

대류권 오존 재분석 자료의 품질 검증: 포항 오존존데와 비교 검증

박진경 · 김서연* · 손석우
서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부

(접수일: 2018년 12월 17일, 수정일: 2019년 2월 12일, 게재확정일: 2019년 3월 2일)

Evaluation of the Troposphere Ozone in the Reanalysis Datasets: Comparison with Pohang Ozonesonde Observation

Jinkyung Park, Seo-Yeon Kim*, and Seok-Woo Son

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 17 December 2018; revised 12 February 2019; accepted 2 March 2019)

Abstract The quality of troposphere ozone in three reanalysis datasets is evaluated with long-term ozonesonde measurement at Pohang, South Korea. The Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis (ERA-I) and Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications version 2 (MERRA2) are particularly examined in terms of the vertical ozone structure, seasonality and long-term trend in the lower troposphere. It turns out that MACC shows the smallest biases in the ozone profile, and has realistic seasonality of lower-tropospheric ozone concentration with a maximum ozone mixing ratio in spring and early summer and minimum in winter. MERRA2 also shows reasonably small biases. However, ERA-I exhibits significant biases with substantially lower ozone mixing ratio in most seasons, except in mid summer, than the observation. It even fails to reproduce the seasonal cycle of lower-tropospheric ozone concentration. This result suggests that great caution is needed when analyzing tropospheric ozone using ERA-I data. It is further found that, although not statistically significant, all datasets consistently show a decreasing trend of 850-hPa ozone concentration since 2003 as in the observation.

Key words: Troposphere ozone, ozonesonde, Pohang ozone

1. 서 론

대류권에는 성층권에 비해 매우 적은 양의 오존이 존재하나, 대류권 오존은 인체에 유해한 영향을 미치기 때문에 그 중요성이 대두되고 있다(Cariolle and Teyssedre, 2007). 대류권 오존은 일반적으로 20~50 ppbv의 농도를 나타내나(Monks et al., 2015), 성층권으로부터의 유입 또는 광화학 반응을 통한 생성으로

인해 100 ppbv 이상의 농도로 증가하면 인류와 지표 생명체에 치명적인 영향을 줄 수 있는 대표적인 단기 체류 대기오염 물질(short-lived climate pollutant)로 분류된다(Feng et al., 2008; Emberson et al., 2009; Fishman et al., 2010).

지표 부근의 오존 농도는 인위적 배출에 따른 국지적 효과뿐만 아니라 하층 제트의 수송, 혼합층의 발달에 따른 종관 규모의 변화에 따라 크게 변화한다(Banta et al., 1998; Ancellet and Ravetta, 2005; Thompson et al., 2007). Solomon et al. (2000)은 광범위한 지역의 오존 연직 관측 자료를 이용하여 대류권 오존의 특성을 분석하고 모형 실험을 통해 고농도 오존의 발생 원인을 파악하였다. 또한 Tarasick et al.

*Corresponding Author: Seo-Yeon Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8152, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: koko2389@snu.ac.kr

Table 1. Summary of reanalyses.

	MACC	ERA-I	MERRA2
System	ECMWF Integrated Forecast System (IFS)	ECMWF Integrated Forecast System (IFS)	Goddard Earth Observing System (GEOS)
Resolution	T255, L60	T255, L60	0.5° × 0.625°, L72
Reference	Inness et al. (2013)	Dee et al. (2011)	Gelaro et al. (2017)

(2007)에서는 화학 모형의 예측성을 향상시키기 위해서는 정확한 오존의 연직 분포 자료를 이용하는 것이 중요함을 밝힌 바 있다. 이처럼 대류권 오존의 연직 분포를 파악하는 것은 오존 수지 및 지표 농도 사례를 이해하기 위해 매우 중요하다.

2000년대 이후 유럽 지역에서 지표 부근의 대류권 오존이 감소하기 시작한 것과는 달리, 북아메리카 및 동아시아에서는 2000년대 이후 대류권 오존이 지속적으로 증가하는 것으로 확인되었다(Cooper et al., 2014). 특히, 동아시아에서는 대류권 오존의 급격한 증가가 보고된 바 있으나(Tanimoto et al., 2009; Parrish et al., 2012) 2000년대 이후 일본에서는 대류권 오존의 증가 경향이 둔화되고 일부는 감소하는 경향성이 나타나기도 했다(Oltmans et al., 2006). 이는 동아시아에서 대류권 오존 농도의 장기 변동성은 지역과 시기에 따라 큰 차이가 존재할 수 있음을 시사한다. 때문에 2000년대 이후 최신 오존존데 자료를 이용한 한반도 대류권 오존의 특성을 확인하는 연구가 요구된다.

오존의 감시를 효과적으로 수행하기 위해 기상청에서는 1995년부터 존데를 이용하여 포항 지점의 오존 관측을 수행하고 있다. 포항은 존데를 이용하여 정기적으로 오존을 관측하여 장기간의 자료를 가지고 있는 한반도의 유일한 관측 지점이다. 때문에 한반도의 대류권 오존을 전 층에서 파악하기 위해 포항 오존존데 자료를 이용한 연구들이 진행되어 왔다. Kim et al. (2001)에서는 1995년부터 1999년까지 포항 오존존데 자료를 이용하여 한반도 대류권 오존의 계절별 특성을 파악하였다. 한반도의 대류권 오존은 봄철 최댓값을 갖는 뚜렷한 계절성을 지니는데, 이러한 특징은 관측 자료를 통해 동아시아 지역의 대류권 오존을 분석한 선행 연구의 결과(Monks, 2000; Wild and Akimoto, 2001; Kim et al., 2002; Pochanart et al., 2002)와도 일치한다. Kim et al. (2002)과 Kim et al. (2003)에서는 특정 기간 동안 관측한 오존 자료를 이용하여 한반도 오존 증가의 원인을 종관 규모 분석을 통해 살펴보았다.

오존의 분포와 변동성을 분석하고 예측하기 위해서는 장기간 고해상도 재분석 자료의 검증이 필수적이다. 때문에 유럽 지역을 중심으로는 대류권 오존의 관측 자료를 재분석 자료와 비교하는 연구들이 진행되어 왔다(Inness et al., 2013; Katragkou et al., 2015;

Wargan et al., 2017). 특히 Katragkou et al. (2015)에서는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecasting System, ECMWF)의 재분석 자료인 Monitoring Atmospheric Composition and Climate (MACC)의 연직 대류권 오존 자료를 유럽 지역의 오존존데 자료와 비교하여, 지표 부근의 오존 농도는 봄철 관측보다 높게 나타나고 여름철 낮게 나타나 최대 농도가 나타나는 계절이 관측보다 다소 늦게 나타나는 특성을 밝혔다. 그러나 아직 한반도를 중심으로 오존 관측 자료를 통해 재분석 자료를 검증한 연구는 진행된 바 없다.

이와 같이 한반도 지역의 대류권 오존에 관한 연구는 관측 자료를 기반으로 하는 사례 연구가 중점적으로 수행되어 장기간의 재분석 자료를 고려한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 때문에 본 연구에서는 포항 오존존데 자료를 이용하여 한반도 대류권 오존의 특성을 분석하고 재분석 자료와 비교하여 검증하였다.

2. 자료 및 분석방법

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 포항 지점(위도 36.03°N, 경도 129.38°E)의 오존존데 관측 자료를 이용하였다. 이 관측 자료는 포항 기상대에서 1995년부터 존데를 이용하여 관측된 연직 오존 농도 자료로, 월 1~4회, 약 100~130분 동안 1~5초 간격으로 관측한다. 이 중 2003년부터 2012년까지의 자료를 사용하였으며, 재분석 자료와의 비교를 위해 월 1~4회 관측된 자료를 각 월별로 결측 값을 제외하고 평균하여 월평균 값을 계산하였다. 연직 층은 재분석 자료와 동일하게 1000 hPa부터 200 hPa까지 10개의 층으로 내삽하여 비교하였다.

재분석 자료는 MACC (Inness et al., 2013), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis (ERA-I, Dee et al., 2011), 그리고 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA2, Gelaro et al., 2017)를 이용하여 분석하였다(Table 1). ECMWF Integrated Forecast System (IFS)에서 생산되는 재분석 자료인 MACC은 화학 수송 모델인 Model for Ozone And Related Tracers, version 3 (MOZART-3, Stain et al., 2012)이

결합되어 있어 오존, 일산화탄소, 산화질소, 포름알데히드의 생성과 소멸 과정을 반영한다(Flemming et al., 2009). 이외에도 에어로졸, 온실 기체 자료 또한 자료 동화에 사용되지만 대류권 오존 자료는 사용되지 않으며, 대류권 오존은 성층권 오존과 오존 전량을 이용하여 계산한다. 마찬가지로 ECMWF IFS에서 생산되는 재분석 자료인 ERAI은 오존 전량으로부터 기온, 성층권의 염소 농도를 고려하여 연직 오존 혼합비를 추정하는 오존 선형 광화학 모수화 방법(Cariolle and Déqué, 1986; Cariolle and Teyssedre, 2007)을 이용하여 계산한 후, 관측 자료를 이용하여 자료동화한다(Dethof and Hólm, 2004). 이 오존 방정식은 광화학 모델을 이용하여 위도, 기압, 계절을 고려한 연직 오존 혼합비를 선형적으로 추정하며, 식에서 이용하는 성층권의 염소량은 관측값의 경년 변동만을 고려한다. 미국항공우주국(The National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 Goddard Earth Observing System (GEOS)에서 생산되는 재분석 자료인 MERRA2는 관측 자료와 위성 자료의 오존 전량과 연직 오존 혼합비를 이용하여 자료동화한다. 특히 2004년 10월을 기점으로 Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer (SBUV) 자료에 의존하던 오존의 동화 과정에 Aura 위성의 Ozone Monitoring Instrument (OMI)와 Microwave Lim Sounder (MLS) 관측 자료가 추가되면서 대류권 오존 자료가 개선된 바 있다(Wargan et al., 2017). 모든 재분석 자료의 자료 동화에 사용된 관측 기기 및 자료 형태는 기간에 따라 상이하다(Dragani, 2010; Inness et al., 2013; Wargan et al., 2017).

모든 재분석 자료는 월평균 자료를 사용하였으며, 수평 해상도 위경도 1.5°로 선형 내삽하였고, 세 재분석 자료가 공동으로 포함하는 22개 층 중 1000~200 hPa에 해당하는 연직 10개 층을 분석에 이용하였다. 포항 지점(36.03°N, 129.38°E)의 대류권 오존을 분석하기 위하여 각 모형 자료에서 가장 가까운 격자인 위도 36°N, 경도 129°E에 해당하는 격자의 자료를 이용하였다. 해당 1개의 격자(위도 36°N, 경도 129°E)뿐만 아니라 위경도 방향으로 총 2개 혹은 4개의 격자 자료를 이용하여 분석하였을 때에도 결과는 유사하였다(결과 나타내지 않음). 이는 준데 자료의 관측 기기의 상승에 따른 이류에 의한 영향을 고려하여도 결과가 크게 달라지지 않음을 시사한다. 분석 기간은 MACC에서 제공하는 자료 기간인 2003~2012년(10년)을 중심으로 분석하였다.

3. 결 과

재분석 자료의 오차를 알아보기 위해 2003~2012년의 관측 자료와의 월별 상대 오차를 분석하였다(Fig.

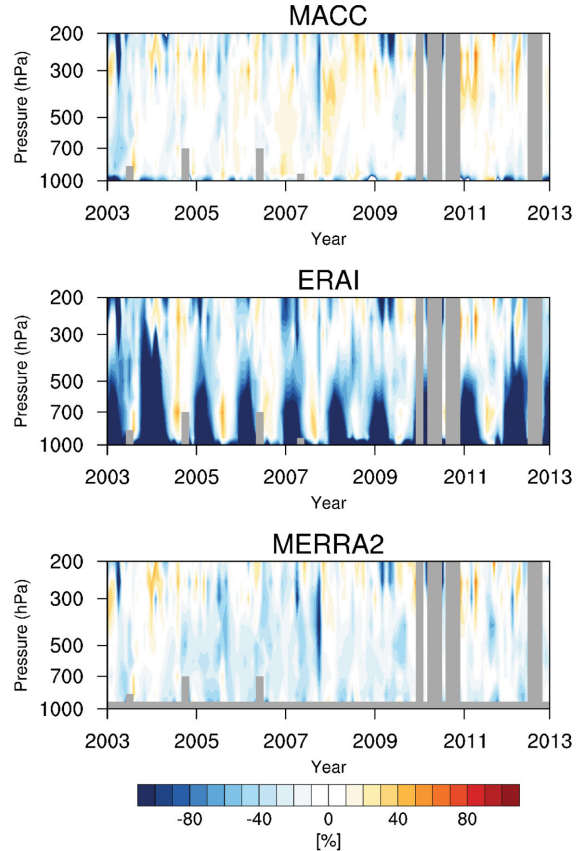


Fig. 1. Time series of monthly-mean ozone mixing ratio bias (in %) as a function of pressure: (top) MACC, (middle) ERAI and (bottom) MERRA2. Grey shading denotes missing values.

1). 관측이 이루어지지 않아 월 평균값의 계산이 불가능한 기간의 값과 MERRA2 1000 hPa의 missing 값은 회색 음영으로 표기하였다. 각 층에서의 연평균 및 계절평균 오차를 Table 2에 나타내었다. 모든 재분석 자료에서 관측 자료보다 낮은 오존 농도가 나타나며, 특히 MACC은 모든 층과 분석 기간에 대해 평균 -1.9%의 오차를 나타내어 가장 작은 오차를 보였다. 평균 오차는 ERAI에서 크게 나타났는데, 특히 700 hPa 이하의 대류권 하부 1~3월의 오차가 -50% 이상으로 가장 크게 나타났다(Table 2). ERAI의 연직 오존량은 예단 방정식(Cariolle and Teyssedre, 2007)을 통해 추정되기 때문에 타 재분석 자료보다 큰 오차를 나타낸 것으로 보인다. MERRA2는 모든 층과 분석 기간에 대해 전반적으로 음의 오차를 나타냈으며 평균 오차는 -8.8%로 나타났다.

포항 지역 오존의 연직 분포의 계절 변동성은 Fig. 2

Table 2. Ozone mixing ratio biases (in %) in MACC, ERAI, and MERRA2 reanalysis datasets compared to the observation data for annual-mean (ANN), March-to-May (MAM), June-to-August (JJA), September-to-November (SON), and December-to-February (DJF).

		200 hPa	300 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	925 hPa	1000 hPa
MACC	ANN	-6.26	8.75	-0.65	-1.33	-0.88	1.22	-24.14
	MAM	-11.90	18.93	-0.69	-7.18	-11.33	-9.82	-38.91
	JJA	-3.39	-6.75	-11.02	-3.05	2.33	13.00	17.98
	SON	-1.79	4.43	-0.85	1.04	2.47	5.79	-27.49
	DJF	-7.26	17.11	9.99	4.58	5.15	0.81	-38.03
ERAI	ANN	-10.94	-7.30	-26.46	-25.44	-36.12	-43.20	-62.07
	MAM	-20.08	-6.10	-38.99	-50.32	-59.53	-63.52	-76.87
	JJA	0.85	-9.80	-13.52	16.33	2.56	-11.36	-50.52
	SON	2.18	-0.08	-11.62	-7.27	-14.71	-22.20	-53.48
	DJF	-25.56	-13.37	-40.13	-57.38	-62.37	-62.58	-63.45
MERRA2	ANN	2.18	-1.74	-15.88	-13.62	-15.62	-14.46	-
	MAM	-6.16	3.22	-15.63	-17.29	-24.58	-23.67	-
	JJA	1.82	-12.25	-20.51	-7.05	-11.96	-12.24	-
	SON	12.67	-3.29	-18.00	-16.49	-17.88	-17.00	-
	DJF	1.43	4.75	-9.40	-13.20	-6.75	-3.55	-

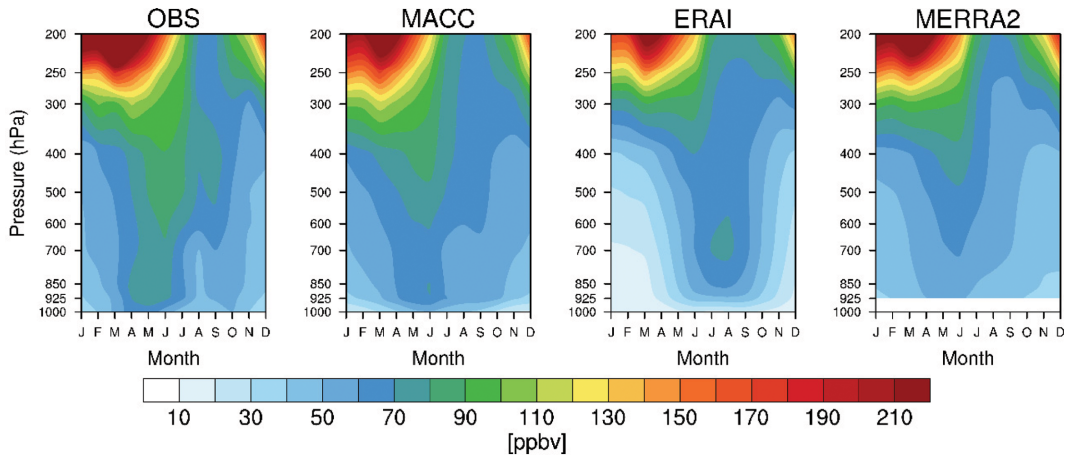


Fig. 2. Seasonal cycle of ozone mixing ratio profile in observation, MACC, ERAI and MERRA2 for the period of 2003~2012.

에서 확인할 수 있다. 관측 자료에서 포항의 대류권 오존 농도는 봄철에 최댓값을 나타내며, 지표 부근에서는 5월을 중심으로 고농도의 오존이 확인되었다. 계절에 따른 오존 농도의 변동성이 뚜렷한 대류권 상부에서는 모든 재분석 자료가 관측 자료와 유사한 형태를 보이지만 대류권 하부의 변동성은 자료에 따라 매우 다르게 나타났다. 모든 층에서 봄철 최대 농도가 나타나는 관측 자료와는 달리, ERAI의 오존 농도는 대류권 중층 이하에서는 여름철에 최대의 농도를 나타냈다.

대류권 하부의 오존을 자세히 살펴보기 위해, 지표 부근인 850 hPa의 계절 변동성을 분석하였다(Fig. 3).

자료별 각 월의 평균값에 대한 10년간의 표준편차를 에러 바(error bar) 형태로 Fig. 3에 표기하였다. 포항의 대류권 오존은 봄철에 최대 농도가 나타나고 봄, 가을철에 농도가 높으며 여름, 겨울철에 농도가 낮은 특징을 나타냈다. 여름철 대류권 하부의 오존 농도는 높은 일사량에도 불구하고 낮은 농도를 보이는데, 이는 주로 여름철 구름과 강우로 인한 것으로 알려져 있다(Luo et al., 2000; Lin et al., 2009; Zhao et al., 2010). MACC은 ERAI, MERRA2와 비교하여 관측과 유사한 계절 변동을 나타냈다. 관측 자료는 5월에 오존 농도의 최댓값을 보인 것과는 달리 MACC의 최

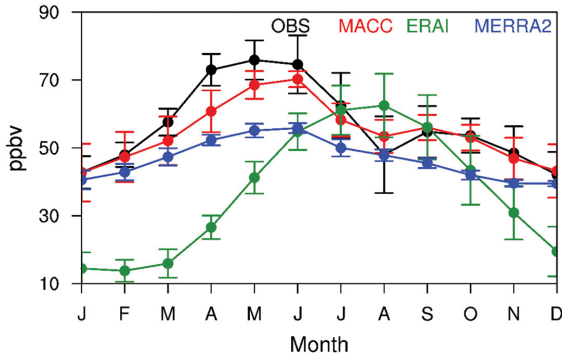


Fig. 3. Seasonal cycle of 850-hPa ozone mixing ratio in observation (black), MACC (red), ERAI (green) and MERRA2 (blue) for the period of 2003~2012. The error bar indicates one standard deviation on interannual time scale.

댓값은 6월에 나타났으나 이를 제외한 모든 계절에서는 관측 자료와 유사한 오존 농도를 나타냈다. MERRA2는 겨울철의 오존 농도를 제외한 포항 대류권 오존의 계절 변화를 나타내지 못하였다. 특히 ERAI의 대류권 하부 오존 농도는 여름철에 가장 높게 나타나 관측이나 타 재분석 자료들과는 전혀 다른 계절적 변화 양상을 보이며 대류권 오존의 변동성을 현실적으로 나타내지 못하는 한계를 보인다(Dragani, 2011). 각 자료별 표준편차를 살펴보면, 관측 자료에서 여름철 변동폭이 가장 크게 나타나며 ERAI는 다른 자료들에 비해 여름, 가을철 변동폭이 크고, MERRA2는 계절에

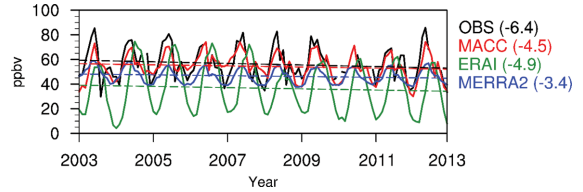


Fig. 5. Time series of monthly-mean ozone mixing ratio at 850 hPa (solid lines) and their linear trends (dashed lines) in observation (black), MACC (red), ERAI (green) and MERRA2 (blue). The number in the parenthesis denotes the trend in ppbv per decade.

관계없이 작은 변동폭을 나타냈다. 이러한 오존 농도의 전반적인 자료별 특징은 850 hPa뿐만 아니라 700 hPa, 925 hPa 등 대류권 중하부에서 동일하게 나타났다(자료 나타내지 않음).

Figure 4에서는 포항의 연도별 연직 오존 분포를 통해, 2003~2012년(10년) 동안의 오존의 연직 구조 변화를 확인하였다. 관측 자료와 모든 재분석 자료에서 대류권 상부의 오존 농도는 뚜렷한 경향성을 보이지 않았으나(Fig. 4a), 대류권 하부에서는 감소 경향이 나타났다(Fig. 4b). MACC은 모든 기간에서 1000 hPa부터 925 hPa까지 급격하게 오존 농도가 증가하는 특징이 나타났는데, 이러한 특징은 선행 연구와 유사한 결과이며 대기 경계층 부근에서의 오존의 유입과 혼합 과정에 대한 개선의 필요성이 확인된 바 있다(Katragkou et al., 2015).

Figure 5에서는 포항의 지표 부근인 850 hPa 오존의

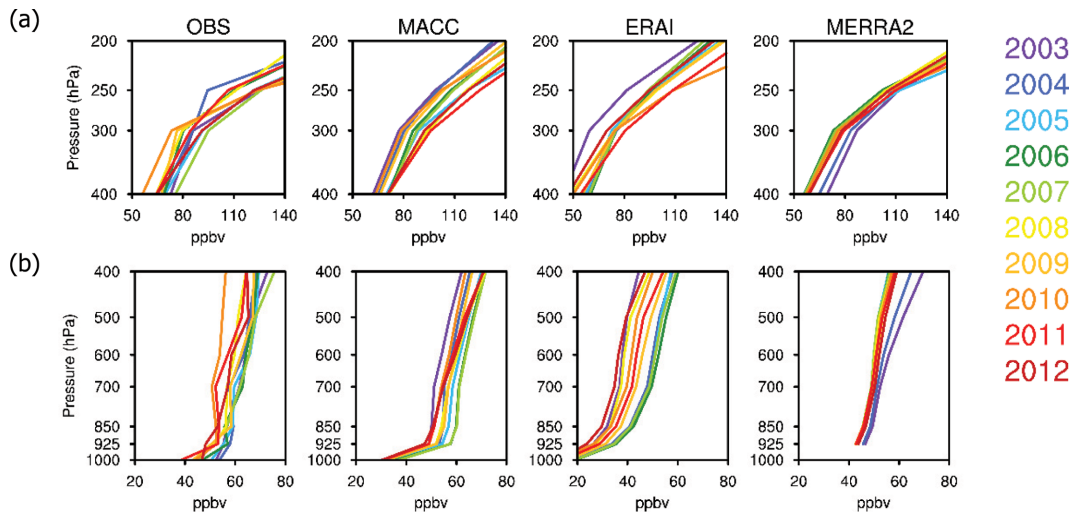


Fig. 4. Vertical profile of annual-mean ozone mixing ratio in observation, MACC, ERAI and MERRA2: (top) upper troposphere from 400 hPa to 200 hPa and (bottom) lower troposphere from 1000 hPa to 400 hPa. Each year is denoted with a different color.

변화 경향성을 확인하였다. 관측 자료는 85.4%의 유의수준에서 6.4 ppbv/decade의 감소 경향성을 보였고, 재분석 자료는 3.4~4.9 ppbv/decade의 감소 경향성을 나타내고 있어, 모든 자료에서 2003~2012년의 오존 농도는 감소하고 있음을 보여준다. 이는 2000년대 이후 일본 지역에서 대류권 오존의 증가 경향이 둔화되고 감소하는 경향성이 보인다는 선행 연구의 결과와 일치한다(Oltmans et al., 2006). 단, 본 연구에서 주목한 기간인 2003~2012년에는 MACC은 83.2%, ERAI는 57.8%, MERRA2는 93.6%의 유의수준을 나타내어 감소 경향이 통계적으로 유의하지 않았다.

4. 결론 및 토의

본 연구는 포항 오존존데 자료를 이용하여 한반도 오존의 연직 분포를 확인하고 계절 특성과 장기 변동성을 분석하였다. 또한 최신 재분석 자료인 MACC, ERAI, MERRA2에서 나타나는 포항 지역 오존의 특성을 관측 자료와 비교하여 검증하였다.

2003~2012년의 포항 지역 재분석 자료의 오차는 MACC에서 가장 작게 나타났고, ERAI에서 가장 크게 나타났으며, 특히 ERAI에서 대류권 하부의 오존 농도가 관측보다 낮게 나타났다. 포항의 오존존데 자료는 대류권 전 층에서 봄철(3~5월) 최대, 겨울철(11~1월) 최소 농도를 갖는 계절 특성을 보였다. 재분석 자료 중 MACC이 가장 관측 자료와 유사한 계절성을 보였으며 ERAI은 포항의 대류권 오존 계절성을 거의 나타내지 못했다. MERRA2는 관측 자료와 유사한 계절성을 보였으나 계절에 따른 대류권 오존의 변동성이 관측 자료보다 작았다. 2003~2012년(10년) 동안 대류권 오존은 상부보다 하부에서 감소 경향이 두드러졌으며, 포항의 대류권 하부의 오존 농도는 관측과 모든 재분석 자료에서 점차 감소하는 것으로 나타났다.

최근 동아시아 지역에서 유의미한 수준의 대류권 오존 증가가 확인된 선행 연구와는 달리, 본 연구에서는 오존의 감소 경향을 확인하였으나 관측 자료 및 모든 재분석 자료에서 유의한 결과는 나타나지 않았다. 때문에 보다 장기간 자료를 분석하여 대류권 오존의 경향성을 파악할 것이 요구된다. 또한, 앞서 일본 지역의 대류권 오존에 관한 선행 연구에서는 본 연구와 같이 대류권 오존의 감소를 확인한 바 있다(Oltmans et al., 2006). 이는 동아시아에서 대류권 오존의 경향성이 지역에 따라 달라질 수 있음을 암시한다. 때문에 대류권 오존의 감소가 한반도에 국한된 현상인지를 확인하기 위해 향후 분석 영역을 동아시아로 확장하여 연구를 수행할 필요가 있다. 이를 통해, 보다 명확한 한반도와 동아시아의 대류권 오존의 특성을 파악할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진See-At기술개발연구사업(KMI2018-01112)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ancellet, G., and F. Ravetta, 2005: Analysis and validation of ozone variability observed by lidar during the ESCOMPTE-2001 campaign. *Atmos. Res.*, **74**, 435-459, doi:10.1016/j.atmosres.2004.10.003.
- Banta, R. M., and Coauthors, 1998: Daytime buildup and nighttime transport of urban ozone in the boundary layer during a stagnation episode. *J. Geophys. Res.*, **103**, 22519-22544, doi:10.1029/98JD01020.
- Cariolle, D., and M. Déqué, 1986: Southern hemisphere medium-scale waves and total ozone disturbances in a spectral general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10825-10846, doi:10.1029/JD091iD10p10825.
- _____, and H. Teyssedre, 2007: A revised linear ozone photochemistry parameterization for use in transport and general circulation models: multi-annual simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 2183-2196, doi:10.5194/acp-7-2183-2007.
- Cooper, O. R., and Coauthors, 2014: Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elem. Sci. Anth.*, **2**, 29, doi:10.12952/journal.elementa.000029.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Dethof, A., and E. V. Hölm, 2004: Ozone assimilation in the ERA-40 reanalysis project. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 2851-2872, doi:10.1256/qj.03.196.
- Dragani, R., 2010: On the quality of the ERA-Interim ozone reanalyses: comparisons with in situ data, ECMWF ERA Report Series 2, 19 pp [Available online at <https://www.ecmwf.int/node/9111>].
- _____, 2011: On the quality of the ERA-Interim ozone reanalyses: comparisons with satellite data. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1312-1326, doi:10.1002/qj.821.
- Emberson, L. D., and Coauthors, 2009: A comparison of North American and Asian exposure-response data for ozone effects on crop yields. *Atmos. Environ.*, **43**, 1945-1953. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.005.
- Feng, Z., K. Kobayashi, and E. A. Ainsworth, 2008: Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): a

- meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, **14**, 2696-2708, doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01673.x.
- Fishman, J., J. K. Creilson, P. A. Parker, E. A. Ainsworth, G. G. Vining, J. Szarka, F. L. Booker, and X. Xu, 2010: An investigation of widespread ozone damage to the soybean crop in the upper Midwest determined from ground-based and satellite measurements. *Atmos. Environ.*, **44**, 2248-2256, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.01.015.
- Flemming, J., A. Inness, H. Flentje, V. Huijnen, P. Moinat, M. G. Schultz, and O. Stein, 2009: Coupling global chemistry transport models to ECMWF's integrated forecast system. *Geosci. Model Dev.*, **2**, 253-265, doi:10.5194/gmd-2-253-2009.
- Gelaro, R., and Coauthors, 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, **30**, 5419-5454, doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- Inness, A., and Coauthors, 2013: The MACC reanalysis: an 8-yr data set of atmospheric composition. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 4073-4109, doi:10.5194/acp-13-4073-2013.
- Katragkou, E., and Coauthors, 2015: Evaluation of near-surface ozone over Europe from the MACC reanalysis. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 2299-2314, doi:10.5194/gmd-8-2299-2015.
- Kim, H.-S., and Y.-S. Chung, 2003: Surface Ozone and Precursors Observed in a Rural Area of Korea 1993-2001. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 689-698.
- Kim, J. H., S.-H. Lee, Y.-K. Kim, H. W. Lee, and S.-K. Song, 2001: Characteristics of troposphere ozone over the Korean peninsula measured from Pohang ozonesonde. *Atmosphere*, **11**, 98-102 (in Korean).
- Kim, Y.-K., Y.-S. Moon, S.-K. Song, and I.-B. Oh, 2002: Case Study of Surface Ozone Enhancement due to Vertical Transport of Tropospheric Ozone. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **38**, 307-317 (in Korean with English abstract).
- Lin, M., T. Holloway, T. Oki, D. G. Streets, and A. Richter, 2009: Multiscale model analysis of boundary layer ozone over East Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3277-3301, doi:10.5194/acp-9-3277-2009.
- Luo, C., J. C. St. John, Z. Xiuji, K. S. Lam, T. Wang, and W. L. Chameides, 2000: A nonurban ozone air pollution episode over eastern China: Observations and model simulations. *J. Geophys. Res.*, **105**, 1889-1908, doi:10.1029/1999JD900970.
- Monks, P. S., 2000: A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmos. Environ.*, **34**, 3545-3561, doi:10.1016/S1352-2310(00)00129-1
- _____, and Coauthors, 2015: Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 8889-8973, doi:10.5194/acp-15-8889-2015.
- Oltmans, S., and Coauthors, 2006: Long-term changes in tropospheric ozone. *Atmos. Environ.*, **40**, 3156-3173, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.01.029.
- Parrish, D. D., and Coauthors, 2012: Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern mid-latitudes. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 11485-11504, doi:10.5194/acp-12-11485-2012.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kinjo, and H. Tanimoto, 2002: Surface ozone at four remote inland sites and the preliminary assessment of the exceedances of its critical level in Japan. *Atmos. Environ.*, **36**, 4235-4250.
- Solomon, P., E. Cowling, G. Hidy, and C. Furiness, 2000: Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe. *Atmos. Environ.*, **34**, 1885-1920, doi:10.1016/S1352-2310(99)00453-7.
- Stain, O., J. Flemming, A. Inness, J. W. Kaiser, and M. G. Schultz, 2012: Global reactive gases forecasts and reanalysis in the MACC project. *J. Integr. Environ. Sci.*, **9**, 57-70, doi:10.1080/1943815X.2012.696545.
- Tanimoto, H., T. Ohara, and I. Uno, 2009: Asian anthropogenic emissions and decadal trends in springtime tropospheric ozone over Japan: 1998-2007. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L23802, doi:10.1029/2009GL041382.
- Tarasick, D. W., and Coauthors, 2007: Comparison of Canadian air quality forecast models with tropospheric ozone profile measurements above midlatitude North America during the IONS/ICARTT campaign: Evidence for stratospheric input. *J. Geophys. Res.*, **112**, D12S22, doi:10.1029/2006JD007782.
- Thompson, A. M., and Coauthors, 2007: Intercontinental Chemical Transport Experiment Ozonesonde Network Study (IONS) 2004: 2. Tropospheric ozone budgets and variability over northeastern North America. *J. Geophys. Res.*, **112**, D12S13, doi:10.1029/2006JD007670.
- Wargan, K., G. Labow, S. Frith, S. Pawson, N. Livesey, and G. Partyka, 2017: Evaluation of the Ozone Fields in NASA's MERRA-2 Reanalysis. *J. Climate*, **30**, 2961-2988, doi:10.1175/JCLI-D-16-0699.1.
- Wild, O., and H. Akimoto, 2001: Intercontinental transport of ozone and its precursors in a three dimensional global CTM. *J. Geophys. Res.*, **106**, 27729-27744, doi:10.1029/2000JD000123.
- Zhao, C., Y. Wang, Q. Yang, R. Fu, D. Cunnold, and Y. Choi, 2010: Impact of East Asian summer monsoon on the air quality over China: View from space. *J. Geophys. Res.*, **115**, D09301, doi:10.1029/2009JD012745.