

지상과 위성으로부터 측정된 서울시 대기 중 오존 전량의 상호 비교

홍현기²⁾ · 김 준^{1)*} · 이한림¹⁾ · 조희구¹⁾

¹⁾연세대학교 지구환경연구소/대기과학과

²⁾극지연구소, 극지 기후 연구부

(접수: 2012년 11월 21일, 수정: 2013년 4월 10일, 게재확정일: 2013년 5월 4일)

Inter-comparison of Total Ozone from the Ground-based and Satellite Measurements at Seoul

Hyunkee Hong²⁾, Jhoon Kim^{1)*}, Hanlim Lee¹⁾, and Hi Ku Cho¹⁾

¹⁾Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Science, Yonsei University, Seoul, Korea

²⁾Korea polar research institute

(Received: 21 November 2012, Revised: 10 April 2013, Accepted: 4 May 2013)

Abstract Despite the extensive investigations to understand the difference between ground-based and space-borne measurements, there still exist differences in total ozone (TO) measured at those two different platforms. Comparisons were carried out for the first time between TO data obtained from the ground based Dobson and Brewer spectrophotometers, and the Ozone Monitoring Instrument (OMI) on board EOS-Aura satellite in a megacity site in Northeast Asia. The TO values retrieved by the OMI-DOAS (Differential optical absorption spectroscopy) algorithm tend to be lower than those measured by the ground based sensors in spring and summer as well as the low solar zenith angle condition. We found that such underestimation of the OMI-DOAS TO is caused by tropospheric ozone underestimated by the OMI-DOAS algorithm when tropospheric ozone are significantly enhanced.

Key words: OMI-DOAS ozone, brewer spectrophotometer, dobson spectrophotometer, megacity total ozone

1. 서 론

오존층은 태양으로부터 지표에 도달할 수 있는 유해 자외선을 흡수하여 생태계를 보호해 주는 역할을 하고 있다. 유해 자외선은 식물의 성장을 억제하고, 농작물에 피해를 주며, 인체에는 피부암의 주원인으로 알려져 있다. 또한 성층권에서 오존이 흡수한 태양 자외선 복사에너지는 오존, 이산화탄소, 수증기 등이 방출하는 적외선 에너지와 복사 평형을 이루어 성층권의 온도 분포를 결정하고, 대기 순환을 유도함으로 기후 변화에도 큰 영향을 미친다.

*Corresponding Author: Jhoon Kim, Global Environment Laboratory/Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yeonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-5682, Fax : 82-2-365-5163
E-mail : jkim2@yonsei.ac.kr

이러한 오존의 전구적 감시를 효과적으로 수행하기 위해 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography), OMI (Ozone Monitoring Instrument)와 같은 위성 센서들이 개발 및 운용되어 왔다. 그 중 오존전량 및 오존의 전구물질인 이산화 질소 등의 미량기체 감시를 위해 2004년 7월 15일 NASA EOS-Aura 위성에 OMI 센서가 탑재되어 발사된 후 현재까지 운영되고 있으며, 이후로 지상관측 장비에서 측정된 오존 전량과 OMI에서 측정된 값과의 비교 및 검증이 전 지구적, 지역적으로 수행되어 왔다. 하지만 널리 알려진 바와 같이 환경위성센서의 경우 넓은 지역을 효과적으로 감시할 수 있는 장점을 가진 반면, 연직적 공간 분포에 대한 불확실성은 일반적으로 지상원격측정기술보다 큰 것으로

알려져 있다.

이러한 불확실성을 지역적, 정량적으로 파악하기 위해서, Brewer, Dobson 분광광도계 등의 지상 오존 원격측정 장비와 오존존데 시스템을 통하여 OMI로부터 산출된 오존의 정확성을 검증하고, 그 자료를 바탕으로 오존 산출 알고리즘을 개선 시키려는 노력이 수행되고 있다. Dobson 분광광도계와 Brewer 분광광도계는 오존전량을 정확히 측정하는 지상 원격 장비로 널리 사용되고 있으며, 전 지구적으로 Dobson 분광광도계와 Brewer 분광광도계에 대한 OMI 오존전량의 검증에서 지상 측정 오존 값은 OMI-TOMS와 1% 이내, OMI-DOAS와는 2% 이내의 오차를 보이고 있다 (Balis *et al.*, 2007). 또한 전 세계 76개의 WOUDC 관측소에서 Brewer 분광광도계와 Dobson 분광광도계로 측정된 오존전량 값과 OMI 오존전량 값의 비교에서 OMI-TOMS (OMI-DOAS)의 오존전량 값이 북반구 관측소의 오존전량 값보다 0.4% (1.1%) 높게 나타났다 (McPeters *et al.*, 2008). 더 나아가 최근 들어 특정 관측소에서 측정된 지상 측정값과 OMI 측정값과의 비교도 이루어지고 있다. 프랑스 두 지상 관측소 (Villeneuve d'Ascq, Briancon) 에서 OMI-TOMS와 OMI-DOAS의 오존전량차이는 4% 이내의 차이를 각각 보였고 (Buchard *et al.*, 2008), 이탈리아 로마에서 OMI-DOAS와 OMI-TOMS의 오존전량과 지상 장비 측정값과의 비교 역시 1.8%, 0.7% 이내의 오차 값을 가져 좋은 상관성을 보였다 (Lalongo *et al.*, 2008). 이러한 연구들은 OMI와의 비교수행연구를 통해서 OMI 오존 산출물의 정확성에 대한 이해를 높이는 것에 큰 도움을 주었다. 하지만, 이러한 비교연구가 수행이 된 사이트에서 OMI 오존 산출물과 지상에서 측정된 오존전량과의 차이가 나는 원인을 규명하는 연구가 수행이 되지 않고 있다. 또한 이러한 OMI에서 산출된 오존전량과 이러한 지상 원격장비에서의 오존전량의 비교연구가 미국과 유럽지역에서 일부 수행되어 왔으나, 많은 인구가 밀집되어 있는 아시아, 특히 동북아시아 지역에서는 그 정확성을 검증하는 비교 연구가 거의 수행되지 않았다.

서울은 동북아 지역에 위치한 대표적인 메가 시티 (<http://www.megacitiesproject.org/>) 중 하나이며, 동시에 중국으로부터 풍 하측에 위치하고 있어, 서울 지역의 오염물질들의 국지적 발생원에 대한 기여도와 장거리 오염물질들의 영향을 받는 대기 오염 및 이로 인한 기후 관련 연구의 중요한 지역 중 한 곳이다. 본 연구에서는 처음으로 동북아시아 지역에 위치한 메가 시티인 서울에서 OMI-DOAS 오존산출물과 Dobson, Brewer 분광광도계 관측자료의 차이를 정량적으로 파악하는 것과, 그 차이가 발생하는 주요 원인에 대하여 논의 하였다.

한국기상학회 대기 제23권 2호 (2013)

2. 관측 원리

Dobson 분광광도계는 자외선의 파장 쌍 중 오존에 의한 흡수가 강한 파장과 약한 파장의 상대적 강도 (intensity)를 측정하여 오존 전량을 관측한다. 예를 들어 A 파장 쌍은 305.5 nm와 324.5 nm의 파장으로 구성되어 있는데, 외부 대기 밖 (extraterrestrial)에서 이들 두 파장의 강도는 알려져 있다. 이러한 파장이 대기층을 통과하여 Dobson 분광광도계에 도착하는 동안 기체 분자, 에어로졸 등의 영향으로 그 강도는 줄어든다. 특히, 오존의 강한 흡수대인 305.5 nm의 파장은 그 강도가 크게 줄어들고, 324.5 nm 파장의 강도 변화는 거의 없다. 이렇게 측정된 파장 쌍의 상대적 강도를 측정하여 오존전량을 측정할 수 있으며, 그 식은 다음과 같다. 연세대학교 Dobson 분광광도계에서는 A (305.5 nm, 325.4 nm), D (317.6 nm, 339.8 nm) 파장 쌍을 이용하여 오존전량을 측정한다. 보다 자세한 관측 방법과 자료 처리 방법은 Komhyr (1980), Chung (1996) 등이 설명하였다.

Dobson 분광광도계에서 오존전량을 산출하는 식은 다음 (1)과 같다.

$$X_{AD} = \frac{(N_A - N_D) - [(\beta - \beta')_A - (\beta - \beta')_D] \frac{mP}{P_0}}{[(\alpha - \alpha')_A - (\alpha - \alpha')_D] \mu} \quad (1)$$

$$\frac{-[(\delta - \delta')_A - (\delta - \delta')_D] \sec(SZA)}{[(\alpha - \alpha')_A - (\alpha - \alpha')_D] \mu}$$

여기서, X는 오존 전량, $N = \log(I_0/I') - \log(I/I')$, I_0 와 I_0' 는 대기 밖에서의 I와 I' 파장의 강도, I와 I'은 측정된 강도, β 는 레일라이 산란계수, m은 대기질량 인자를 의미한다. μ 는 오존층을 통과하는 상대 대기 질량 인자, SZA은 태양천정각, α 는 오존 흡수계수, δ 는 에어로졸 입자의 산란계수, P_0 와 P는 평균 해면기압과 현지 기압을 의미한다.

Brewer 분광광도계는 6개의 파장의 채널로부터 (하나의 Dark-count channel과 5개의 operational channel) 태양의 광자 수를 측정한다. 이렇게 측정된 각 파장의 강도($I_2 \sim I_5$)로부터 다음 식을 이용하여, 오존전량을 측정한다 (De Backer *et al.*, 1991). Brewer 분광광도계에서 사용하는 파장은 다음과 같다. (I_1 : 306.3 nm, I_2 : 310.1 nm, I_3 : 313.5 nm, I_4 : 316.7 nm, I_5 : 320.0 nm)

$$X = \left\{ F_0 + C - \left[F + C + \frac{\Delta\beta(m)P}{P_0} \right] \right\} / \Delta\alpha(\mu) \quad (2)$$

여기서, X는 오존전량, $F = \log(I_2/I_4) - 0.5(I_3/I_4) - 1.7(I_4/I_5)$, C는 Brewer 분광광도계의 스펙트럼 반응 가중 함수, F_0 는 외부대기 밖에서의 대기강도, $\Delta\beta$ 는 지상 기압에서 정규화된 레일라이 광학 깊이의 가중 함수,

$\Delta\alpha_s$ 는 오존 흡수계수의 가중합수를 의미한다. 이산화황을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$X_S = \frac{\left\{ S_0 + C - \left[S + C + \frac{\Delta'\beta(m)P}{P_0} \right] \right\}}{\Delta'\alpha(\mu)} - X \left(\frac{\Delta'\alpha_s}{\Delta'\alpha} \right) \quad (3)$$

여기서, X_S 는 이산화황 전량, $S = \log I_1/I_4 - 3.2 \log I_4/I_5$, S_0 는 외부 대기 밖의 빛 강도, $\Delta'\alpha_s$ 는 이산화황 흡수계수의 가중합수를 의미한다.

OMI-DOAS 오존전량 알고리즘은 차등흡수분광법(DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy)을 사용한다. 이 알고리즘은 다음의 세 단계로 구성되어 있다. 첫 번째로 지구 복사 스펙트럼과 태양 복사 조도 스펙트럼을 측정하여 산출된 오존의 흡수단면적 정보를 이용하여 경사 층 적분농도 (slant column density)를 구한다. 두 번째로 이렇게 얻은 경사 층 적분농도를 상대 대기질량인자 (AMF, air mass factor)를 이용하여 오존전량을 구한다. 마지막 단계는 구름 효과를 수정하는 단계이다. 구름이 존재할 시 오존 전량을 구하는 식은 다음 식 (4)와 같다.

$$N_T = \frac{N_S + \omega \cdot M_{cloudy} \cdot N_g}{M} \quad (4)$$

식 (4)에서, N_T 는 오존전량, N_S 는 경사 층 적분농도, N_g 는 유령 층 적분농도, M_{cloudy} 는 구름 존재 시 대기질량 인자, $M = \omega \cdot M_{cloudy} + (1 - \omega)M_{clear}$ ω 는 가중치 (weight factor)를 의미한다. 더욱 자세한 내용은 Veefkind (2002) 등이 설명하였다.

3. 자료 및 분석 방법

지상에서 서울 상공의 오존전량 측정은 Dobson 분광광도계의 경우 태양 천정각이 가장 낮은 정오에 한번, 그리고 오전, 오후 태양 천정각이 60°일 경우 각각 한 번씩 직달 관측 (Direct Sun)을 실행한다 (Komhyr, 1980). 이때 구름이 태양을 가리지 않으면, 직달 관측과 한 번 산란 관측 (Zenith Sky)을 각각 한 번씩 수행하고, 태양이 직접 보이지 않을 경우는 산란 관측만을 두 번 수행하여 눈, 비가 내리지 않는 날의 경우 하루에 총 세 번의 직달 관측을 수행한다. Brewer 분광광도계의 경우 정해진 작동 스케줄에 맞춰 태양 천정각의 변화에 따라 자동으로 직달 및 산란 관측을 수행하게 된다.

OMI 자료는 2004년부터 존재하지만, Dobson과 Brewer의 자동관측 시스템 업그레이드 등으로 2004년부터 2007년까지 서울 관측소의 자료가 OMI-DOAS 산출물과 비교를 수행하기에 충분히 존재하지 않는

이유로 비교 연구는 2008년부터 2010년까지 관측된 자료를 이용하였다.

OMI 오존의 자료는 NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI>)의 2008년부터 2010년까지의 LV2G (Level 2 gridded) global binned 자료를 이용하였다. OMI의 공간해상도는 0.25 deg (Lat/Lon grid)이며, 서울 상공을 통과하는 시간은 약 13시 40분이다. 또한 서울 상공의 오존전량 값은 북위 37.15~37.45, 동경 126.45~127.15 총 4개의 격자의 값의 평균값을 사용하였다. 다만 4개 격자의 데이터가 전부 존재 하지 않는 경우에는 나머지 격자의 값만을 이용하였고, LV2G 데이터가 존재하는 날에 LV3 Data가 없는 경우는 위성 시스템에 이상이 있다고 판단하고, 이들 자료들을 모두 제거하였다. 마찬가지로 자료의 신뢰성 향상을 위해 OMI-DOAS 오존전량 산출물 중에서 기술적인 문제가 알려진 자료들 (Flagged data)은 본 연구에서 제외하였다. 지상 관측기기와 유사하게 OMI와 지상 자료의 비교에 있어서 서울 상공에서 하루 중 성층권 오존의 일변동이 기존 연구와 유사하게 (Kourtidis *et al.*, 2002), 6~20%까지 변화하는 경우도 존재하기 때문에 시간대를 최대한 맞춰 일변화 등으로 발생하는 오차를 최소화하도록 하였다. Brewer 분광광도계의 경우에는 두 관측의 태양 천정각이 1° 이내이며, 두 관측시간이 가장 일치하는 시간대의 자료 하나를 이용하였으며, Dobson의 경우는 관측시간이 30분 이내에 존재하면서 그 시간의 차이가 가장 작게 나는 자료 하나만을 사용하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 지상 관측기기 사이의 오존전량 비교

OMI와 지상 원격 측정 장비에서 관측한 오존전량을 비교하기에 연세대학교 월봉 오존 관측소에서 관측자료의 정확성을 검증하기 위하여 Dobson과 Brewer 분광광도계의 상호 비교를 수행하였다. 이러한 두 지상장비의 비교는 기존 연구들에서 일반적으로 비교기준으로 사용하듯이 태양 천정각, 운량, 계절별, 그리고, 대기 중 이산화황 전량에 대하여 수행하였다. Fig. 1a는 태양 천정각의 변화에 따른 Dobson 분광광도계 (Beck, #124)와 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC, #148) 사이의 오존전량의 차이를 보인 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Dobson 분광광도계에서 측정된 오존전량은 Brewer 분광광도계에서 측정된 오존전량보다 평균 1.17 DU 크게 나타났다. 그 상대적 차이는 태양 천정각 60°에서 0.27 DU로 가장 작게 나타났다. 그러나 태양 천정각 60° 이상의 자료는 선행연구 (McPeters *et al.*, 2008; Anton *et al.*, 2009)에서 언급한 대로 신

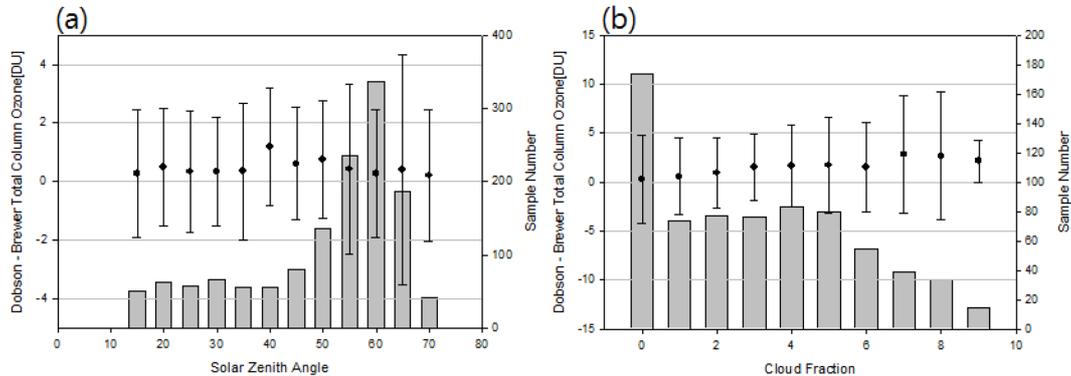


Fig. 1. Differences between Dobson and Brewer total ozone data as a function of (a) solar zenith angle and (b) cloud fraction from 2008 to 2010. The bar chart is sample number and error bar is standard deviation.

뢰성이 떨어졌기에 제외하였고, 40°에서 1.18 DU로 가장 크게 나타났으나, 이는 한반도 평균 오존 전량인 320 DU에 비해서는 약 0.3% 정도로 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 또한 태양 천정 각에서의 변화에 따른 두 장비의 오존전량의 차이에 대한 경향성은 발견 되지 않았다. Fig. 1b는 운량에 따른 Dobson 분광광도계와 Brewer 분광광도계의 관측 값을 비교한 그림이다. 운량은 연세대학교에서 약 10 km 범위 내의 기상청 서울관측소에서 관측한 서울 운량 자료를 이용하였다. 이들 자료는 6시 (KST)부터 18시 사이 3시간 간격으로 일 5회 관측된 운량자료 중 지상장비와의 관측시간이 가장 일치하는 시간의 운량 값을 이용하였다. 운량에 따른 두 관측기의 오존전량의 상대적 차이를 비교한 결과 운량이 없는 0에서는 Brewer 분광광도계의 오존전량값이 Dobson 분광광도계의 오존전량 값보다 0.28 DU 크게 측정되었으나, 태양 천정각의 경우와 마찬가지로 특별한 경향성은 보이지 않았다. 운량에 따른 두 관측기의 오존전량의 상대적 차이를 비교한 결과 운량에 따라 두 관측값이 최대 1.13 DU의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 이는 관측기간 중 평균오존전량 값인 320 DU의 약 0.35%에 해당하는 값으로 구름의 영향이 거의 없음을 보여주었다.

또한 두 관측장비 사이의 월별 차이에 대한 분석을 시도하였으나, 본 연구에서는 정확성이 높은 직달 자료만을 사용하였으므로, 월별 특히, 여름철의 경우 한반도의 기후학적 특징으로 맑은 날이 많이 존재하지 않았기 때문에 직달 관측 자료의 부족으로 낮은 통계적 신뢰성 때문에 정량적으로 월별 차이를 비교 수행할 수가 없었다.

앞서 나타낸 결과에서 두 기기의 오존 값의 상대적 차이는 태양 천정각, 운량에 대한 뚜렷한 연관성이 없었기 때문에, 구름의 양과 태양천정각의 변화에 구분

없이 2008년부터 2010년까지 태양 천정각이 60° 이하, 직달관측, 그리고 두 기기의 관측 시간이 30분 이하인 모든 자료를 모아 회귀분석을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 다만 태양 천정각은 두 관측기기의 오존전량의 상대적 차이에 크게 영향을 주는 않았지만 앞에서 언급되었듯이 선행 연구들에서 큰 태양 천정각에서 오존전량 값의 신뢰성이 좋지 않았기 때문에 태양 천정각 60° 이상의 자료는 제외하였다. 선행 연구 (De Baker *et al.*, 1999)에서 두 관측기기에서 관측한 오존전량에 대한 이산화황에 대한 영향이 존재하였고, Fig. 2에서도 Dobson 분광광도계에서 관측한 오존전량이 Brewer 분광광도계에서 관측한 오존전량보다 크게 나타났기 때문에 두 관측기기에서의 차이와 이산화황의 영향을 확인하였다.

Figure 3은 Brewer 분광광도계에서 측정된 이산화황과 두 분광광도계에서 측정된 오존전량의 차이를

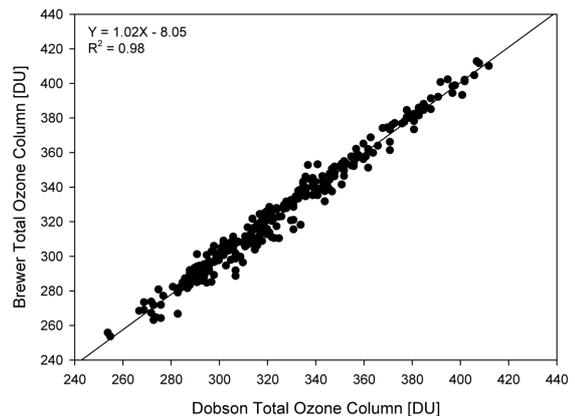


Fig. 2. Correlation between total measured by Dobson and Brewer spectrophotometers in Seoul. The solid line represents the regression line with slope equal to 1.

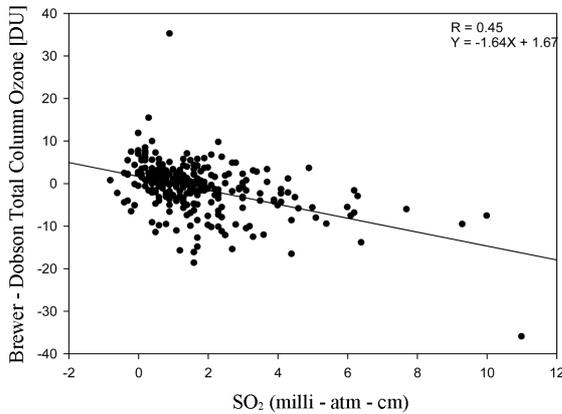


Fig. 3. Difference in total ozone measured by Brewer and Dobson spectrophotometers against the SO₂ column densities measured by the Brewer.

비교한 그림이다. 식 3에서 보여지듯이 Brewer에서 관측한 이산화황 전량이 오존전량의 함수인 계산적 한 계로 음의 값이 나타날 수 있지만, 과거 Belgium Uccle에서 Brewer로 관측한 이산화황 전량은 근처 지상 관측소에서 관측한 이산화황 전량과 유사한 계절적 경향을 보이고 있기 때문에 (De Backer *et al.*, 1991), 이산화황의 전량에 따른 두 지상관측 장비의 오존 전량의 차이를 살펴보았다. 또한 Brewer 분광광도계는 오존전량을 측정함에 있어 이산화황의 영향을 제거하기 때문에 이산화황의 영향이 없다고 볼 수 있다. 그러나 Dobson 분광광도계와 같은 경우 오존전량을 측정하는 AD 파장대가 이산화황의 흡수대와 같기 때문에 이산화황이 증가하여도 오존전량값이 증가할 수 있다. 이 그림에서도 Brewer 분광광도계에서 측정된 이산화황이 증가함에 따라 Dobson 분광광도계의 오존전량값이 Brewer 분광광도계의 오존전량값보다 더욱 커지는 경향을 보였다. Fig. 3에서 기울기는 -1.64이고 R 값은 0.44이다. 이 기울기의 값은 Belgium Uccle에서의 관측값 -1.41과 Komhyr and Evans (1980)가 이론적으로 결정한 값인 -1.53과 유사한 결과이다. 그러나 위에서 보는 바와 같이 두 지상 장비간의 오존 전량 차이 이산화황의 영향을 받으나 그 차이는 미미한 정도이므로, OMI-DOAS와 비교 시 두 지상 장비에서 산출된 오존전량을 함께 사용하였다.

4.2. 지상 관측값과 OMI 위성 관측값과의 비교

Figure 4는 2008년 1월부터 2010년 12월까지 OMI-DOAS와 서울 연세대학교 관측소에서 Dobson 분광광도계와 Brewer 분광광도계를 이용해 관측한 오존전량의 비교이다. 검정색 실선은 1:1 대응선을, 붉은 실선은

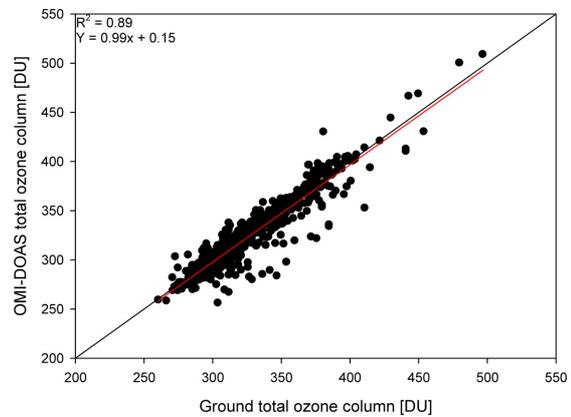


Fig. 4. Correlation between total ozone observed from OMI-DOAS and ground (Brewer and Dobson spectrophotometers) in Seoul from 2008 to 2010. The solid black line is 1:1 fit line while solid red line is the linear fit.

은 OMI-DOAS와 지상에서 관측한 오존전량의 회귀선이다. OMI-DOAS와 지상을 비교한 결과 R²는 0.89, 기울기는 0.99, 평균산출오차는 12.24, bias는 -0.80%이다. 여기서 사용한 bias의 계산식은 다음 식 (5)와 같다.

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - x_i)}{x_i} \times 100 \tag{5}$$

Solar Radiometry Observatory of Sapienza University of Rome (41.9°N, 12.5°E)에서 OMI-TOMS (DOAS)와 Brewer 분광광도계와 오존전량을 비교한 결과 R²는 0.94 (0.92), bias는 -1.8% (-0.7%)로 나왔으며 (Lalongo *et al.*, 2008), 이는 연세대학교에서 관측한 결과와 유사한 값이다. 또한, 2005년부터 2007년까지 Spain Iberian Peninsula의 5개 관측소에서 OMI-TOMS (OMI-DOAS)와 Brewer 분광광도계를 비교한 결과 R²는 0.96 ~ 0.98 (0.94~0.96)으로 나왔으며, OMI-TOMS (OMI-DOAS)에 따른 지상관측의 기울기는 0.96~0.99 (0.94~0.97)로 나타났다. 또한, OMI-TOMS (OMI-DOAS)가 Brewer 분광광도계에 비해 2±1.8% (1.4±2.4%) 과소측정하는 결과가 나타났다 (Anton *et al.*, 2009).

이와 같이 OMI-DOAS의 TO가 지상에서 관측한 TO에 비해 작게 관측하는 값이 어느 계절에 주로 발생하는지 살펴보기 위해 두 관측 값의 차이의 시계열 분석을 수행하였다 (Fig. 5). 각 점들은 관측이 이루어진 날짜 중 지상 장비와 OMI-DOAS 두 관측 값이 가장 시간적으로 (혹은 태양 천정각) 가까운 관측 값을 이용하였다. 위의 그림에서 같이 OMI-DOAS와 지상 관측 장비로 측정된 오존전량의 차이는 계절에 따른

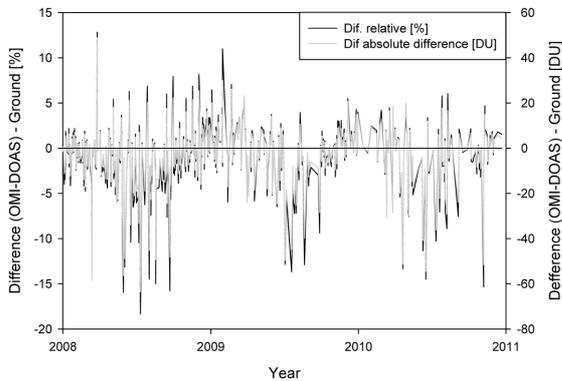


Fig. 5. Time series of the difference between total ozone observed OMI-DOAS and ground (Brewer and Dobson spectrophotometers) in Seoul from 2008 to 2010.

명확한 차이를 보이고 있다. 여름철에는 지상관측 장비가 OMI-DOAS에 비해 크게 관측하였고, 겨울에는 그 반대의 경향을 보이고 있다. 모든 관측을 비교한 결과 2008년 7월 11일 OMI-DOAS가 지상관측 장비에 비해 18.33% 가장 작게 관측하였고, 2008년 3월 26일 12.83% 가장 크게 관측하였다. 또한 OMI-DOAS가 지상관측 장비에 비해 가장 작게 관측한 30일 중 20일은 6~8월 사이의 여름철에 존재하였다. 일주일 평균의 경우에 겨울철에는 OMI-DOAS의 관측값이 최대 3.32% 크게 나타났고, 반대로 여름철에는 지상관측 장비의 관측값이 최대 10.88% 크게 나타났다. 기존 연구에서도 이와 유사하게 계절적 차이의 특성을 보고 하였으나, 그 이유에 대해 명확히 설명한 바는 없다. 본 연구에서는 특히 여름철 큰 과소측정 결과에 대한 이유를 다음 Table 1에 설명하였다.

Figure 6은 2008년부터 2010년까지 지상관측 장비와 OMI-DOAS로 관측한 오존전량의 차이를 나타낸

그림이다. 그림 (a)는 계절에 따른 지상관측장비에서 관측한 오존전량과 OMI-DOAS로 관측한 오존전량의 차이를 나타낸 그림이고, 그림 (b)는 태양천정각의 변화에 따른 두 관측의 차이를 나타낸 그림이다. 여름철의 자료수가 다른 계절에 비해 적은 이유는 Brewer 및 Dobson에서 직달관측 자료만을 이용하였기 때문이다. 이 계절 한반도는 장마기간으로 다른 계절에 비해 직달관측이 가능한 일수가 적기 때문이다. 계절별로 두 관측의 오존전량의 차이를 분석한 결과 계절에 따른 뚜렷한 결과를 보이고 있으며, 여름철, 특히 7월에 지상관측 장비로 관측한 오존전량이 OMI-DOAS에 비해 5.9% 이상 크게 관측하고 있음을 볼 수 있다. 겨울철의 경우 반대의 결과가 나타나 12월에 지상관측장비로 관측한 오존전량이 OMI-DOAS에 비해 최고 1.5% 작게 관측하였다. 스페인 Iberian Peninsula에서 구름이 존재하는 날과 구름이 없는 날에서 OMI-DOAS와 Brewer에서 관측한 오존 전량의 차이를 비교한 결과 겨울철에는 두 관측의 차이가 거의 나타나지 않은 반면에 여름철에 구름이 없는 날에서는 2~3%, 구름이 존재할 경우에는 4~6% OMI-DOAS가 낮은 경향을 보였다 (Anton *et al.*, 2009). 반면에 이러한 OMI-DOAS와 지상관측장비 사이의 계절적 차이는 전구에서 60° 이상의 고위도지역 여름철을 제외하고는 나타나지는 않았다. 한반도의 경우 지리적 특성으로 여름철에 태양천정각이 작고, 겨울철에 크기 때문에 태양천정각이 20°보다 작은 경우 역시 지상관측장비의 측정값에 비해 OMI-DOAS의 측정값이 4.6% 낮게 측정하였고, 태양천정각 65° 이상에서는 2.6% 크게 측정하였다. 이 값은 Iberian peninsula 5개 도시에서 구름이 존재할 경우 SZA의 변화에 따른 OMI-DOAS와 Brewer 분광광도계에서 관측한 오존전량의 차이를 비교한 결과에서 나타난 태양 천정각 20°에서 3~4% 태양천정각 65°에서 1~2%와 유사한 결과이다 (Anton *et al.*, 2009). 또한 전구에서 29개의 Brewer 분광광도계

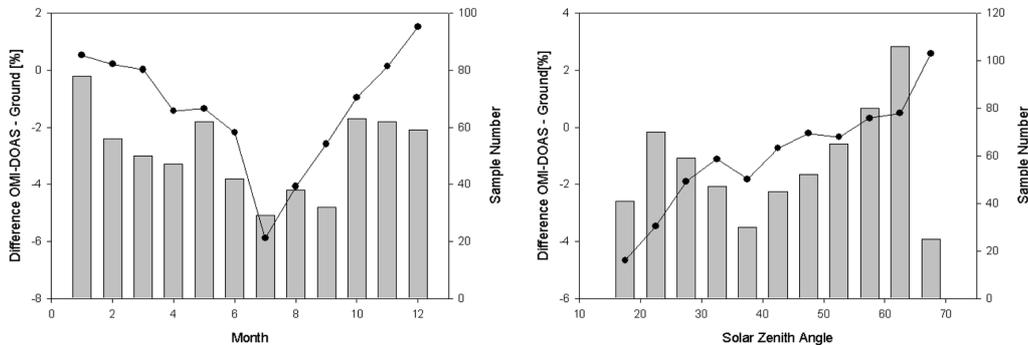


Fig. 6. Difference between total ozone observed from the OMI-DOAS and ground (Brewer and Dobson spectrophotometers) total ozone as a function of (a) month and (b) solar zenith angle from 2008 to 2010.

Table 1. Seasonal average tropospheric ozone, average OMI-DOAS ghost column density and relative difference between total ozone observed from OMI-DOAS and ground (Brewer and Dobson spectrophotometers).

Season	Number of Data	Troposphere O3 [%]	Average Ghost Column Density [DU]	Relative Difference (OMI-DOAS) - Ground [%]
Winter	33	7.13	1.55	0.69
Spring	29	9.63	5.54	-0.35
Summer	16	15.35	8.59	-2.68
Fall	21	10.97	2.40	-0.45

와 47개의 Dobson 분광광도계에서 관측한 오존전량과 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량을 비교한 경우에서도 태양천정각의 낮은 경우 오존전량의 차이는 거의 나타나지 않았지만, 태양천정각 50° 이상에서 그 차이가 나타나기 시작하여 70°에서는 4% 이상의 차이를 보였다 (Balis *et al.*, 2007). 이와 같이 한반도에서 여름철 지상관측 장비에서 관측한 오존전량이 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량보다 크게 나타나는 것은 북반구 중위도에서 여름철에 대류권 오존량이 많기 때문이다 (Fishman *et al.*, 1990).

Fig. 7은 2008년부터 2010년까지 포항기상대에서 오존존데로 관측이 수행된 모든 일 중, 오존전량에서 대류권 오존이 차지하는 비율에 따른 지상관측장비와 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량의 차이를 나타낸 그림이다. 대류권계면의 높이는 포항존데의 계절별 연직 온도 프로파일의 평균값을 이용하여 산출하였다. 전체 오존전량 중 대류권 오존량이 차지하는 비율이 낮을 경우는 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량이 지상관측장비에 비해 크게 나타났으며, 그 값은 2009년 8월 19일에 8.88% OMI-DOAS에서 관측한 오존전량이 지상관측장비에 비해 가장 작게 나타났다. 반대의

경우 지상관측장비에서 관측한 오존전량값이 OMI-DOAS에 비해 크게 나타났으며, 그 값은 2008년 12월 3일에 8.14%로 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량이 지상관측 장비에 비해 크게 나타났다. 이와 같이 봄철, 여름철 대류권 오존전량이 상대적으로 많은 경우 위성 OMI-DOAS 관측값은 지상 관측값보다 적게 측정되었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 겨울철에 대류권 오존이 오존 전량에서 차지하는 비율은 7.13%로 가장 작았으며, 이때 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량이 지상관측장비에서 관측한 오존전량에 비해 0.69% 크게 관측하였다. 반대로 여름철에 대류권 오존의 비율이 15.35%로 가장 크게 나타났으며, 이때는 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량이 지상관측장비에서 관측한 오존전량에 비해 2.68% 작게 관측하였고, 특히 7월에는 5% 이상 작게 관측하였다. 즉, 대류권 오존이 전체 오존 전량에서 차지하는 비율이 커질수록 OMI-DOAS에서 관측한 오존전량은 지상관측장비의 오존전량에 비해 점점 작게 측정하는 것을 알 수 있다. 그에 비해 OMI-DOAS 알고리즘에서 구름의 영향을 받는 대류권 오존량을 반영하는 유평층적분농도 (Ghost Column Density)는 표에서와 같이 매우 작은 값들로 설정되어 있기 때문에 여름철 대류권 오존량이 크게 증가할 경우 이를 모두 반영하지 못하게 되며 결과적으로 OMI-DOAS의 오존총량은 지상측정값과 비교하여 과소평가되는 결과를 초래하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 처음으로 동북아지역의 한 메가시티 사이트인 서울에서 Dobson과 Brewer 분광광도계로 측정된 오존전량과 OMI-DOAS로 측정된 오존전량을 서로 비교하였다. 오존전량은 Dobson 분광광도계의 관측값이 Brewer 분광광도계의 관측값보다 평균 0.3%가 더 많았으며, 이 증가는 이산화황 전량이 증가할수록 더욱 컸다. 오존전량은 Brewer 관측값이 OMI-DOAS 관측값에 비해 평균 0.88% 더 많았다. 그러나 모든 관측기기로부터 관측을 수행한 날 그 상관계수는 최

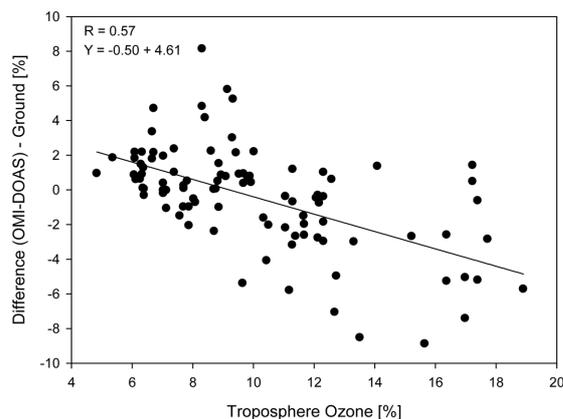


Fig. 7. Difference between total ozone column densities observed from the OMI-DOAS and ground (Brewer and Dobson spectrophotometers) ozone of tropospheric ozone (%).

소 0.89로 매우 높게 나타났다. 이는 스페인 Iberian peninsula에서 비교하였을 시 발생한 3% 오차보다 적은 값이다 (Anton *et al.*, 2009). 또한 Dobson 분광광도계 관측값은 OMI-DOAS에 비해 평균 2.60% 더 많았다. 이는 전구에서 비교할 경우 생긴 차이 3%에 비해서는 적은 값이다 (Balis *et al.*, 2007).

이들 차이를 태양천정각에 따라 분석한 결과 오존 전량은 태양천정각이 감소할수록 오존전량은 OMI 관측값이 지상에서 관측한 값보다 더 작아지는 결과를 보였으며, Dobson에서 관측한 오존전량이 더욱 뚜렷하게 나타났는데 이는 선행 논문과 유사한 결과이다 (Anton *et al.*, 2009). 계절에 따라서는 지상과 위성 관측의 차이가 크게 나타났으며 특히 7월에 지상관측값이 위성 관측값보다 5% 이상 크게 관측하였다.

이와 같이 지상관측인 Dobson과 Brewer 관측값 사이의 차이는 이산화황의 영향을 받았으나 그 차이는 미비하였고, 지상 관측값과 위성 관측값의 차이는 대류권 하부의 오존량이 많은 여름철의 경우 OMI-DOAS에서 사용하는 유효층 적분농도 구름아래 대류권의 오존량을 잘 반영하지 못하여 지상관측과 OMI-DOAS와의 오존전량의 차이가 비교적 크게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업 (Grant No. 2006-3203) 및 BK21 과제로 수행되었습니다. 또한 기상청 지구대기위탁관측소로서 재정적 지원에 감사하며, 매일 오존 관측에 참여한 연세대학교 대기복사연구실 연구원에게도 감사의 글을 드립니다.

REFERENCES

- Anton, M., M. Lopez, J. M. Vilaplana, M. Kroon, R. McPeters, M. Banon, and A. Serrano, 2009: Validation of OMI-TOMS and OMI-DOAS total ozone column using five Brewer spectroradiometers at the Iberian peninsula. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **114**(D14307).
- Balis, D., M. E. Koukouli, E. J. Brinksma, M. Kroon, J. P. Veefkind, G. Labow, and R. D. McPeters, 2007: Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **112**(D24).
- Buchard, V., C. Brogniez, F. Auriol, B. Bonnel, J. Lenoble, A. Tanskanen, B. Bojkov, and P. Veefkind, 2008: Comparison of OMI ozone and UV irradiance data with ground-based measurements at two French sites. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**(16), 4517-4528.
- Chung, S. R., 1996: Effect of lamp test and intercomparison of Dobson ozone spectrophotometer on the accuracy of observed total ozone.
- De Backer, H. and D. De Muer, 1991: Intercomparison of Total Ozone Data Measured With Dobson and Brewer Ozone Spectrophotometers at Uccle (Belgium) From January 1984 to March, Including Zenith Sky Observation. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **96**(D11), 20,711-20,719.
- Fishman, J., C. E. Watson, J. C. Larsen, and J. A. Logan, 1990: Distribution of Tropospheric Ozone Determined From Satellite Data. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **95**(D4), 3599-3617.
- Fortuin, J., F. Paul, and H. Kelder, 1998: An ozone climatology based on ozonesonde and satellite measurements. *J. Geophys. Res.*, **V95**(D24), 31,709-31,734.
- Komhyr, W. D., 1980: Operation Handbook - Ozone Observation with a Dobson Spectrophotometer. *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report*, **6**, Geneva, 125 pp.
- Komhyr, W. E. and R. D. Evans, 1980: Dobson spectrophotometer total ozone measurement errors caused by interfering absorbing species such as SO₂, NO₂ and photochemically produced O₃ in polluted air. *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 157-160.
- Kourtidis, K. and Coauthors, 2002: Regional levels of ozone in the troposphere over eastern Mediterranean. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **107**(D18), 8140.
- Lalongo, I., G. R. Casale, and A. M. Siani, 2008: Comparison of total ozone and erythemal UV data from OMI with ground-based measurements at Rome station. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **8**, 2381-2401.
- McPeters, R., M. Kroon, G. Labow, E. Brinksma, D. Balis, I. Petropavlovskikh, J. P. Veefkind, P. K. Bhartia, and P. F. Levelt, 2008: Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product, *J. Geophys. Res-Atmos.*, **113**(D15S14).
- Veefkind, J. P., J. F. Hann, 2002: OMI algorithm theoretical basis document. *ATBD-OMI-02*, 33-51.