Journal of Environmental Science International
26(6); 729~739; June 2017

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2017.26.6.729

ORIGINAL ARTICLE

기상-식생 모델을 이용한 연안 분지 도시 지역의 대기 중 CO_2 시뮬레이션

박창현 · 이화운*

부산대학교 대기환경과학과

Simulation of Atmospheric CO_2 Over Coastal Basin Urban Areas Using Meteorology-Vegetation Model

Changhyoun Park, Hwa Woon Lee*

Department of Atmospheric Environmental Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

The Weather Research and Forecasting (WRF) model and Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) were coupled to simulate atmospheric CO_2 concentrations. The performance of the WRF-VPRM to simulate regional scale CO_2 concentration was estimated over coastal basin areas. Either Hestia 2011(HST) or Vulcan 2002(VUL) anthropogenic CO_2 emission data were used in two numerical experiments for the study regions. Simulated meteorological variables were validated with ground and background CO_2 measurement data, and the results show that the model captured temporal variations of CO_2 concentration on a daily basis. CO_2 directional analysis revealed that the dominant CO_2 emission sources are located S and SW. The simulated Net Ecosystem Exchange (NEE) agreed relatively well with measured CO_2 fluxes at each vegetation class site, showing approximately 40% at max improvement at shrub areas.

Key words : WRF, Vegetation photosynthesis and respiration, CO_2, Net ecosystem exchange

1. 서 론

대기 중에 온실기체들은 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 육불화황(SF_6) 등이 있고, 이 기체들의 분자구조 특성상 복사 에너지 흡수 원리에 의해서 지구온난화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 지구 전체의 온실 기체의 약 30-40%가 도시 지역에서 배출됨으로서 지구 평균 기온을 상승시키거나, 예측 불허의 극한 날씨상태를 유발하거나, 폭우와 가뭄을 증가 또는 감소시키는 것으로 International Panel of Climate Change(IPCC, 2013)은 보고하고 있다. 온실 기체 CO_2는 주로 인간활동으로 인한 화석연료의 사용으로 인해 대기 중에 배출되는데, 다른 온실기체들에 비해서 분자당 지구온난 잠재도(Global Warming Potential, GWP)는 작지만, 예를 들어 메탄에 비해서 21배 작음, 대기 중 가장 많은 양의 분자가

Received 10 April, 2017; **Revised** 21 April, 2017;
Accepted 25 April, 2017
***Corresponding author**: Hwa Woon Lee, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-583-2651
E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

존재하기 때문에 지구 온난화와 관련하여 가장 큰 연구 관심 대상이다.

CO_2는 화석연료 사용으로 인한 배출 이외에도, 식생의 광합성과 호흡 활동에 의해서 대기 중에서 제거되거나 대기로 배출된다. 식생과 대기 상호간의 CO_2 교환은 경계층 내의 난류운동에 의해서 이루어지고, CO_2 플럭스는 연직 난류 운동 섭동과 CO_2농도 섭동의 공분산에 의해서 계산된다. CO_2와 연직 바람의 섭동을 측정하기 위해서, 초음파 풍향 풍속계와 연동한 적외선 분광기를 이용하여 지상 수 m에서 수십- 수백 m 정도 높이의 타워에서 관측하는 데, 이러한 측정 시스템을 에디 공분산 방법(Eddy Covariance) 이라 하고, 현재까지 플럭스를 직접 측정하는 유일한 방법이다. 플럭스 측정 지점을 중심으로 2차원 발자국(footprint) 모형(Kormann and Meixner, 2001)을 분석하면, 관측 지점을 중심으로 수 km 내에서 플럭스 값에 영향을 미치는 CO_2 배출 강도를 통계적으로 추정할 수 있다(Park and Schade, 2016). 국지규모 플럭스 관측은 주로 식생이 넓게 분포하고 있는 지역에서 각 지역별, 계절별 그리고 식생 종류별로 관측 네트워크를 바탕으로 수행되어 왔다(Baldocchi et al., 2001). 식생 지역에서의 광합성에 의한CO_2 흡수량과 호흡량의 합은 순생태교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)으로 표현되고, 이것은 방향이 있는 플럭스로서 양의 값이면 CO_2가 지표 식생에서 대기 중으로 배출되는 양을 나타내고, 음의 값이면 대기 중에서 식생과 토양으로 흡수되는 경우를 뜻한다. 전구 규모에서 NEE는 주로 관측 자료를 바탕으로 역계산 모델링 기법으로 산정되어왔다(Peylin et al., 2005; Gurney et al., 2009). 그러나 전구규모에서는 선험적(a prior) 플럭스 관측 지점이 공간적으로 조밀하지 못함으로 인해, 역계산 결과에 불확실성이 매우 커지는데, 전구 규모의 역계산 모델링과 국지 규모의 플럭스 관측 사이의 연구 규모 차이는 큰 오차를 유발한다(Gerbig et al., 2003; Perez-Landa et al., 2007).

따라서, 전구 규모 역계산 모델링과 국지 규모 플럭스 관측 사이의 규모 차이를 극복하기 위해서는 그 둘의 공간 해상도 차이를 줄일 수 있는 CO_2 중규모 모델이 필요하다. 중규모 모델은 전구 규모에 비해서 대기 경계층의 시공간 해상도가 높고, 상대적으로 낮은 산악 등지의 지형을 구체적으로 표현할 수 있기에, 대기 오염물 농도장과 이류를 고해상도로 모의할 수 있는 장점이 있다. 대기 오염물질에 대한 모의는 WRF-Chem 등의 모델로 화학반응 기작들이 구현이 되어 널리 사용되고 있지만, 화학적으로 비반응성인 CO_2에 대한 모의는 지역 기후와 지역 식생의 종류에 따른 광합성과 호흡량을 고려해야 하기에, 토지 이용에 대한 정보가 필수적으로 반영되어야 한다.

최근 Ahmadov et al.(2007, 2009)는 중규모 기상모델인 Weather Research and Forecast (WRF)와 식생의 광합성과 호흡 기작을 진단적으로 반영한 Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM)을 접합하여 유럽 지역을 대상으로 CO_2 모델링을 수행하였다. 그 결과 접합된 중규모 모델의 CO_2 농도의 공간분포와 시간에 따른 일변화가 성긴 전구 모델 보다 더 정밀하게 모의되었고, 30분에서 1시간 단위의 CO_2 농도 관측결과와 높은 상관관계를 보였다. Pillai et al.(2011)도 독일의 한 산악지형을 대상으로 전구 모델이 제대로 표현하지 못한 특이 지형 특성이 반영된 CO_2농도 변화를 식생의 광합성 역할을 반영하여 성공적으로 모의하였다. Jamroensan(2013)은 미국 중서부 지역의 경작지를 중심으로 같은 모델을 사용하면서, 해당 연구 지역의 주요 농작물에 대한 새로운 식생 매개변수를 추가하여, 플럭스 관측과의 불확실성을 30%이상 줄인 바 있다.

본 연구에서는 Ahmadov et al.(2007)의 연구를 바탕으로 접합한 WRF-VPRM을, 미국의 남가주의 한 도시 Los Angeles (LA) 지역을 대상으로 대기 중 CO_2 농도 수치모의 능력을 검증하였다. LA를 연구 대상으로 선택한 이유는 (1) 중규모 CO_2 모델링을 수행하기 위해서는 우선적으로 최소 10 km 이하의 수평해상도, 최소 1시간간격의 고해상도 CO_2 배출량 자료가 뒷바침 되어야 하는데, LA지역은 상대적으로 신뢰할 만한 고해상도 CO_2 배출량 자료가 풍부하기 때문이고, (2) VPRM 모듈은 식생의 광합성과 호흡에 대해서 지역 식생 특성에 맞는 매개변수를 최적화해서 사용하게 되는데, LA 지역이 상대적으로 많은 식생 종류별 플럭스 관측 자료가 존재하기 때문이다. 모델의 기상 수치모의 성능 검증은 1개 지상 관측지점에서, CO_2 농도 모의 결과 성능 검증은 2개의 특별 관측지점에서

수행하였고, 또한 접합된 모델에서 생산된 NEE는 연구대상지역을 대표하는 식생종류별 플럭스 관측 지점에서 비교하여, 광합성 진단 모델의 중규모 적용에 대한 성능을 추가적으로 검증하였다.

2. 수치 모델링 구성

2.1. WRF-VPRM

식생의 광합성과 호흡에 의한 CO_2 플럭스를 진단하는 VPRM 모델을 Mahadevan et al.(2008)가 제안한 방법으로 WRF에 접합하였고, 그 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. WRF에서 계산된 단파복사와 지상 기온이 VPRM내에 전달되고, VPRM은 다시 MODIS 위성의 지표반사도 자료와 플럭스 관측 자료를 이용하여, 총생태교환량(Gross Ecosystem Exchange, GEE)와 호흡량(R)을 계산하고, 두 합인 순생태교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)는 대기 중 CO_2 농도 흡수량을 계산하도록 구성되어 있다(Mahadevan et al., 2008).

VPRM 은 MODIS위성 자료 중 8일 간격 수평해상도 500 m의 지표반사도 자료 중 Enhanced Vegetation Index (EVI)와 Land Surface Water Index (LSWI) 및 CO_2 플럭스 관측 자료를 이용하여 NEE를 계산한다. 또한 1 km 해상도의 토지 이용도(Jung et al., 2006)를 바탕으로 식생을 8개의 카테고리(상록수림, 낙엽 활엽수림, 혼합림, 관목지, 사바나, 경작지, 목초지 그리고 도시지역)로 분류한다. 각 식생 카테고리는 최대 광자 생산량, 광합성유효복사량(Photosynthesis Active Radiation, PAR) 절반값, 그리고 호흡과 관계된 1차원 선형방정식의 기울기와 절편의 4개의 매개변수가 있는데, 이들은 봄철 식생 생장 기간이나 연간 플럭스 관측 자료를 바탕으로 연구 대상 지역 특성에 맞게 최적화 되어야 하나, 본 연구에서는 WRF-Chem 개발팀에서 제공하는 VPRM 기본 매개변수를 사용하였다. WRF에서 계산된 단파복사량은 주간의 CO_2 총생태교환(Gross Ecosystem Exchange, GEE)를 산출하고, 야간의 호흡량은 최적화된 매개변수와 WRF에서 생산된 지상 기온값을 이용하여 계산한다. 모델링을 위한 WRF 내 격자 구성은 Fig. 2에 나타내었고, 초기 및 경계 조건 그리고 모델 내 물리과정 기법은 Table 1에 요약하였다.

2.2. CO_2 입력 데이터

CO_2농도의 초기조건과 측면 경계조건으로 National

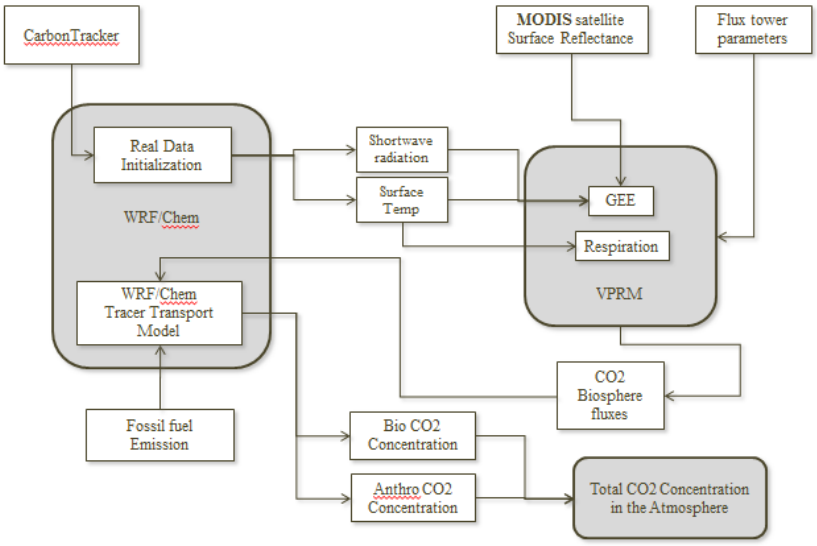

Fig. 1. The description of WRF-VPRM frame work.

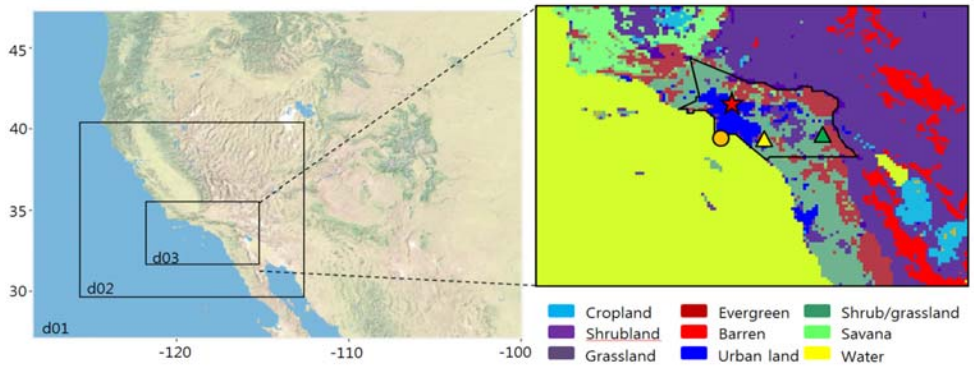

Fig. 2. Domains for WRF-VPRM modeling (left panel), and land use distributions for the finest domain (right panel) with the locations of CIT (red star), Palos Verdes (orange dot), and flux measurement sites including shrub and grassland (yellow triangle; overlapped) and mixed forest (green triangle). The border of study domain is indicated by thick black line.

Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 2010년 CarbonTracker 3차원 몰분율을 사용하였다. CarbonTracker는 북미 대륙을 대상으로 CO_2의 배경농도와 광합성과 호흡, 산불, 화석연료, 대기-해양 교환에 해당되는, CO_2 몰분율을 3시간 간격으로 해상도 1° × 1° 자료로 제공한다(Peters et al., 2007).

또한 CarbonTracker 자료와 별개로, 1시간 간격의 고해상도 CO_2 배출량 자료를 WRF-VPRM에 입력하였다. 현재 미국 내 고해상도 CO_2 배출량은 2010년을 대상으로 한 Hestia 배출량 자료(Gurney et al., 2012)와 2002년의 Vulcan 배출량 자료(Gurney et al., 2009) 두 종류가 존재한다. 이 자료들은 산업, 상업, 주거지, 도로, 항공기, 전력생산 등의 여러 영역에 대한 CO_2 배출량을 1시간 간격으로 역계산 방법으로 산정하여 제공하고 있다. 본 연구에서는 2002년 이후 배출량의 변화가 모델 결과에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 대조군과 실험군의 쌍으로 수치결과를 산출하였다. 이후 Hestia 배출량 자료를 이용한 수치실험 결과는 HST, Vulcan 배출량 자료로 산출된 결과는 VUL로 표기한다.

3. 관측 데이터

본 연구 대상 LA지역은 남쪽과 서쪽 태평양 바다가 있고, 북쪽과 동쪽은 해발 2500 m 이상의 산들로, 북서쪽은 해발 1000 m 이상의 산으로 둘러싸인 해안 분지 지역이다(Fig. 2). 이 산지들은 병풍 역할을 하여

Table 1. WRF configuration for meteorological models

Model configuration	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid resolution	36 km	12 km	4 km
Vertical grid resolution		38 levels	
IC and BC data set		3-hr 32 km NARR meteorological data	
SST data		NCEP ~8 km SST data	
Physics options			
Microphysics		WSM 3 scheme	
Longwave radiation		RRTTM scheme	
Shortwave radiation		Dudhia scheme	
Land surface		Noah land surface model	
PBL scheme		YSU scheme	
Cumulus scheme		Grell-3 applied to 36 km (d01) only	

Table 2. Statistics of meteorology at CIT

Site	Variable	Mean		RMSE	MB	IOA
		Model	Observation			
CIT	Temp (°C)	17.1	16.7	1.5	0.5	0.97
	RH (%)	58.1	67.6	14.8	-9.5	0.87
	WS ($m\ s^{-1}$)	1.9	0.8	1.3	1.1	0.69
	SWDOWN* ($W\ m^{-2}$)	583	473	200	110	0.91
	PBLH (m)	551	566	547	27	0.71

* only for daytime for solar radiation > 10 $W\ m^{-2}$

LA 지역에서 발생한 대기오염 물질이 산에 막혀 분지 지역을 원활하게 빠져 나가지 못하게 하고, 그로 인하여 심각한 대기오염을 지속적으로 유발해 오고 있다 (Ulrickson and Mass, 1990; Conil and Hall, 2006). 따라서 이 지역을 대상으로 남가주 대기보전국과 NOAA 등은 대기오염과 기후의 기작과 변화를 이해하기 위하여 간헐적이지만 지속적인 종합 관측이 이뤄지고 있는데, 본 연구에서는 2010년 5월에 수행된 집중 관측 자료를 사용하였다.

CO_2의 지상관측은 California Institute of Technology (이 후로 CIT; 34°08'12" N, 118°07'39" W) 내 한 건물 옥상 10 m 타워에서 각 종 기상변수와 CO_2농도를 관측하였고, 단파복사계와 운저계도 운용하였다. CO_2 농도는 G1101-I 동위원소 분석기(Picarro Instruments, Sunnyvale, CA, USA)를 사용하였다. CO_2농도의 관측과 모델링에서는 배경농도가 중요한데, 중규모 모델에서는 하와이 Mauna Loa에서 관측하는 전구 배경농도와 별개로 지역 배경농도를 고려해서 지역 CO_2 농도평가에 반영하여야 한다. 따라서, LA 남서쪽 해안가 지역 Palos Verdes(33°42'88" N, 118°18'70" W)에서 CO_2 농도만 추가적으로 따로 관측하였다.

4. 결 과

4.1. 기상변수 모의 결과

연구 기간 동안의 지상일기도를 분석한 결과, 연구 대상 지역의 종관상태는 거의 변화가 없이 봄철 맑은 날의 전형적인 날씨를 보였다. 전선이 LA 상공을 지나간 경우가 5일 정도 발생하였으나, 강우를 동반하지는 않았다. Fig. 3은 CIT 관측 지점에서의 기온, 습도, 풍속, 풍향에 대한 시간별 평균 변화를 관측과 함께 나타낸 그림이다. Table 2는 기상 변수에 대해서 모델결과와 관측자료 간의 통계 결과를 나타내었다. 평균적으로 WRF-VPRM은 CIT에서 기온을 주간과 야간에 각각 약 0.3˚C, 0.8˚C 과대모의하였고, 습도는 11%, 16% 과소모의하였다. 풍속은 낮에 1.1 $m\ s^{-1}$, 밤에 1.2 $m\ s^{-1}$ 과대모의하였다. 낮 시간에 남쪽, 밤시간대에 남서쪽이 연구 기간 내내 주풍방향이었다. 전체적으로 기상 변수에 대한 IOA는 기온과 습도에 대해서 IOA > 0.8, 풍속에 대해 IOA > 0.7의 값을 나타냄으로서 모델의 기상변수 모의 성능이 충분함을 보였다.

식생의 CO_2 관련 광합성 기작을 제대로 모의하기 위해서는 식생의 광합성과 직접 관련이 있는 PAR의 모의가 매우 중요한데, PAR는 단파복사량의 약 1.98배로서(Mahadevan et al., 2008), 단파복사량에 의해서 결정된다. CIT관측지점에서 모델은 한 낮의 단파복사량을 약 10% 정도 과대모의 하였다. CO_2의 농도 모의의 정확성을 위해서 PBLH 에 대한 모델의 결과도 매우 중요하다. PBLH는 경계층 부피를 결정함으로써 CO_2 등의 대기오염 물질 농도 모의결과에 매우 민감만 영향을 미친다. 본 연구에서는 PBLH는 운저고도와 같다고 가정하여, 운저계(Ceilometer) 관측 자료와 비교하였다. 그 결과 모델은 주간에 평균 약 130 m 과대모의하였고, Index of Agreement (IOA; Willmott, 1982) 는 약 0.7으로 양호한 경과를 보였다. 하지만, 5월 23일과 29일에는 낮 시간동안의 PBLH를 약 1.5배 이상 과대 모의하는 경향을 나타내었다. 이는 모델의 수평 해상도가 4 km인 점을 고려할 때, 그 보다 작은 아격자 규모에서의 구름을 모델이 제대로 모의하지 못했기에, 운저계 관측값과 큰 오차가 발생한 것으로

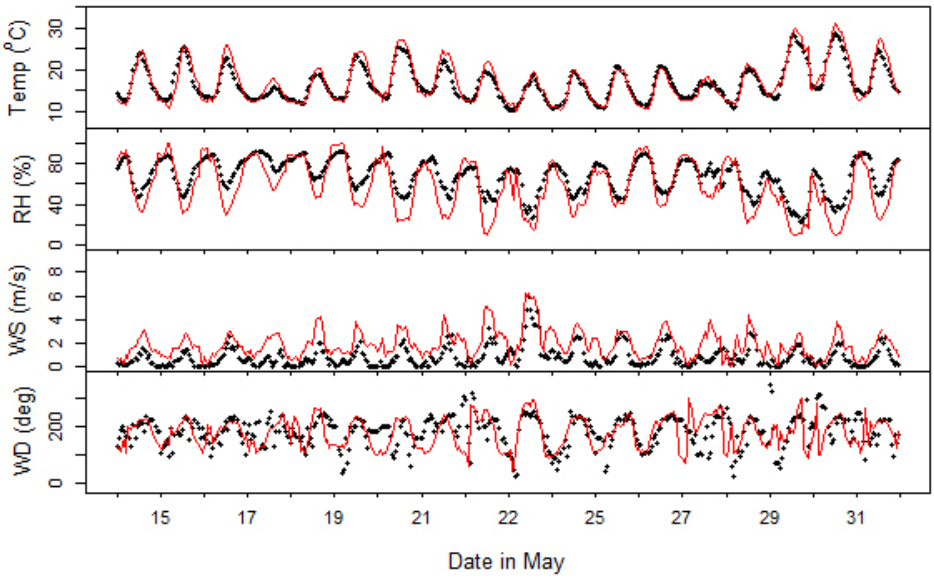

Fig. 3. Time series of hourly averaged meteorological variables including temperature, RH, wind speed and wind direction at CIT. Measurements are indicated by black dots, and simulations are shown as red lines.

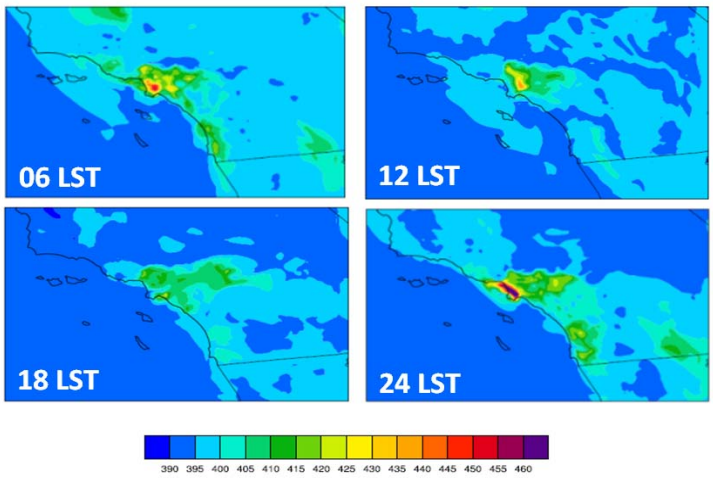

Fig. 4. Variation of horizontal distribution of CO_2 concentrations from HST, displayed by 6-hr interval on May 19 2010. The unit is in ppm.

판단된다.

4.2. CO_2 농도

배경농도 모델링 결과를 검증하기 위하여, Palos Verdes에서 관측한 CO_2농도를 사용하였다. 이 관측 지점은 LA남서쪽 끝단에 위치하고 있어, 지리적으로 판단할 때 이 관측 지점에서 측정한 CO_2 농도는 남가주 지역 전체의 배경농도로 가정할 수 있다. 모델과 배경농도 관측값을 비교한 결과 HST는 0.2±1.3 ppm과 소모의하고, VUL은 0.4±1.4 ppm 과대모의하였다. 이 결과는 사용된 관측 기기 오차(0.2 ppm)를 고려할 때 모델 성능이 통계적으로 매우 유의한 수준에서 우수함을

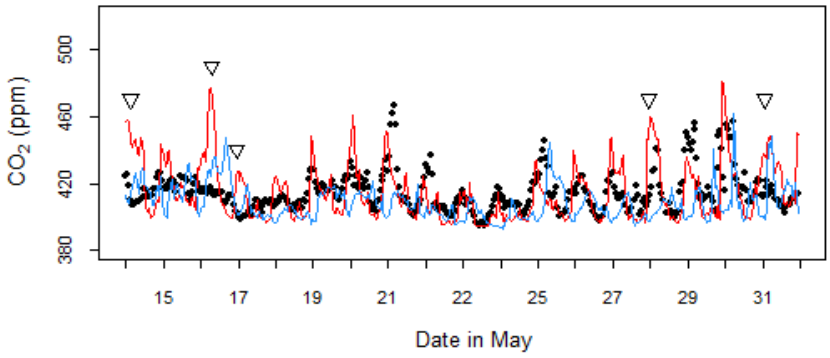

Fig. 5. Comparison of day-to-day hourly variations of CO_2 concentrations between ground observations (black dots), HST (red line) and VUL (blue line) at CIT. Inverse triangles indicate peaks events in the HST simulation.

나타내고, 향후 모의된 CO_2 농도는 LA 지역 내 배출량이 상대적으로 큰 역할을 할 수 있음을 암시한다.

LA 지역 전체의 CO_2 수평농도장의 일변화를 대표일인 5월 19일을 대상으로 6시간 간격으로 Fig. 4에 나타내었다. 수평 CO_2 농도장의 일변화는 해륙풍, CO_2 배출량, PBLH 및 복잡한 지형의 특징에 의해서 결정된다. 아침 6시 경에 일최고 CO_2농도를 보이다가, 일출 후 시간이 지남에 따라 PBLH가 최대에 이르는 대략 정오까지 농도가 지속적으로 감소하고 야간에 다시 농도가 상승한다. 연구기간 동안 PBLH는 주변 산의 높이를 넘지 못하여, 대기 중의 CO_2 농도의 상당량이 LA 분지에 갇혀있게 되고, 잔류량으로서 다음날 CO_2 농도에 영향을 미친다. 전날의 잔여 CO_2 농도는 분지 내에서 약 10 ppm 이었다.

Fig. 5는 배출원이 복잡하게 산재해 있는 LA 북쪽 CIT 관측 지점에서의 시간별 CO_2 농도의 변화를 나타낸 그림이다. 일평균 CO_2 농도를 살펴보면, 도시 내 대기 오염 물질 농도의 전형적인 일변화와 일치하는 패턴을 잘 모의하고 있다. 그러나 5월 16일, 17일 야간과 새벽에 HST는 약 20 ppm 이상 과대 모의하는 경향을 보였다(Fig. 5 내 ▽로 표시). 앞 절에서의 경계층 고도 모의에 대한 모델의 우수한 성능을 고려할 때, 기상장이나 PBLH모의에 대한 오류보다, 배출량 자료 자체의 불확실성이 큰 오차를 유발하는 것으로 판단된다. CIT관측 지점에서 CO_2농도의 수치 모델 결과와 관측값을 비교하면, 아침 6시 경에 최저 PBLH와 오전 출근시간의 차량에 의한 CO_2 배출에 의해서 CO_2는 일최고 농도를 보이다가, 해가 뜨고 시간이 감에 따라 농도가 PBLH가 최대에 이르는 대략 1시경까지 지속적으로 감소하여 밤 8시까지 낮은 농도가 유지되는 평균 일변화를 보인다. 이후 인공 CO_2 배출의 감소와 PBLH의 지속적인 하강으로 인하여 야간에 CO_2 농도는 새벽까지 지속적으로 상승하여, 다음날 일출시까지 이른다. 모델 내 같은 기상조건에서 CO_2 농도를 각각 HST는 주간에 3.3 ppm, 야간에 3.8 ppm 과대모의하였고, VUL은 주간에 1.5 ppm 야간에 8.3 ppm 과소모의하였다.

CIT 관측 지점 주변에서 이류되는 CO_2의 영향을 분석하기 위하여, 풍향에 대한 농도 분석을 수행하여, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결론적으로 남쪽과 남서쪽에 CO_2의 주배출원이 위치해 있다는 것을 알 수 있다. 배출원의 위치를 분석해 보면, 그 방향으로는 LA 도심이 위치하여 자동차, 상업지, 주거지 등의 주된 CO_2 배출원이 산재해 있고, 특히 차량에 의한 CO_2 배출이 가장 큰 비중을 차지한다. 주풍 방향에 대해서 HST는 낮 시간에 408.7 ppm, 밤 시간에 424.9 ppm의 평균 농도를 보였는데, 이 값들은 주간과 야간의 관측 농도인 412.2 ppm과 420.0 ppm과 비교할 때 약 4 ppm 정도 모델이 과소모의하는 것을 알 수 있다.

WRF 내에서 인공적으로 배출되는 CO_2는 바람장에 의해서 이류되고, VPRM 모듈 내의 NEE는 광합성에 의해서 대기 중에 존재하는 CO_2를 흡수하는 양을

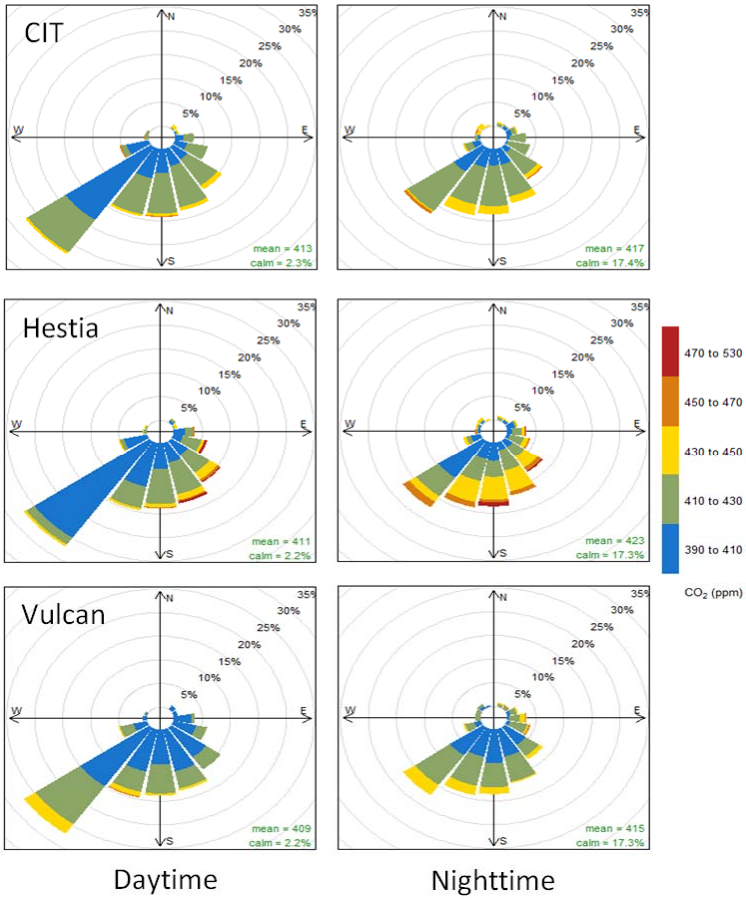

Fig. 6. Frequency of counts by wind directions (%) of CO_2 concentration at CIT site and of HST and VUL with observations for daytime and nighttime during weekdays.

계산한다. 식생의 광합성 기작이 대기 중 CO_2 농도에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 WRF-VPRM 내 식별자를 조사하였다. 이 식별자는 VPRM개발단계에서 포함된 것으로서, CO_2 배출 기원이 식생에 의한 것인지 화석연료 사용에 의한 것인지를 구별해 준다(Ahmadov et al., 2009; Pillai et al., 2011). 광합성과 호흡량에 의해 영향 받은 CO_2 농도는 CIT에서 관측된 방사성 동의 원소(Δ14C) 샘플링 자료와 함께 비교할 수 있다. 연구 기간동안 방사성 동의 원소 관측은 1회에 걸쳐 플라스크 샘플링으로 관측되었고(Newman et al., 2016), 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다. WRF-VPRM은 식생이 대기 중 CO_2 농도에 대해서 평균 음의 영향(광합성에 의한 대기 중의 CO_2감소)을 보였다. 그러나 모델은 관측 평균에 비해 평균 약 1.5 -2배 정도 과소모의하였다.

4.3. CO_2 플럭스

CO_2의 총생태교환량은 태양광량, 기온, 습도, CO_2 농도, 토양 수분, 영양상태, 계절에 따른 관엽 상태 등에 의해서 결정되고, 호흡량은 식물의 자가 영양과 토양의 유기 영양에 의해서 결정된다(Bowden, 1993). 이 중 VPRM는 총생태교환량에 지배적인 영향을 미치는 태양광량, 기온, 토양수분, 관엽상태만 고려하여 총생태교환량과 호흡량의 합으로 NEE를 계산한다. 이 절에서는 모의된 NEE를 CO_2 플럭스 관측값과 비교 검증 하였다. 현재 VPRM내에서는 식생의 광합성과

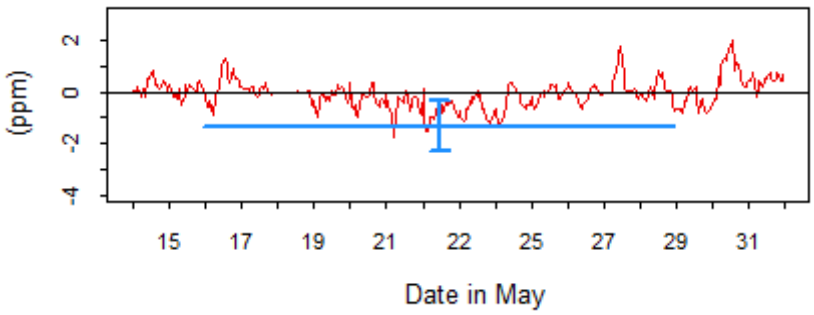

Fig. 7. Comparison of simulated biospheric tagged (red) and flask-sampled (blue) CO_2 concentration (Newman et al., 2016). The horizontal and vertical bars indicate 1 standard deviation.

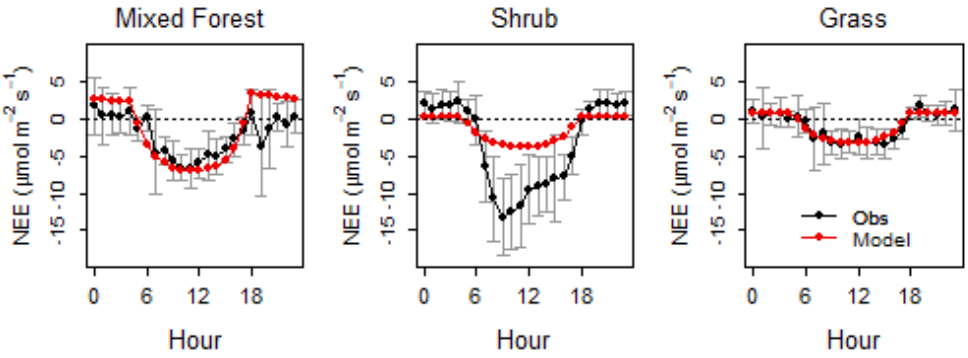

Fig. 8. Averaged diurnal variation of observed CO_2 fluxes and simulated NEE at three vegetation sites.

대기 중 CO_2 농도와의 관계는 고려하지 않기 때문에, HST와 VUL에 의해 산출된 CO_2 농도와 독립적으로 태양광과 기온에 의해서만 NEE를 산정한다.

Fig. 8은 VPRM 매개변수에 의해서 계산되어진 NEE를 나타내었다. VPRM은 낮시간 동안에는 광합성에 의한 CO_2 흡수를 단파복사의 일변화를 따라 잘 모의하였으나, 밤 시간 동안의 호흡량은 편차가 상대적으로 컸다. 이는 연구 대상지의 플럭스 관측 자료가 식생과 토양의 CO_2 저장량을 포함하는 NEE를 CO_2 총(bulk) 플럭스 값과 구분하여 제공하지 않고, 총 CO_2 플럭스값만을 제공하므로서, 모델상의 NEE와 실제 NEE사이의 편차가 상대적으로 크게 존재함을 주지하여야 한다. 본 절에서는 낮 시간동안의 NEE에만 초점을 맞추어 분석하였다.

2장에서 언급하였듯이, VPRM 내에서 NEE계산은 연구 대상 지역에 최적화된 매개변수를 고려하는 것이 중요하나, 매개변수 최적화 기법을 다루는 것은 본 연구 범위를 넘어선다. 따라서, 여기서는 기본 매개변수를 사용하여 수치모의한 결과를 각 식생 관측 지점에서 분석하였다. 모델은 주간의 NEE를 혼합림 관측지점에서 평균 16% 과대모의, 목초지 관측지점에서는 25% 과대모의, 관목지 관측지점에서는 68% 과소모의하는 것으로 나타났다. 특히 야간에는 호흡량이 관측에 비해서 상당량 과소모의되는 경향이 나타났다. 각 식생 관측 지점에서의 불확실성을 극복하기 위해서는 서론에서 언급한 바와 같이 VPRM 매개변수를 그 지역 특성에 맞게 최적화하는 것이 필요하다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상 모델인 WRF와 식생 진단 모델 VPRM을 접합하고, 미국 해안 분지 지역인 LA를 대상으로 고해상도 CO_2 수치모델링을 수행하였다. 접합된 모델은 먼저 기상 변수와 단파복사량 및 경계층 고도의 일변화와 값을 잘 모의하여, 대기 중 CO_2 농도 모의결과를 분석할 만큼 충분한 양질의 결과를 산출하여, 모델의 대기 중 CO_2농도의 모의 성능을 정량적으로 논의하기에 충분히 잘 접합되었음을 보였다.

중규모 한 시간 단위 CO_2 모델링을 위해서, 시간차이를 가지는 고해상도 CO_2배출량 자료 두 세트를 사용하여 관측자료와 비교하였다. 모델의 CO_2 농도장에 대한 평가에 앞서, 먼저 CO_2배경농도에 대한 수치모의 결과를 검증하였는데, HST는 약 0.2 ppm, VUL은 0.4 ppm 평균 편차를 보임으로, 접합된 모델의 배경농도 모의 결과는 신뢰할 만한 수준이었다. 한 시간 간격으로 산출된 CIT 관측 지점에서의 CO_2 농도는 일변화와 크기를 대체로 잘 모의하였다. 풍향에 따른 CO_2 농도 분석은 주배출원이 남과 남서방향에 위치하고 있음을 추정할 수 있었고, 이는 실제 LA도심의 배출원의 방향과 일치하였다. WRF-Chem 개발팀이 제공한 기본 VPRM 매개변수를 사용한 결과, 식생별로 16%에서 68%까지의 오차를 보였다. 이는 VPRM매개변수 최적화가 추후 연구에서 필요함을 나타내는 결과이다.

본 수치모의 연구 결과 중 CO_2 기주 농도는 CO_2 위성 자료와 비교함으로 위성자료를 검증하는데 활용될 수 있고, 특정 지역에 대해서 CO_2에 의한 복사 강제력을 산출하는데 이용하여, 지역 및 전구 기후변화 연구에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2014R1A1A2058053)의 지원을 받아 수행된 연구임. 저자는 자료를 제공해 준 University of California, Los Angeles의 J. Stutz 박사, University of California, Irvine의 M. Goulden 박사, California Institute of Technology의 S. Newman 박사, University of Arizona 대학의 K. Gurney 박사, 그리고 미국 NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration)의 CarbonTracker 팀에게 감사드린다.

REFERENCES

Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Koerner, S., Neininger, B., Dolman, A. J., Sarrat, C., 2007, Mesoscale covariance of transport and CO_2 fluxes: Evidence from observations and simulations using the WRF-Chem coupled atmosphere-biosphere model, J. Geophys. Res-Atmos., 112, D22107.

Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Korner, S., Rodenbeck, C., Bousquet, P., Ramonet, M., 2009, Comparing high resolution WRF-Chem simulations and two global CO_2 transport models with coastal tower measurements of CO_2, Biogeosciences, 6(5), 807-817.

Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L. H., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X. H., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., U, K. T. P., Pilegaard, K., Schmid, H., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001, Fluxnet: A New tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, B. Am. Meteorol. Soc., 82(11), 2415-2434.

Bowden, R. D., Nadelhoffer, K. J., Boone, R. D., Melillo, J. M., Garrison, J. B., 1993, Contributions of aboveground litter, belowground litter, and root respiration to total soil respiration in a temperature mixed hardwood forest, Can. J. Forest. Res., 23(7), 1402-1407.

Conil, S., Hall, A., 2006, Local regimes of atmospheric variability: A Case study of southern California, J. Climate., 19(17), 4308-4325.

Gerbig, C., Lin, J. C., Wofsy, S. C., Daube, B. C., Andrews, A. E., Stephens, B. B., Bakwin, P. S., Grainger, C. A., 2003, Toward constraining regional-scale fluxes of CO_2 with atmospheric observations over a continent: 2. Analysis of COBRA data using a receptor-oriented framework, J. Geophys. Res-Atmos., 108(D24).

Gurney, K. R., Mendoza, D. L., Zhou, Y. Y., Fischer, M. L., Miller, C. C., Geethakumar, S., Du Can, S. D.,

2009, High resolution fossil fuel combustion CO_2 emission fluxes for the united states, Environ. Sci. Technol., 43, 5535-5541.

Gurney, K. R., Razlivanov, I., Song, Y., Zhou, Y. Y., Benes, B., Abdul-Massih, M., 2012, Quantification of fossil fuel CO_2 emissions on the building/street scale for a large US City, Environ. Sci. Technol., 46(21), 12194-12202.

IPCC, 2013, Climate change 2013: The physical science basis, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.

Jamroensan, 2013, Improving bottom-up and top-down estimates of carbon fluxes in the Midwestern USA, Ph. D Thesis, University of Iowa, USA.

Jung, M., Henkel, K., Herold, M., Churkina, G., 2006, Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling, Remote. Sens. Environ., 101(4), 534-553.

Kormann, R., Meixner, F. X., 2001, An Analytical footprint model for non-neutral stratification, Boundary - Layer, Meteorol., 99, 207-224.

Mahadevan, P., Wofsy, S. C., Matross, D. M., Xiao, X. M., Dunn, A. L., Lin, J. C., Gerbig, C., Munger, J. W., Chow, V. Y., Gottlieb, E. W., 2008, A Satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO_2 exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), Global. Biogeochem. Cy., 22(2).

Newman, S., Jeong, S., Fischer, M. L., Xu, X., Haman, C. L., Lefer, B., Alvarez, S., Rappenglueck, B., Kort, E. A., Andrews, A. E., Peischl, J., Gurney, K. R., Miller, C. E., Yung, Y. L., 2013, Diurnal tracking of anthropogenic CO_2 emissions in the Los Angeles basin megacity during spring 2010, Atmos. Chem. Phys., 13, 4359-4372.

Newman, S., Xu, X., Gurney, K. R., Hsu, Y. K., Li, K. F., Jiang, X., Keeling, R., Feng, S., O'Keefe, D., Patarasuk, R., Wong, K. W., Rao, P., Fischer, M. L., Yung, Y. L., 2016, Toward consistency between trends in bottom-up CO_2 emissions and top-down atmospheric measurements in the Los Angeles megacity, Atmos. Chem. Phys., 16, 3843-3863.

Park, C., Schade, G. W., 2016, Anthropogenic and biogenic features of long-term measured CO_2 flux in north downtown Houston, Texas, J. Environ. Qual., 45, 253-265.

Perez-Landa, G., Ciais, P., Gangoiti, G., Palau, J. L., Carrara, A., Gioli, B., Miglietta, F., Schumacher, M., Millan, M. M., Sanz, M. J., 2007, Mesoscale circulations over complex terrain in the Valencia coastal region, Spain - Part 2: Modeling CO_2 transport using idealized surface fluxes, Atmos. Chem. Phys., 7(7), 1851-1868.

Peters, W., Jacobson, A. R., Sweeney, C., Andrews, A. E., Conway, T. J., Masarie, K., Miller, J. B., Bruhwiler, L. M. P., Petron, G., Hirsch, A. I., Worthy, D. E. J., van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Wennberg, P. O., Krol, M. C., Tans, P. P., 2007, An Atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, P. Natl. Acad. Sci., 2007, 104, 18925-18930.

Peylin, P., Rayner, P. J., Bousquet, P., Carouge, C., Hourdin, F., Heinrich, P., Ciais, P., Aerocarb contributors, 2005, Daily CO_2 flux estimates over Europe from continuous atmospheric measurements: 1, inverse methodology, Atmos. Chem. Phys., 5, 3173-3186.

Pillai, D., Gerbig, C., Ahmadov, R., Rodenbeck, C., Kretschmer, R., Koch, T., Thompson, R., Neininger, B., Lavric, J. V., 2011, High-resolution simulations of atmospheric CO_2 over complex terrain - representing the Ochsenkopf mountain tall tower, Atmos. Chem. Phys., 11(15), 7445-7464.

Tans, P. P., Fung, I. Y., Takahashi, T., 1990, Observational constraints on the global atmospheric CO_2 budget, Science, 247(4949), 1431-1438.

Turnbull, J. C., Karion, A., Fischer, M. L., Faloona, I., Guilderson, T., Lehman, S. J., Miller, B. R., Miller, J. B., Montzka, S., Sherwood, T., Saripalli, S., Sweeney, C., Tans, P. P., 2011, Assessment of fossil fuel carbon dioxide and other anthropogenic trace gas emissions from airborne measurements over Sacramento, California in spring 2009, Atmos. Chem. Phys., 11, 705-721.

Ulrickson, B. L., Mass, C. F., 1990, Numerical investigation of mesoscale circulations over the Los-Angeles casin, a verification study, Mon. Weather. Rev., 118(10), 2138-2161.

Willmott, C. J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance, B. Am. Meteorol. Soc., 63(11), 1309-1313.