

관악산 봄철 야간의 고농도 오존 사례 연구

대기환경연구부 대기측정관리팀

안미진 · 권은한 · 조성호 · 이순희 · 노승근 · 조석주 · 어수미 · 정 권

Study of Springtime Nocturnal High Concentration Ozone Events in Mt. Gwanak

*Department of Atmospheric Environmental Research,
Atmospheric Measurement and Management Team*

**Mi-jin Ahn, Eun-han Kwon, Seong-ho Cho, Soon-hee Lee,
Seung-keun No, Seog-ju Cho, Soo-mi Eo and Kweon Jung**

Abstract

This study investigated the cause of springtime nocturnal ozone enhancement on Mt. Gwanak—whose altitude of 615 m is higher than the other air quality monitoring stations in Seoul—from 2012 to 2014. The ozone concentration on Mt. Gwanak had been higher than those in the urban and background stations, particularly in the nighttime, during spring. The concentrations of springtime nocturnal ozone on Mt. Gwanak were mostly distributed from 30~70 ppb, which was 88% of the total, with an average of 55 ppb. The high springtime nocturnal ozone events over 90 ppb occurred on 40 days during the 3 years, covering 14.5% of the springtime. These were influenced by wind speed rather than wind direction. However, they were not strongly related to the origin of the aerosol, according to the NOAA HYSPLIT backward trajectory modeling. These results showed that the cause of springtime nocturnal ozone enhancement on Mt. Gwanak could have been associated with not only long-range transport, but also stratosphere-troposphere exchange of ozone.

Key words : nocturnal ozone enhancement, backward trajectory, long-range transport,
troposphere-stratosphere exchange of ozone

서 론

서울시 대기오염측정소 중 관악산 측정소는 관악산 정상에 위치하여 배경농도 측정망임과 동시에 황사 등 장거리 이동 오염물질의 모니터링에 적합한 해발고도 615 m의 높은 위치에 있다. 관악산 측정소에서 측정되는 대기오염물질은 서울지역의 배경농도로서의 특징을 가지며, 또한 수직적인 특성이 있어 도심의 지상에 위치한 대기오염측정소와 다른 거동 특성을 나타낼 수 있다. 그 중 하나가 야간에 고농도 오존이 종종 발생한다는 점이다.

야간 오존농도 상승의 주요 원인으로는 대기안정층 파괴와 결부되어 나타나는 상층 오존의 연직 혼합과정을 들 수 있다(1). Chan et al.(2)은 봄철에 성층권 오존이 상부 대류권으로부터 침투하여 점차 하부 대류권으로 이동하여 높은 농도를 나타낸다고 하였다. 성층권 하층부와 대류권 상층부(대류권계면)의 제트기류가 존재하는 위치에서 대기의 섭동에 의한 대류권계면 접합을 통해 성층권에서 다량의 오존이 대류권으로 유입되는 오존교환을 말하는 것으로 이를 증명하기 위한 시도들이 있었다(3, 4). 또한 봄철 황사기간 동안 상층에 제트기류가 발달하고 있으므로 성층권-대류권 또는 자유대기-대기경계층에서 오존교환이 가능하며 장거리 수송 역시 가능하다(6).

김유근 등(4)은 매주 1회 간격으로 띄우는 오존존대 자료를 이용하여 포항지역 각 고도별 오존농도 및 오존전량의 분포 특성을 분석한 바 있으나, 오존의 수직적인 분포에 관한 국내 연구는 광화학오염과 관련한 지상오존에 대한 연구에 비해 상대적으로 적다. 또한 주로 오존존대를 이용하여 관측함에 따라 도심지역 관측은 어려울 뿐만 아니라 연속적인 자료 축적이 쉽지 않다. 따라서 수직적인 분포에 대한 연구를 위해 높은 고도에 위치하고 실시간 관측이 이뤄지는 관악산의 오존 농도에 대한 연구가 대안이 될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 2012년에서 2014년까지 3년간 관악산에서 관측한 오존농도 자료를 중심으로 시간 및 계절적 분포 특성을 파악하고 야간 고농도 오존 발생 원인을 분석하고자 기상자료 및 역궤적 분석을 실시하여 기원 파악과 오존 교환 가능성을

진단하였다.

연구방법

본 연구에 사용된 오존 등 대기오염자료와 풍향, 풍속 자료는 최근 3년간(2012~2014년) 관악산 및 서울시 도시대기오염 측정소에서 수집된 시간별 자료이다. 모든 자료는 서울시보건환경연구원 에서 자료검증을 거친 것이며 유효자료처리비율은 75% 이상이다(환경부, 2011).

관악산 오존농도 분포 특성을 파악하고자 시간별, 계절별 빈도 분석을 실시하였으며, 대기오염물질 기원에 분포 특성을 분석하고자 풍향 및 풍속 그리고 유입 기류를 고려하였다.

기류 분석은 미국 NOAA/ARL(National Oceanic and Atmosphere Administration/Air Research lab.)의 HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 역궤적모델을 이용하였다. 사용된 입력자료는 GDAS(Global Data Assimilation System) 자료이며 연직운동은 등온위면에서의 계산 방법을 선택하였다. 궤적 계산은 서울(37.05°N, 127.01°E) 상공 1500 m에서 출발시켰으며, 모사시간은 96시간으로 설정하였다. 유입기류는 그림 1과 같이 총 5개의 경로로 분류하였다(① 중국 만주 등 북동부지역, ② 중국 북경, 심양 등 지역 경유, ③ 중국 상해 등 남부지역 경유, ④ 동해, 일본, 제주 등 남쪽 먼 바다에서 유입, ⑤ 지역 정체).

야간 고농도 오존 현상을 구체적으로 파악하기 위해 고농도 사례일을 분류하였는데 시간대는 2100~0600LST로, 농도는 최대 시간농도 90 ppb 이상으로 한정하였다.

연구결과 및 고찰

1. 관악산 오존농도 분포 특성

관악산의 오존농도 분포 특성을 살펴보고자, 최근 3년간(2012~2014년) 지상 청정지역인 북한산과 도심지역인 종로구의 오존농도를 비교하였다.

평균농도는 관악산이 가장 높고 북한산, 종로 순이었다. 이는 오염된 대도시 오존의 경우 광화학반응에 의해 주간 최고농도는 높으나 1차 대기 오염물질과의 반응에 의해 파괴되어 야간 농도가 청정지역보다 낮은 특성을 반영한다(8).

표 1은 2012년에서 2014년까지 지점별 계절별 오존농도를 나타낸다. 관악산의 오존농도는 특히 봄에 높고, 여름, 가을, 겨울 순으로 높았다. 북한산과 종로도 계절별 순위는 같았으나 농도 차이는 관악산에서 월등히 컸다. 봄과 여름의 평균농도차가 북한산과 종로에서는 약 1 ppb 이었으나, 관악산에서는 6 ppb이었다.

그림 2는 지점별 월별 오존농도 분포를 나타낸다. 북한산과 종로에 비해 관악산 오존의 평균농도가 높았으며 월별 변동율도 컸다. 관악산의 월별 오존농도 분포 경향은 겨울에서 봄으로 가면서 증가하기 시작하여 4, 5, 6월에 고농도를 보이다가(5월에 최대) 7~9월에 일정 농도를 유지, 이후 감소하였다.

그림 3은 지점별 오존의 일중 시간변화를 나타낸다. 종로와 북한산에서는 도시지역 오존의 일반적인 일중 시간변화 경향을 보이며 광화학반응이 활발할 것으로 예상되는 주간에 높고 야간에 낮았다. 관악산에서는 타지점에 비해 뚜렷한 일중 변화를 보이지 않았는데, 야간 시간대의 오존농도가 상대적으로 높았기 때문이다.

그림 4는 관악산의 계절별 오존의 일중 시간변화를 나타낸다. 야간 고농도 오존 발생이 다른 계절에 비해 봄철에 뚜렷하였다. 봄철에 야간 오존농도가 50 ppb 이상의 높은 분포를 보이면서 관악산 자체의 주간농도와도 차이가 적었다.

2. 봄철 야간 오존농도 분포 특성

그림 5는 관악산에서 봄철 야간 시간대의 풍계와 오존농도를 나타낸다. 북풍계열의 풍향에서 높은 오존 농도를 나타냈고 이때 풍속이 월등히 강하였다. 나머지 풍향에서도 고르게 높은 오존 농도를 보였다. 야간의 강한 서풍이 서해상으로부터

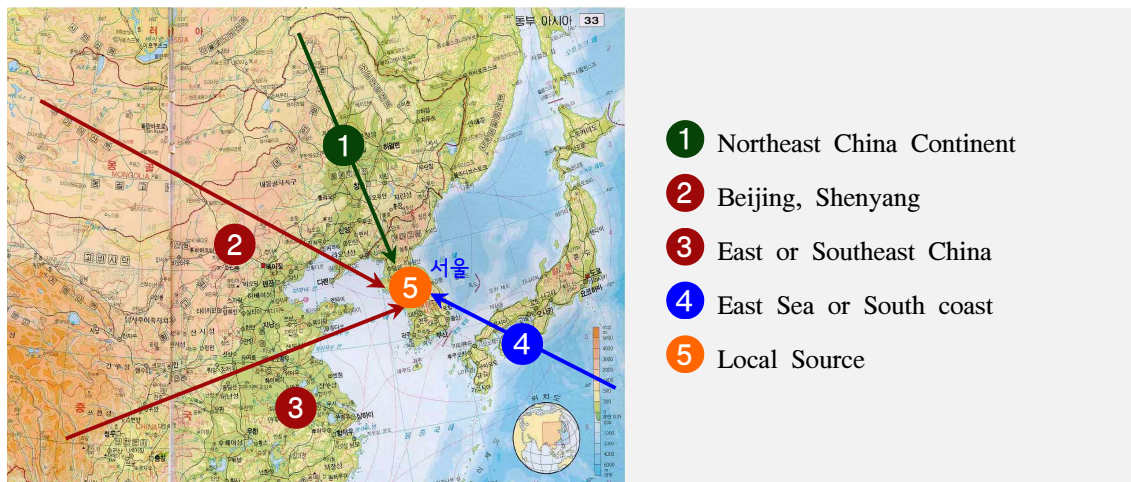


Fig. 1. Five trajectory patterns inflowing to Seoul.

Table 1. Seasonal distribution of ozone concentration(ppb) in Mt. Gwanak, Mt. Bukhan, and Jongro during 2012~2014

	Mean	Spring	Summer	Fall	Winter
Mt. Gwanak	42 ± 20	54 ± 19	48 ± 23	38 ± 15	27 ± 11
Mt. Bukhan	28 ± 15	33 ± 14	32 ± 19	27 ± 14	22 ± 10
Jongro	22 ± 18	29 ± 18	28 ± 20	16 ± 13	13 ± 10

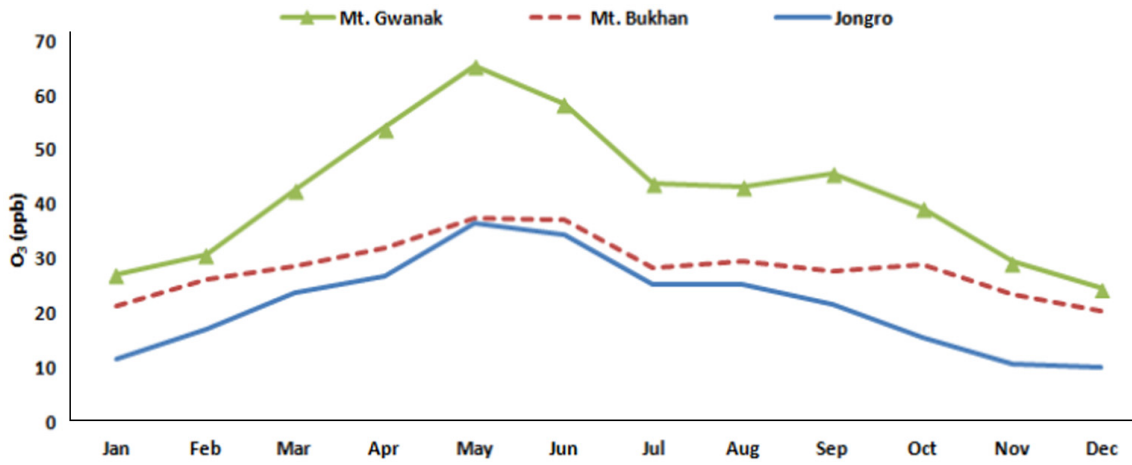


Fig. 2. Monthly variation of ozone in Mt. Gwanak, Mt. Bukhan, and Jongro during 2012~2014.

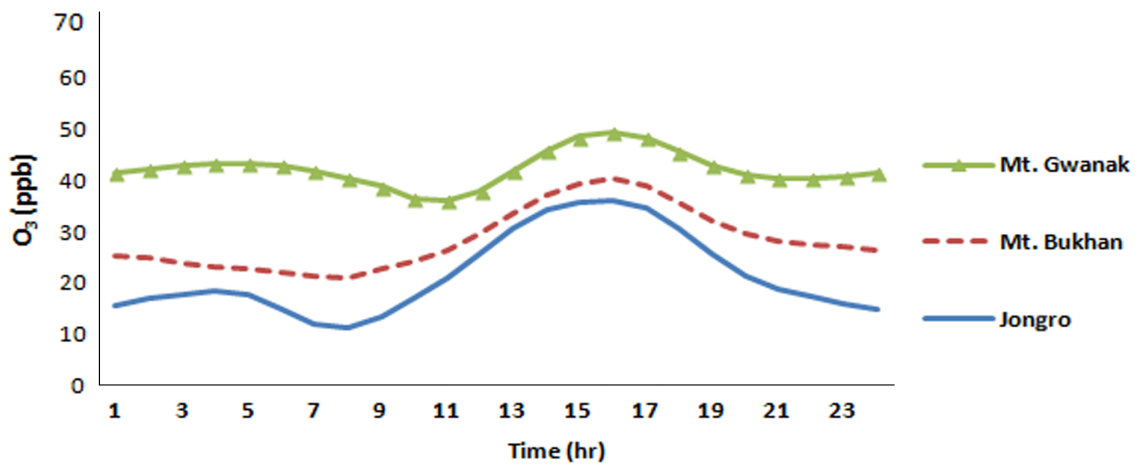


Fig. 3. Diurnal variation of ozone in Mt. Gwanak, Mt. Bukhan, and Jongro during 2012~2014.

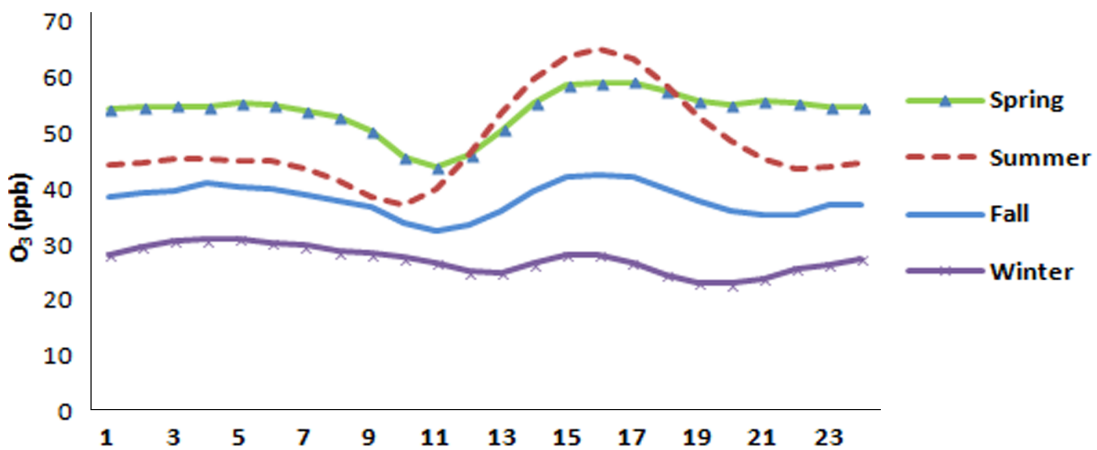


Fig. 4. Diurnal variation of ozone in Mt. Gwanak of different seasons during 2012~2014.

상당 수준의 배경 오존을 서울지역으로 유입시키는 역할을 한다는 연구(9)와 달리, 관악산에서는 풍향보다 풍속의 영향이 더 크게 작용했던 것으로 추정된다.

그림 6은 관악산의 봄철 야간 오존 평균농도 값의 발생 빈도분포를 나타낸다. 평균농도는 55 ppb였으며, 30~70 ppb가 가장 많았고(88%), 100 ppb 이상도 출현하였다. 광화학반응이 일어나지 않는 야간에 이러한 고농도 오존이 나타나는 것은 주간에 광화학반응에 의해 생성된 오존이 잔류하였거나 수직 혹은 수평적인 오존 수송이 진행되었

을 가능성을 보여준다.

3. 기류 유입경로에 따른 분류

관악산에서 야간 오존 고농도 현상이 두드러졌던 봄철에 오존 오염원 이동 경로를 파악하고자 NOAA/ARL의 HYSPLIT 역궤적 모델링을 수행하였다. 유입기류 추적 결과를 그림 1과 같이 5개의 경로로 분류하였다(① 중국 만주 등 북동부지역, ② 중국 북경, 심양 등 지역 경유, ③ 중국 상해 등 남부지역 경유, ④ 동해, 일본, 제주 등 남쪽 먼 바다에서 유입, ⑤지역 정체).

표 2는 분류한 기류 유입경로에 따른 관악산의 봄철 야간 오존 최고농도 및 풍속과 종로의 미세먼지농도를 나타낸다. 기류 유입경로와 종로의 미세먼지농도는 ② 베이징/심양 및 ③ 중국 상해 등 남부지역을 경유할 때와 ⑤ 지역오염원의 정체 시 높아지는 일반적인 경향을 나타냈다. 그러나 관악산의 야간 오존농도는 이와 상이한 결과를 보였다. ③ 중국 상해 등 남부지역을 경유할 때는 일반적인 경향과 유사하여 관악산 오존농도와 종로의 미세먼지가 높았으나, 관악산에서는 청정한 기류인 ④ 동해/남해에서 기류 유입 시에도 야간 오존농도가 높았던 것이다. 이는 오존의 수평이동 뿐 아니라 다른 경로로의 오존 유입 가능성을 나타낸다. 즉 관악산의 야간 오존 농도가 높아지는 원인이 장거리 이동 가능성 외에도 다른 요인(직접 증거는 없으나 성층권으로부터 오존 교환 등)이 있음을 추정하게 한다. 향후 성층권-대류권간 기단 교환을 추정할 수 있는 베릴륨(⁷Be)(10) 연구가 추가된다면 유익할 것이다.

4. 봄철 야간 고농도 오존 사례일 분류

봄철 야간 고농도 오존 현상을 구체적으로 파악하기 위해 2100~0600LST 시간 중 오존 시간최고농도 90 ppb(대기환경지수의 '나쁨' 기준)를 초과하는 40일(총 276일 중 14.5%)을 고농도 사례일로 선정하였다. 그 결과 5월에 고농도 사례가 집중적으로 발생하여 총 40일 중 29일(72.5%)이었다.

고농도 사례를 다음과 같이 크게 두 가지로 분류할 수 있었다.

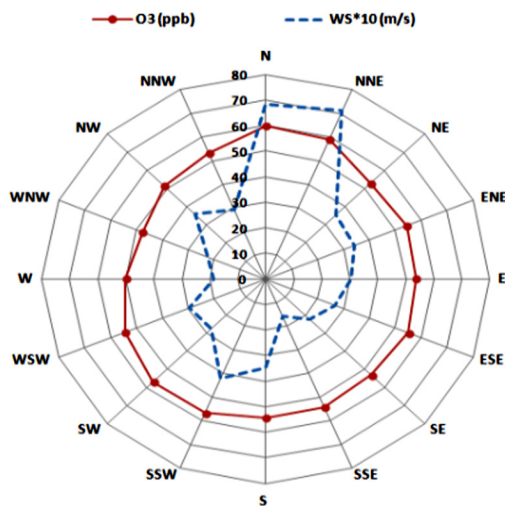


Fig. 5. Nocturnal ozone distribution and wind speed for wind directions in Mt. Gwanak during the spring, 2012~2014.

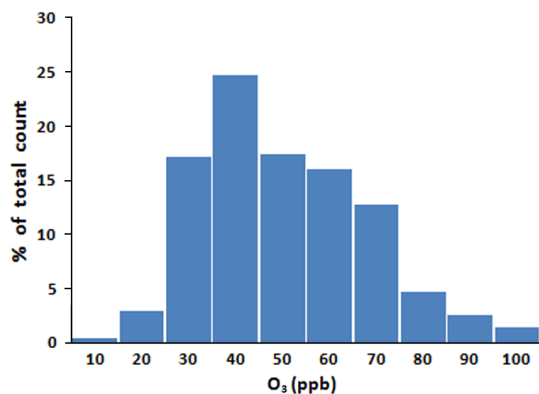


Fig. 6. Frequency distribution of nocturnal ozone in Mt. Gwanak during the spring, 2012~2014.

Table 2. Trajectory patterns for maximum nocturn ozone & wind speed in Mt. Gwanak and PM-10 in Jongro

Origin of trajectory	% of total trajectories	Average of maximum nocturn Ozone on Mt. Gwanak(ppb)	Average of maximum nocturn Wind Speed on Mt. Gwanak(m/s)	Average of maximum nocturn PM-10 in Jongro($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
① Northeast China Continent	17.0	56.5	5.8	63.2
② Beijing, Shenyang	42.0	66.9	7.6	80.8
③ East or southeast China	19.2	80.5	7.7	98.8
④ East Sea or south coast	13.0	67.3	4.6	53.6
⑤ Local	8.7	71.3	5.5	83.6

첫번째는 야간에 도시대기를 포함한 관악산에 고농도의 오존이 출현하는 것으로 총 15일(37.5%) 발생하였다. 그 중 2013년 5월 11일~5월 13일에 걸쳐 발생한 사례를 보면, 관악산 뿐 아니라 서울 도시대기에서도 야간 오존농도가 올라갔으며(농도는 관악산보다 높지 않음) 3일간에 걸쳐 유지되었다. 이 기간 중 도시대기의 야간 농도가 주간 농도보다 높아지기도 하였다. 주풍향은 관악산은 북동풍, 서울 도시대기는 남서풍이었으며, 풍속은 관악산 최대 16.0 m/s로 세었으나, 도시대기에서는 유의하게 세진 않았다.

둘째는 주간에 광화학반응에 의해 상승한 오존농도가 야간에 도시대기에선 감소되나, 관악산에선 유지 혹은 상승하는 경우로 총 25일(62.5%) 발생하였다. 즉 주간에 생성된 고농도 오존의 잔류 현상이다. 그러나 이 경우도 관악산에서 봄철 야간에 지속적으로 유지되는 50~60 ppb의 오존농도가 기본이 되었기 때문이다.

이러한 고농도 사례일의 대기유입경로에서는 뚜렷한 경향이 보이진 않았으며 이는 앞 절 3. 기류 유입경로에 따른 분류에서의 결과와 유사하였다.

관악산의 오존농도는 도심 및 타 청정지역보다 지속적으로 높았는데, 봄철 야간에 고농도 현상이 두드러졌다. 야간 시간대의 관악산 오존농도는 다른 지점보다 높을 뿐 아니라 관악산 자체의 주간 농도와 견주어도 차이가 적었다. 관악산 봄철 야간 오존 평균농도는 55 ppb이었으며, 30~70 ppb에 가장 많이 88% 분포하였다. 봄철 야간에 시간 최고농도 90 ppb 이상이 발생한 사례일은 3년간 총 40일로 봄철의 14.5%를 차지하였다. 관악산에서 고농도 오존 발생시 풍향보다는 풍속의 영향이 강하였으며, 역계적 모델링에 의한 대기유입경로와도 큰 상관성을 보이지 않았다. 위 결과들은 관악산 봄철 오존 고농도 출현 원인이 수평적인 이동 뿐 아니라 수직적인 이동, 즉 성층권으로부터의 오존교환 가능성을 시사한다. 또한 주간에 광화학반응에 의해 생성된 오존의 잔류 영향도 추정된다.

오존의 수직적 혹은 수평적 수송에 대한 정확한 해석을 위해서 베릴륨(^7Be)과 화학적 성분 자료, 연직적인 기상 정보가 축적되어야 하며 아울러 수송모델링 연구가 병행되어야 할 것이다.

결 론

본 연구에서는 서울시의 타 측정소보다 높은 고도에 위치한 관악산의 최근 3년간(2012~2014년) 오존농도 분포 특성을 파악하고 고농도 오존 발생 원인을 분석하였다.

참고문헌

- 오인보, 김유근 : 봄철 서울지역 야간 오존농도 상승에 미치는 장거리 수송의 영향, 한국 대기환경학회지, 20(4):503~514, 2004.
- Chan, LY, Liu, HY, Lam, KS, Wang, T,

- Oltmans, SJ and Harris, JM : Analysis of the seasonal behavior of tropospheric ozone at Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 32:159~168, 1998.
3. Keyser, D, Schanidt, BD and Duffy, DG : A technique for representing three-dimensional vertical circulations in baroclinic disturbance, *Mon. Wea. Rer.*, 117:2463~2494, 1989.
 4. 김유근, 문윤섭, 송상근 : 상층 제트류와 관련된 오존의 성층권-대류권 교환, *한국기상학회*, 38(6):531~545, 2002.
 5. 김지영, 윤용훈, 송기범, 김기현 : 포항지역 오존의 수직분포 특성, *Korean Earth Science Society*, 21(3):287~301, 2000.
 6. Yasunari, TJ and Yamazaki, K : Impacts of Asian dust storm associated with stratosphere-to-troposphere transport in the spring of 2001 and 2002 on dust and un tritium variations in mount Wrangell ice core, Alaska, *Atmospheric Environment*, 43:2582~2590, 2009.
 7. 환경부 : 대기오염측정망 설치·운영지침, 2011.
 8. Fuentes, JD and Dann, TF : Ground-level Ozone in eastern Canada : seasonal variations. *J Air and Wastes Mananagement Association*, 44:1019~1026, 1994.
 9. Kim, YK, Lee, HW, Oh, IB, Moon, YS and Song, SK : Seansonal characteristics of surface ozone associated with folw patterns at Kanghwa background monitoring site in the western Korea, *Proceeding of the 8th International conference on ASAAQ*, p.286, 2003.
 10. Yosimori, M : Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere, *Advances in space research*, 36:922~926, 2005.