

인버스 모델링을 이용한 지표면 이산화탄소 플럭스 추정 향상을 위한 항공기 관측 이산화탄소 자료동화 체계 개발

김현정 · 김현미* · 조민광 · 박준 · 김대휘

연세대학교 대기과학과, 대기예측성 및 자료동화 연구실

(접수일: 2018년 1월 11일, 수정일: 2018년 3월 19일, 게재확정일: 2018년 4월 11일)

Development of the Aircraft CO₂ Measurement Data Assimilation System to Improve the Estimation of Surface CO₂ Fluxes Using an Inverse Modeling System

Hyunjung Kim, Hyun Mee Kim*, Minkwang Cho, Jun Park, and Dae-Hui Kim

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

(Manuscript received 11 January 2018; revised 19 March 2018; accepted 11 April 2018)

Abstract In order to monitor greenhouse gases including CO₂, various types of surface-, aircraft-, and satellite-based measurement projects have been conducted. These data help understand the variations of greenhouse gases and are used in atmospheric inverse modeling systems to simulate surface fluxes for greenhouse gases. CarbonTracker is a system for estimating surface CO₂ flux, using an atmospheric inverse modeling method, based on only surface observation data. Because of the insufficient surface observation data available for accurate estimation of the surface CO₂ flux, additional observations would be required. In this study, a system that assimilates aircraft CO₂ measurement data in CarbonTracker (CT2013B) is developed, and the estimated results from this data assimilation system are evaluated. The aircraft CO₂ measurement data used are obtained from the Comprehensive Observation Network for Trace gases by the Airliner (CONTRAIL) project. The developed system includes the preprocessor of the raw observation data, the observation operator, and the ensemble Kalman filter (EnKF) data assimilation process. After preprocessing the raw data, the modeled value corresponding spatially and temporally to each observation is calculated using the observation operator. These modeled values and observations are then averaged in space and time, and used in the EnKF data assimilation process. The modeled values are much closer to the observations and show smaller biases and root-mean-square errors, after the assimilation of the aircraft CO₂ measurement data. This system could also be used to assimilate other aircraft CO₂ measurement data in CarbonTracker.

Key words: CarbonTracker, aircraft CO₂ measurement, CONTRAIL, observation operator, surface CO₂ flux

*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

인간 활동에 의한 온실기체 배출은 지구 온난화를 가속화 시킨다. 지구 온난화에 따른 기후변화의 심각성으로 인해 국제적인 협력의 필요성이 대두되었고, 지구 온난화를 경감하기 위해 유엔기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 등의 국제협약이 체결되었다(United Nations, 2016). 또한 온실기체 감시를 위해 여러 나라에서 지상 관측 및 위성 관측을 수행하며 관측 자료를 제공하고 있다. 온실기체 감시는 현재 대기 상태를 파악하기 위해서뿐만 아니라 기후변화 예측 및 기후변화 대응 대책 수립의 기반이 되기 때문에 매우 중요하다. 특히 이산화탄소는 주요 온실기체로 기후 및 생태계 변화에 있어 중요한 역할을 하므로 다양한 종류의 관측을 통해 대기 중 이산화탄소 농도를 감시하려는 노력이 지속되고 있다. 타워 기반의 지상 관측을 비롯해 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) (Aumann et al., 2003), Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) (Crevoisier et al., 2009), Greenhouse gases Observing Satellite (GOSAT) (Yokota et al., 2009)과 같은 위성 관측, Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere Based on an Instrument Container (CARIBIC) (Brenninkmeijer et al., 2007), Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) (Machida et al., 2008; Matsueda et al., 2008)과 같은 항공 관측 프로젝트를 통해 관측이 수행되고 있다.

대기 중 이산화탄소 분포에 대한 이해를 위해, 지표면 탄소 플럭스를 추정하는 대기 인버스 모델링(atmospheric inverse modeling) 방법 또한 널리 이용되고 있다(e.g., Gurney et al., 2002; Feng et al., 2009; Chevallier et al., 2010). 대기 인버스 모델링 방법은 대기 중 이산화탄소 농도 관측 자료로부터 지표면 탄소 플럭스를 역으로 추정하는 방법을 말한다. 본 연구에서 사용한 시스템인 탄소추적시스템(CarbonTracker)은 앙상블 칼만 필터(ensemble Kalman filter, EnKF) 자료동화 방법(Evensen, 1994; Whitaker and Hamill, 2002)을 기반으로 한 대기 인버스 모델링 시스템으로, 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 산하 지구시스템연구소(Earth System Research Laboratory, ESRL)에서 처음 개발되었다(Peters et al., 2007). 탄소추적시스템으로부터 산출된 대기 중 이산화탄소 농도 결과는 다른 관측 자료와의 비교를 통해 검증된 바 있다(e.g., Kim et al., 2016; Kulawik et al., 2016; Kim et al., 2017b). 하지만, 탄소추적시스템을 비롯한 대기 인버스 모델링 방법의 단점으로, 인버스 모델링의 방법론에 따라 사용

가능한 관측 자료 수가 부족하다는 것이 꾸준히 지적되어 왔다(e.g., Stephens et al., 2007; Chevallier et al., 2010). 특히 지역적으로 관측 자료가 불균형한 문제 또한 존재한다. 북미와 유럽 지역은 지표 관측 자료가 조밀하게 분포하기 때문에 지표 관측 자료만을 동화시켰을 때에도 상대적으로 정확한 지표면 탄소 플럭스 값을 얻을 수 있었다(Peters et al., 2007, 2010). 하지만 아시아 지역의 경우 북반구에서 생권 탄소 흡수가 가장 큰 지역 중 하나임에도 불구하고(Peylin et al., 2013), 북미나 유럽 지역에 비해서는 상대적으로 지표 관측 자료가 부족하다. NOAA에서 개발한 탄소추적시스템은 현재 지표 관측만을 사용해 지표면 탄소 플럭스를 추정하고 있기 때문에(Kim et al., 2012; Kim et al., 2014a, b; Kim et al., 2017a, b; Kim et al., 2018), 이러한 단점을 보완하고 모델 결과를 개선하기 위해 추가 관측 자료를 동화할 수 있는 기술 개발이 필수적이다.

CONTRAIL 프로젝트로부터 얻어진 이산화탄소 관측 자료는 신뢰도가 매우 높기 때문에 모델 결과나 위성 자료를 검증하기 위해 널리 사용되어 왔다(e.g., Kulawik et al., 2010; Feng et al., 2011; Houweling et al., 2015; Kim et al., 2016). Zhang et al. (2014)에서는 CarbonTracker Data Assimilation Shell (CTDAS)이라는 시스템에 CONTRAIL 자료를 동화시킴으로써 아시아 지역의 지표면 탄소 플럭스가 더 잘 묘사됨을 보인 바 있다. 또한 synthesis inversion 방법을 이용하여 CONTRAIL 자료동화가 관측이 부족한 열대 지역에 대해서도 효과가 있음을 보인 Niwa et al. (2012)의 연구와 중국에서 효과적임을 보인 Jiang et al. (2014)의 연구가 있다. 따라서 CONTRAIL 자료가 기존의 지표 관측 자료를 보완해 지표면 탄소 플럭스 추정 결과 개선에 기여할 것이라 기대할 수 있다. 하지만 위에서 언급된 선행 연구들에서는 NOAA에서 개발한 탄소추적시스템에 CONTRAIL 관측 자료를 동화한 것은 아니다. 현재 NOAA에서 개발한 탄소추적시스템을 국립기상과학원에서 현업으로 활용하고 있고 이 시스템에는 지표 관측 자료만 동화되고 있으므로, NOAA에서 개발한 탄소추적시스템에 CONTRAIL 자료를 동화할 수 있는 시스템을 개발하면 지표면 탄소 플럭스를 좀 더 정확히 추정하는데 기여할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 항공 관측으로 얻어진 이산화탄소 관측 자료를 탄소추적시스템에 동화하는 체계를 개발하였다. 구체적으로는 Japan Airlines (JAL) 여객기와 함께 수행된 CONTRAIL 프로젝트에서 관측된 이산화탄소 몰농도 자료를 탄소추적시스템인 CarbonTracker 2013B (CT2013B) 버전에 동화하는 이산화탄소 항공 관측 자료동화 시스템을 최초로 개발하였다. CT2013B

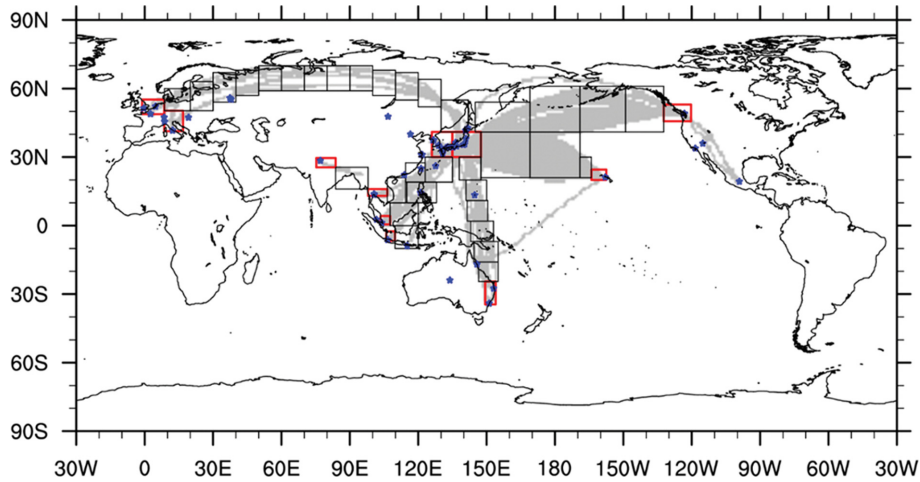


Fig. 1. Distribution of the aircraft CO₂ measurement data from the CONTRAIL project (gray) and the locations of the airports where CO₂ measurements were conducted (blue star). The boxes are bins used for averaging: horizontal bins for the observations of level mode are represented by the black box and vertical bins for the observations of vertical mode are represented by the red box.

에 CONTRAIL 자료를 동화할 수 있는 시스템을 개발함으로써 지표면 탄소 플럭스를 보다 정확하게 추정하는데 기여할 뿐만 아니라 추후 다른 항공 프로젝트로부터 얻어진 관측 자료를 탄소추적시스템에 동화할 수 있는 기반이 될 것으로 기대된다. 2장에서는 CONTRAIL 자료 및 개발된 자료동화 시스템에 대해 설명하고, 3장에서는 개발된 시스템으로부터 얻어진 결과를 제시할 것이다. 마지막으로 결론 및 요약을 4장에 제시한다.

2. 탄소추적시스템 항공 관측 자료동화 체계 개발

2.1 항공 관측 자료 전처리

본 연구에서 사용한 항공 관측 자료는 CONTRAIL 프로젝트로부터 관측된 이산화탄소 농도 자료이다. CONTRAIL 프로젝트는 메탄, 이산화탄소 등의 온실기체 관측을 목적으로 2005년 11월에 시작되었으며, JAL 여객기에 연속적인 이산화탄소 측정 장비(Continuous CO₂ Measuring Equipment, CME)를 탑재해 비행 경로를 따라 이산화탄소를 측정한다(Machida et al., 2008). CONTRAIL 프로젝트에서 관측된 자료의 분포를 Fig. 1에 나타냈다. 측정된 이산화탄소 자료의 정확도는 ±0.2 ppm 이내이다(Machida et al., 2008). 모든 이산화탄소 자료는 250~530 ppm 범위 내 10개의 일차 표준 기체(primary standard gases)를 기반으로 한 National Institute for Environmental Studies (NIES) 09 스케일로 보정되었으며, NIES 09 스케일은 380~

400 ppm 범위에서 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 기준과 거의 일치한다(Machida et al., 2011).

원시 미가공 관측 자료(raw data)는 몇 단계의 전처리 과정(preprocessing)을 거쳐 자료동화에 사용할 수 있는 입력 자료로 만들어진다(Fig. 2). 먼저 결측값(missing data)을 제거하고 모델 입력 자료로 사용할 수 있도록 Network Common Data Form (netCDF) 형식의 일 자료로 변환한다. 이렇게 만들어진 첫 번째 입력 자료를 이용해 전진 실험(forward run)을 수행한다. 여기서 전진 실험은 탄소추적시스템에 사용되는 수송 모델인 Transport Model 5 (TM5) 내에서 잠재 소용돌이도(potential vorticity)를 계산하기 위해 수행된다. 각 관측 자료 위치에 대해 잠재 소용돌이도를 계산해 그 값이 2 PVU (Potential Vorticity Unit, 1 PVU = 10⁻⁶ m² s⁻¹ K kg⁻¹) 이상이면 Sawa et al. (2008)을 따라 성층권 자료로 분류하였다. 성층권 이산화탄소 농도는 대류권에 비해 계절 변동에 위상 변이(phase shift)가 존재할 뿐만 아니라 그 진폭 또한 작다(Sawa et al., 2008; Niwa et al., 2012). 또한 높은 고도에서 모델 해상도가 낮기 때문에 성층권 자료를 제외한 대류권 자료만 자료동화에 사용하였다.

전진 실험을 통해 계산된 잠재 소용돌이도를 기준으로 성층권 자료를 거르고 나면 시공간 평균을 통해 최종 입력 자료를 생산한다. CONTRAIL 자료는 비행 중 관측된 비행 모드(level mode)와 공행에서 이·착륙시 관측된 이·착륙 모드(ascending and descending mode 또는 vertical mode)로 나누어지는데, 비행 중에

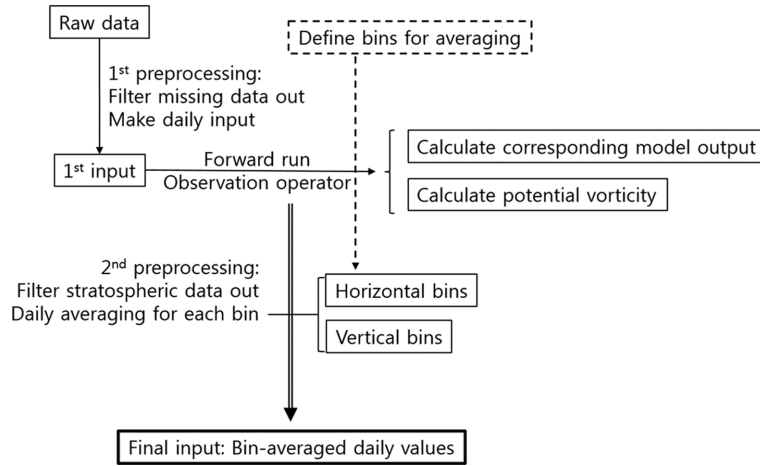


Fig. 2. Schematic of the preprocessing of the observation data.

는 1분 간격으로, 이·착륙 중에는 10초 간격으로 이산화탄소를 측정하기 때문에 시공간 평균이 필요하다. 본 연구에서는 Niwa et al. (2012)를 따라, 비행 모드에 대해서는 수평으로 33개의 구간(bin) (225~275 hPa)을 정의하였다(Fig. 1). 또한, 이·착륙 모드 11개 수평 구간에 대해서는 연직 4층(575~625, 475~525, 375~425, 225~275 hPa)으로 확장하여, 총 44개의 구간으로 정의하였다. 비행 모드에 대한 수평 구간의 위경도 범위는 약 8°~22°이며 평균적으로는 약 12°이다. 이·착륙 모드에 대한 수평 구간의 위경도 범위는 약 4°~10°이며 평균적으로는 약 7°이다. 따라서 비행 모드와 이·착륙 모드를 합쳐 총 77개의 구간에 대해, 시간적으로는 일 평균한 값을 자료동화에 사용하였다. 625 hPa 미만의 관측 자료는 경계층 내 낮은 고도에서 공항 근처의 오염된 공기에 의해 국지적인 영향을 받을 가능성이 있기 때문에 자료동화에 사용하지 않았다.

2.2 관측연산자와 자료동화 체계 개발

탄소추적시스템에서는 앙상블 제곱근 칼만 필터(ensemble square root filter, EnSRF; Whitaker and Hamill, 2002) 방법을 통해 관측 자료를 동화한다. 탄소추적시스템의 자료동화 체계에 대한 자세한 설명은 선행 연구(e.g., Peters et al., 2005; Kim et al., 2012)에 있기 때문에, 본 연구에서는 간략한 설명만 제시한다. EnSRF 방법에서는 기본적으로 분석 값(analysis)을 구할 때, 다음 식 (1), (2)와 같이 상태 벡터 x 의 평균(\bar{x})과 앙상블 섭동(x')을 따로 업데이트한다. 탄소추적시스템에서 상태 벡터 x 는 scaling factor로서 지표면 플럭스를 간접적으로 추정하는데 사용되며, 이에 대한 자세한 설명은 Kim et al. (2012)를 참고하기 바란다.

$$\bar{x}_i^a = \bar{x}_i^b + K(y^o - \mathcal{H}(\bar{x}_i^b)), \tag{1}$$

$$x_i^a = x_i^b - \tilde{k}\mathcal{H}(x_i^b), \tag{2}$$

여기서 첨자 i 는 해당 시간을, a 는 분석 값, b 는 배경 값(background)을 의미하며 K 는 평균 값 업데이트를 위한 칼만 게인 행렬(Kalman gain matrix), \tilde{k} 는 앙상블 섭동 업데이트에 사용되는 감소된 칼만 게인 행렬(reduced Kalman gain matrix)이다. y^o 는 관측 값 벡터이며 \mathcal{H} 는 관측 연산자(observation operator)이다. 위의 식에서 알 수 있듯이 자료동화란 관측과 모델 값의 차이를 모델 값에 다시 반영해 줌으로써 모델 결과를 업데이트하는 과정이기 때문에, 자료동화에 앞서 항공 관측 자료에 대한 관측 연산자 개발이 필요하다. 관측 연산자는 모델 값과 관측의 비교를 위해 모델 공간에서 관측 공간으로 사상(mapping)하는 역할을 한다. 탄소추적시스템에서는 TM5 수송 모델이 관측 연산자 역할을 하며, 지표면 탄소 플럭스로부터 이산화탄소 몰 농도를 계산하고 관측 값에 상응하는 모델 값을 계산하는 과정을 포함한다. 항공 관측 자료에 대한 관측 연산자는 관측 값에 상응하는 모델 값 계산뿐만 아니라 관측 및 모델 값에 대한 시공간 평균 과정도 포함한다. 이는 Kim et al. (2012)에서 언급된 바와 같이 탄소추적시스템에서는 일 관측 값의 평균을 자료 동화에 사용하기 때문이다. 공간 평균은 2.1장에 제시된 바와 같이 수행된다.

개발된 관측 연산자 모듈(user_output_flight)을 구성하는 서브루틴(subroutine)과 서브루틴 수행의 순서 및 자세한 설명을 Table 1에 나타냈다. 관측 연산자는 CONTRAIL 관측 자료로부터 시공간 정보(관측 시각, 위경도 및 고도)와 이산화탄소 몰농도 등의 정보를 읽는 초기화 단계(user_output_flight_init), 관측 값 및

Table 1. Description of the function of subroutines in the developed observation operator. Variables represent flight information and CO₂ concentration information, and bin variables represent flight information and CO₂ concentration information averaged over the bin.

Name	Description
user_output_flight_init	Initialize variables and read CONTRAIL data when the data assimilation cycle starts
user_output_flight_reset	Deallocate variables
user_output_flight_read	Allocate variables and read CONTRAIL data
user_output_flight_bin_reset	Deallocate bin variables
user_output_flight_bin_init	Initialize bin variables
user_output_flight_step	Calculate model and CONTRAIL observation values
user_output_flight_sample	Calculate model values corresponding to CONTRAIL observations
user_output_flight_write	Save data from user_output_flight_sample
user_output_flight_bin_write	Average model and CONTRAIL observation values spatiotemporally, and save the average to bin variables
user_output_flight_reset	Deallocate variables
user_output_flight_read	Allocate variables and read CONTRAIL data for the next time step
user_output_flight_bin_reset	Deallocate bin variables
user_output_flight_bin_init	Initialize bin variables for the next time step
user_output_flight_done	Save results when the data assimilation cycle ends
user_output_flight_write	Save data from user_output_flight_sample
user_output_flight_bin_write	Average model and CONTRAIL observation values spatiotemporally, and save the average to bin variables
user_output_flight_reset	Deallocate variables
user_output_flight_bin_reset	Deallocate bin variables

계산된 모델 값의 시공간 평균을 계산하는 단계(user_output_flight_step), 그리고 앞서 Fig. 1에서 정의한 구간(bin)의 형태로 결과값을 저장하는 단계(user_output_flight_done)로 구성된다. 관측 자료 전처리 과정에서 수행한 전진 실험이 바로 관측 연산자를 이용한 실험이었는데, 전진 실험에서는 잠재 소용돌이도 계산 과정이 관측 연산자 내에 포함되지만 지표면 탄소 플럭스 최적화를 위한 자료동화 과정에서는 계산의 효율을 위해 포함하지 않는다.

관측 연산자를 이용해 관측 자료에 상응하는 모델 값을 산출한 후 앙상블 칼만 필터 방법으로 상태 벡터를 업데이트 한다. 앙상블 칼만 필터 과정에서는 식 (1), (2)의 칼만 게인 행렬과 감소된 칼만 게인 행렬을 계산해 분석 값을 구하고, 다음의 식 (3)을 이용해 다음 분석 단계에 대한 배경 값을 구하게 된다. 즉 식 (3)은 수치예보에서의 예보 단계에 상응한다고 할 수 있다.

$$x_t^b = \frac{x_{t-2}^a + x_{t-1}^a + x_t^p}{3} \quad (3)$$

여기서 x^p 는 고정된 값으로 1로 정해져 있다(Kim et al., 2012). 즉, 탄소추적시스템에서는 이전 분석 단계로부터 지속된 정보와 고정된 값의 조합으로 현재 단계의 배경 값을 계산하게 되며, 만약 관측으로부터 새

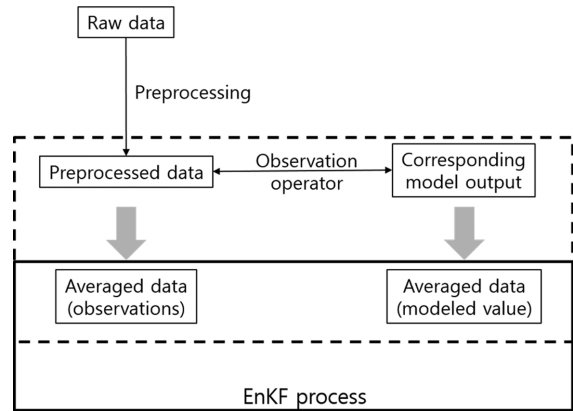


Fig. 3. Schematic of the developed aircraft CO₂ measurement data assimilation system.

로운 정보가 들어오지 않으면 배경 값이 x^p (즉, 1)로 수렴한다. 이는 자료동화 과정을 통해 상태 벡터가 업데이트 되지 않으면 상태 벡터가 초기의 추정값으로 수렴되게 하는 효과가 있다(Peters et al., 2007).

개발된 항공 관측 자료동화 시스템의 모식도를 Fig. 3에 나타냈다. 먼저 원시 미가공 자료로부터 몇 단계의 전처리 과정을 거쳐 최종 입력 자료를 생산한다. 관측 연산자 내에서는 관측 위치 및 시간에 상응하는

모델 값을 계산하는데, 이렇게 계산된 값들은 1분 혹은 10초 간격으로 존재하기 때문에 관측과 모델 값에 대한 시공간 평균이 수행된다. 시간적으로는 일 평균을, 공간적으로는 2.1장에서 언급된 수평 및 수직 구간 별 평균을 하였다. 그리고 평균된 관측 및 모델 값의 차이를 이용해 분석 값을 업데이트 하고 다음 단계의 배경 값을 계산하는 앙상블 칼만 필터 자료동화 과정을 수행하게 된다.

3. 결 과

개발된 항공 관측 자료동화 시스템을 평가하기 위해 1년 동안의 기간에 대한 실험 결과를 분석해 보았다. 초기 지표 플럭스 및 지표 관측 자료, 그리고 등지 격자 설정은 Kim et al. (2016)과 같다. CONTRAIL 자료가 2005년 11월부터 있지만 자료의 양의 매우 불규칙하기 때문에, 자료가 충분히 동화되어 CONTRAIL 자료 동화의 효과를 뚜렷이 볼 수 있는 2009년에 대한 분석을 수행하였다.

Figure 4는 자료동화 전(Prior 실험), 지표 관측 자료동화 후(CNTL 실험), 지표 관측에 CONTRAIL 관측이 추가 동화된 후(CONTRAIL 실험) 생권 및 해양 플럭스의 지구 분포를 나타낸 그림이다. 자료동화 전 후인 Prior와 CNTL을 비교해보면, 자료동화 과정을 거치면서 지표면 탄소 플럭스의 흡수 및 배출 강도가 지역에 따라 강해짐을 알 수 있다(Figs. 4a, b). 특히 대륙 지역을 봤을 때 남반구에 비해 북미, 유럽, 아시아 등 북반구에서 자료동화 전후 차이가 큰데, 이는 북반구 대륙 지역의 탄소 플럭스 강도가 남반구에 비해 더 클 뿐만 아니라(Gurney et al., 2002) 북반구 지역에 더 많은 관측 자료가 동화되어 초기에 과소 추정된 플럭스를 보정하기 때문인 것으로 보인다. Figures 4b, c에 나타난 바와 같이, 지표면 생권 이산화탄소 플럭스 관점에서 시베리아와 중국의 일부 지역에서 흡수가 나타나고, 유럽 남부에서 배출이 나타나는 것은 기존의 연구 결과(e.g., CarbonTracker 2013B, 2015)와 일치한다. CNTL 실험과 CONTRAIL 실험의 결과를 비교해보면, CONTRAIL 자료가 동화됨에 따라 시베리아 지역의 지표면 탄소 플럭스의 흡수 강도가 특히 약해짐을 확인할 수 있다(Fig. 4c). 이는 탄소추적 시스템에 기존에는 동화되지 않던 시베리아 지역의 지표 관측 자료를 동화함에 따라 시베리아 지역의 탄소 플럭스 흡수 강도가 약해짐을 보였던 Kim et al. (2017b)과 일치하는 결과로, CONTRAIL 자료를 동화함에 따라 더 많은 자료의 동화로 인해 시베리아 지역의 지표면 탄소 플럭스가 더 잘 추정됨을 의미한다.

개발된 시스템을 이용해 모의된 이산화탄소 농도를 자료동화에 사용된 지구 지표 관측 이산화탄소 농도

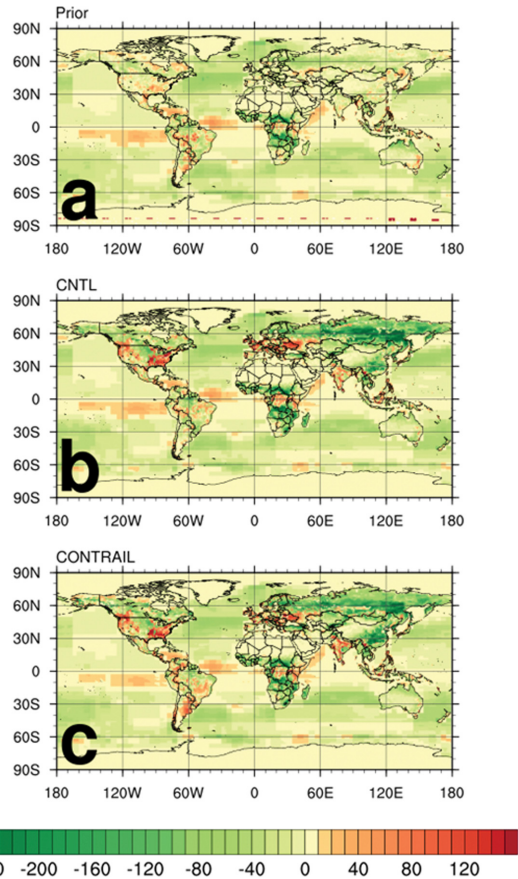


Fig. 4. Average (a) prior CO₂ flux ($\text{gC m}^{-2} \text{yr}^{-1}$), (b) posterior CO₂ flux produced by assimilating surface CO₂ observations, and (c) posterior CO₂ flux produced by assimilating both surface CO₂ observations and CONTRAIL data in 2009. These fluxes include biosphere and ocean fluxes only. The green color denotes net CO₂ flux uptake by the surface, whereas the red color denotes net CO₂ flux release to the atmosphere.

자료와 비교해 보았다(Fig. 5). 자료동화에 사용된 지표 관측 이산화탄소 농도로 검증한 것은 개발된 시스템이 잘 작동하는지를 확인하기 위해서이다. 자료동화가 잘 수행되면, 자료동화 전보다 자료동화 후 모의 자료가 관측 자료와 더 비슷해져야 한다. 따라서 자료동화 전 지표면 탄소 플럭스로부터 계산된 이산화탄소 농도(Prior)와 자료동화 후 지표면 탄소 플럭스로부터 계산된 이산화탄소 농도(CNTL, CONTRAIL)를 비교하였다. 자료동화 전(Prior)에는 관측에 비해 이산화탄소 농도를 과대모의 하였으나, 자료동화 과정을 거친 CNTL 실험과 CONTRAIL 실험에서 모의한 이산화탄소 농도는 관측과 비슷해졌다(Fig. 5a). 탄소추

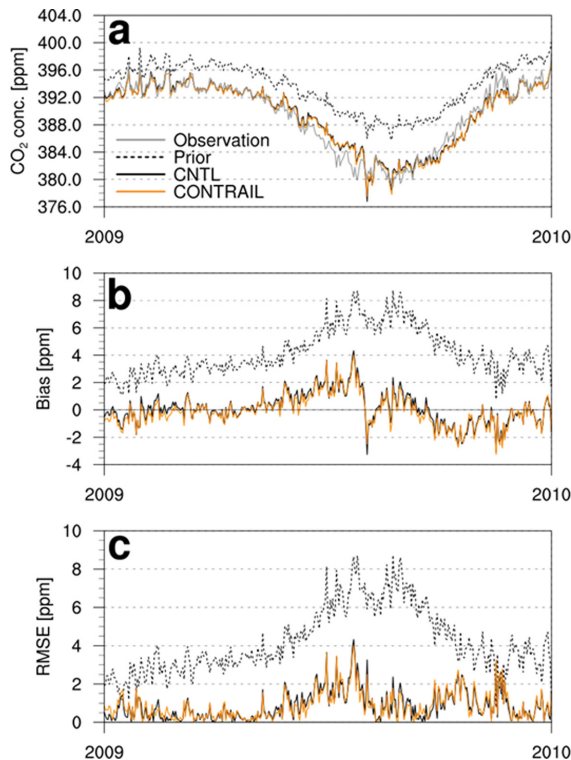


Fig. 5. Time-series of (a) the observed CO₂ concentrations (gray solid) and modeled CO₂ concentrations from: prior CO₂ flux (Prior, black dot), the CO₂ flux optimized by assimilating surface CO₂ observations (CNTL, black solid), and the CO₂ flux optimized by assimilating both surface CO₂ observations and CONTRAIL data (CONTRAIL, orange solid), (b) bias of Prior (black dot), CNTL (black solid), and CONTRAIL (orange solid) with respect to observations, and (c) RMSE of Prior (black dot), CNTL (black solid), and CONTRAIL (orange solid) with respect to observations, calculated over the globe in 2009.

적시스템의 초기 플럭스는 생권, 해양, 화재, 그리고 화석연료 플럭스로 구성되는데 생권 및 해양 플럭스만 자료동화 과정을 거친다(Peters et al., 2007). 즉, 화재 및 화석연료 플럭스는 자료동화 전후에 차이가 없으며, 생권 및 해양 플럭스는 자료동화 전보다 자료

동화 후 전구 평균적으로 탄소 흡수가 증가하여 관측과 비슷해졌다. 이로 인해 자료동화 전에, 관측보다 이산화탄소 농도를 과대모의 했던 것이 보정된 것으로 보이며, 이는 자료동화 후인 CNTL 실험과 CONTRAIL 실험에서 bias와 root-mean-square error (RMSE)가 작아진 것으로 확인할 수 있다(Figs. 5b, c). Bias와 RMSE는 CONTRAIL 실험에서 CNTL 실험보다 그 크기가 각각 22.5%, 2.3% 작아 CONTRAIL 자료를 추가로 동화한 것이 효과적이다(Table 2). CONTRAIL 실험과 CNTL 실험의 차이가 전구 평균보다는 지역적으로 더 크게 나타나는데, 이는 Kim et al. (2017a)의 결과와 유사하다. 전구 평균에서 CNTL 실험과 CONTRAIL 실험의 차이가 지역적 분포에 비해 상대적으로 작은 것은 검증에 사용한 전구 지표 관측 이산화탄소 농도 자료가 두 자료동화 실험에 모두 사용된 것에 기인한다. 결과적으로 개발된 시스템을 이용하여 자료동화 후 모의된 지표 이산화탄소 농도가 관측된 이산화탄소 농도와 더 비슷하여 개발된 시스템이 잘 작동함을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 탄소추적시스템에 이산화탄소 항공 관측 자료를 동화할 수 있는 이산화탄소 항공 관측 자료동화 시스템을 개발하고 테스트 실험을 통해 개발된 시스템으로 모의된 결과를 평가하였다. 본 연구에서는 일본을 중심으로 수행된 CONTRAIL 프로젝트로부터 얻어진 이산화탄소 항공 관측 자료를 기반으로 항공 관측 자료동화 시스템을 개발하였다. CONTRAIL 프로젝트는 온실 기체 관측을 목적으로 일반 여객기에 관측 장비를 탑재하여 관측을 수행하기 때문에 비행 경로를 따라 넓은 공간에 관측이 분포한다. CONTRAIL 프로젝트로부터 얻어진 관측 자료는 신뢰도가 높아 모델 및 위성 자료를 검증하거나 지표면 탄소 플럭스를 추정하는 데 많이 사용되고 있다. 따라서 CONTRAIL 자료를 기반으로 항공 관측 자료동화 시스템을 개발함으로써, 지표면 탄소 플럭스를 보다 정확하게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

자료동화에 앞서 원시 미가공 관측 자료의 전처리 과정이 필요하다. 우선 결측값을 제거하고 모델 입력

Table 2. Average CO₂ concentrations, bias, and RMSE of Prior, CNTL, and CONTRAIL experiments in 2009, based on observations.

	Prior	CNTL	CONTRAIL	Observation
Concentration [ppm]	393.66	389.553	389.374	389.452
Bias [ppm]	4.2123	0.1008	-0.0781	
RMSE [ppm]	4.5438	1.1528	1.1262	

자료로 사용될 수 있도록 형식을 변환하였으며, 전진 실험을 통해 잠재 소용돌이도를 계산하여 계산된 잠재 소용돌이도를 기준으로 성층권 자료를 필터링하였다. 전진 실험은 관측 연산자를 이용해 수행되는데, 관측 연산자는 관측 위치 및 시간에 상응하는 모델 값 계산 과정을 포함한다. CONTRAIL 프로젝트에서는 비행 동안과 이·착륙 시 관측이 이루어지며, 관측이 각각 1분, 10초 간격으로 수행되기 때문에 방대한 자료에 대한 시공간 평균이 필요하다. 시간적으로는 일 평균을 하며, 공간적으로는 이·착륙 모드에 대해서는 연직으로 구간을 나누고 비행 모드에 대해서는 수평으로 구간을 나눠 평균하게 된다. 따라서 관측 값과 관측에 상응하게 계산된 모델 값은 시공간 평균을 거쳐 앙상블 칼만 필터 자료동화 과정에 사용된다. 앙상블 칼만 필터 과정에서는 상태 벡터를 최적화하고 다음 단계의 배경 값을 계산하는 과정이 수행된다. 결과적으로 이산화탄소 항공 관측 자료에 대한 전처리 과정, 관측 연산자, 그리고 전처리 과정과 관측연산자를 CT2013B 내의 앙상블 칼만 필터와 연계하여 항공 관측 자료를 동화하는 전체 시스템을 개발하였고, 테스트 실험을 수행해 개발된 시스템이 잘 작동함을 확인하였다. Kim et al. (2016)에서 언급된 바와 같이 CONTRAIL 자료를 대기 인버스 모델링 방법에 사용한 선행 연구 결과간에 차이가 있기 때문에, CONTRAIL 자료동화가 지표면 탄소 플럭스 추정에 미치는 영향에 대해 좀 더 정량적인 분석을 향후 수행할 예정이다. 본 연구를 통해 개발된 탄소추적시스템과 연동하는 이산화탄소 항공 관측 자료동화 시스템은 지표면 탄소 플럭스 추정 결과 개선에 기여할 뿐만 아니라, 추후 다른 항공 프로젝트로부터 관측된 이산화탄소 자료를 탄소추적시스템에 동화할 수 있는 기반이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원강화사업(KMIPA 2015-2021)의 지원으로 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 국립기상과학원 기후연구과와 미국 NOAA의 Andrew Jacobson 박사님 및 이산화탄소 항공 관측 자료를 제공해 주신 일본 National Institute for Environmental Studies (NIES)의 Toshinobu Machida 박사님께 감사를 전합니다.

REFERENCES

- Aumann, H. H., and Coauthors, 2003: AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **41**, 253-264.
- Brenninkmeijer, C. A. M., and Coauthors, 2007: Civil aircraft for the regular investigation of the atmosphere based on an instrumented container: The new CARIBIC system. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 4953-4976, doi:10.5194/acp-7-4953-2007.
- 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.
- Evenen, G., 1994: Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10143-10162.
- Feng, L., P. I. Palmer, H. Bösch, 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.
- _____, and Coauthors, 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.
- Gurney, K. R., and Coauthors, 2002: Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, **415**, 626-630.
- 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.
- 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.
- Kim, H., H. M. Kim, J. Kim, and C.-H. Cho, 2016: A comparison of the atmospheric CO₂ concentrations obtained by an inverse modeling system and passenger aircraft based measurement. *Atmosphere*, **26**, 387-400, doi:10.14191/Atmos.2016.26.3.387 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, _____, T. Machida, A. R. Jacobson, C.-H. Cho, and T.-Y. Goo, 2017a: Effect of assimilating aircraft CO₂ observations in CarbonTracker. *Proceedings of 2017 10th International Carbon Dioxide*

- Conference, 21th - 25th August, 2017, Interlaken, Switzerland.
- _____, _____, _____, and C.-H. Cho, 2018: Effect of data assimilation parameters on the optimized surface CO₂ flux in Asia. *Asia-Pac. J. of Atmos. Sci.*, **54**, 1-17, doi:10.1007/s13143-017-0049-9.
- Kim, J., H. M. Kim, and C.-H. Cho, 2012: Application of Carbon Tracking System based on ensemble Kalman filter on the diagnosis of Carbon Cycle in Asia. *Atmosphere*, **22**, 415-427, doi:10.14191/Atmos.2012.22.4.415 (in Korean with English abstract).
- _____, _____, and _____, 2014a: The effect of optimization and the nesting domain on carbon flux analyses in Asia using a carbon tracking system based on the ensemble Kalman filter. *Asia-Pac. J. of Atmos. Sci.*, **50**, 327-344, doi:10.1007/s13143-014-0020-y.
- _____, _____, and _____, 2014b: Influence of CO₂ observations on the optimized CO₂ flux in an ensemble Kalman filter. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 13515-13530, doi:10.5194/acp-14-13515-2014.
- _____, _____, _____, K.-O. Boo, A. R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev, 2017b: Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 2881-2899, doi:10.5194/acp-17-2881-2017.
- Kulawik, 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 ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 683-709, doi:10.5194/amt-9-683-2016.
- Machida, T., and Coauthors, 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, *Proc. 15th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques, GAW Rep. 194*, Geneva, Switzerland, World Meteorol. Organ., 114-119.
- Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, H. Ikeda, N. Kondo, and K. Goto, 2008: Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask air sampling of JAL airliner observations. *Pap. Meteorol. Geophys.*, **59**, 1-17, doi:10.2467/mri-papers.59.1.
- Niwa, Y., 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.*, **117**, D11303, doi:10.1029/2012JD01747.
- Peters, W., J. B. Miller, J. Whitaker, A. S. Denning, A. Hirsch, M. C. Krol, D. Zupanski, L. Bruhwiler, and P. P. Tans, 2005: An ensemble data assimilation system to estimate CO₂ surface fluxes from atmospheric trace gas observations. *J. Geophys. Res.*, **110**, D24304, doi:10.1029/2005JD006157.
- _____, and Coauthors, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. 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.
- Peylin, P., and Coauthors, 2013: Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO₂ inversions. *Biogeosciences*, **10**, 6699-6720, doi:10.5194/bg-10-6699-2013.
- 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.
- Stephens, B. B., and Coauthors, 2007: Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO₂. *Science*, **316**, 1732-1735, doi:10.1126/science.1137004.
- United Nations, 2016: Climate Action Now-Summary for Policymakers 2016, *United Nations*, 47 pp.
- Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2002: Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1913-1924.
- Yokota, T., Y. Yoshida, N. Eguchi, Y. Ota, T. Tanaka, H. Watanabe, and S. Maksyutov, 2009: Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: first preliminary results. *SOLA*, **5**, 160-163.
- 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, doi:10.5194/acp-14-5807-2014.