

ORIGINAL ARTICLE

## 연안 분지 지역 상공에서의 대기 중 CO<sub>2</sub> 시뮬레이션 결과와 항공 관측 사례 비교

박창현\* · 이귀옥<sup>1)</sup> · 정우식<sup>2)</sup>

부산대학교 대기환경과학과, <sup>1)</sup>DMJ 시스템, <sup>2)</sup>인제대학교 대기환경정보공학과

### Comparisons of Aircraft Observations and Simulation Results of Atmospheric CO<sub>2</sub> over Coastal Basin Areas

Changhyoun Park\*, KwiOk Lee<sup>1)</sup>, Woo-Sik Jung<sup>2)</sup>

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

<sup>1)</sup>DMJ System, Co., Busan 46241, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 50834, Korea

#### Abstract

A model coupling a meteorological predictive model and a vegetation photosynthesis and respiration model was used to simulate CO<sub>2</sub> concentrations over coastal basin areas, and modeling results were estimated with aircraft observations during a massive sampling campaign. Along with the flight tracks, the model captured the meteorological variables of potential temperature and wind speed with mean bias results of 0.8 °C, and 0.2 m/s, respectively. These results were statistically robust, which allowed for further estimation of the model's performance for CO<sub>2</sub> simulations. Two high-resolution emission data sets were adopted to determine CO<sub>2</sub> concentrations, and the results show that the model underestimated by 1.8 ppm and 0.9 ppm at higher altitude over the study areas during daytime and nighttime, respectively, on average. Overall, it was concluded that the model's CO<sub>2</sub> performance was fairly good at higher altitude over the study areas during the study period.

**Key words** : Weather Research & Forecast (WRF) model, Vegetation photosynthesis and respiration, CO<sub>2</sub>, Net ecosystem exchange

#### 1. 서론

금세기 인류가 당면한 과제인 지구온난화로 인하여 국제사회는 상호협력을 통하여 해결, 완화, 적응에 대해서 수많은 연구를 수행하고, 그 결과를 바탕으로 새로운 환경 정책과 규제를 도입하고 있다. 이에 따

라 산업 구조와 경제 구조까지 변화하고 있으며, 인간의 일상생활의 막대한 변화까지 진행되고 있는 상태이다.

현재까지 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 육불화황(SF<sub>6</sub>) 등의 온실기체가 지구 온난화의 주범으로 인식되어 많은 연구들이 진행되고 있다.

Received 10 April, 2017; Revised 27 April, 2017;

Accepted 8 May, 2017

\*Corresponding author: Changhyoun Park, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone : +82-51-583-2651

E-mail : chpark@live.com

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.

International Panel of Climate Change (IPCC, 2013)의 보고서에 따르면, 전구 규모에서 전체 온실 기체의 약 30-40%가 도시 내 화석연료 배출원에 의해서 대기로 방출되고, 이 온실 기체들은 지구 전체의 기온상승을 유발하면서도, 지역 규모의 극한 또는 극서의 기온, 가뭄과 홍수 등의 극단적 기상을 유발하고 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 온실 기체는 지구온난 잠재도 (Global Warming Potential, GWP)를 가지고 있는데, 100년 기준으로 CO<sub>2</sub> 한 분자당 GWP를 1로 두면, CH<sub>4</sub>는 21배, N<sub>2</sub>O는 310배, SF<sub>6</sub>는 23900배 (Forster et al., 2007)이다. 한 분자당 CO<sub>2</sub>의 GWP는 가장 작지만, 대기 중 농도와 배출량이 다른 기체에 비해서 월등히 크기 때문에, 가장 관심있게 연구되고 있다. CO<sub>2</sub>는 산업활동, 자동차, 주거활동 등에 의해 사용되는 화석연료로부터 배출되거나 식생과 토양 미생물의 호흡에 의해서 대기 중으로 배출된다.

기본적으로 CO<sub>2</sub>와 같은 대기 중의 미량기체의 배출량의 영향을 파악하기 위해서 일반적으로 상향식과 하향식 연구 방법으로 접근하고 있다. 상향식 접근(bottom-up approach)법은 주거지, 상업지, 자동차 등의 각 배출원의 영역으로 나누어서 화석연료 소비 통계를 이용하여 각 영역별로 배출되는 탄소 함유량을 고려하여 배출량을 평가하는 방법이다. 이 방법은 전 지구 규모에서 약 5% 오차, 도시 지역에서 약 50-200% 오차를 포함하고 있는 것으로 알려져 있다 (Turnbull et al., 2011; Le Quere et al., 2014). 하향식 접근(top-down approach)법은 대기 플럭스 관측과 역계산 모델링 기법을 포함한다. 국지규모에서의 CO<sub>2</sub> 플럭스 관측은 식생과 대기 상호간의 순생태교환량 (Net Ecosystem Exchange, NEE)을 측정하는 것이다. 고주파 센서나 관측 장비를 타워 등에 설치하여 플럭스를 관측하는 것은 유일하게 플럭스를 직접 측정할 수 있는 방법이지만, 관측 기기 설치 장소와 기기 설계 구성 등의 한계로 인하여 약 수 km 반경에 대한 배출량에 대해서만 관측값이 유효하다. 역계산 방법은 주로 전구 지역에서 관측된 농도로 부터 순생태교환량을 평가하는 방법이다. 이 방법은 선형적 플럭스 추정량이 부족하기 때문에 역계산 시 큰 불확실성을 야기 할 수 있다(Tans et al., 1990; Peylin et al., 2005). 또한 관측 기기의 공간 해상도가 성겨서 국지규모 플

럭스 관측의 공간해상도와외의 규모 격차가 너무 커 연구 대상 규모간의 직접 비교가 상당히 어렵거나 통계적으로 유의하지 않다.

그러므로 이러한 전구 규모, 국지 규모의 차이를 극복하기 위해서는 중규모 CO<sub>2</sub> 모델링의 도입이 필요하게 되는데 Ahmadov et al.(2007, 2009)는 중규모 기상예단 모델인 Weather Research & Forecast (WRF) 모델과 식생 진단 모델인 Vegetation Photosynthesis & Respiration Model (VPRM)을 접합하여, 중규모 CO<sub>2</sub> 모델링을 성공적으로 모의한 바 있다. 또한 Pillai et al. (2011)은 산악지형에 대해서도 이 접합된 중규모 WRF-VPRM이 식생의 광합성과 호흡량을 반영하여 계산된 NEE가 관측된 NEE와 높은 상관도를 보인바 있으며, Jamroensan(2013)은 미국의 중서부 경작지를 중심으로 WRF-VPRM을 수행하였는데, 콩과 식물에 대한 국지 규모 식생 매개변수를 도출하여, CO<sub>2</sub> 농도장 모델링을 성공적으로 수행한 바 있다.

중규모 CO<sub>2</sub> 모델링을 수행하기 위해서는, 최소 1시간 간격의 고해상도 배출량 자료가 기본적으로 선행되어야 하고, 각 식생별 NEE에 대한 플럭스 관측 자료 또한 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 상대적으로 검증된 배출량과 CO<sub>2</sub>관측 자료가 풍부하고, 기존에 대기오염 관련연구 결과가 풍부한(Ulrickson and Mass, 1990; Conil and Hall, 2006; Ryerson et al., 2013) 미국의 Los Angeles연안지역을 대상으로 모델링을 수행하고, 항공기 관측자료를 이용하여 모델 성능을 평가하였다. 관측자료는 최근 미국 남가주 지역의 대기질과 기후변화를 설명하기 위해서 2010년 실시된 CalNex 대규모 관측 캠페인에서 획득된 자료를 사용하였다. 이 캠페인은 2010년 5월과 6월에 걸쳐 남가주 지역과 인접한 태평양 해안지역을 대상으로 항공, 선박, 지상관측을 통해서 대기를 입체적으로 관측하였는데, 여러 대학과 정부연구소 등이 함께 공동으로 참여하였다.

CO<sub>2</sub>에 대한 모델링 결과와 항공 관측 자료의 비교는 다른 대기오염 물질을 대상으로 한 연구에 비해서 아직까지 희소하다(Takegawa et al., 2004). CO<sub>2</sub>와 같은 미량기체의 농도는 경계층 내에서 난류에 의해 배출원의 직접적인 영향을 크게 받고, 특히 도시 지역에서는 시간별 배출량 양태가 불규칙적이기에 경계층

내에서의 모델 검증은 평균류가 지배적인 경계층 바깥에서 보다 불확실성이 상대적으로 크다. 경계층 내·외부에 따라 WRF-VPRM의 CO<sub>2</sub> 모의 농도 결과 차이를 조사하고자 항공기 관측 경로와 고도에 따라 모델 성능을 검증하였다. 또한 약 8년이라는 시간차이를 가진 두개의 배출량 자료를 이용하여 같은 기상 조건에서 CO<sub>2</sub>농도 모의 결과 차이를 분석하여, 연도 차이에 따른 연구대상 지역의 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 파악하고자 하였다.

## 2. 수치 실험 설계

### 2.1. WRF-VPRM 모델

식생학적으로 CO<sub>2</sub>의 총생태교환량(Gross Ecosystem Exchange, GEE)은 기온, 습도, 복사량, 주변 CO<sub>2</sub> 농도, 토양 수분 함량, 영양상태 등에 의해서 결정되고, 호흡량(Respiration, R)은 토양 내부와 식물 내부 영양분 상태에 의해서 결정된다고 알려져 있다(Bowden, 1993). VPRM은 광합성과 호흡에 대한 기작을 반영한 진단 모듈로서, 기상 모델 WRF에서 계산된 단파복사와 지상 기온을 입력값으로 총생태교환량과 호흡량을 각 지역 식생의 종류에 따른 매개변수와 함께 NEE를 계산하는 시스템이다. 자세한 내용은 Ahmadov et al.(2007, 2009)과 Mahadevan et al.(2008)에서 찾을 수 있는데, 아래에 간단히 요약하였다.

VPRM 내에서 식생의 광합성-호흡에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수-배출의 영향을 계산하기 위해서는 지상 식생과 대기 상호간의 CO<sub>2</sub> 교환 즉 NEE가 산정되어야 하는데, NEE는 식생의 광합성에 의한 이산화탄소 흡수(GEE)와 호흡(R)에 의한 배출, 두 가지의 합으로 결정된다. CO<sub>2</sub>의 식생 광합성-호흡량은 태양 복사량의 계절 변화, 일변화와 식생의 성장과정과 연수 및 종류에 따라서 변화한다. 따라서, VPRM 내에서는 WRF에서 모의된 기온과 태양광을 Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) 인공위성의 지표면 반사도 자료 중 EVI (Enhanced Vegetation Index)와 LSWI (Land Surface Water Index)와 함께 이용하여, 지표면 식생 종류와 분포 및 지표수분량을 계산한다. 기존의 연구에서 식생의 광합성을 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)를 사용하여 계산하였으

나, 최근에는 MODIS Leaf Area Index (LAI)가 광합성과 더 큰 상관관계가 있음이 밝혀졌다(Mahadevan et al., 2008). VPRM 모듈은 기상모델 WRF에서 계산된 단파복사에너지와 최하층 온도와 플렉스 타워 관측을 통해 얻어진 파라미터를 이용하여 GEE와 R을 아래 식과 같이 계산한다.

$$GEE = (\lambda \times T_{scale} \times P_{scale} \times W_{scale}) \times FAPAR \times 1/(1+PAR/PAR_0) \times PAR \quad (1)$$

$$R = \alpha \times T + \beta \quad (2)$$

식에서,  $\lambda$ 는 최대 태양복사 에너지의 양자 생산량,  $T_{scale}$ 는 온도,  $P_{scale}$ 는 식생 생태학적 지수,  $W_{scale}$ 는 캐노피 수분 함량, FAPAR는 캐노피 내 식생이 흡수하는 직달 일사량,  $PAR_0$ 는 PAR (Photosynthetic Active Rate)의 반값, 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 식생에 따른 플렉스 데이터에 의해 조정된 고유값을 나타낸다.  $T_{scale}$ 는 광합성에 적합한 최대, 최소 온도에 의해서 계산되고,  $P_{scale}$ 와  $W_{scale}$ 는 LSWI와 LSWI 최고값을 이용하여 계산한다. 모델 내에서의 CO<sub>2</sub> 수송은 WRF 내 이류 모듈에서 계산된다(Mahadevan et al., 2008).

식(1)과 (2)에서 사용된  $\lambda$ ,  $PAR_0$ ,  $\alpha$  그리고  $\beta$ 는 각 식생의 종류별 특징을 담고 있는 매개변수들이다. 주로 봄철에 식물이 왕성하게 성장하는 기간이나 최소 1년 이상 기간 동안의 CO<sub>2</sub> 플렉스 관측 자료와 고해상도 토지 이용도(Jung et al., 2006)를 바탕으로 한 식생 분류도를 이용하여 최소자승법으로 최적화 할 수 있다(Jamroensan, 2013). VPRM 매개 변수의 최적화는 대기 중 CO<sub>2</sub>농도에서 식생의 역할을 정량화하는데 매우 중요한데, 사전에 실시된 연구 결과에서는 매개변수를 최적화하지 않은 경우, 모델은 연구 대상지역에서 약 40% 정도 NEE를 과소모의한 결과를 보였다. 본 연구에서는 연구 대상지 면적의 30% 이상의 면적을 차지하는 대표 식생 종류인 사철나무, 혼합림, 관목림, 목초지에 대한 CO<sub>2</sub> 플렉스 관측 자료를 이용하여 매개변수를 최적화 하였다. 해당 지역의 식생 분류, 토지 이용도는 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2. 수치 모델링 구성

접합된 WRF-VPRM 내 식생의 광합성과 호흡에

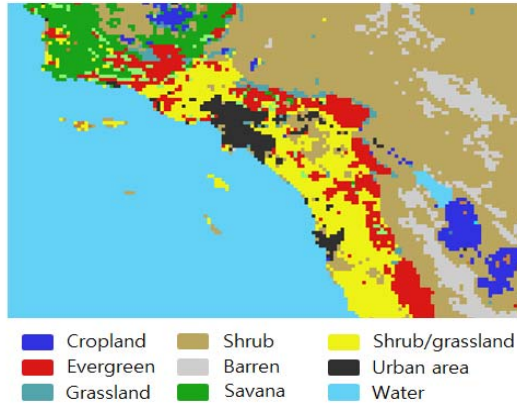


Fig. 1. Land use and land cover distributions for the finest domain.

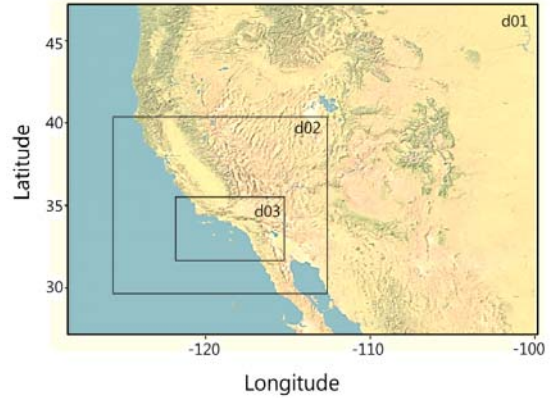


Fig. 2. Modeling domains for this study.

의한 CO<sub>2</sub> 플럭스를 진단하는 VPRM 모듈을 사용하였다. WRF모델 내 격자 구성은 Fig. 2에 모식적으로 나타내었다. 총 3개의 동지 격자 이고 각각의 도메인은 수평해상도 36 km, 12 km, 4 km을 가지고, 연직으로 총 38개 층을 100 hPa까지 설정하였다. 기상학 초기와 경계조건은 북미 재분석(National American Regional Reanalysis, NARR) 자료(해상도: 3 hr, 32 km)를 사용하였고, 해수면 온도 자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 해수면 자료(해상도: 6 hr, 약 8 km)를 사용하였다. 모델 상에서의 바람의 정확도를 향상하기 위하여, NCEP 전구 관측 기상 데이터(Global observational weather data)를 이용하여 지상과 상층 바람에 WRF 내 Obs nudging 옵션을 적용하였다. 모델에서 사용한 물리 과정은 Table 1에 요약하였다. 수치모델링은 30시간 단위로 수행하였고, 최초 6시간은 spin-up 시간으로 분석에서는 제외하였다.

CO<sub>2</sub> 초기 농도 조건과 측면 경계조건으로 NOAA

CarbonTracker 자료를 사용하였다(Peters et al., 2007). CarbonTracker는 북미 대륙을 대상으로 CO<sub>2</sub>의 대륙 배경농도와 식생지역에 대한 광합성량과 호흡, 연간 발생한 산발적 산불의 영향, 화석연료에 의한 배출량, 대기-해양 교환과 관련된 CO<sub>2</sub> 물분율(해상도: 3 hr, 1° × 1°) 자료로 제공된다. 접합된 모델 내에서는 CarbonTracker 자료를 연직 기압층을 고려하여, 단순 내삽법으로 WRF 내 연직층에 삽입하였고, 이때 지표면 기압차이는 최대 3 hPa 이었다.

고해상도 CO<sub>2</sub> 모델링을 위해서 최소 1시간 간격의 고해상도 CO<sub>2</sub> 배출량 자료를 필요하기 때문에, 본 연구에서는 LA 지역을 대상으로 산출된 2010년 Hestia 배출량 자료(Gurney et al., 2012)와 2002년 Vulcan 배출량 자료(Gurney et al., 2009)를 이용해서 2개의 병행 수치모델링을 수행하였다. 이후, 전자를 이용한 수치실험 결과를 HST, 후자의 경우 VUL로 표기한다. 각 배출량 자료는 주거지, 상업용지, 산업용지, 도로 및 비도로, 항공기, 발전소, 시멘트 생산지 카테고리

Table 1. WRF-VPRM model's physics options

Physics	Options
Microphysics	WSM 3 scheme
Longwave radiation	RRTM 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

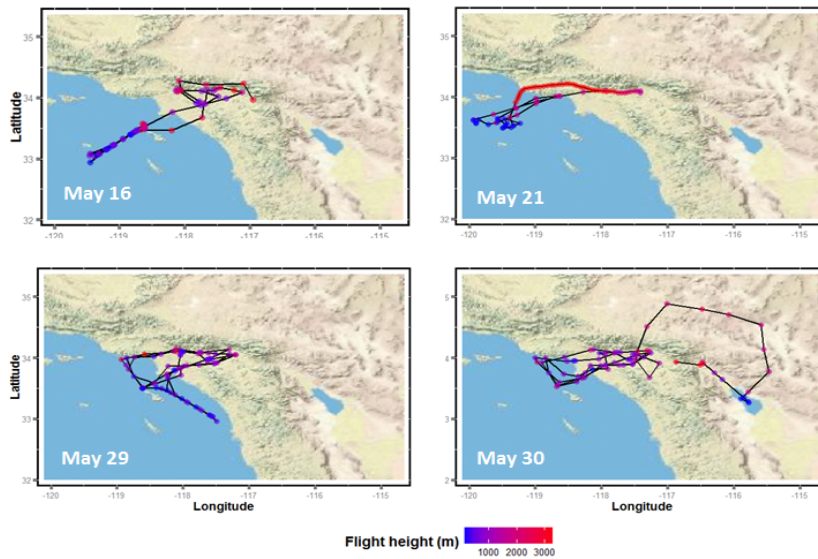


Fig. 3. The 4-day flight tracks of the NOAA P-3 aircraft during the study period. Each dot indicates CO<sub>2</sub> sampling points.

전력사용량 카테고리 대해서 CO<sub>2</sub> 배출량을 제공한다.

### 3. CO<sub>2</sub> 관측 자료

2010년에 미국 남가주 지역을 중심으로 대기오염 물질과 기후변화에 대한 이해를 위해 종합 캠페인 CalNex가 수행되었는데, 본 연구에서는 대류권 하층에 대한 수치모의를 검증하고자 항공기 관측 자료를 사용하였다. 구체적인 관측 장비와 관측 방법 시기, 비행경로 등에 대한 자세한 내용은 Ryerson et al.(2013)에서 찾을 수 있다.

캠페인 관측 기간 동안 주간 2회(5월 16일, 21일) 야간 2회(5월 30일, 31일) 총 4일에 걸쳐 획득된 NOAA-P3 항공기 관측 자료를 사용하였고, 해당일의 항공기 운행 경로는 Fig. 3에 샘플링 간격마다 나타내었다. 주간에는 LA 분지상공을 거쳐 태평양 바다 상공까지 관측하여 돌아오는 경로를 통해, 해풍에 의한 CO<sub>2</sub>와 같은 미량 기체의 일변화 관측에 초점을 맞추었고, 야간에는 주로 LA 분지상공 뿐만 아니라 분지를 이루는 산을 넘는 경로를 선택하여 CO<sub>2</sub>의 내륙 침투와 LA 근해 상공에서의 농도에 초점을 두어 비행 관측하였다.

항공기 내에 분해능 0.2 ppm의 cavity ring down

분광기(Picarro, Inc., CA, USA)를 설치하여 CH<sub>4</sub>와 같이 측정하였다. CO<sub>2</sub> 샘플링 시간 간격은 4-7분으로 유동적이었고, 기상 자료 관측 자료와 함께 평균하여 결과 분석을 진행하였다.

항공관측 자료는 시간에 따라 모델 공간 내에서 위치가 바뀌는 특성을 지니고 있으므로, 대부분의 자료는 모델 내에서 아격자 규모의 기상 변수 및 CO<sub>2</sub> 농도와 비교해야 한다. 따라서 CO<sub>2</sub> 샘플링 시각마다의 항공기 위치를 수치모델 한 격자 당 8점의 거리 차이를 고려해서 가중치를 두어 비교하여야 한다. 수평방향으로는 거리차이 가중치를 사용하고, 연직방향으로는 기압차이 또는 거리차이 가중치를 적용하여 모의된 CO<sub>2</sub> 농도를 계산하는데, 본 연구에서는 연직방향으로 거리차이 가중치를 사용하였다. 이 경우, 기압차이 가중치의 경우와 비교할 때 오차는 평균 1 ppm 이하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 기상변수 비교

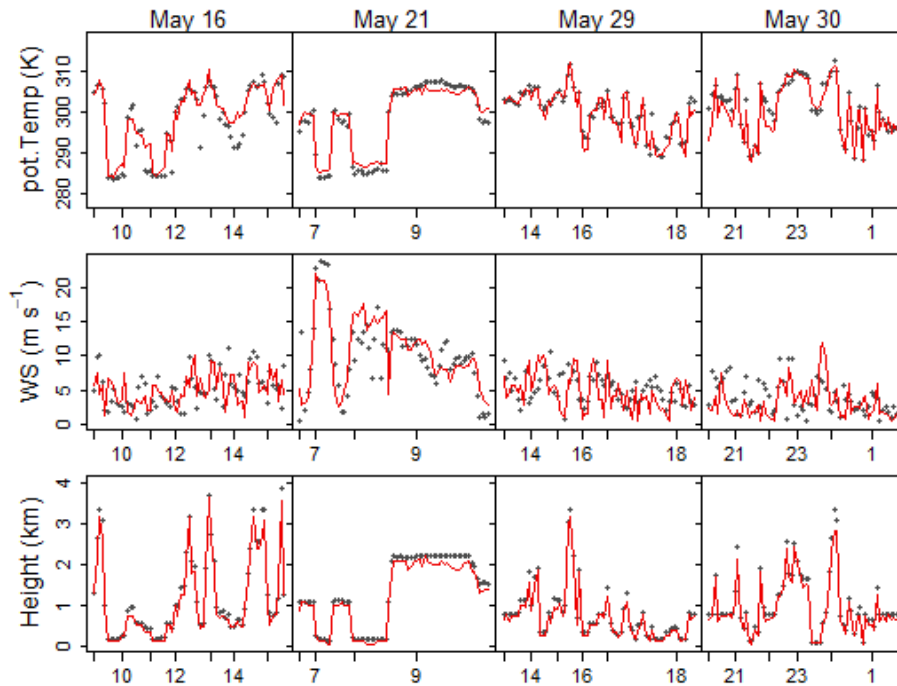
캠페인 관측 항공기 경로가 LA 상공이었던 날 중 밤과 낮을 대표하는 총 4일에 걸쳐서 분석하였다. 각 해당일의 온도, 풍속 그리고 비행 고도에 대한 모델결과와 항공 관측의 통계량을 Table 2에 나타내었다.

**Table 2.** Statistics of meteorological variables between modeling results and aircraft observations

Date	Variable (unit)	Mean (observations)	RMSE	MB	IOA
May 16	Pot. Temp (K)	298.6	2.6	0.6	0.97
	WS ( $\text{m s}^{-1}$ )	5.1	2.4	-0.4	0.70
May 21	Pot. Temp (K)	294.5	1.7	0.3	0.99
	WS ( $\text{m s}^{-1}$ )	10.5	2.7	-0.8	0.96
May 29	Pot. Temp (K)	301.2	1.8	0.2	0.96
	WS ( $\text{m s}^{-1}$ )	5.4	3.9	0.3	0.43
May 30	Pot. Temp (K)	301.7	1.3	-0.1	0.99
	WS ( $\text{m s}^{-1}$ )	3.7	2.1	-0.3	0.77

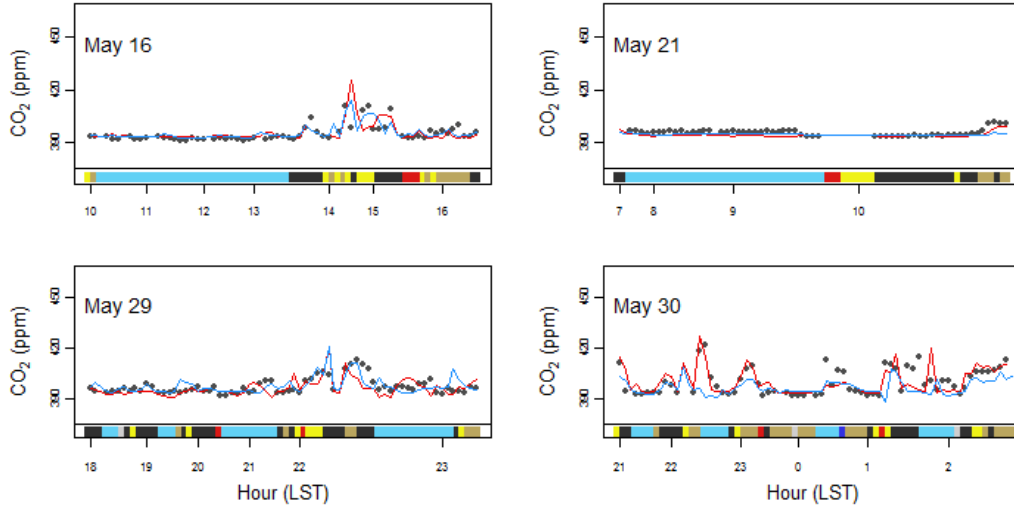
온위에 대한 수치모의 결과는 Index of Agreement (IOA; Willmott, 1982)가 0.9이상의 높은 값을 보였고, 풍속에 대해서도 5월 29일 바람을 제외하면, 모두 IOA가 0.7이상의 값을 보였다. 각 날에 대한 HST와 VUL과 관측 값의 시계열 비교를 Fig. 4에 나타내었다. 5월 16일 23:00 부근을 제외하고 모델 결과는 4일 전

체 평균 온위는 RMSE (Root Mean Square Error)가 2.6 K, MB (Mean Bias)가 0.8 K,  $R^2=0.88$ 의 결과를 보였고, 전체 평균 풍속의 경우 RMSE는 3.0 m/s, MB는 0.2 m/s,  $R^2=0.95$ 의 결과를 보였다. 비행 경로를 따라 연직 격자 간격이 상대적으로 넓은 것을 고려하더라도, 전체적으로 LA 지역 상공 대류권 하층에서의



**Fig. 4.** Time series of potential temperature (upper panels), wind speed (middle panels), and flight altitude and geopotential height (bottom panels) for each of the 4 flights during the study period. The red lines indicate WRF-VPRM results and black dots indicate P3 aircraft observations. The x-axis indicates local standard time (PST).





**Fig. 5.** Time series of CO<sub>2</sub> concentration of HST (red solid line) and VUL (blue solid line), and P3-flight observation (black dot) and pf P-3 aircraft observations for each of the 4 flight days. Land-use types over the aircraft locations are represented by color code the same as in Fig. 1.

기상 수치 모의 결과는 관측과 잘 일치하고, 이 후 CO<sub>2</sub> 농도 분석을 위한 충분한 모델 성능을 보였다고 결론 지을 수 있다.

#### 4.2. CO<sub>2</sub> 농도 비교

CO<sub>2</sub> 수치모의에서 결과를 논하기 전에, 모델의 CO<sub>2</sub> 배경농도 모의 능력을 평가하는 것이 중요하데, 이를 위해서, CarbonTracker자료만으로 WRF-VPRM을 수치모의하였다. 그 결과 배경농도 지상 관측 지점에서 HST와 VUL 각각 +0.2 ppm 과 -0.4 ppm의 오차를 보였다. 이는 관측 기기 자체의 평균 오차 0.2 ppm을 고려할 때 모델의 배경농도 모의 능력은 우수하다고 판단할 수 있다.

Fig. 5는 비행 경로와 고도에 따른 CO<sub>2</sub> 모델 결과와 항공기 관측결과를 나타내는 그림이다. 관측 기간 동안 항공기는 경계층 내, 외부 진출입을 반복하고, 또 다양한 토지와 식생 피복 종류에 해당하는 지역 상공을 비행하였다. 비행 경로는 경계층에 의한 CO<sub>2</sub> 농도의 변화와 각 토지 피복에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량과 관측된 농도의 상관관계를 발견하기에 적합한 경로들이다.

항공 관측일 각각에 대해 CO<sub>2</sub> 농도 수치모의 결과와 항공 관측과의 통계결과를 Table 3에 나타내었다.

5월 29일 결과를 제외하고, 주야간 모두 모델 결과가 IOA > 0.7의 양호한 결과를 보였다. 전체적으로 모델은 시간에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 변화의 경향성을 잘 따라잡고 있다. 주간 비행 관측일인 5월 16일과 21일 동안 NOAA-P3 항공기는 전반부에는 주로 해양 상공을 후반부에는 육지상공을 주로 비행하였다. 관측 결과에서 해양 위를 비행하는 동안에는 낮은 농도를 나타내고, 도시 지역을 경계층 내에서 저공 비행하는 동안에는 높은 CO<sub>2</sub>농도를 보이고 있다. 5월 21일의 경우에는 관측시간 전반부에는 주로 해양 상공에서, 후반부에는 주로 도시지역 상공 특히 경계층 밖에서 관측하였는데, 해양 상공에서는 CO<sub>2</sub>농도는 큰 변화가 없었고, 또한 도시 지역 상공이라도 경계층 외부를 비행하는 동안에는 역시 CO<sub>2</sub>농도에 큰 변화가 없었다. 모델 결과는 경계층 외부에서는 관측과 크게 차이가 나지 않았으나, 경계층 내부로 항공기가 진입하면서, 각 모델 결과의 오차가 커짐을 알 수 있다. HST와 VUL이 각각 평균 1.8 ppm와 1.5 ppm 과소모의 하였는데, 이는 경계층 내에서는 배출원의 영향을 직접적으로 받기 때문인 것으로 판단된다. Vulcan 배출량 자료가 Hestia에 비해서 8년 전 년도를 대상으로 생성된 것이고, 해상도도 성김으로 인하여 VUL이 HST 보다

**Table 3.** Statistics of CO<sub>2</sub> concentrations between modeling results and aircraft observations

Date	Observation	RMSE	MB	IOA
May 16	395.2	4.3	0.7	0.86
May 21	397.1	3.4	-2.4	0.80
May 29	395.0	3.8	1.0	0.74
May 30	395.2	4.3	0.7	0.86

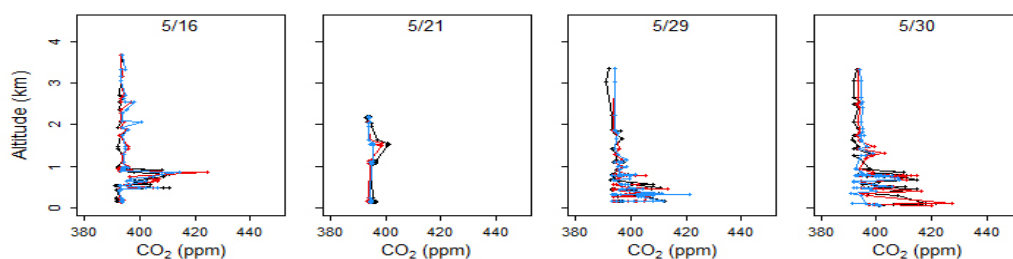
전반적으로 낮은 CO<sub>2</sub> 농도를 모의하고 있는 것으로 판단된다.

야간 비행 관측일인 5월 29일과 30일 동안에는 항공기가 주로 육지 상공을 비행하면서 샘플링하였다. 야간 경계층의 높이는 200 m 미만이었으며, 비행 관측은 야간 경계층 밖에서 수행되었다. 최대 최저 농도 차이는 주간 농도와 크게 다르지 않지만, 경계층 바깥에서 관측한 결과임에도 불구하고 도시 상공에서 고농도를 보였다. 야간에 CO<sub>2</sub> 인공 배출량이 낮음에도 불구하고 주간 농도 범위와 차이가 적은 것은 상대적으로 낮은 평균 풍속(Fig. 4)에 의해서 야간 경계층 상공에 CO<sub>2</sub>가 잔류된 영향으로 판단된다. 또한 주간의 결과에 비해서 모델은 관측과 상대적으로 큰 불일치를 보였는데, 낮 시간에는 도시-고농도라는 상관관계가 상대적으로 높았으나, 야간에는 경계층 상층에 잔류하는 CO<sub>2</sub>의 이류에 의해서 토지 피복(Fig. 1)과의 농도와의 상관관계가 상대적으로 낮았다. HST와 VUL는 각각 밤에 0.9 ppm과 0.6 ppm로 과소모의 하였다.

전체적으로 해양과 육지 또는 경계층 내부와 외부에 대한 상관관계는 뚜렷하나, 다양한 토지 또는 식생 지역에 따른 CO<sub>2</sub>와의 상관관계는 크지 않았다. 이는 식생이 CO<sub>2</sub>에 미치는 영향이 인공 배출원에 비해 적다는 것을 암시한다. WRF-VPRM 내에서는 CO<sub>2</sub>의

배출원천이 인공인지 식생인지를 판단해 주는 추적자가 있다. 이를 이용하여 식생이 비행 고도의 CO<sub>2</sub> 농도에 미치는 영향을 분석하였으나, 지상과 대비할 때, 특히 경계층 꼭대기 고도 이상에서는 무시할 만한 수준이었다. 따라서, 관측 대상지역 상공 대기 내 CO<sub>2</sub> 농도에 미치는 식생의 광합성-호흡에 의한 직접적인 영향은 거의 없었다.

WRF-VPRM이 모의한 연직 CO<sub>2</sub> 농도를 분석하기 위해서, 비행 고도에 따라 관측된 CO<sub>2</sub> 농도와 모델 결과의 연직 프로파일을 Fig. 6에 나타내었다. 이 연직 프로파일은 배출량의 시간변화와 샘플링 시간과 독립적인 CO<sub>2</sub> 농도의 연직 분포를 나타내므로, 관측과 비교하여 모델 내에서 물질의 질량혼합이 제대로 작동하는지를 평균적으로 파악할 수 있다. 주간과 야간 모두 거의 모든 층에서 1 ppm 표준편차 내에서 모델이 농도장의 평균을 잘 모의하였다. 주간에는 경계층 꼭대기 약 1 km 상공에서 연직 평균 약 3-5 ppm 이상 높은 최고 농도를 보였고, 반면 야간에는 최하층에서 최대값을 보였고 고도가 상승함에 따라 점점 농도가 낮아지는 패턴을 보였다. 이는 주간에는 활발한 대류 활동으로 인해 연직적으로 경계층 내에서 CO<sub>2</sub>의 혼합이 활발하게 잘 이루어지고, 야간에는 상대적으로 낮은 경계층 꼭대기 고도로 인하여, 하층 CO<sub>2</sub> 농도가 높아

**Fig. 6.** Vertical profiles of average CO<sub>2</sub> concentration of HST (red solid line) and VUL (blue solid line), and P3-flight observation (black dot).



진다는 것을 모델이 잘 모의하고 있음을 나타내는 것이다.

## 5. 결론

기상 예단 모델 WRF와 접합된 식생 진단 모델 VPRM을 이용하여, 미국 내 연안 분지 지역인 LA를 대상으로 고해상도 CO<sub>2</sub> 수치모델링을 수행하였다. 모델의 성능은 주, 야간 총 4일의 항공 관측 자료와 비교하여 모델을 평가하였다. 모델은 비행 경로를 따라 측정된 기상변수인 온도와 풍속의 변화와 크기를 잘 모의하였다.

비행경로를 따라 추출된 모의된 CO<sub>2</sub> 농도는 일변화보다 토지피복 및 토지이용과 관련된 배출원들과 상대적으로 높은 상관관계를 보였다. 해양 상공에서는 주야간 모두 낮은 농도가 지속되었고, 도심 상공에서는 주야간에 상대적으로 고농도를 보였다. 특히, 야간에는 경계층 고도 상층에서도 잔류하는 CO<sub>2</sub>의 영향으로 고농도가 지속되었다. LA 분지지역 밖 상공에서는 분지지역 안 상공에서 보다 CO<sub>2</sub> 농도가 확연하게 낮은 값을 보였는데, 전반적으로 LA 도심 내의 CO<sub>2</sub> 배출이 높은 산으로 구성된 분지를 넘어가지 못하기 때문이다. 전체적으로 CO<sub>2</sub> 농도장은 해양 상공과 경계층 바깥 층에서 HST와 VUL 모두 양호한 결과를 보였다. 주간에는 도시 경계층 내부에서의 모델 성능은 배출량 자료에 직접적으로 영향을 받음으로 인해, 오차가 2-3배 이상 상대적으로 컸다. HST와 VUL은 평균적으로 모두 과소모의하였으나, HST가 VUL보다 상대적으로 적은 오차범위를 보였는데, 이를 통해 Hestia 배출량 자료가 연구기간 동안의 CO<sub>2</sub> 배출의 양과 패턴을 더 적절히 반영하고 있음을 알 수 있었다. WRF-VPRM 내 배출원 추적자를 분석한 결과, 비행 고도 범위에서 식생의 광합성이나 호흡이 직접 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있는 것으로 나타났고, 이는 LA 지역 상공에서의 주된 CO<sub>2</sub> 농도의 배출원은 인공발생원에 의한 것임을 알 수 있었다.

본 연구방법은 2016년도 봄 한반도 상공에서 항공기 관측 자료를 모델링을 통하여 재현하고, 한반도 내 인공배출원으로 부터의 CO<sub>2</sub> 확산 기작과, 식생과의 상호작용을 연구하는 기초가 될 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2014년도 한국연구재단 이공분야기초연구사업(NRF-2014R1A1A2058053)의 지원을 받아 수행된 연구임. 저자는 자료를 제공해 준 미국 대기해양국 NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration)의 Jeff Peischl 박사와 Tom Ryerson 박사, Max Plank Institute의 C. Gerbig 박사, University of Arizona 대학의 K. Gurney 박사, 그리고 NOAA CarbonTracker 팀에게 감사드린다.

## REFERENCES

- Ahmadov, R., Gerbig, C., Kretschmer, R., Koerner, S., Neining, B., Dolman, A. J., Sarrat, C., 2007, Mesoscale covariance of transport and CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> transport models with coastal tower measurements of CO<sub>2</sub>, *Biogeosciences*, 6(5), 807-817.
- 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.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2008, Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.), *Climate change 2007: The physical science basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2, 129-234.

- 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> emissions on the building/street scale for a large US city, *Environ. Sci. Technol.*, 46(21), 12194-12202.
- IPCC, 2013, Summary for policymakers, in: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (eds.), *Climate change 2013: The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-27.
- 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.
- 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<sub>2</sub> exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM), *Global. Biogeochem. Cy.*, 22, GB2005.
- 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> over complex terrain - representing the Ochsenkopf mountain tall tower, *Atmos. Chem. Phys.*, 11(15), 7445-7464.
- Ryerson, T. B., Andrews, A. E., Angevine, W. M., Bates, T. S., Brock, C. A., Cairns, B., Cohen, R. C., Cooper, O. R., de Gouw, J. A., Fehsenfeld, F. C., Ferrare, R. A., Fischer, M. L., Flagan, R. C., Goldstein, A. H., Hair, J. W., Hardesty, R. M., Hostetler, C. A., Jimenez, J. L., Langford, A. O., McCauley, E., McKeen, S. A., Molina, L. T., Nenes, A., Oltmans, S. J., Parrish, D. D., Pederson, J. R., Pierce, R. B., Prather, K., Quinn, P. K., Seinfeld, J. H., Senff, C. J., Sorooshian, A., Stutz, J., Surratt, J. D., Trainer, M., Volkamer, R., Williams, E. J., Wofsy, S. C., 2013, The 2010 California research at the nexus of air quality and climate change (CalNex) field study, *J. Geophys. Res-Atmos.*, 118(11), 5830-5866.
- Takegawa, N., Kondo, Y., Koike, M., Chen, G., Machida, T., Watai, T., Blake, D. R., Streets, D. G., Woo, J. H., Carmichael, G. R., Kita, K., Miyazaki, Y., Shirai, T., Liley, J. B., Ogawa, T., 2004, Removal of NO<sub>x</sub> and NO<sub>y</sub> in Asian outflow plumes: Aircraft measurements over the western Pacific in January 2002, *J. Geophys. Res.*, 109, D23S04.
- Tans, P. P., Fung, I. Y., Takahashi, T., 1990, Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> 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 (1) 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 basin, 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.