

인버스 모델링 방법을 통해 추정된 대기 중 이산화탄소 농도와 항공 관측 자료 비교

김현정¹⁾ · 김현미^{1)*} · 김진웅¹⁾ · 조천호²⁾

¹⁾연세대학교 대기과학과, 대기예측성 및 자료동화 연구실, ²⁾국립기상과학원

(접수일: 2016년 3월 25일, 수정일: 2016년 5월 29일, 게재확정일: 2016년 6월 21일)

A Comparison of the Atmospheric CO₂ Concentrations Obtained by an Inverse Modeling System and Passenger Aircraft Based Measurement

Hyunjung Kim¹⁾, Hyun Mee Kim^{1)*}, Jinwoong Kim¹⁾, and Chun-Ho Cho²⁾

¹⁾*Atmospheric Predictability and Data Assimilation Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea*

²⁾*National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea*

(Manuscript received 25 March 2016; revised 29 May 2016; accepted 21 June 2016)

Abstract In this study, the atmospheric CO₂ concentrations estimated by CT2013B, a recent version of CarbonTracker, are compared with CO₂ measurements from the Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) project during 2010-2011. CarbonTracker is an inversion system that estimates surface CO₂ fluxes using atmospheric CO₂ concentrations. Overall, the model results represented the atmospheric CO₂ concentrations well with a slight overestimation compared to observations. In the case of horizontal distribution, variations in the model and observation difference were large in northern Eurasia because most of the model and data mismatch were located in the stratosphere where the model could not represent CO₂ variations well enough due to low model resolution at high altitude and existing phase shift from the troposphere. In addition, the model and observation difference became larger in boreal summer. Despite relatively large differences at high latitudes and in boreal summer, overall, the modeled CO₂ concentrations fitted well to observations. Vertical profiles of modeled and observed CO₂ concentrations showed that the model overestimates the observations at all altitudes, showing nearly constant differences, which implies that the surface CO₂ concentration is transported well vertically in the transport model. At Narita, overall differences were small, although the correlation between modeled and observed CO₂ concentrations decreased at higher altitude, showing relatively large differences above 225 hPa. The vertical profiles at Moscow and Delhi located on land and at Hawaii on the ocean showed that the model is less accurate on land than on the ocean due to various effects (e.g., biospheric effect) on land compared to the homogeneous ocean surface.

Key words: CarbonTracker, atmospheric inversion, CONTRAIL, aircraft measurement, surface CO₂ flux, atmospheric CO₂ concentration

*Corresponding Author: Hyun Mee Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea
Phone: +82-2-2123-5683, Fax: +82-2-365-5163
E-mail: khm@yonsei.ac.kr

1. 서 론

대기와 육지 및 해양 간 탄소 교환을 이해하기 위해 대기 중 이산화탄소 몰농도 관측 자료로부터 지표면 탄소 플럭스를 추정하는 대기 인버스 모델링(atmospheric inverse modeling), 즉 “top-down” 방법이 널리 이용되고 있다(e.g., Peters et al., 2007, 2010; Feng et al., 2009; Chevallier et al., 2010). 대기 인버스 모델링 방법을 이용해 지표면 탄소 플럭스를 추정하는 시스템인 탄소추적시스템(CarbonTracker)은 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 산하 지구시스템연구소(Earth System Research Laboratory, ESRL)에서 개발되어 2007년 초기 버전이 시행된 이래 거의 매년 업데이트되고 있다. 탄소추적시스템에서는 관측 자료를 동화시키기 때문에 모의된 결과와 관측 간 연관성이 존재하며, 일반적인 지표 관측 자료가 한 지점에서 존재함에 비해 수송 모델을 통해 전구 분포, 즉 넓은 공간 범위에 대한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 기타 관측 자료, 특히 위성 관측 자료를 평가하기에 적합하여 CarbonTracker 2013B (CT2013B)의 경우 Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography (SCIAMACHY)와 Greenhouse gases Observing Satellite (GOSAT)으로부터 얻어진 이산화탄소 컬럼 농도(XCO₂)와의 비교 대상으로 사용된 바 있다(Heymann et al., 2015; Lindqvist et al., 2015).

하지만 인버스 모델링 결과 또한 부족한 관측 수와 수송 모델에 의한 오차로 인해 불확실성이 존재한다(Stephens et al., 2007; Chevallier et al., 2010). 따라서 인버스 모델링 방법으로 산출된 결과 역시 다른 믿을 만한 관측 자료와의 비교를 통해 정확성을 검증할 필요가 있다. CT2013B를 이용하여 추정된 이산화탄소 농도 결과는 Kulawik et al. (2016)에서 지면 관측 기반의 Total Carbon Column Observing Network (TCCON) 자료와 Frankenberg et al. (2016)에서는 항공 자료인 HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) 자료와 비교하여 검증된 바 있다. 이를 통해 북반구 고위도에서 CT2013B 모의 결과와 관측의 차이가 컸고, 탄소 흡수/배출이 최대치에 이르는 시기에는 특히 300 hPa 부근에서 모델-관측 차이가 거의 4 ppm 정도로 컸다는 것이 밝혀진 바 있다. 하지만 Kulawik et al. (2016)에서 추가적인 연구(특히 남반구 및 45°N~67°N에 대해)의 필요성을 밝힌 바 있으며, Frankenberg et al. (2016)에서도 언급한 것처럼 인버스 모델링 방법을 통해 전구 탄소 순환을 추정함에 있어 여전히 존재하는 불확실성을 감소시키기 위해서는 추가적인 검증이 필요하다. 특히 검증에 사용할 수 있는 관측 자료에는

시공간적 한계가 존재하고, 등지 격자 설정(Kim et al., 2014) 혹은 자료동화에 사용한 관측 자료(Kim et al., 2016) 등에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에, 추가적인 검증은 모델 결과 개선에 큰 도움이 될 것이다.

본 연구에서 비교 대상으로 사용하고자 하는 관측 자료는 Japan Airlines (JAL) 여객기와 함께 수행된 Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) 프로젝트의 이산화탄소 몰농도 관측 자료이다. JAL 여객기 관측 프로젝트는 이산화탄소, 메탄 등의 온실 기체 관측을 목적으로 두 번에 걸쳐 수행되었다. 첫 번째 프로젝트는 1993년부터 2005년까지 수행되었고(Matsueda and Inoue, 1996; Matsueda et al., 2002), 뒤이어 두 번째 프로젝트가 2005년 후반부터 시작되어 현재까지 수행되고 있는데, 이 두 번째 프로젝트가 바로 CONTRAIL 프로젝트이다(Machida et al., 2008; Matsueda et al., 2008). CONTRAIL 프로젝트로부터 얻어진 이산화탄소 관측 자료(이하 CONTRAIL 자료)는 정확도가 ± 0.2 ppm 이내의 자료이다(Matsueda et al., 2008). 이러한 상업용 항공기를 이용한 관측은 자유 대기(free atmosphere)부터 성층권 하부까지 온실 기체의 변동성을 이해하는 데 도움이 된다(e.g., Sawa et al., 2008, 2012).

또한, CONTRAIL 자료는 신뢰도가 높아 위성 자료를 검증하기 위해서도 사용되고(e.g., Crevoisier et al., 2009, 2013; Kulawik et al., 2010; Inoue et al., 2013), 모델 결과와의 비교 대상으로도 사용된다. Chevallier et al. (2010)는 Bayesian variational inversion 방법과 Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMDZ) 수송 모델을 통해 추정된 이산화탄소 인버스 모델링 결과를, Feng et al. (2011)에서는 GEOS-Chem 수송 모델과 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter, EnKF) 방법을 사용해 추정된 이산화탄소 인버스 모델링 결과를 CONTRAIL 관측 자료와 비교한 바 있고, Houweling et al. (2015)에서는 8개의 인버스 모델링 결과를 비교 및 검증하기 위해 CONTRAIL 자료를 사용하였다. 또한 여러 가지 수송 모델을 사용해 얻어진 이산화탄소 농도 결과를 CONTRAIL 관측 자료와 비교하여 수송 모델의 영향을 분석하기도 하였다(Basu et al., 2011; Niwa et al., 2011). 특히 Basu et al. (2011)에서는 이전 탄소추적시스템 버전인 CT2010 결과와 CONTRAIL 자료를 비교한 바 있으나, 30°N~60°N에 대해 이산화탄소 컬럼 농도(XCO₂)의 계절 사이클 분석에 초점을 두었고 CONTRAIL 자료는 TCCON 자료에 부가적으로 별다른 선처리 없이 사용하였다. 이와 다르게 본 연구에서는 하층 자료 및 관측 수가 적은 공항의 자료를 필터링하고 이산화탄소 몰농도의 수평 및 연직 분포를 분석함으로써 보다 정확하고 자세한 분석을 수행하였다. 또한 아시아 지역의 지표면 탄소 플럭스

Table 1. Summary of the prior flux, transport model, and nesting domain used in CT2013B.

Prior flux	Biosphere	CASA-GFED v3.1 (van der Werf et al., 2010)
	Ocean	Jacobson et al. (2007)
	Fires	CASA-GFED v3.1 (van der Werf et al., 2010)
	Fossil Fuel	Miller dataset (CDIAC and EDGAR)
Transport model	TM5 transport model with ERA-interim reanalysis	
Transport model resolution	(domain 1) 3° × 2°	Globe
	(domain 2) 1° × 1°	12°S-70°N, 30°E-168°E
Period	2000. 1. 1~2011. 12. 31 (Analysis was conducted for 2010-2011.)	

를 추정하기 위해 CONTRAIL 자료를 탄소추적시스템에 동화시킴으로써 효과를 본 연구로 Zhang et al. (2014)가 있다. Zhang et al. (2014)의 결과는 CONTRAIL 자료를 다른 인버스 모델링 방법에 적용한 연구(Niwa et al., 2012; Jiang et al., 2014)와 비교해 보면 결과에 차이가 있다. 예를 들어, Zhang et al. (2014)에서 추정된 아시아 지역의 탄소 순 흡수는 $-1.56 \text{ PgC yr}^{-1}$ 이었지만 Niwa et al. (2012)에서는 $+0.06 \text{ PgC yr}^{-1}$ 이었다. 여기서 음의 부호는 지표면 탄소 플럭스 흡수를, 양의 부호는 배출을 의미한다. 따라서 CONTRAIL 자료와 모델 결과를 자세하게 비교하는 것은 CONTRAIL 자료를 동화시킨 인버스 모델링 연구의 정확도 향상에 큰 도움이 될 것이다. 뿐만 아니라 CONTRAIL 자료는 정확도가 높고 시공간적으로 분포 범위가 넓기 때문에 앞서 언급하였던 검증에 사용된 관측 자료의 시공간적 한계를 보완하기에 매우 적합하다. 그러므로 CONTRAIL 자료를 이용하여 모델 결과를 검증하는 것은 의미 있는 연구가 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 최근 1년동안 운영된 CT2013B를 통해 모의된 이산화탄소 농도와 CONTRAIL 이산화탄소 항공 관측 자료를 비교하여 그 결과를 분석하고자 한다. 2장에서는 비교 자료인 CT2013B와 CONTRAIL 자료에 대한 설명을 제시하였고, 비교 결과는 3장에서 보일 것이다. 마지막으로 결론 및 요약은 4장에 제시한다.

2. 자료 설명

2.1 탄소추적시스템

탄소추적시스템에서는 초기 추정된 지표 플럭스를 기반으로 대기 중 이산화탄소 관측 자료를 앙상블 칼만 필터 방법(Evensen, 1994; Whitaker and Hamill, 2002)을 이용해 동화시켜 최적화된 지표면 탄소 플럭스를 추정한다(Peters et al., 2007). 본 연구에서는

CT2013B를 사용해 모의된 이산화탄소 농도 결과를 비교에 사용할 것이다. 본 연구에서 사용한 CT2013B 설정 및 구성은 Table 1에 요약하여 나타내었다. 생권, 해양, 화재, 그리고 화석 연료 4가지로 구성된 초기 지표 플럭스는 각각 Carnegie-Ames-Stanford Approach Global Fire Emissions Database (CASA-GFED) v3.1 (van der Werf et al., 2010), Jacobson et al. (2007), CASA-GFED v3.1, 그리고 Carbon Dioxide Information and Analysis Center (CDIAC) and the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) 인벤토리로부터 얻어졌다. 자료동화에 사용된 관측 자료는 NOAA ESRL에서 제공하는 이산화탄소 현장(in-situ) 관측 자료 모음인 “ObsPack” 자료(Masarie et al., 2014)이다. ObsPack 자료는 탄소 순환 인버스 모델링, 모델 평가, 그리고 위성 자료 검증 연구에 사용하는 것을 목적으로 생산된 자료이며, 연속적 지표 관측 자료와 비연속적 지표 관측 자료 및 항공 관측 자료로

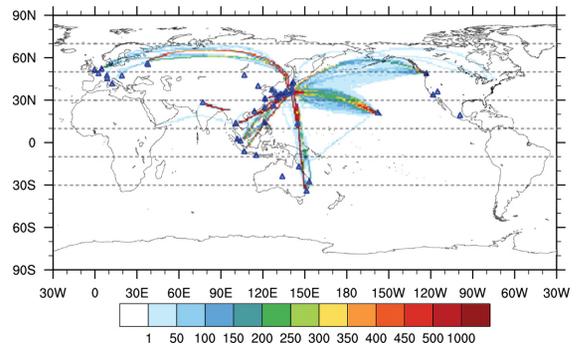


Fig. 1. The number of CO₂ observations at 1° × 1° grid from January 2010 to December 2011 in CONTRAIL project. The locations of airports where CO₂ measurements were conducted are denoted by blue triangles, and gray-dashed lines indicate the latitudinal bins (20° interval from 30°S to 70°N).

Table 2. List of the airports where aircraft measurements were implemented during 2011-2012. The airports selected to analyze the vertical profile are presented in bold character.

Code	City	Airport name	Latitude [°N]	Longitude [°E]	Elevation [m]
DME	Moscow, Russia	Domodedovo Airport	55.41	37.91	179
AMS	Amsterdam, Netherlands	Schiphol Airport	52.31	4.76	3
YVR	Vancouver, Canada	Vancouver International Airport	49.19	-123.18	4
ZRH	Zurich, Switzerland	Zurich International Airport	47.47	8.55	432
CTS	Chitose, Japan	New Chitose Airport	42.78	141.69	25
PEK	Beijing, China	Beijing Capital International Airport	40.08	116.59	35
GMP	Seoul, Republic of Korea	Gimpo International Airport	37.56	126.79	18
ICN	Incheon, Republic of Korea	Incheon International Airport	37.47	126.45	7
NRT	Narita, Japan	Narita International Airport	35.76	140.39	43
HND	Haneda, Japan	Tokyo International Airport	35.55	139.78	6
NGO	Nagoya, Japan	Chubu Centrair International Airport	34.86	136.81	5
ITM	Osaka, Japan	Osaka International Airport	34.79	135.44	12
KIX	Kansai, Japan	Kansai International Airport	34.43	135.24	0
FUK	Fukuoka, Japan	Fukuoka Airport	33.58	130.45	9
SHA	Shanghai, China	Shanghai Hongqiao International Airport	31.20	121.34	3
DEL	Delhi, India	Indira Gandhi International Airport	28.57	77.10	237
OKA	Naha, Japan	Naha Airport	26.20	127.65	4
TPE	Taipei, Taiwan	Taiwan Taoyuan International Airport	25.08	121.23	32
HKG	Hong Kong, China	Hong Kong International Airport	22.31	113.92	6
HNL	Honolulu, United States	Honolulu International Airport	21.32	-157.92	4
BKK	Bangkok, Thailand	Suvarnabhumi International Airport	13.68	100.75	2
GUM	Guam, Guam	Guam International Airport	13.48	144.80	91
SIN	Singapore, Singapore	Singapore Changi International Airport	1.35	103.99	7
CGK	Jakarta, Indonesia	Jakarta International Soekarno-Hatta Airport	-6.13	106.66	10
CNS	Cairns, Australia	Cairns Airport	-16.89	145.76	3
SYD	Sydney, Australia	Kingsford Smith Airport	-33.95	151.18	6
AOJ	Aomori, Japan	Aomori Airport	40.73	140.69	198
JIB	Djibouti, Djibouti	Djibouti-Ambouli International Airport	11.55	43.16	15
ZAG	Zagreb, Croatia	Zagreb International Airport	45.74	16.07	108
PRG	Ruzyně, Czech	Vaclav Havel Airport	50.11	14.28	380
DBV	Dubrovnik, Croatia	Dubrovnik Airport	42.56	18.27	161
OKJ	Okayama, Japan	Okayama Airport	34.76	133.86	239
LJU	Ljubljana, Slovenia	Ljubljana Joze Pucnik Airport	46.22	14.46	388
YUL	Montreal, Canada	Montreal-Pierre Elliott Trudeau International Airport	45.47	-73.74	36
YYZ	Toronto, Canada	Toronto Pearson International Airport	43.68	-79.63	173

구성된다. 이 중 항공 관측 자료는 이 연구에서 동화에 사용되지 않으며, 사용되는 지표 관측 자료 중 일부는 각 관측소의 위치 및 특성에 따라 12에서 16 LST, 또는 00에서 04 LST, 또는 14에서 18 LST에 대해서만 평균된다. 예를 들어, 높은 고도에 위치한 관측소의 경우 낮 시간 동안 종종 골짜기에 의한 국지적 영향을 받는데 이러한 국지적 영향은 모델이 모의하기 어렵기 때문에 밤 시간대 관측된 자료를 사용한다.

탄소추적시스템에서 사용하는 대기 수송 모델은 Transport Model 5 (TM5) 수송 모델(Krol et al., 2005)이다. TM5는 탄소추적시스템에서 관측 연산자

(observation operator) 역할을 하는 오프라인 모델로, 양방향 등지 격자(two-way nested grid)를 사용한다. Kim et al. (2014)에서 등지 격자를 동아시아로 설정한 결과 아시아 지역에 대해 좀더 세밀한 플럭스 패턴을 얻을 수 있음을 보였다. CONTRAIL 프로젝트는 일본을 중심으로 수행된 프로젝트이므로 이에 따라 본 연구에서도 동아시아 지역에 대한 등지 격자를 적용하여, 전구에 대해 3° × 2° 해상도를, 동아시아에 대해 1° × 1°(위도 12°S~70°N, 경도 30°E~168°E) 해상도를 적용하였다. TM5는 모델 상한인 0.1 hPa까지 연직 층이 25개이고, 사용하는 기상장은 ECMWF (European

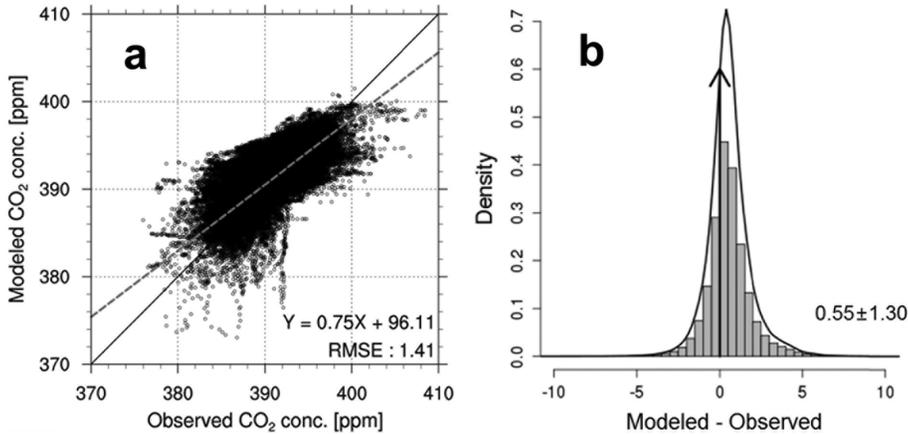


Fig. 2. (a) The scatter plot between the observed CO₂ concentrations and the modeled CO₂ concentrations during 2010-2011: the solid line denotes the identity line (i.e., $y=x$ line) and the dashed line denotes the regression line with information represented at the right bottom. (b) The histogram of modeled minus observed CO₂ concentrations: the black line denotes the density function, and the number at the right bottom indicates the mean difference with standard deviation.

Centre for Medium Weather Forecast) ERA-interim 재 분석 자료로부터 얻어진다.

CT2013B를 사용한 이산화탄소 농도 모의는 2000년부터 2011년까지 기간에 대해 수행되었으며, 분석에 사용된 자료는 스핀업 기간을 제외하고 2010년 1월부터 2011년 12월까지의 자료이다. 모델-관측 비교를 위해, CT2013B 모델 결과를 CONTRAIL 자료의 시·공간에 대응하여 내삽하였다.

2.2 CONTRAIL

CONTRAIL 프로젝트는 상업용 항공기를 이용해 대류권계면 근처의 온실 기체를 관측하기 위해 2005년 11월 시작되었다(Machida et al., 2008). 이 프로젝트는 National Institute for Environmental Studies (NIES), Meteorological Research Institute (MRI), Japan Airlines International (JAL), JAMCO Corporation, 그리고 JAL-Foundation (JAL-F)이 함께 수행하는 프로젝트이며, 5대의 JAL 여객기에 연속적인 이산화탄소 측정 장비(Continuous CO₂ Measuring Equipment, CME)를 탑재하여 이산화탄소를 측정한다. 이산화탄소 측정은 비행 모드(level mode)과 이·착륙(ascending and descending mode) 모드로 나누어진다. 비행 중에는 이산화탄소 자료가 1분 간격으로 측정되며 이는 수평거리 약 15 km 정도에 상응한다. 반면 이·착륙 동안에는 10초 간격으로 이산화탄소가 측정되며 이는 고도 약 100 m 정도에 상응한다. 앞서 언급했던 것처럼 측정된 이산화탄소 자료의 정확도는 ±0.2 ppm 이내이다. 모든 이산화탄소 자료는 NIES 09 CO₂ 스케일에 대해 보정되었다(Machida et al., 2011).

비행 중, 그리고 이·착륙 시 이산화탄소를 측정함으로써 대류권계면 부근의 이산화탄소 관측뿐만 아니라 각 공항에서의 연직 프로파일 또한 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이산화탄소 농도의 수평 분포와 연직 분포에 대한 분석을 나누어 수행하였다. 수평 분포 분석은 비행 모드 자료를 이용하였다. CONTRAIL 자료의 지리적 분포는 일본을 중심으로 유럽, 아시아, 호주, 북태평양, 북미 지역에 이른다(Fig. 1). 연직 분포는 각 공항에서의 이·착륙 모드 자료를 이용해 분석하였다. 분석 기간 동안 총 35개 공항에서 관측이 수행되었으며, 이 중 관측이 30일 이상 존재하는 11개 공항의 자료만 분석에 사용하였다(Table 2). 또한, 경계층 내 낮은 고도에서는 공항 근처의 오염된 공기가 관측에 영향을 미칠 가능성이 있기 때문에 Niwa et al. (2012)을 따라서 625 hPa 미만의 자료는 비교에서 제외하였다. 자료 분석에 사용된 CONTRAIL 자료는 2010년 1월부터 2011년 12월까지의 자료이다.

3. 결 과

전체 자료의 특성을 보고자 CT2013B에서 모의된 이산화탄소 농도와 CONTRAIL 프로젝트에서 관측된 이산화탄소 농도를 비교해 보았다(Fig. 2). 모델 값과 관측 값 사이의 상관 계수는 약 0.84로 높았다(Fig. 2a). 모델-관측 차이를 보았을 때, 전체적으로는 양의 편향, 즉 모델에서 관측에 비해 이산화탄소 농도를 과대 모의하였으나 그 크기는 약 0.55 ppm 정도로 작았다(Fig. 2b). 또한 모델-관측 차이의 분포가 Gaussian 분포를 잘 따르는 것으로 보아, 모델에서 모의된 이

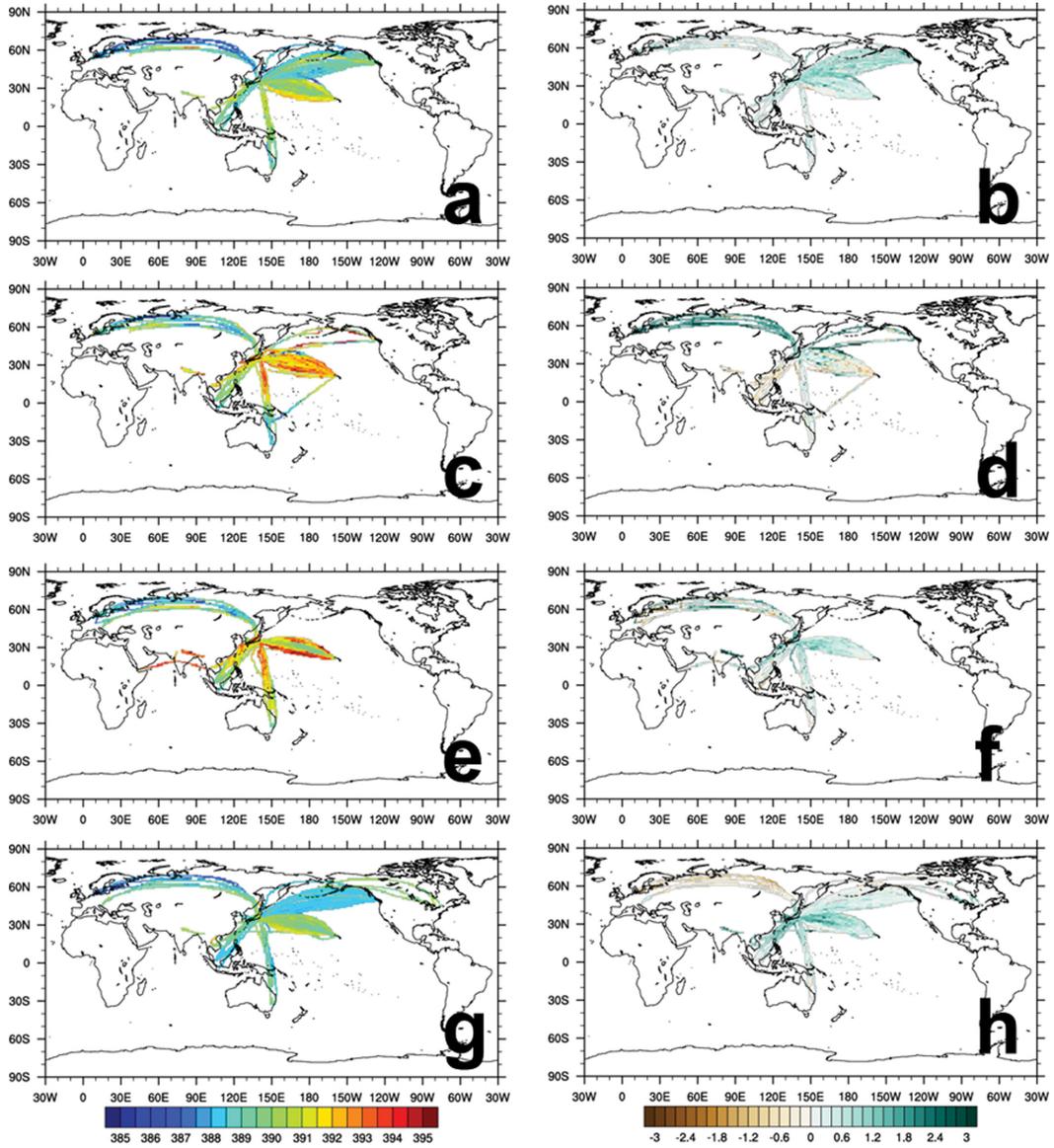


Fig. 3. Distribution of observed CO₂ concentrations at (a) DJF, (c) MAM, (e) JJA, and (g) SON, and difference between modeled and observed CO₂ concentrations at (b) DJF, (d) MAM, (f) JJA, and (h) SON for 2010-2011.

산화탄소 농도가 관측된 이산화탄소 농도를 잘 표현한다고 할 수 있다. 시공간 변동에 따른 결과를 보다 자세하게 살펴보기 위해, CONTRAIL 자료를 비행 모드와 이·착륙 모드로 구분하여 수평 분포와 연직 분포를 나누어 분석하였다.

3.1 수평 분포

수평 분포 분석을 위해 사용된 이산화탄소 농도 관측 자료는 약 9~13 km에 분포하므로, 대류권계면 근

처, 즉 대류권 상부 및 성층권 하부의 이산화탄소 농도 분포를 분석하였다. Figure 3은 분석 기간인 2010-2011년 동안 관측된 이산화탄소 농도 분포 및 모델-관측 차이를 12~2월(DJF), 3~5월(MAM), 6~8월(JJA), 그리고 9~11월(SON)에 대해 나타낸 그림이다. 다른 지역에 비해 유라시아 대륙 북부에서 모델-관측 차이의 분포가 계절별로 상이하다. 예를 들어, 북반구 봄철(MAM)에는 모델이 관측에 비해 이산화탄소 농도를 과대 모의한 정도가 다른 지역에 비해 컸고(Fig.

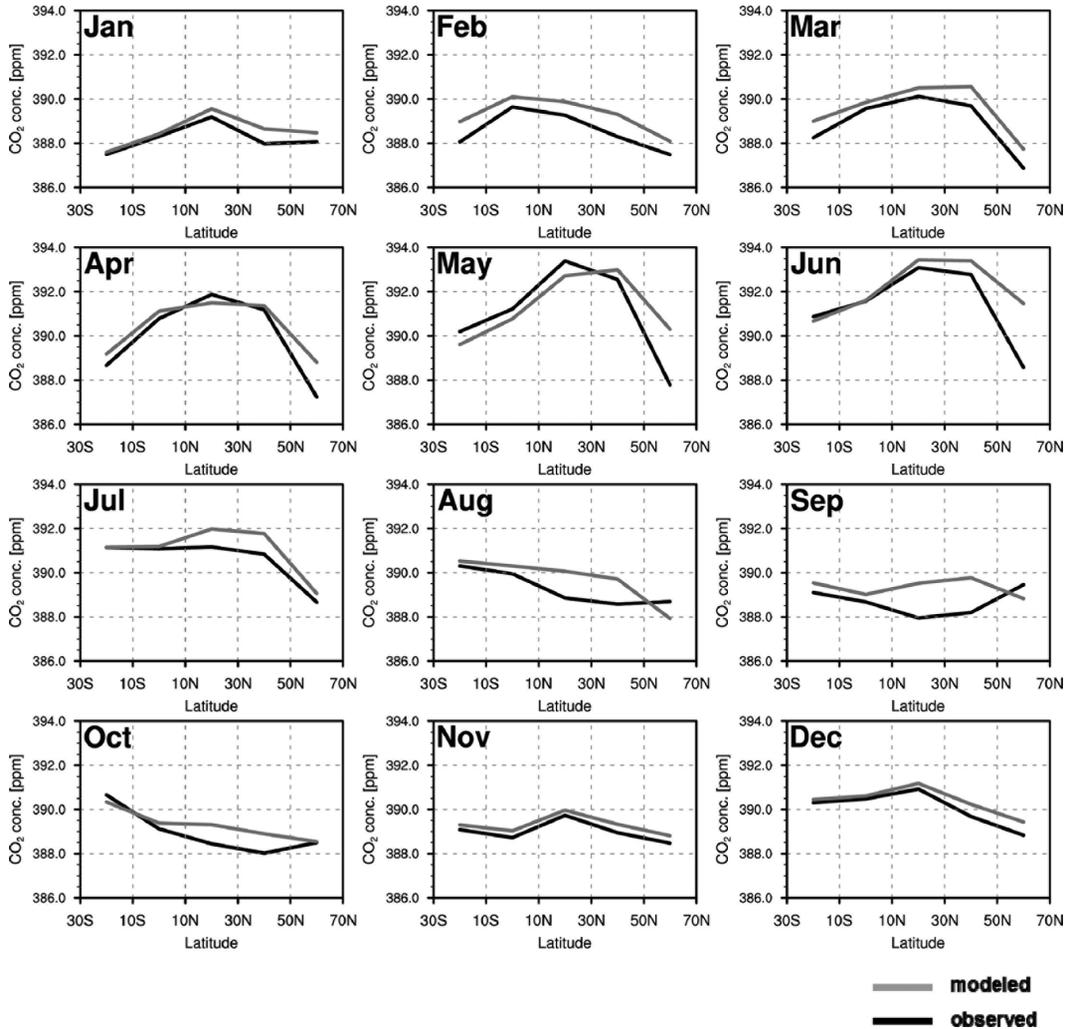


Fig. 4. Latitudinal distribution of the modeled (gray) and observed (black) CO₂ concentrations for each month. Latitudinal values were averaged for each latitudinal bin (20° interval from 30°S to 70°N, see Fig. 1).

3d), 북반구 가을철(SON)에는 다른 지역에서 대부분 양의 편향이 존재함에 비해 유라시아 대륙 북부에서는 그 정도는 작지만 오히려 모델이 이산화탄소 농도를 과소 모의하였다(Fig. 3h). 정량적인 분석을 위해 유라시아 대륙 북부(약 45°N~70°N, 0~135°E)에서 모델 값과 관측 값에 대해 월평균 이산화탄소 농도 최대값과 최소값의 차이를 계산하였다. 해당 지역은 관측 자료 수가 적기 때문에 월평균 값을 사용하였다. 모델에서 모의된 월평균 이산화탄소 농도의 최대-최소 차이는 약 4.2 ppm이었으나 관측은 약 3.0 ppm이었다. 따라서 모델이 관측에 비해 계절 변동성을 더 크게 모의하고 있음을 알 수 있다. 한편, 다른 지역에서는 북반구 봄철을 제외하면 주로 모델 결과가 관측

에 비해 과대 모의 되었다. 북반구 봄철 태평양, 특히 일본 열도와 하와이 사이 지역에서 높은 이산화탄소 농도가 관측되었는데, 모델에서는 이를 과소 모의 하였다. 이산화탄소 농도의 위도에 따른 분포를 보기 위해 30°S부터 70°N까지 20° 간격으로 나누어(see Fig. 1), 각 위도 대에 대한 월별 이산화탄소 농도의 모델 값과 관측 값을 평균하여 Fig. 4에 나타내었다. 몇 가지 특징들을 살펴보면, 먼저 3월부터 6월까지 10°N~50°N 부근에서 점점 다른 위도 대에 비해 높은 이산화탄소 농도가 관측되었으며, 모델 또한 그 경향을 잘 모의 하였다. 북반구 여름철을 지나며 식생에 의한 탄소 흡수가 활발해지면서 대기 중 이산화탄소 농도가 감소하는데, 이 때 모델 값과 관측 값이 점점 차이가 나

게 된다. 이는 여러 연구를 통해 밝혀진 것처럼 초기 지표 플릭스의 불확실성, 수송모델에 의한 오차 등으로 인해 모델에서 대기 중 이산화탄소 농도에 대한 식생의 영향을 정확하게 모의하는 것이 어렵기 때문이다(e.g., Gurney et al., 2002; Basu et al., 2011). 이후 11월부터는 모델 값과 관측 값이 상당히 비슷한 결과를 보였다. 반면, 4월에서 6월까지 50°N~70°N에서 모델 값과 관측 값의 차이가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 주의해야 할 점은, 항공 관측이 수행된 고도가 대류권계면 근처이긴 하나 위도에 따라, 그리고 계절에 따라 대류권계면의 높이가 다르다는 점이다. 대류권계면의 높이는 적도에서 극으로 향할수록 낮아지며 겨울철이 여름철보다 낮기 때문에, 같은 고도라 할 지라도 적도 부근에서는 대류권에 속한 반면 고위도에서는 성층권에 속할 수 있다. 실제로 수송 모델 내에서 ECMWF 재분석 자료를 이용해 잠재 소용돌이도(Potential vorticity)를 계산하여 2 PVU (1 PVU = $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$)를 기준으로 대류권과 성층권을 구분하면(Sawa et al., 2008), 유라시아 대륙 북부에서 관측된 값들 중 상당 부분이 성층권으로 분류된다(not shown).

모의된 이산화탄소 농도와 관측된 이산화탄소 농도의 차이 및 경향을 보기 위해 각 위도대에서 각각의 값을 일평균한 시계열 자료를 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 언급한 50°N~70°N에서 모델과 관측의 차이는 시계열 자료에서 좀더 뚜렷하게 드러난다(Fig. 5a). 특히 모델에서 관측에 비해 계절 변동성을 크게 모의하는 경향을 볼 수 있는데, 이러한 차이는 성층권 이산화탄소 농도의 계절 변동성이 대류권에 비해 상 이동(phase shift)이 존재하며 그 진폭 또한 작아 모의하기가 어려울 뿐만 아니라, 높은 고도에서 해상도가 낮아 성층권 이산화탄소 농도를 충분히 모의하지 못하기 때문으로 보인다(Sawa et al., 2008; Niwa et al., 2012). 다른 위도대에서는 모델 값과 관측 값이 엇갈리는 것을 보아 모델에서 관측에 비해 계절 변동성을 작게 모의하고 있음을 알 수 있다. Basu et al. (2011)에서 수송 모델 내 약한 연직 수송 등으로 인해 북반구 온난 지역 위도대에서 모델이 계절 사이클의 진폭을 과소 모의함을 밝힌 바 있으며, Jiang et al. (2008)에서도 대류권 상부 이산화탄소 농도 모의 결과 중위도 지역에서 모델이 관측에 비해 계절 사이클의 진폭을 과소 모의하는 경향이 있어 모델과 관측의 차이가 크다는 것을 보인 바 있다. 본 연구에서도 항공기의 비행 경로에 국한된 결과이기는 하나 중위도뿐만 아니라 다른 위도대에서도 이런 과소 모의 경향이 보인다. 또한 관측 값 중 상당 부분이 성층권으로 분류되었던 50°N~70°N를 제외하면 적도에서 북극으로 갈수록 계절 사이클 진폭이 커짐을 알 수 있

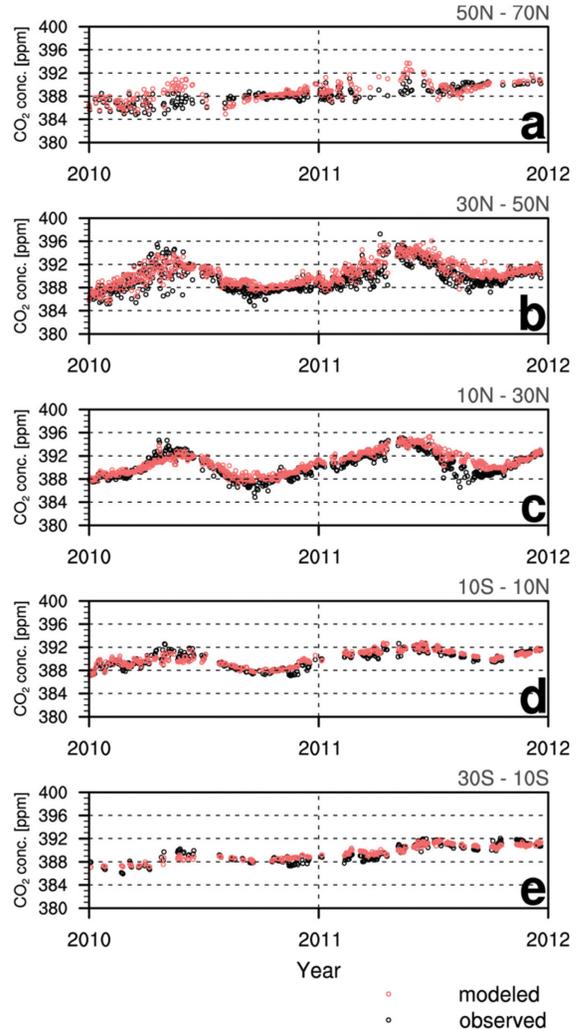


Fig. 5. Time series of the daily-averaged modeled (red dot) and observed (black dot) CO_2 concentrations for each latitudinal bin: (a) 50°N-70°N, (b) 30°N-50°N, (c) 10°N-30°N, (d) 10°S-10°N, and (e) 30°S-10°S.

는데, 이는 Sawa et al. (2012)의 결과와 일치한다. Sawa et al. (2012)에서는 고도 8 km 이상 대류권계면 이하, 즉 대류권 상부에서 적도에서 북극으로 갈수록 계절 사이클 진폭이 커짐을 보였는데, 본 연구에서는 대류권 및 성층권을 따로 구분하지 않았으므로 Sawa et al. (2012)과는 약간의 차이가 존재한다. 남반구와 북반구를 비교하면, Jiang et al. (2008)에서 보인 바와 같이 남반구의 계절 사이클 진폭이 북반구에 비해 작은 것을 확인할 수 있다(Figs. 5c, e).

대류권계면 근처의 이산화탄소 농도 수평 분포를 분석한 결과, 고위도 부근과 북반구 여름철에서 모델

값과 관측 값이 상대적으로 차이를 보였으나, 전반적으로는 모델에서 모의한 이산화탄소 농도 결과와 관측 값이 잘 맞는다는 것을 알 수 있었다. 이산화탄소는 화학적으로 안정한 기체이며 인간 활동이나 식생 등 주요한 흡수/배출원이 지표 근처에 존재한다(Goody and Yung, 1989). 즉, 대류권 상부 이산화탄소 농도는 지표 근처 이산화탄소의 수송으로 결정된다고 할 수 있으며 성층권 이산화탄소 농도 또한 대류권으로부터 유입되는 정도에 의해 결정된다. 따라서 모델에서 대류권 상부 및 성층권 하부의 이산화탄소 농도를 정확하게 모의하기 위해서는 먼저 지표면 탄소 플럭스를 정확하게 모의해야 하며, 수송 모델에서 수송 과정, 특히 연직 수송을 잘 모의할 수 있어야 한다. 그러므로 다음 절에서는 각 공항에서 이 · 착륙 시 관측된 자료를 통해 이산화탄소 농도의 연직 분포에 대한 모델-관측 결과를 자세하게 분석하였다.

3.2 연직 분포

Figure 6은 11개 공항에서 이 · 착륙 시 관측된 이산화탄소 농도와 모의된 이산화탄소 농도 및 그 둘의 차이를 나타낸 그림이다. CONTRAIL 프로젝트는 일본을 중심으로 수행된 프로젝트이기 때문에 관측 자료가 일본을 중심으로 위치한다. 특히, NRT에서 연직 자료는 전체 11개 공항 자료의 약 43.9%를 차지하기 때문에 결과가 편향되지 않도록 NRT에서의 결과를 따로 나타내었다. 모든 공항에서 모델이 관측에 비해 이산화탄소 농도를 과대 모의하여 양의 편향이 존재하였고, 40°N 이상 위도 대에 위치한 공항에서는 고도가 높아짐에 따라 양의 편향이 점차 증가하였다(Figs. 6a, b). 반면, 그 외 공항 및 NRT에서는 전 고도에서 모델-관측 차이가 거의 일정하였는데, 이는 모델이 지표로부터 상층으로 이산화탄소가 수송되는 과정을 잘 모의하고 있음을 의미한다. 따라서 지표 근처에서 모의가 더 정확해지면 전 고도에서 모델-관측 차이를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. NRT 및 다른 공항, 그리고 전체 공항에서의 자세한 결과는 Table 3에 나타내었다. NRT의 관측 자료 수가 많고 수송 모델의 등지 격자를 동아시아 지역에 적용하였

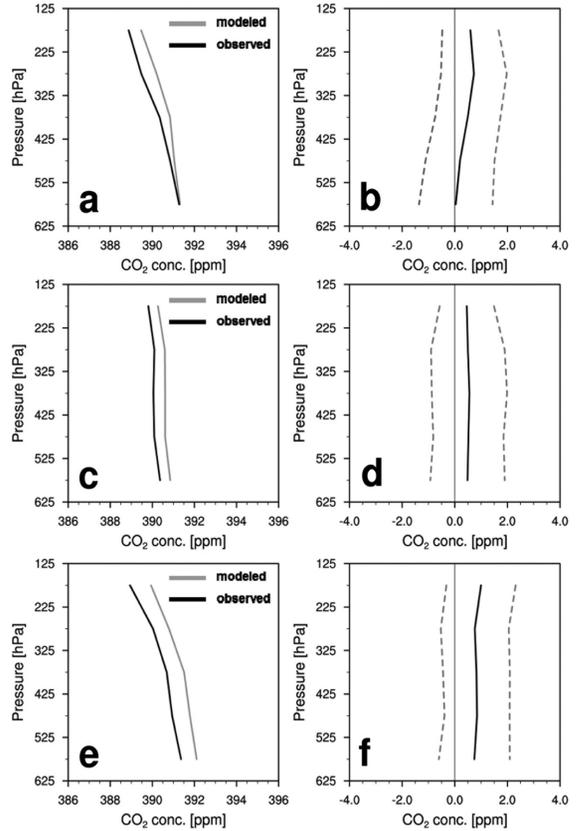


Fig. 6. Vertical profile of (a) modeled (gray) and observed (black) CO₂ concentrations and (b) their differences (black) with 1-sigma range (dashed gray) at airports located above 40°N (i.e., AMS, DME, and YVR). Results at other airports except NRT are represented in (c) and (d), similar to (a) and (b), respectively. NRT (e, f) was analyzed separately from other airports since NRT accounted for 43.9% of total observations at all selected 11 airports.

기 때문에, NRT에서 이산화탄소 농도의 연직 분포를 좀더 자세하게 분석하였다. 625 hPa부터 125 hPa까지 100 hPa 간격으로 나누어 각 연직 구간에 대한 모델 및 관측 값을 시계열로 나타내었다(Fig. 7). 각 연직

Table 3. Root Mean Squared Difference (RMSD, ppm), bias (ppm), standard deviation of the bias (Std, ppm), correlation coefficient between modeled and observed CO₂ concentration (Corr), and number of observations (Nobs) at all selected airports, airports located above 40°N, other airports except NRT (Narita), and NRT for 2010-2011.

	RMSD [ppm]	Bias [ppm]	Std [ppm]	Corr	Nobs
All selected	1.487	0.636	1.345	0.850	251515 (100%)
Airports located above 40°N	1.370	0.411	1.306	0.885	27655 (11.0%)
Other airports except NRT	1.488	0.523	1.393	0.798	113537 (45.1%)
NRT	1.515	0.809	1.281	0.891	110323 (43.9%)

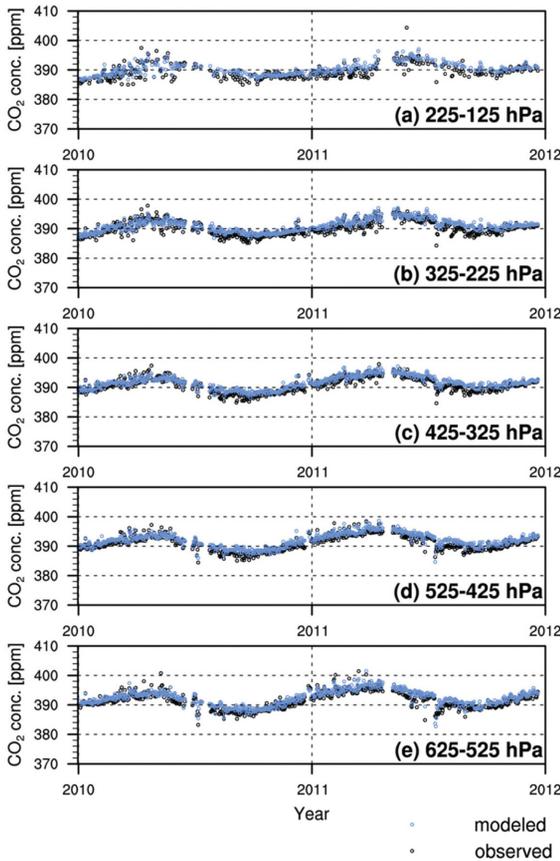


Fig. 7. Time series of the modeled (blue dot) and observed (black dot) CO₂ concentrations at NRT for (a) 225-125 hPa, (b) 325-225 hPa, (c) 425-325 hPa, (d) 525-425 hPa, and (e) 625-525 hPa.

Table 4. Bias (ppm), standard deviation of bias (Std, ppm), correlation coefficient between modeled and observed CO₂ concentration (Corr), and number of observations (Nobs) for each vertical level at NRT for 2010-2011.

P [hPa]	Bias [ppm]	Std [ppm]	Corr	Nobs
225-125	0.999	1.316	0.805	1775
325-225	0.761	1.291	0.860	22145
425-325	0.826	1.270	0.882	39686
525-425	0.848	1.240	0.905	29149
625-525	0.745	1.349	0.912	17568

구간에서 구한 모델-관측 간 차이 및 표준 편차, 상관 계수 값은 Table 4에 제시하였다. 고도가 높아질수록 모델-관측 간 상관 관계가 감소하였고, 특히 225 hPa 이상에서 상관 관계가 감소한 정도가 컸으며 편향 정도 또한 컸다. 225 hPa 이상에서 관측 자료 수가 적

긴 하나, 그 이하 고도에 비해 차이가 큰 편이며 특히 북반구 봄철 모델과 관측의 차이가 컸다(Fig. 7a). 그럼에도, 전체 편향 정도가 1 ppm 미만으로 작은 편이었고 상관 계수 또한 높은 것으로 보아 모델에서 대기 중 이산화탄소 농도를 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

Figure 8은 DME와 DEL, 그리고 HNL에서 모의된 이산화탄소 농도와 관측된 이산화탄소 농도의 연직 분포 및 계절별 두 값의 차이를 나타낸 그림이다. 연직 분석을 수행한 11개 공항 가운데 DME는 러시아 서부에, DEL은 인도 북부에 위치하여 내륙 지역의 특성을 나타내며, HNL은 태평양 한가운데 위치하여 해양의 특성을 나타낸다. 먼저 비슷한 위도에 위치한 DEL과 HNL을 비교해보면, 모의된 이산화탄소 농도와 관측된 이산화탄소 농도의 차이는 HNL에 비해 DEL에서 훨씬 컸다. 이 차이는 북반구 여름철 두드러졌으며(Fig. 8f), 가을철에도 약하긴 하지만 그 경향을 볼 수 있었다(Fig. 8g). 육지에 비해 균질하고 변동성 또한 적은 해양에서 모델-관측 차이가 적은 것은 기대할 수 있는 결과이긴 하나, 주요 원인은 서남아시아에서 여름철 몬순 기간인 7월에서 9월 동안 강한 탄소 흡수가 존재하지만 이를 모델에서 잘 모의하지 못하였기 때문으로 추측된다(Patra et al., 2011). DME의 경우, DEL에 비해 모델-관측 차이가 작았으나 HNL에 비해서는 컸고 북반구 봄철 모델-관측 차이가 가장 컸다(Fig. 8e). 결과적으로, 지역에 따라 차이가 있지만 해양에 비해 복잡한 내륙 지역에서 대기 중 이산화탄소 농도 모의가 더 어렵다는 것을 알 수 있다. DME와 DEL은 등지 격자 내에 존재하고 HNL은 등지 격자 밖에 존재하는데, 모든 지역에 등지 격자 설정을 적용하지 않은 실험에서도 위와 같이 육지와 해양의 차이를 확인할 수 있어(not shown), 등지 격자의 설정과 상관없이 모델-관측간의 차이가 육지와 해양에서 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 둘 다 내륙에 위치했음에도 DEL에서 DME에 비해 모델-관측 차이가 훨씬 큰 것은, 자료동화에 이용 가능한 관측 수가 많은 유럽 지역에 비해 관측소가 적게 분포한 아시아 지역에서 정교한 지표면 탄소 플럭스 결과를 얻기 힘들다(Peters et al., 2007)는 것이 주요하게 작용한 것으로 보인다. 북위 40°N 이상에 위치하고 있는 DME를 제외한 DEL과 HNL에서는 NRT에서와 같이 모델-관측 간 차이가 고도에 따라 거의 일정하게 분포하는 것으로 보아 연직 수송이 잘 모의되고 있음을 추측할 수 있다.

앞서 언급했던 것처럼, 대기 인버스 모델링 방법을 이용한 연구에서 정확한 결과를 방해하는 주요 원인 중 한 가지로 수송 모델 내에서 연직 수송을 잘 모의하지 못한다는 점이 꼽힌다(e.g., Stephens et al., 2007).

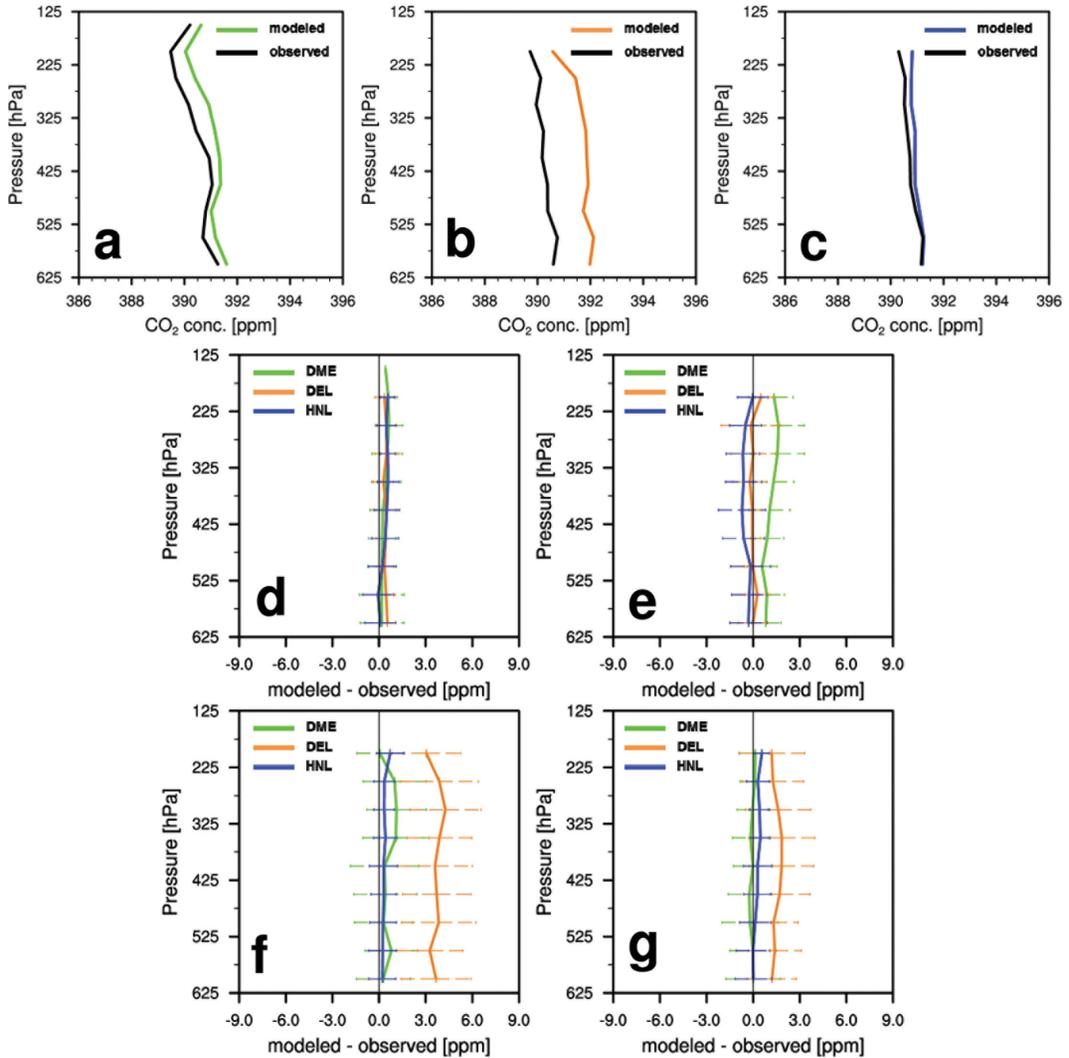


Fig. 8. Vertical profile of the modeled (green at DME, orange at DEL, blue at HNL) and observed (black) CO₂ concentrations at (a) DME, (b) DEL and (c) HNL, and difference (green at DME, orange at DEL, blue at HNL) between modeled and observed CO₂ concentrations for (d) DJF, (e) MAM, (f) JJA, and (g) SON. DME (location: 55.41°N, 37.91°E) and DEL (location: 28.57°N, 77.10°E) are located on land while HNL (location: 21.32°N, 157.92°W) is located on the ocean.

개선된 대류 질량 속 모수화 방법이 연직 수송 능력 개선에 얼마나 영향을 미쳤는지는 알 수 없지만, 본 연구에서 11개 공항에서 이산화탄소 농도의 연직 분포를 분석한 결과, 특정 고도(i.e., 225 hPa) 이상에서 모델-관측 간 차이가 가장 크긴 하였으나 전반적으로 CT2013B 모델에서 연직 수송을 잘 모의하였음을 알 수 있었다. 그러므로 자료동화에 사용할 관측 자료를 추가하는(e.g., 위성 자료) 등의 방법을 통해 지표면 탄소 플럭스를 보다 정확하게 모의한다면 성층권 하부까지 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2010~2011년 동안 CONTRAIL 프로젝트의 이산화탄소 물농도 관측 자료와 최근 버전 탄소추적시스템인 CT2013B를 통해 모의된 이산화탄소 농도 결과를 비교하고 분석하였다. CONTRAIL 프로젝트는 일반 여객기에 관측 장비를 탑재하여 이산화탄소, 메탄 등 온실 기체를 측정하기 위해 수행된 프로젝트로, 비행 동안뿐만 아니라 이·착륙 시에도 관측이 이루어지기 때문에 본 연구에서는 이산화탄소

농도의 수평 분포와 연직 분포에 대한 분석을 나누어 수행하였다. 정확한 분석을 위해 625 hPa 미만 고도의 자료와 관측이 30일 이하로 존재하는 공항에서의 자료를 제외하고 분석하였다.

전반적으로, 모델-관측 간 차이는 Gaussian 분포에 잘 맞았고 상관 관계도 높은 편이었으나, 그 정도는 작지만 양의 편향이 존재하여 모의된 이산화탄소 농도가 관측된 이산화탄소 농도에 비해 높았다. 항공기의 비행 경로를 따른 이산화탄소 농도의 수평 분포를 보면, 유라시아 대륙 북부에서 계절 별 모델-관측 간 차이의 변동성이 가장 컸다. 해당 위도 대(50°N~70°N)의 시계열 자료에서 모델이 관측에 비해 계절 변동성을 크게 모의하는 경향을 볼 수 있는데, 성층권 이산화탄소 농도의 계절 변동성이 대류권에 비해 상 이동(phase shift)이 존재하며 그 진폭 또한 작아 모의하기가 어려울 뿐만 아니라, 높은 고도에서 해상도가 낮아 성층권 이산화탄소 농도를 충분히 모의하지 못하기 때문에 이러한 차이가 발생한 것으로 추측된다. 또한 북반구 여름철에 모델-관측 간 차이가 컸는데, 이는 여러 연구를 통해 밝혀진 것처럼 초기 지표 플럭스의 불확실성, 수송모델에 의한 오차 등으로 인해 모델에서 대기 중 이산화탄소 농도에 대한 식생의 영향을 정확하게 모의하지 못했기 때문인 것으로 추측된다. 결론적으로, 고위도 부근과 북반구 여름철에 상대적으로 모델-관측 간 차이가 컸지만 전반적으로는 모델에서 모의한 이산화탄소 농도 결과와 관측 값이 잘 맞았다.

11개 공항에서 연직 분포는 NRT 자료가 전체의 43.9%로 상당 부분을 차지하였기 때문에 결과가 편향되지 않도록 NRT와 다른 공항들을 따로 분석하였다. 모든 공항에서 모델이 관측에 비해 이산화탄소 농도를 과대 모의하여 양의 편향이 존재하였고, 40°N 이상 위도 대에 위치한 공항에서는 고도가 높아짐에 따라 양의 편향이 점차 증가하였다. 반면, 그 외 공항 및 NRT에서는 전 고도에서 모델-관측 차이가 거의 일정하였는데, 이는 모델이 지표로부터 상층으로 이산화탄소가 수송되는 과정을 잘 모의하고 있음을 의미한다. NRT에서 시계열 자료를 분석한 결과 고도가 높아질수록 모델-관측 간 상관 관계가 감소하였고, 225 hPa 이상 고도에서 모델-관측 간 차이가 다른 고도에 비해 두드러져 보이긴 하지만 전 고도에서 잘 맞는 편이었다. 내륙 지역에 위치한 DME와 DEL, 그리고 해양에 위치한 HNL에서 이산화탄소 농도의 연직 분포를 비교한 결과, 해양에 비해 내륙 지역에서 모델-관측 차이가 컸으며, 이는 균질한 해양보다 복잡한 내륙 지역에서 대기 중 이산화탄소 농도 모의가 더 어렵다는 것을 의미한다. 주목할 점은, 40°N 이상을 제외하면, HNL과 DEL뿐만 아니라 NRT, 그리고 다른

공항에서 고도에 따른 모델-관측 차이가 거의 일정하게 유지되었다는 것이다. 이는 CT2013B 모델 내에서 연직 수송이 잘 모의됨을 의미한다. 그러므로 자료동화에 사용할 관측 자료를 추가하는(e.g., 위성 자료) 등의 방법을 통해 지표면 탄소 플럭스를 보다 정확하게 모의한다면 성층권 하부까지 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화 사업(KMIPA 2015-2021)의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 심사를 해주신 두 분 심사위원과 이산화탄소 항공 관측 자료를 제공해 주신 일본 National Institute for Environmental Studies (NIES)의 T. Machida 박사님께 감사를 전합니다.

REFERENCES

- Basu, S., and Coauthors, 2011: The seasonal cycle amplitude of total column CO₂: Factors behind the model-observation mismatch. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23306, doi:10.1029/2011JD016124.
- Chevallier, F., and Coauthors, 2010: CO₂ surface fluxes at grid point scale estimated from a global 21 year reanalysis of atmospheric measurements. *J. Geophys. Res.*, **115**, D21307, doi:10.1029/2010JD013887.
- Crevoisier, C., A. Chédin, H. Matsueda, T. Machida, R. Armante, and N. A. Scott, 2009: First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 4797-4810.
- _____, and Coauthors, 2013: The 2007-2011 evolution of tropical methane in the mid-troposphere as seen from space by MetOp-A/IASI. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 4279-4289.
- Evensen, G., 1994: Sequential data assimilation with a non-linear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10143-10162.
- Feng, L., P. I. Palmer, H. Bosch, and S. Dance, 2009: Estimating surface CO₂ fluxes from space-borne CO₂ dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman Filter. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 2619-2633.
- _____, _____, Y. Yang, R. M. Yantosca, S. R. Kawa, J.-D. Paris, H. Matsueda, and T. Machida, 2011: Evaluating a 3-D transport model of atmospheric CO₂ using ground-based, aircraft, and space-borne data. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 2789-2803, doi:10.5194/acp-

- 11-2789-2011.
- Frankenberg, C., S. S. Kulawik, S. Wofsy, F. Chevallier, B. Daube, E. A. Kort, C. O'Dell, E. T. Olsen, and G. Osterman, 2016: Using airborne HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO) to evaluate model and remote sensing estimates of atmospheric carbon dioxide. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2015-961.
- Goody, R. M., and Y. L. Yung, 1989: *Atmospheric radiation: theoretical basis*. 2nd ed. Oxford University Press, 544 pp.
- Gurney, K. R., and Coauthors, 2002: Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, **415**, 626-630.
- Heymann, J., and Coauthors, 2015: Consistent satellite XCO₂ retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 2961-2980.
- Houweling, S., and Coauthors, 2015: An intercomparison of inverse models for estimating sources and sinks of CO₂ using GOSAT measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 5253-5266, doi:10.1002/2014JD022962.
- Inoue, M., and Coauthors, 2013: Validation of XCO₂ derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9771-9788, doi:10.5194/acp-13-9771-2013.
- Jacobson, A. R., S. E. M. Fletcher, N. Gruber, J. L. Sarmiento, and M. Gloor, 2007: A joint atmosphere-ocean inversion for surface fluxes of carbon dioxide: 2. Regional results. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **21**, GB1019, doi:10.1029/2006GB002703.
- Jiang, X., Q. Li, M.-C. Liang, R.-L. Shia, M. T. Chahine, E. T. Olsen, L. L. Chen, and Y. L. Yung, 2008: Simulation of upper tropospheric CO₂ from chemistry and transport models. *Global Biogeochem. Cy.*, **22**, GB4025, doi:10.1029/2007GB003049.
- Jiang, F., H. M. Wang, J. M. Chen, T. Machida, L. X. Zhou, W. M. Ju, H. Matsueda, and Y. Sawa, 2014: Carbon balance of China constrained by CONTRAIL aircraft CO₂ measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 10133-10144, doi:10.5194/acp-14-10133-2014.
- Kim, J., H. M. Kim, and C.-H. Cho, 2014: The effect of optimization and the nesting domain on carbon flux analysis in Asia using a carbon tracking system based on the ensemble Kalman filter. *Asia-Pac. Atmos. Sci.*, **50**, 327-344, doi:10.1007/s13143-014-0020-y.
- _____, _____, _____, K.-O. Boo, A. R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev, 2016: Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2015-875.
- Krol, M. C., S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peters, F. Dentener, and P. Bergamaschi, 2005: The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: Algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 417-432.
- Kulawik, S. S., and Coauthors, 2010: Characterization of tropospheric emission spectrometer (TES) CO₂ for carbon cycle science. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5601-5623, doi:10.5194/acp-10-5601-2010.
- _____, and Coauthors, 2016: Consistent evaluation of GOSAT, SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 683-709, doi:10.5194/amt-9-683-2016.
- Lindqvist, H., and Coauthors, 2015: Does GOSAT capture the true seasonal cycle of carbon dioxide? *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 13023-13040, doi:10.5194/acp-15-13023-2015.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, K. Ishikawa, T. Nakazawa, and T. Ogawa, 2008: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1744-1754, doi:10.1175/2008JTECHA1082.1.
- _____, Y. Tohjima, K. Katsumata, and H. Mukai, 2011: A new CO₂ calibration scale based on gravimetric one-step dilution cylinders in National Institute for Environmental Studies-NIES 09 CO₂ scale. *Report of the 15th WMO Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques*, Switzerland: Geneva, 7-10.
- Masarie, K. A., W. Peters, A. R. Jacobson, and P. P. Tans, 2014: ObsPack: a framework for the preparation, delivery, and attribution of atmospheric greenhouse gas measurements. *Earth Syst. Sci. Data*, **6**, 375-384, doi:10.5194/essd-6-375-2014.
- Matsueda, H., and H. Y. Inoue, 1996: Measurements of atmospheric CO₂ and CH₄ using a commercial airliner from 1993 to 1994. *Atmos. Environ.*, **30**, 1647-1655, doi:10.1016/1352-2310(95)00374-6.
- _____, _____, and M. Ishii, 2002: Aircraft observation of carbon dioxide at 8-13 km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus*, **54B**, 1-21.
- _____, T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, H. Ikeda, N. Kondo, and K. Goto, 2008: Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask

- sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 1-17, doi:10.2467/mripapers.59.1.
- Niwa, Y., and Coauthors, 2011: Three-dimensional variations of atmospheric CO₂: aircraft measurements and multi-transport model simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 13359-13375.
- _____, T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, R. Imasu, and M. Satoh, 2012: Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **117**, D11303, doi:10.1029/2012JD01747.
- Patra, P. K., Y. Niwa, T. J. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, T. Machida, H. Matsueda, and Y. Sawa, 2011: Carbon balance of South Asia constrained by passenger aircraft CO₂ measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 4163-4175, doi:10.5194/acp-11-4163-2011.
- Peters, W., and Coauthors, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, **104**, 18925-18930.
- _____, and Coauthors, 2010: Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Glob. Change Biol.*, **16**, 1317-1337, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02078.x.
- Sawa, Y., T. Machida, and H. Matsueda, 2008: Seasonal variations of CO₂ near the tropopause observed by commercial aircraft. *J. Geophys. Res.*, **113**, D23301, doi:10.1029/2008JD010568.
- _____, _____, and _____, 2012: Aircraft observation of the seasonal variation in the transport of CO₂ in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **117**, D05305, doi:10.1029/2011JD016933.
- Stephens, B. B., and Coauthors, 2007: Weak Northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric CO₂. *Science*, **316**, 1732-1735.
- van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin, and T. T. van Leeuwen, 2010: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 11707-11735.
- Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble Data Assimilation without Perturbed Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913-1924.
- Zhang, H. F., and Coauthors, 2014: Estimating Asian terrestrial carbon fluxes from CONTRAIL aircraft and surface CO₂ observations for the period 2006-2010. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 5807-5824.