조건의 영향이 크게 달라짐을 알 수 있다.

평균 기온과 평균 풍속에 따른 최대 O₃ 농도와 최저 NO₂ 농도의 산점도(scatter plot)와 선형회귀분석을 통해 구한 추세선을 그림 7에 나타내었다. 평균 기온과 풍속, 최대 O₃ 농도와 최저 NO₂ 농도 모두 도심 공원과

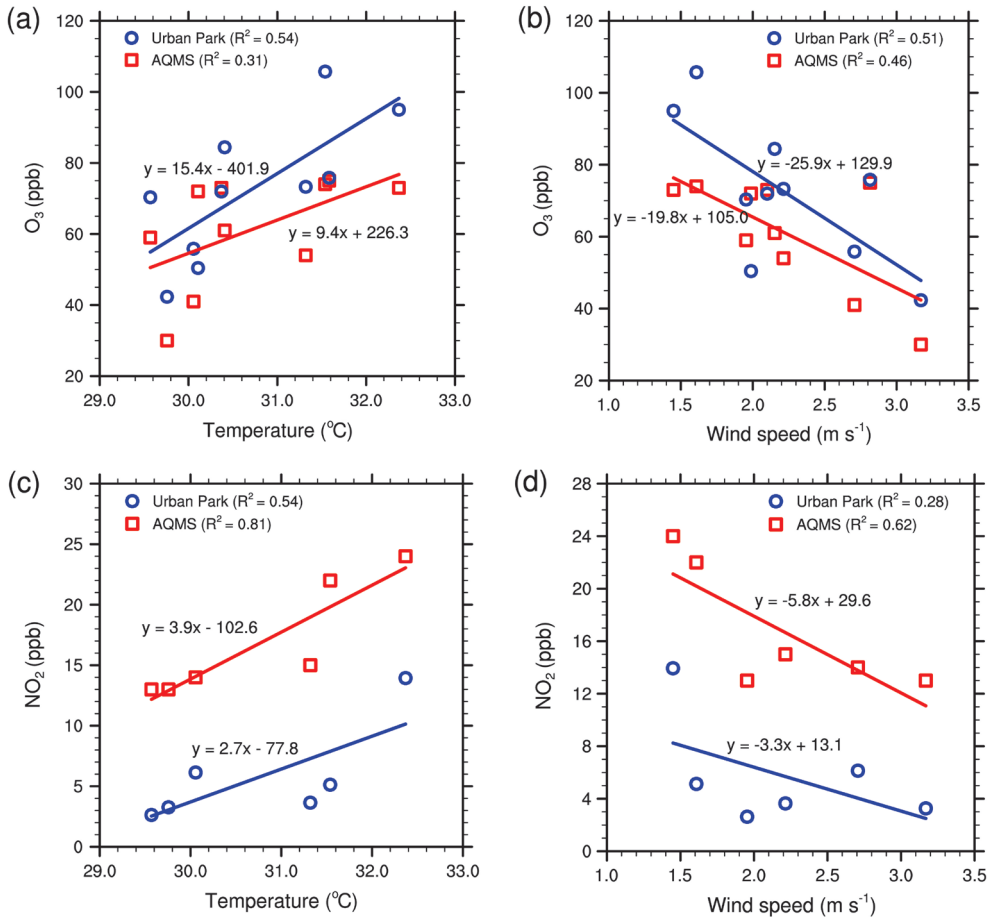


Fig. 7. Scatter plots of maximum O₃ concentrations versus (a) average air temperatures and (b) average wind speeds and minimum NO₂ concentrations versus (c) average air temperatures and (d) average wind speeds.

강남구 AQMS 자료의 차이가 큰 09~21 KST를 대상으로 하였다. 앞선 분석과 같이 최대 O_3 농도는 기온이 증가할수록, 풍속이 감소할수록 높아지는 경향을 보였다. 기온과 풍속에 따른 최대 O_3 농도의 변화 폭은 강남구 AQMS보다 도심 공원에서 더 컸다. 평균 기온이 증가함에 따라 도심 공원의 최대 O_3 농도는 강남구 AQMS의 최대 O_3 농도보다 더 크게 증가하였으며, 평균 풍속이 증가함에 따라 도심 공원의 최대 O_3 농도는 강남구 AQMS의 최대 O_3 농도보다 더 크게 감소하였다. 최저 NO_2 농도도 최대 O_3 농도와 같이 기온이 증가할수록, 풍속이 감소할수록 높아지는 경향을 보였다. 다만, 기온과 풍속에 따른 최저 NO_2 농도의 변화 폭은 도심 공원에서 강남구 AQMS에서 더 컸다. 평균 기온이 증가함에 따라 강남구 AQMS의 최저 NO_2 농도는 도심 공원의 최저 NO_2 농도보다 더 크게 증가하였으며, 평균 풍속이 증가함에 따라 강남구 AQMS의 최저 NO_2 농도는 도심 공원의 최저 NO_2 농도보다 더 크게 감소하였다.

4. 결 론

본 연구는 여름철 도심 공원과 인근 도심 지역의 O_3 과 NO_2 농도의 일변화 차이를 연구하였으며, 기온과 풍속이 각 관측 지점에서의 O_3 과 NO_2 농도의 일변화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 선릉공원(도심 공원)에서 2015년 7월 27일부터 8월 9일까지 O_3 과 NO_2 농도를 관측하였고 이를 강남구 AQMS 자료와 비교하였다. 전 기간 평균한 O_3 농도의 일변화에서는 낮 시간에 도심 공원의 O_3 농도가 강남구 AQMS의 O_3 농도보다 더 높았지만, 밤 시간에는 큰 차이를 보이지 않았다. 전 기간 평균한 NO_2 농도의 일변화는 전반적으로 도심 공원에서 강남구 AQMS보다 더 낮은 모습을 보였다. 이는 도심 공원이 자동차에서 배출되는 NO_x 의 영향을 더 적게 받으며, 이로 인해 O_3 의 분해가 적게 일어나기 때문이다. 관측 자료를 기온과 풍속에 따라 분류한 결과, O_3 농도는 낮 시간에는 기온이 높고 풍속이 낮은 조건에서 더 높았지만, 밤 시간에는 기상 조건에 따른 차이가 작았다. 이는 기온이 높을수록 O_3 생성이 활발해지며, 풍속이 낮을수록 주변 지역으로의 분산이 줄어들기 때문이다. NO_2 농도도 O_3 농도와 마

찬가지로 기온이 높고 풍속이 낮은 조건에서 더 높았다. 평균 기온과 평균 풍속, 최대 O_3 농도와 최저 NO_2 농도의 관계를 나타낸 산점도에서 평균 기온과 평균 풍속 변화에 따른 최대 O_3 농도 변화는 강남구 AQMS보다 도심 공원에서 더 컸다. 반면, 평균 기온과 평균 풍속 변화에 따른 최저 NO_2 농도 변화는 도심 공원에서 강남구 AQMS에서 더 컸다.

도심 공원의 오염물질 농도의 일변화는 본 연구에서 분석한 기온과 풍속 조건 이외에도 공원 입지 조건, 면적, 식생 등 여러 가지 요인에 의해 달라질 수 있다. 또한 계절적 차이에 따른 오염물질 농도의 일변화의 차이도 연구가 필요하다. 도심 공원과 인근 지역 등 여러 지점에서의 장기적인 대기오염물질 모니터링이 뒷받침된다면 도심 공원의 오염물질 농도 변화에 대한 지속적인 연구가 활발하게 이루어질 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자 지원사업(과제번호 2016R1A2B2013549) 및 기상청 국립기상과학원 주요사업 “차세대 도시농림 융합스마트 기상서비스 개발”의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Arya, S.P. (1999) *Air Pollution Meteorology and Dispersion*, Oxford University Press, U.S.A., 310 pp.
- Clapp, L.J. and M.E. Jenkin (2001) Analysis of the relationship between ambient levels of O_3 , NO_2 and NO as a function of NO_x in the UK, *Atmospheric Environment*, 35(36), 6391-6405.
- Cohen, P., O. Potchter, and I. Schnell (2014) The impact of an urban park on air pollution and noise levels in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel, *Environmental Pollution*, 195, 73-83.
- Costabile, F. and I. Allegrini (2007) Measurements and analyses of nitrogen oxides and ozone in the yard and on the roof of a street-canyon in Suzhou, *Atmospheric Environment*, 41(31), 6637-6647.
- Dueñas, C., M.C. Fernández, S. Cañete, J. Carretero, and E.

- Liger (2002) Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast, *Science of the Total Environment*, 299(1-3), 97-113.
- Elminir, H.K. (2005) Dependence of urban air pollutants on meteorology, *Science of the Total Environment*, 350(1-3), 225-237.
- Filella, I. and J. Peñuelas (2006) Daily, weekly, and seasonal relationships among VOCs, NO_x and O₃ in a semi-urban area near Barcelona, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 54(2), 189-201.
- Finlayson-Pitts, B.J. and N.J. Jr. Pitts (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*, John Wiley & Sons, U. S. A., 1098 pp.
- Freiman, M.T., N. Hirshel, and D.M. Broday (2006) Urban-scale variability of ambient particulate matter attributes, *Atmospheric Environment*, 40(29), 5670-5684.
- Geng, F., X. Tie, J. Xu, G. Zhou, L. Peng, W. Gao, X. Tang, and C. Zhao (2008) Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China, *Atmospheric Environment*, 42(29), 6873-6883.
- Grinn-Gofroń, A., A. Strzelczak, and T. Wolski (2011) The relationships between air pollutants, meteorological parameters and concentration of airborne fungal spores, *Environmental Pollution*, 159(2), 602-608.
- Gunthe, S.S., G. Beig, and L.K. Sahu (1994) Study of relationship between daily maxima in ozone and temperature in an urban site in India, *Current Science*, 110(10), 1994-1999.
- Hassan, I.A., J.M. Basahi, I.M. Ismail, and T.M. Haebeebullah (2013) Spatial distribution and temporal variation in ambient ozone and its associated NO_x in the atmosphere of Jeddah City, Saudi Arabia, *Aerosol and Air Quality Research*, 13(6), 1712-1722.
- Kim, D.-S., J. Jeong, and J. Ahn (2016a) Characteristics in atmospheric chemistry between NO, NO₂ and O₃ at an urban site during MAPS (Megacity Air Pollution Study)-Seoul, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 422-434. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.S., Y.J. Choi, K.B. Lee, and S.D. Kim (2016b) Relation with activity of road mobile source and roadside nitrogen oxide concentration, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 9-20. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P. and M.J. Yeo (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 369-377. (in Korean with English abstract)
- Konarska, J., B. Holmer, F. Lindberg, and S. Thorsson (2016) Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city, *International Journal of Climatology*, 36(5), 2379-2395.
- Kuttler, W. and A. Strassburger (1999) Air quality measurements in urban green areas - a case study, *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 4101-4108.
- Kwak, K.-H., S.-H. Lee, J.M. Seo, S.-B. Park, and J.-J. Baik (2016) Relationship between rooftop and on-road concentrations of traffic-related pollutants in a busy street canyon: Ambient wind effects, *Environmental Pollution*, 208, 185-197.
- Lal, S., M. Naja, and B.H. Subbaraya (2000) Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India, *Atmospheric Environment*, 34(17), 2713-2724.
- Lin, S., X. Liu, L.H. Le, and S.-A. Hwang (2008) Chronic exposure to ambient ozone and asthma hospital admissions among children, *Environmental Health Perspectives*, 116(12), 1725-1730.
- Mazzeo, N.A., L.E. Venegas, and H. Choren (2005) Analysis of NO, NO₂, O₃ and NO_x concentrations measured at a green area of Buenos Aires city during winter-time, *Atmospheric Environment*, 39(17), 3055-3068.
- McDonald, A.G., W.J. Bealey, D. Fowler, U. Dragosits, U. Skiba, R.I. Smith, R.G. Donovan, H.E. Brett, C.N. Hewitt, and E. Nemitz (2007) Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations, *Atmospheric Environment*, 41(38), 8455-8467.
- Nguyen, H.T. and K.-H. Kim (2006) Comparison of spatio-temporal distribution patterns of NO₂ between four different types of air quality monitoring stations, *Chemosphere*, 65(2), 201-212.
- Oh, I.-B. and Y.-K. Kim (2002) Surface ozone in the major cities of Korea : Trends, diurnal and seasonal variations, and horizontal distributions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(4), 253-264. (in Korean with English abstract)
- Pandey, S.K., K.-H. Kim, S.-Y. Chung, S.-J. Cho, M.-Y. Kim, and Z.-H. Shon (2008) Long-term study of NO_x behavior at urban roadside and background locations in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 42(4), 607-622.

Raddatz, R.L. and J.D. Cummine (2001) Temporal surface ozone patterns in urban Manitoba, Canada, *Boundary-Layer Meteorology*, 99(3), 411-428.

Satsangi, G.S., A. Lakhani, P.R. Kulshrestha, and A. Taneja (2004) Seasonal and diurnal variation of surface ozone and a preliminary analysis of exceedance of

its critical levels at a semi-arid site in India, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 47(3), 271-286.

Tu, J., Z.-G. Xia, H.S. Wang, and W.Q. Li (2007) Temporal variations in surface ozone and its precursors and meteorological effects at an urban site in China, *Atmospheric Research*, 85(3-4), 310-337.