

## 기후변화에 따른 기온상승이 한반도 동남지역 국지 기상장과 오존 분포에 미치는 영향에 관한 수치모의

정여민 · 이화운\* · 이순환<sup>1)</sup> · 최현정<sup>1)</sup> · 전원배

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>부산대학교 환경문제연구소  
(2010년 11월 3일 접수; 2010년 11월 19일 수정; 2010년 11월 19일 채택)

### Numerical Study on the Impact of Regional Warming on the Meteorological Field and Ozone Concentration over the South-Eastern Part of the Korean Peninsula

Yeo-Min Jeong, Hwa-Woon Lee\*, Soon-Hwan Lee<sup>1)</sup>,  
Hyun-Jung Choi<sup>1)</sup>, Won-Bae Jeon

*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

*<sup>1)</sup>Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Manuscript received 3 November, 2010; revised 19 November, 2010; accepted 19 November, 2010)

#### Abstract

In order to clarify the impact of regional warming on the meteorological field and air quality over southeastern part of Korean Peninsula, several numerical experiment were carried out. Numerical models used in this study are WRF for the estimate the meteorological elements and CMAQ for assessment of ozone concentration. According to the global warming impact, initial air temperature were changed and its warming rate reach at 2 degree which was based on the global warming scenarios provided by IPCC. The experiments considering the global warming at initial stage were presented as case T\_UP. Air temperature over inland area during night time for case T\_UP is higher than that for Base case. During time since the higher temperature over inland area is maintained during daytime more intensified sea breeze should be induced and also decrease the air temperature in vicinity of coast area. In case of T\_UP, high level concentrations ozone distribution area was narrowed and their disappearance were faster after 1800LST. As a results, wind and temperature fields due to the global warming at initial stage mainly results in the pattern of ozone concentration and its temporal variation at South-Eastern Part of the Korean Peninsula.

**Key Words** : Global warming, Temperature increase rate, WRF, CMAQ

#### 1. 서론

현재 지구온난화에 따른 기후변화가 인간생활 미

치는 영향에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 2007년에 발표된 IPCC (Inter government Panel of Climate Change) 4차 보고서는 지난 100년(1006~2005) 동안 전 지구적인 기온 상승이  $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$  에 이르고, 특히, 동아시아 지역은  $1.5^{\circ}\text{C}$  상승하여 지구 평균 2배에 달한다고 보고하였다. 그리고 향후 20년 동안 SRES (Special Report on Emission Scenarios)

\*Corresponding author : Hwa-Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-51-510-2291  
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

온실가스 배출 시나리오 범위에 대하여 약 0.2°C/10년 상승률로 온난화가 진행될 것으로 전망되고, A1F1 시나리오에 따라 1980-1990년 대비 2090-2099년의 기온이 약 2.4-6.4°C 상승할 것이라고 예측하였다.

이렇듯 전 지구적인 기온의 상승이 명시적으로 나타나고 있으며, 도심지역에서 더 큰 기온상승이 나타나 (IPCC, 2007) 전지구규모의 기류 변화를 유도한다는 여러 연구가 진행되고 있다. Oouchi 등(2006)은 일본 기상청 수치모형을 이용하여 기후 시나리오를 적용한 기상상태에서 발생하는 태풍의 강도변화를 살펴 보았다. 이들은 북반구의 태풍의 평균 풍속이 현재 기상상태에서 발생하는 태풍에 비하여 약 7.3 m/s 강화된다고 보고하였다. 그리고 Vecchi 와 Soden(2007)은 인위적인 이산화탄소의 증가가 태풍에 미치는 영향에 관한 수치실험을 통하여 지구규모의 온난화는 대서양과 동태평양의 중관 바람 층밀리기(shear)를 증가시키고 있음을 보였다. 이처럼 지구온난화에 따른 중관규모의 바람장의 강도 변화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 지구규모의 기온상승은 전구적인 기류 뿐 아니라 국지규모의 기류 변화에도 영향을 미친다. 특히 한반도를 포함한 동아시아지역의 기온 상승이 급격하게 이루어지고 있기 때문에 이 지역의 기온 상승이 국지규모의 바람에 미치는 영향을 정확히 파악할 필요가 있다. 그리고 이러한 기온 상승은 단순히 기상장의 변화 뿐 아니라 대기오염 특히 광화학 반응성 오

염 물질의 농도 변화에도 영향을 미친다 (Carvalho 등 2010; Diem, 2009). Camalier 등(2007)은 미국 39개 대도시의 오존농도의 시간 변화를 분석한 결과 오존 농도가 지표면 기온변화와 밀접하게 관련된다고 보고 하였다.

이러한 지구온난화에 따른 기온의 상승이 국지규모의 기류변화와 광화학 반응성 오염물질의 농도변화에 직접적으로 영향을 미침에도 불구하고 그에 따른 영향에 관한 연구가 매우 부족한 실정이다. 따라서 장기적인 환경 변화 예측기술의 개발 측면에서 지구온난화에 따른 국지기상장의 변화와 이에 따른 대기오염의 변화 경향성을 파악할 필요가 있다. 본 연구는 지구온난화 시나리오에 따른 기온상승을 가정하고, 이에 따른 한반도 동남지역의 기류 변화와 오존의 농도 변화를 수치실험을 통하여 살펴보았다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 대상지역

지구온난화에 따른 기온상승의 영향을 파악하고, 이에 따른 오존 농도의 변화 양상을 규명하기 위하여 본 연구는 오염 배출원이 밀집되어 있으며, 연안에 접하여 국지순환장이 복잡하게 나타나는 한반도 동남지역을 연구대상으로 설정하였다.

동남지역 권역은 한반도의 대구와 포항을 포함하는 경상북도의 남부지역과 부산과 울산을 포함하는 경상남도 동부 지역을 의미한다. 연구 대상 지역인 동

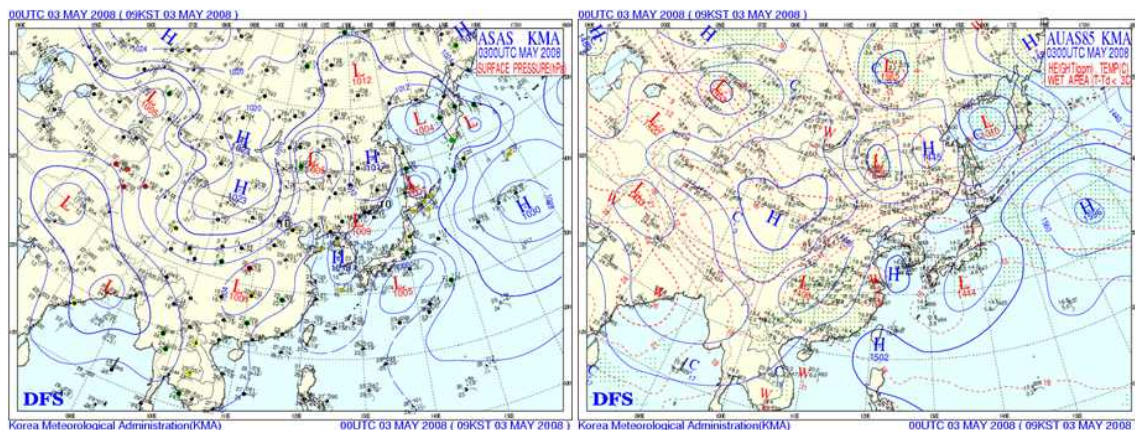


Fig. 1. Surface and 850 hpa weather chart at 0900LST on 3 May 2008.

남지역 권역은 산악과 분지, 연안의 복잡한 지형을 가지고 있으며 대규모 오염물질의 배출원이 위치하고 있어 오염물질의 발생과 수송이 다양하게 나타날 수 있는 조건을 갖추고 있다.

## 2.2. 연구대상일의 종관장

본 연구에서는 동남지역 대도시(부산, 울산, 포항, 대구, 경주)의 고농도 오존 사례일 중 종관장의 영향이 크지 않고 맑았던 2008년 5월 2일 09LST부터 4일 09LST까지를 사례일로 선정하였다. Fig. 1은 사례일인 5월 3일 09LST의 지상 종관 상태를 나타낸 것이다. 5월 3일 지상에서는 1019 hPa의 강한 고기압이 위치하고 있었으며, 산동 반도 상공에서도 강한 고기압이 위치하고 있기 때문에 사례 기간 동안 한반도는 지속적으로 약한 종관 바람장이 나타났다. 이러한 기압계는 850 hPa 고도 종관장에서도 동일하게 나타나는데, 850 hPa 고도의 풍속은 5m/s 이내로 나타나 종관장의 영향을 비교적 약하게 나타나는 것으로 확인되었다.

## 3. 수치모형

### 3.1. 기상장 수치모델

기상장 수치모의 모델은 미국 국립대기연구소(National Center for Atmospheric Research)와 미국 해양대기관리청(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction)에서 개발한 WRF(Weather Research and Forecasting)를 사용하였다.

WRF 모형은 완전 압축성 비정수계 방정식을 사용하고, 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용하며, 지형에 근거한 정역학 기압 연직 좌표를 사용한다.

모델의 초기입력장은 미국 해양대기관리청의 국립환경예측센터에서 제공하는 1.0x1.0 FNL(Final Operational Global Analysis data)을 사용하였고, 경계조건에서의 수치모델링 계산 오차를 줄이기 위해 3개의 동지격자를 설정하여 nesting 방법을 이용하였다. 동남지역을 중심으로 설정한 마지막 도메인 영역은 1km 해상도의 가로와 세로의 격자수를 199개로 하여 수치모의 하였다. 모델링 영역은 Fig. 2에 나타내었고, 상세 모델 설정은 Table 1과 같다.

수치 모의에서 사용된 초기 입력 및 경계 조건은 FNL자료를 사용하였다. FNL의 초기 입력 자료는 1.0x1.0로 제공되므로 WRF의 전처리 과정인 WPS(WRF Preprocessing System)에서 FNL 자료를 격자 수에 맞게 내외삽하여 수치 모델링 계산에 사용되는 초기 입력 자료로 생성된다. 지형 및 토지이용 자료는 미국항공우주국에서 제공하는 3초 지형자료인 SRTM(Shuttle Radar Topography Pission) 3초와 환경부에서 제공하는 1초 토지이용 자료인 KLU(Korea Land Use) 1초를 사용하였다. SRTM 3초 자료는 1도의 영역이 1,200개 격자로 표현되므로 USGS(United States Geological L의 vey) 30초 자료에 비해 해상도가 10배 높으며, KLU 1초 자료는 환경부에서 Lands 전처리TM 위성과 SPOPS 위성 영상의 합성을 통해 제작한 토지 이용 자료로서 USGS 토지 이용 자료에 비

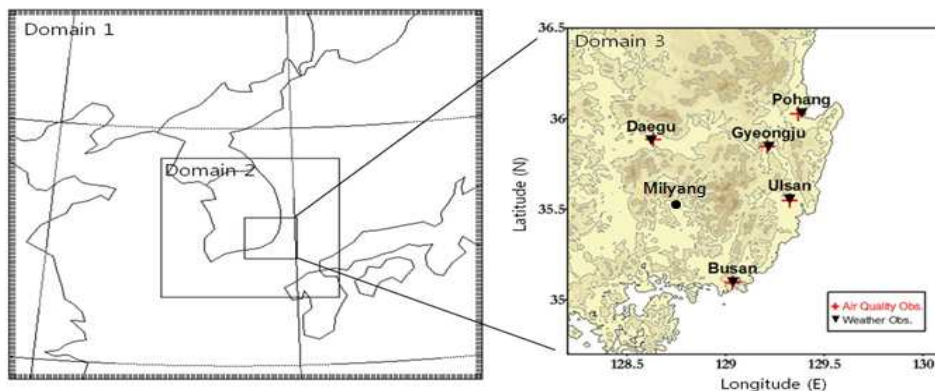


Fig. 2. WRF model domains and nested domain used in this study.

**Table 1.** Description of WRF modeling

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	190 × 190	214 × 214	199 × 199
Horizontal resolution	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	28 layers		
Physical options	Kain-Frisch(new Eta) cumulus scheme		
	YSU scheme		
	WSM 3-class simple ice scheme		
	RRTM long-wave scheme		
	Dudhia short-wave scheme		
Initial data	NCEP FNL Operational Global Analysis data		
Time Period	2008. 05. 02. 0900LST ~ 2008. 05. 04. 0900LST		

해 해상도가 30배 높아 수치모의의 정확도를 향상시킨다.

### 3.2. 대기질 수치모델

대기질 수치모의에 사용된 모델은 미국 보건환경국 (EPA ; Environmental Protection Agency)에서 개발된 CMAQ v4.6(Community Multiscale Air Quality model, Byun 와 Ching, 1999)이다. CMAQ은 오일러리안 모델에 기초한 3차원 광화학 수송 모델로서 대류권 오존, 산성 강하, 시정, 독성 물질 등 대류권을 통과하는 입자상 물질을 모의할 수 있고, 도시규모에서 지구적인 규모까지 다양한 규모에 대한 수치모의가 가능하며, 여러 종류의 대기오염물질의 복잡한 반응을 동시에 고려할 수 있다. 모델의 구조는 5개의 전처리 과정(MCIP, ICON, BCN, ECIP, JPROC)과 1개의 화학수송모델(CCTM)로 되어있다. 전처리 과정은 기상장 수치모의 결과를 화학수송모델에서 수행할 수 있는 입력 자료로 변환하는 과정인 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Model)과 격자 내의 초기 농도값을 설정하는 ICON (Initial CONditions processor), 경계조건의 농도를 설정하는 BCN (Boundary CONditions processor), 화학 반응에 기여하는 광해리율 산출 과정인 JPROC(Photolysis rate processor), 그리고 CAPSS 자료를 이용하여 배출량을 산정하는 과정인 ECIP(Emission-Chemistry Interface Model)으로 구성된다. 전처리 과정을 통해 나온 입력 자료는 화학수송모델 CCTM (CMAQ Chemical Transport Model)에서 오염물질의 이류와 확산, 생성과 소멸, 그리고 배출량을 계산하는 연속방

정식을 기초로 3차원 이류 확산 방정식의 수치적 계산의 결과로 공간상의 시계열 오염물질의 농도를 나타낸다. 본 연구에서는 MCIP V3.2와 CMAQ V4.6을 이용하였으며, 수평 격자는 가로와 세로 각각 186개로 구성하였고, 연직 격자 층은 28개로 설정하여 대기질 수치모의를 수행하였다.

### 3.3. 수치실험 설계

본 연구에서는 지구온난화 시나리오에 따른 기온 상승이 국지 기류장과 대기오염 농도에 미치는 영향을 살펴보기 위한 것으로, 수치실험에 사용된 초기조건과 경계조건의 기온을 IPCC 4차 보고서의 지구온난화 시나리오에 따라 상승시킨 후 수치실험을 실시하였다.

따라서 본 연구에서는 초기 입력 자료를 변조시키지 않고 수치실험을 실시한 경우 (이하 case BASE)와 지구온난화 시나리오 상 최소값인 2°C를 매시간 기상장 초기 입력 자료에서 상승시켜 수치실험을 실시한 경우(이하 case T\_UP) 등 2가지 경우로 구분하여 수치실험을 실시하였다. 그리고 경계 및 초기 기온 조건 이외의 모든 조건은 동일한 상태에서 실시하였으며, 수치적분은 5월 1일부터 4일간 실시하였고 초기 조건의 안정화를 위하여 초기 24시간을 Spin-Up 시간으로 간주하고 분석은 5월 2일부터 3일간 실시하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 오존 농도에 영향을 미치는 기상요소 분석

관측 자료를 바탕으로 동남지역 내 대도시에서 관

측한 기상요소와 대기오염물질인 오존의 농도에 미치는 영향을 살펴보았다. Camalier 등(2007) 이 제시한 요소 중 일 최고 기온과 일 최저 기온, 오전·오후의 상대습도, 오전·오후의 풍속과 풍향, 일조시간과 강수량 등 총 10개의 요소에 대한 오존 농도와의 대한 중회귀 분석을 실시하였다. 중회귀 분석에 사용된 오존농도 자료는 동남지역에 위치하는 5개 도시(부산, 울산, 포항 대구, 경주)의 60 ppb 이상의 고농도가 나타난 사례일로 한정하였다. 연구에 사용된 기상자료는 각 도시 내에 위치한 유인 기상대급 자료를 적용하였으며, 2003년부터 2009년간 총 7년의 자료를 사용하였다.

총 10개의 요소 중 SPSS 요인분석 결과 오존 발생과 가장 큰 상관관계가 나타난 일 최고 기온과 오후 상대습도 그리고 오후 풍속을 독립변수로 설정하고 오존의 농도를 종속변수로 설정하여 중회귀 방정식으로 도출하였다. 각 요소에 대한 오존 농도의 분석 결과 산출된 중회귀선의 기울기(B)와 유의도 검증(T-test) 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 나타난 결과를 통해 모든 도시에서 오존 농도가 최고 기온에 대하여 가장 민감하게 반응한다고 볼 수 있다. 특히 대구의 경우 바람에 대한 민감도가 크게 나타나는데 이것은 대구지역이 내륙에 위치하기 때문에 포항과 부산 등에서의 이류하여 유입되는 오존의 농도가 대구에서 관측된 오존 농도에 영향을 미치기 때문이다(Lee 등, 2009). 이러한 통계적인 분석 결과를 통해 오존 농도의 설명력을 나타내는 T 검증값 역시 모든 지역에서 기온의 설명력이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 한반도 동남지역에서는 지구온난화에 따른 기온 변화가 지역 내 오존 농도의 변화를 유도할 개연성이 크다는 것을 알 수 있으며, 선행연구에서 살펴본 바와 같이 오존의 농도에

영향을 미치는 기상요소 중 기온의 변화가 의미 있는 변수임을 확인하였다.

#### 4.2. 기온 상승에 따른 기상장 변화

Table 3은 WRF에 의하여 계산된 기상요소의 정확도를 검증하기 위하여 5개 분석지점에서의 관측자료와 수치실험에서 계산된 자료에 대한 RMSE(Root Mean Square Error)와 IOA(Index of Agreement) 값을 제시하였다. RMSE 값은 관측값과 모델값의 평균적인 오차를 나타내는 값으로 작은 값을 나타낼수록 모델의 수치모의 능력이 높은 것을 의미하며, IOA 값은 관측값과 모델값의 일치도를 나타내고 0.0 ~ 1.0의 값을 가진다. 검증은 현재 상태를 표현하는 case BASE에서 계산된 사례일의 기온과 바람자료의 자료를 사용하였다. 기온의 IOA는 0.95로 매우 높게 나타났으며, 풍속의 IOA는 0.63으로 기온에 비하여 낮게 나타났으나, 일반적으로 기온에 비하여 예측가능성이 떨어지고, 국지적인 바람의 변동성과 관측적인 오차를 고려할 때 분석에 적용 가능한 유의한 값으로 판단되었다.

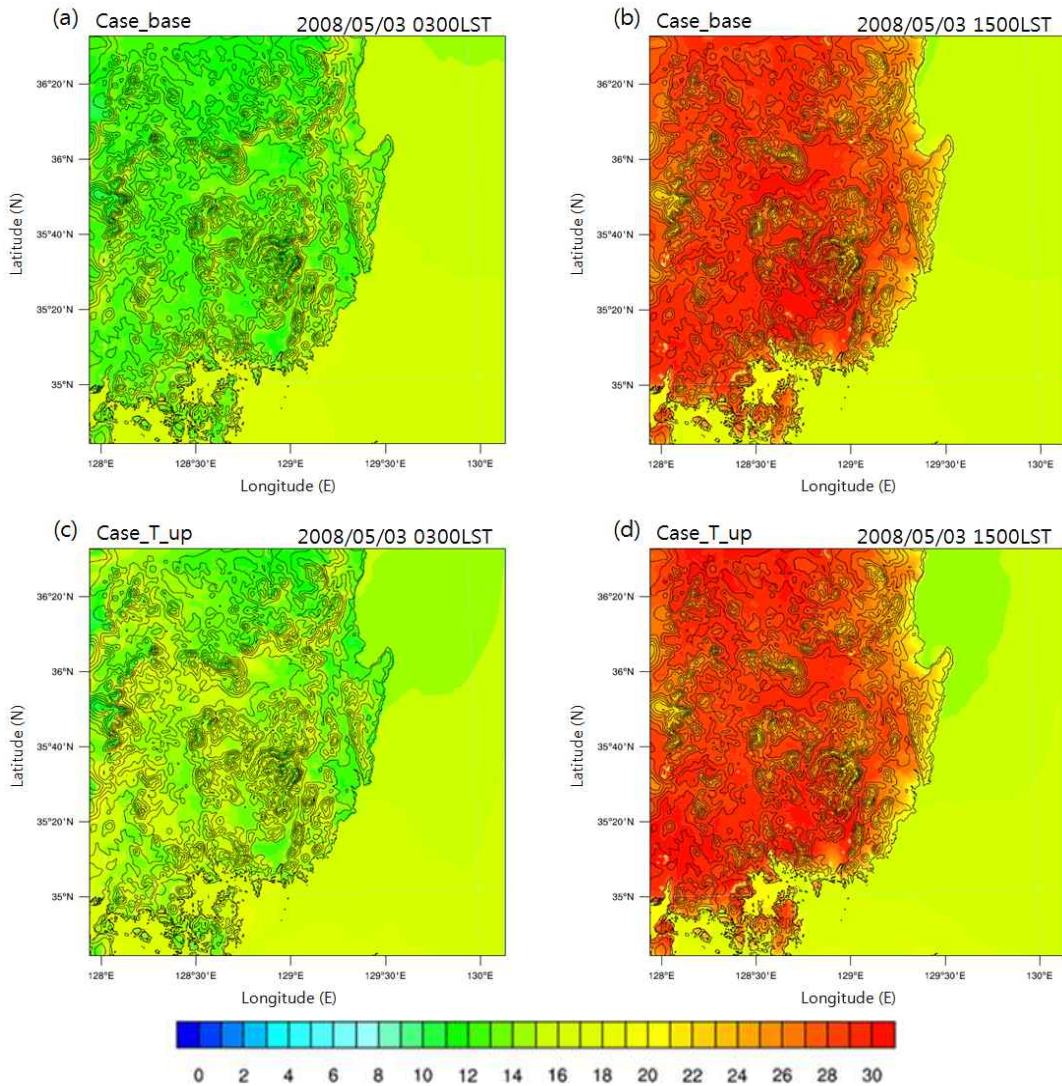
**Table 3.** Horizontal wind speed and temperature statistics at 5 cities in Southeast Region

	RMSE	IOA
Temperature	2.165 K	0.956
wind speed	1.265 m/s	0.630

Fig. 3는 Case BASE와 case T\_UP에서 계산된 2008년 5월 3일 0300LST와 1500LST의 수평 기온장 분포를 나타내었다. Fig. 3(a)의 Case BASE 0300LST의 결과를 보면 내륙지역의 경우 전체적으로 10°C에서 14°C의 기온을 나타내고 있으며 (b)의 1500LST에

**Table 2.** Regression analysis of meteorological elements at 5 cities in Southeast Region

	Max Temperature		Wind speed		Relative Humidity	
	B	T-test	B	T-test	B	T-test
Busan	0.680	<b>3.322</b>	0.013	0.025	0.008	0.186
Ulsan	0.571	<b>4.261</b>	1.379	1.954	-0.018	-0.406
Pohang	0.473	<b>3.862</b>	0.233	0.289	-0.42	-1.158
Daegu	1.153	<b>8.163</b>	-3.904	-5.880	-0.18	-4.463
Kyeongju	0.821	<b>5.884</b>	0.651	-1.096	Non	Non



**Fig. 3.** The horizontal distribution of temperature field on case BASE (a), (b) and case T\_UP (c), (d).

는 대구와 경주를 포함한 내륙에서 28°C에서 30°C의 고온역이 나타나고 포항과 울산, 부산의 해안지역에서는 25°C에서 27°C의 기온이 나타나고 있어 강한 일사에 의한 내륙과 해양의 수평 기압경도력이 해풍을 발생시켜 해안지역의 저온역이 나타나게 된 것이다.

지구온난화를 고려하여 기온을 변화시킨 Case T\_UP의 결과를 보면, 전체적으로 고른 기온 분포를 나타낸 Case BASE 0300LST의 결과와 달리 Fig. 3(c)

의 금오산, 가야산, 황매산으로 이어지는 소백산맥의 남쪽으로 뻗은 구릉지대의 풍하측에서 14°C에서 16°C의 고온역이 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d) 1500LST의 경우, Case BASE 1500LST (Fig. 3(b))와 전체적으로 유사한 분포를 나타내지만 해풍의 침투가 강하게 나타나는 포항과 울산, 부산의 해안 지역에서 상대적으로 낮은 기온이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

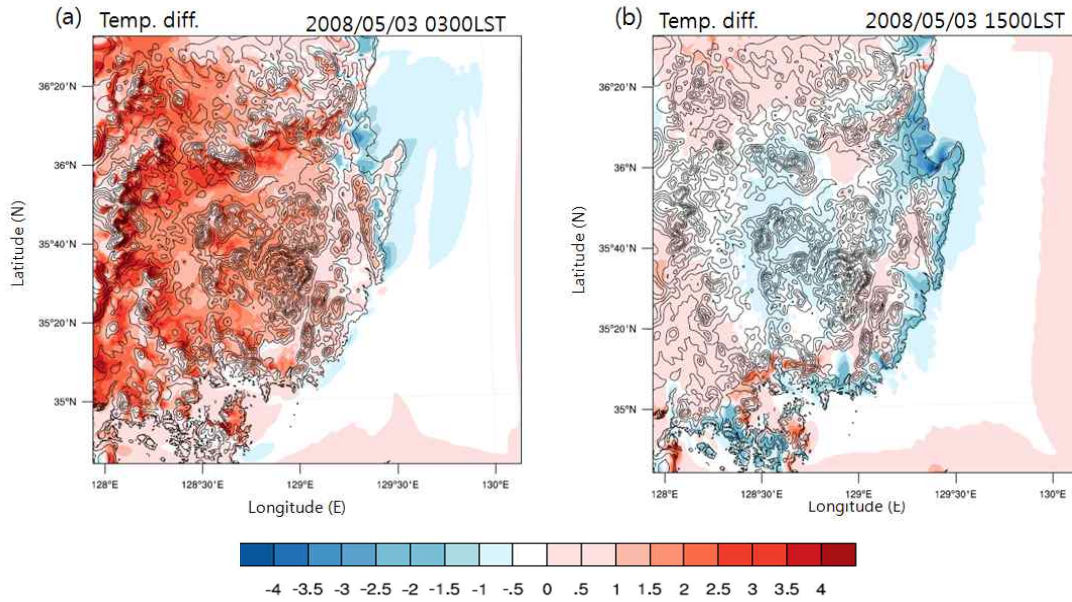


Fig. 4. The horizontal distribution of case T<sub>up</sub> and case BASE temperature difference. ( $\Delta T = \text{case T}_{up} - \text{case BASE}$ )

이 두 실험의 기온 차이를 명확히 나타내기 위하여 각 시간대별로 실험에서 계산된 지표 기온의 차이를 살펴보았다. Fig. 4는 각 실험에서 계산된 0300LST와 1500LST의 수평 기온장의 차이를 나타낸 것이다. Fig. 4(a) 0300LST에는 소백산맥 후면의 내륙지역을 포함한 내륙지역의 산 후면으로 Case T<sub>UP</sub>와 Case BASE의 차가 0.5°C에서 3°C의 양의 값을 나타내었고 포항 지역을 포함한 해안지역에서 1°C의 음의 값이 나타났다. Fig. 4(b) 1500LST에는 포항과 울산 부산 지역에서 2°C에서 2.5°C의 음의 값이 나타났으며 경주와 대구에서도 0.5°C의 음의 값이 나타났다. 이러한 차이는 기온의 상승으로 인한 내륙의 야간 열적 플럭스의 증가가 오후시간 수평 바람장을 변화시킨 결과로 사료된다.

이러한 기온 변화에 따른 바람장 변화를 살펴보기 위하여 두 실험에서 계산된 수평 바람장을 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 Case BASE의 0300LST 수평 바람장의 분포를 나타낸 Fig. 5(a)를 보면, 기상장 수치모의 결과 산악지형과 해안의 영향으로 야간 곽풍과 육풍의 결합으로 인해 내륙에서는 산악지형에서 복잡한 형태의 곽풍이 나타나고 바다와 맞닿은 지역에서 해

양으로 빠져나가는 동·남동풍의 풍계가 나타나고 있다. 그러나 1500LST가 되면 포항과 울산, 부산 지역에서 해안선의 수직방향으로 2.5~3 m/s의 해풍이 침투해 오는 것을 확인 할 수 있고 내륙지역에서는 산악지형에 의한 산풍이 해안으로 침투된 해풍과 결합이 나타났으며 대구와 경주 지역에서는 2m/s 이하의 풍속이 나타났다.

기온을 상승 시킨 case T<sub>UP</sub>의 수평 바람장 결과를 살펴보면 0300LST의 경우 Case BASE의 결과와 비교해 내륙지역에서는 풍속이 다소 약하게 나타났으며 울산과 부산의 해안지역에서는 강하게 나타났다. 육풍이 해양으로 빠져나가는 해안지역에서 남동풍이 우세하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 1500LST의 Case T<sub>UP</sub>의 수평 바람장의 풍향은 Case BASE의 수평 바람장과 유사하게 나타났으며 풍속은 전체적으로 강하게 나타났다. 해안지역으로 침투하는 해풍의 속도가 증가한 것은 야간 내륙의 열적 플럭스의 증가로 내륙지역의 연직 난류가 강하게 발생하여 수평 이류의 강도가 강해진 것으로 분석할 수 있으며 해풍이 침투하면서 기온의 하강이 나타났으므로 사료된다.

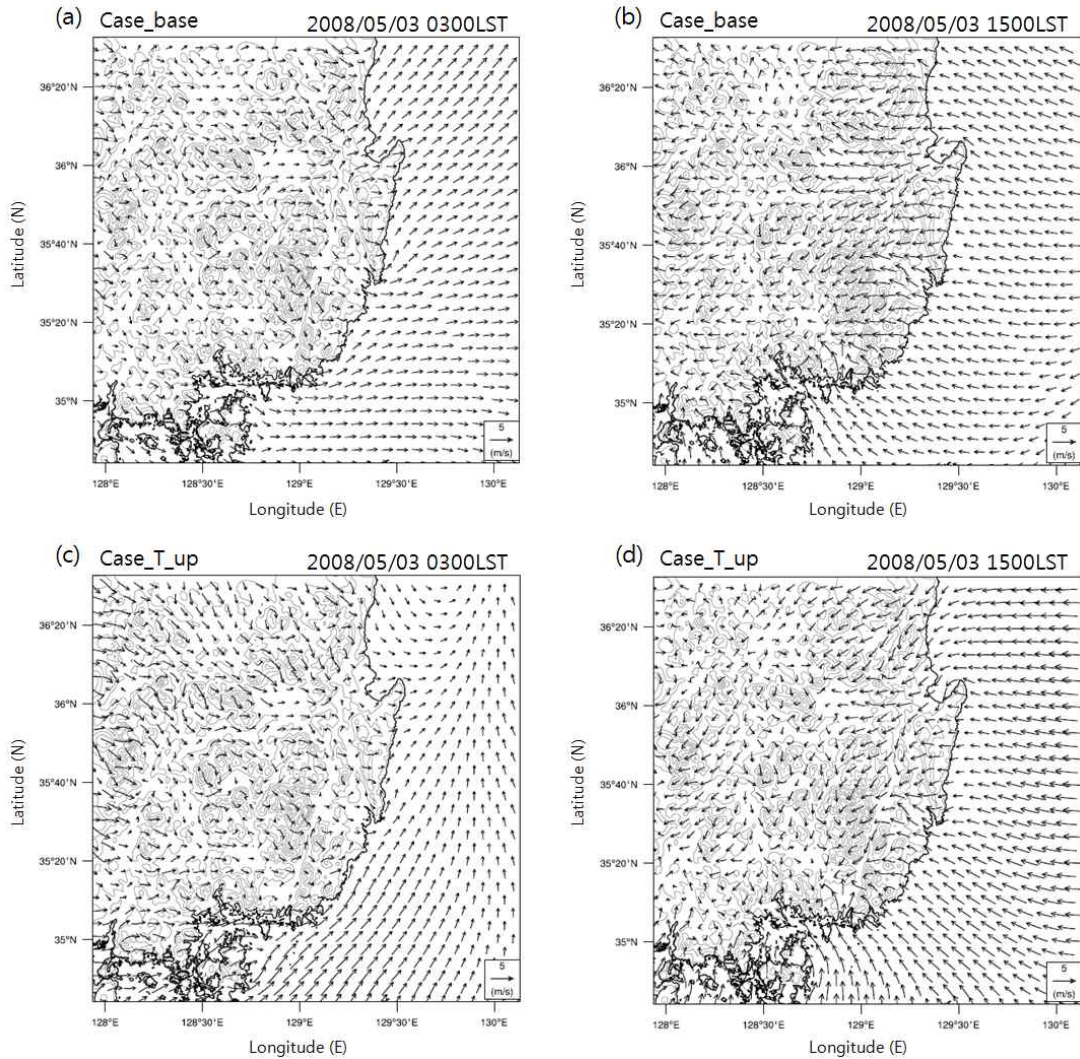
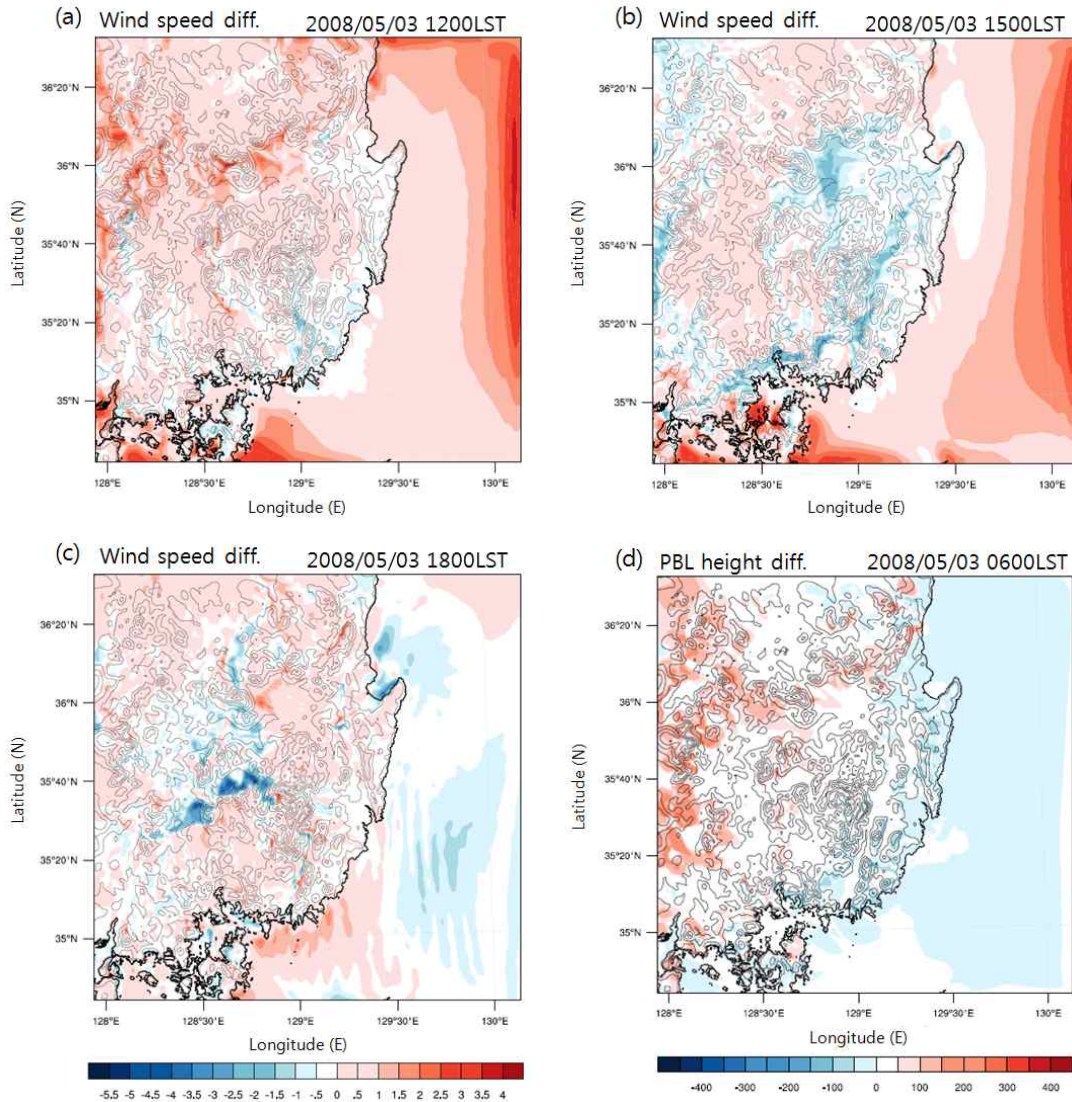


Fig. 5. The horizontal distribution of wind speed on case BASE (a), (b) and case T\_UP (c), (d).

낮 시간 동안 연안 바람장의 풍속 변화를 살펴보기 위하여 1200LST, 1500LST, 1800LST에 계산된 두 실험의 바람장의 차이를 Fig.6 (a) ~ (c)에 나타 내었다. 12시의 경우 부산을 중심으로 한 연안의 극히 제한된 지역에서만 풍속강화가 나타났다. 그러나 시간이 지남에 따라 풍속은 강화되면서 내륙으로 이동했으며 이러한 풍속 증가는 Fig.4에서 나타난 바와 같이 case T\_UP의 내륙지역 기온 상승으로 해풍시작 시간에 풍속이 증가하여 나타난 것이다. 이러한 해풍은 점

진적으로 내륙으로 이동하여 15시에는 해안선과 평행하게 이동했으며, 1800LST에는 내륙방향으로 더 깊이 침투하여 밀양과 대구지역까지 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 6(d)에는 06시의 PBL height의 차이를 나타 내었는데, 이 시간 case T\_UP의 PBL 높이가 case BASE 보다 낮게 나타나 case T\_UP의 야간 해안의 기온 하강이 PBL 높이에 영향을 주었음을 알 수 있었다.





**Fig. 6.** The horizontal distribution of case T<sub>up</sub> and case BASE wind speed difference at 1200LST ~ 1800LST ( $\Delta = \text{case T}_{up} - \text{case BASE}$ ) (a),(b),(c), (d) The PBL height difference at 0600LST.

그리고 case BASE와 case T<sub>UP</sub>에서 계산된 부산, 대구, 울산, 경주, 그리고 포항의 기온과 풍속의 시계열을 Fig. 7.에 나타내었다. 연안에 위치한 부산과 울산의 기온은 초기 기온상승을 고려하여 초기 및 경계 조건에 기온을 상승시킨 case T<sub>UP</sub>이 낮게 나타났다. 반면 내륙에 위치한 대구의 기온은 오후에 포항 쪽에서 해풍유입 등에 의하여 기온하강이 있으나 전체 으

로 case T<sub>UP</sub>에서 높게 나타났다. 이는 초기 및 경계치 기온의 상승에 따른 영향이 국지적으로 매우 복잡하게 나타나며, 연안지역과 내륙지역에서 다르게 나타난다는 것을 의미한다. 풍속의 경우 대구에서의 case T<sub>UP</sub>의 결과가 야간시간에서 높게 나타나는데, 야간 기온의 상승으로 인한 연직·수평 바람장의 변화가 크게 나타나는 것으로 분석할 수 있다. 바람의

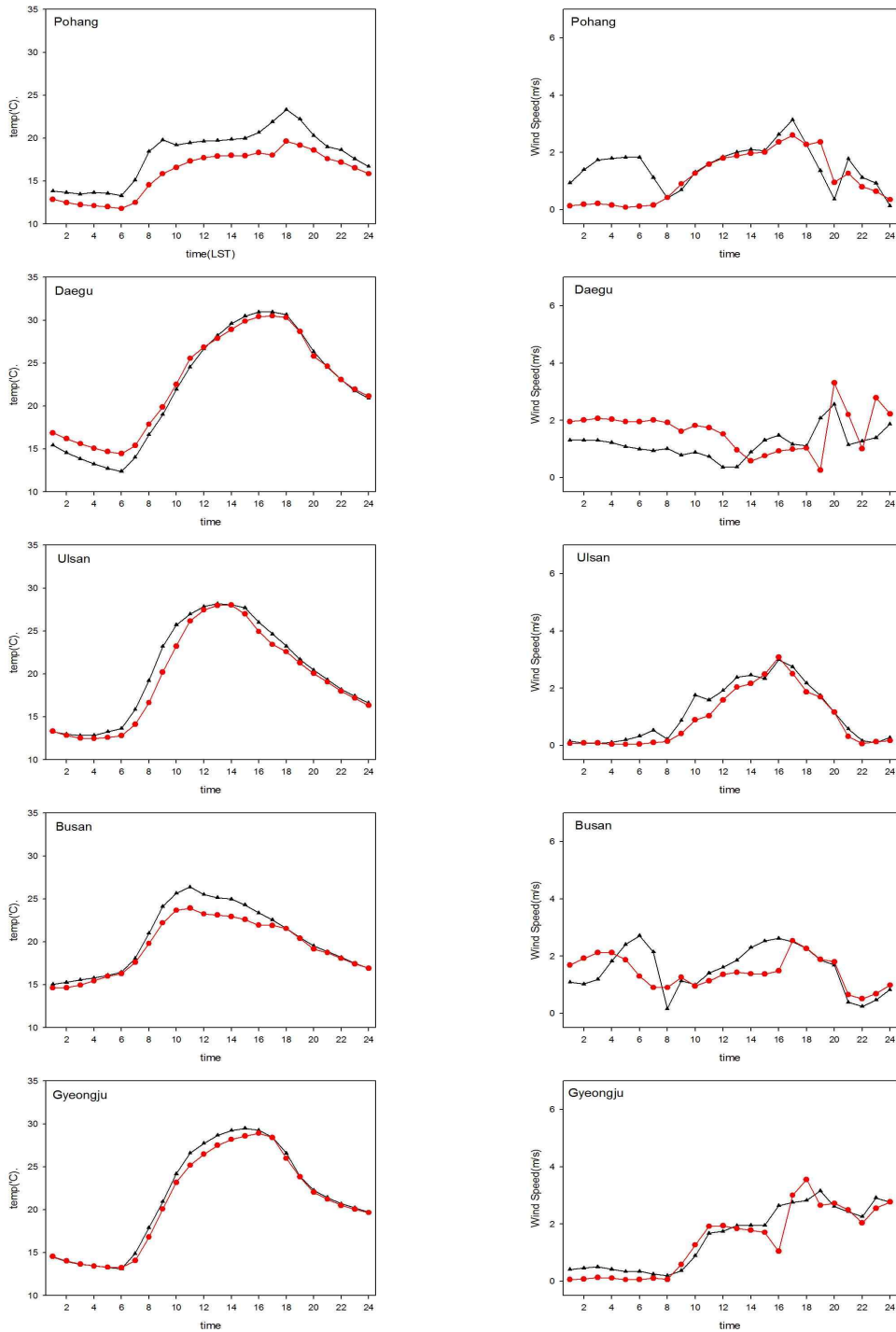


Fig. 7. Comparison of case T\_UP and case BASE simulated temperature and wind speed at Pohang, Daegu, Ulsan, Busan and Gyeongju( ▲ : case BASE value, ● : case T\_UP value).

수평장 결과는 연안으로 해풍의 유입이 case T\_UP의 경우, case BASE에 비해 강하게 나타나지만, 기상대 급 관측 지점은 내륙에 위치하여 연안지역인 부산과 포항, 울산의 지점에서 풍속의 시계열에서 수평장의 결과와 다른 양상을 띄었다.

### 4.3. 기온 상승에 따른 오존 농도의 변화

Fig. 8과 Fig. 9는 두 가지 수치실험에서 계산된 오존농도의 수평 분포를 3시간 간격으로 나타낸 것이다. 먼저 case BASE의 0600LST에는 전체적으로 30 ppb 이하의 농도가 나타났으며 포항에서부터 내륙을 통과

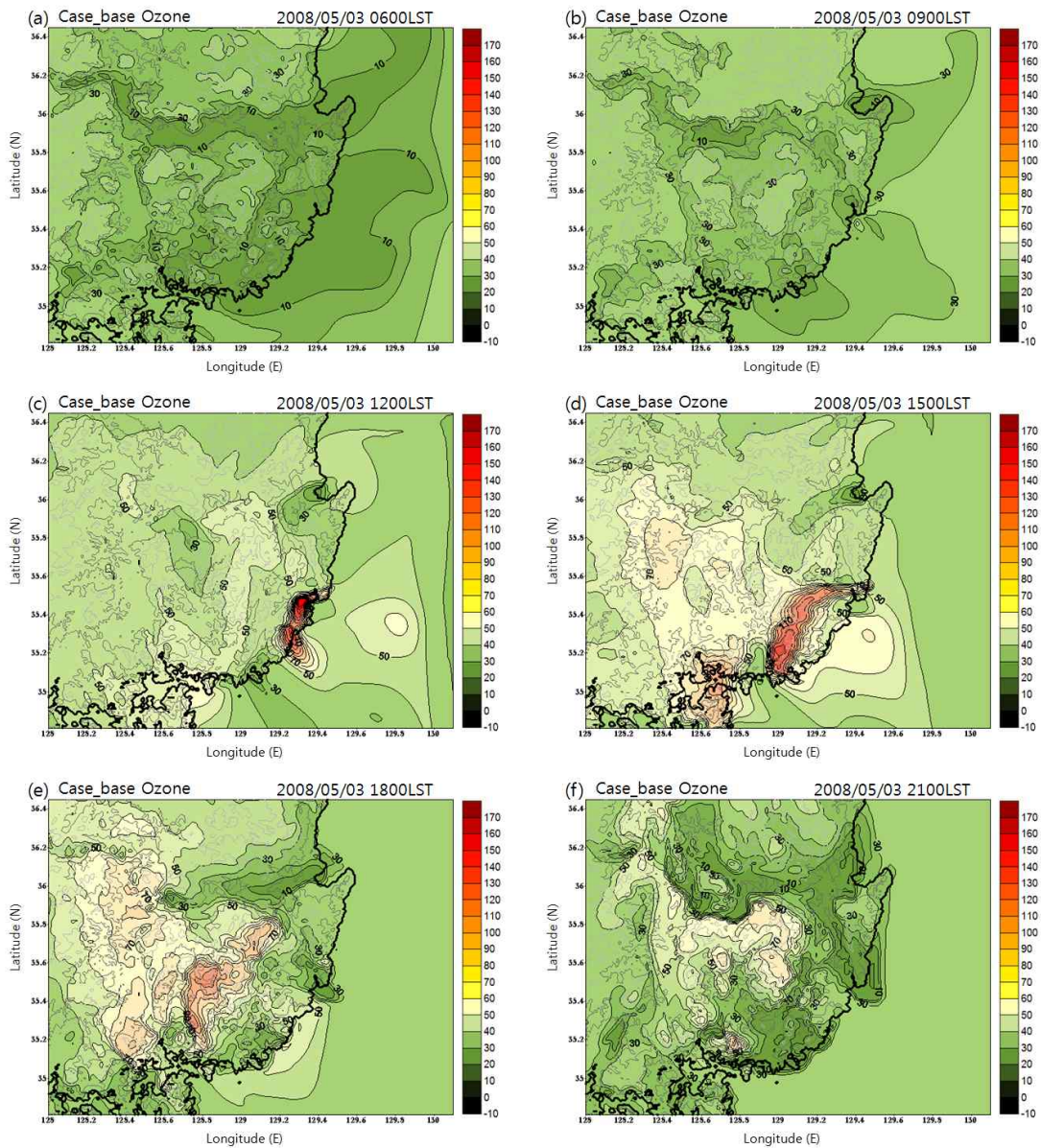


Fig. 8. The horizontal distribution of case BASE simulated ozone concentration at three hour intervals on 3 may 2008.

하여 대구를 포함하는 영역과 울산과 부산의 경계 영역의 낮은 해발고도 지역에서 10 ppb 이하의 농도가 나타났다. 0900LST에는 오존 저농도 영역이 대구와 포항으로 확산이 약화된 모습이 보였다. 1200LST의 수평장의 결과에서는 중·화학 공업지역인 울산에서 광화학반응에 의한 고농도 오존의 발생이 나타나고

있으며 내륙지역에서도 50 ppb 정도의 오존 농도가 모의 되었다. 다음 시간인 1500LST의 수평장 결과 울산에서 발생한 고농도 오존이 부산까지 이류하여 해풍과 함께 내륙으로 침투하고 있음을 나타냈으며 대구 지역에서 70 ppb이상의 고농도 오존이 발생했음을 확인할 수 있었다. 1800LST에는 1200LST부터 울산지

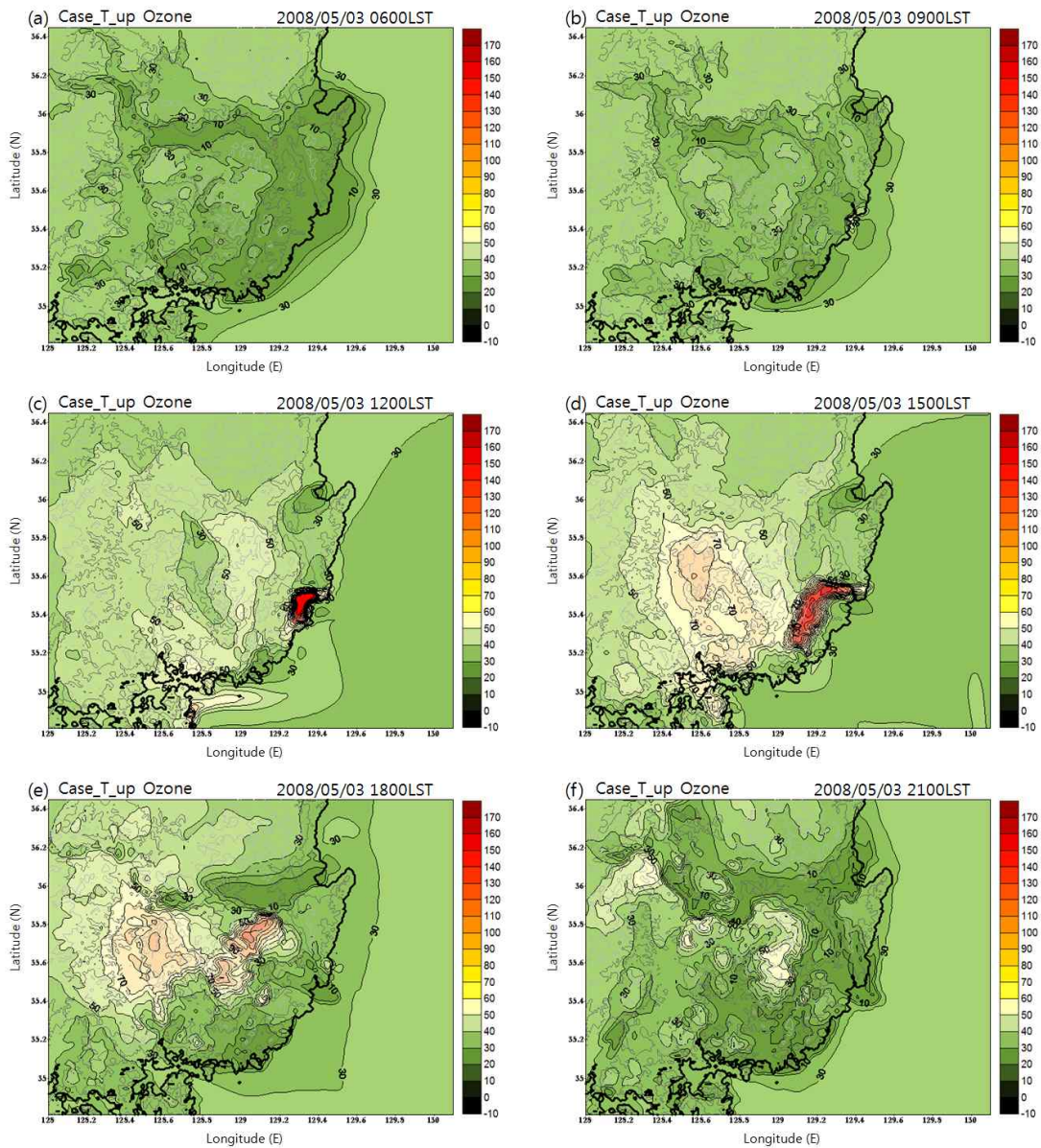


Fig. 9. The horizontal distribution of case T\_UP simulated ozone concentration at 3 hour intervals on 3 may 2008.

역에서 이루어진 고농도 오존이 밀양 지역까지 침투된 모습이 나타났고 울산과 부산 지역에서는 고농도 오존의 소멸이 나타나 30 ppb를 나타냈다. 2100LST에서는 오존이 밀양시 부근에서 잔류하여 최고 70 ppb가 나타났고 해안을 포함한 그 외의 지역에서는 10 ppb에서 30 ppb를 나타냈다. 대기오염물질의 배출이 많은 철강공업지대인 포항지역에서는 본 사례일의 경우 30 ppb 정도의 농도가 지속적으로 나타났는데 이것은 해양으로부터 포항만으로 불어 들어오는 지속적인 바람이 오존의 형성을 막은 것으로 사료된다.

그러나 case T\_UP의 경우, 0600LST와 0900LST에서의 오존 농도는 case BASE의 수평장과 해안과 내륙지역에서 유사한 분포를 나타내었다. 그러나 강한 일사와 함께 고농도 오존이 형성되는 1200LST에는 배출원 지역인 울산에서 고농도 오존의 분포가 나타나며 이 시간의 고농도 오존 분포 지역은 case BASE에 비해 적으나 농도는 다소 높게 나타났다. 1500LST에는 대구와 밀양 지역으로 70 ppb이상의 오존 농도가 나타나고 울산에서 발생한 고농도 오존이 해풍의 진입과 함께 내륙으로 이동하는 모습을 확인할 수 있다. 내륙으로 진입하는 오존의 농도는 case BASE에 비해 높게 나타났다. 1800LST에서는 전시간대부터 해풍과 함께 들어온 오존의 진입이 내륙으로 진행되었고, 대구 지역에서 80 ppb이상의 고농도 분포가 나타나고 있으며, 고농도 오존의 소멸이 해안에서부터 진행되고 있음을 알 수 있다. 2100LST에는

내륙의 오존 잔류 지역에서 최고 50 ppb가 나타났고 이 지역을 제외한 영역은 전체적으로 10 ppb에서 30 ppb의 농도가 나타났다.

case T\_UP의 오존 농도 수평장과 case BASE의 오존 농도 수평장의 비교를 위해 두 수평장의 차이를 Fig. 11에 나타내었다. 0600LST에서는 대구와 밀양으로 이어지는 영역으로 두 수평장의 차이가 거의 나타나지 않았고 포항과 울산, 부산의 해안과 그 부근으로 5 ppb에서 10 ppb의 음의 값이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기상장 모델링의 결과에서 확인되었듯이 case T\_UP 사례의 경우 야간 내륙에 축적된 열적 플럭스로 인해 경계층의 높이가 case BASE 사례보다 상대적으로 높아진 결과로 사료된다. 1500LST에서는 울산 지역에서 발생한 고농도 오존이 해풍을 따라 내륙으로 이동하면서 나타나는 차이를 확인할 수 있다. case BASE의 경우 넓은 영역으로 오존이 확산되면서 진입되었고, case T\_UP의 경우 좁은 영역으로 20 ppb이상의 고농도 오존이 진입되었기 때문에 case T\_UP의 진입 경로에서는 20 ppb이상의 양의 값이 나타나고 case BASE의 진입경로 영역으로 45 ppb이상의 음의 값이 나타난다. 또한 기상장 수치모의 결과 0900LST에서부터 1200LST까지 김해, 밀양, 대구 지역으로 case T\_UP의 결과가 case BASE보다 0.5°C에서 1.5°C의 양의 값이 나타나 이 지역 기온의 상승이 오존 형성을 가중시켜 밀양과 김해 지역으로 case T\_UP의 대기질 모의 결과가 case BASE의 결과보다

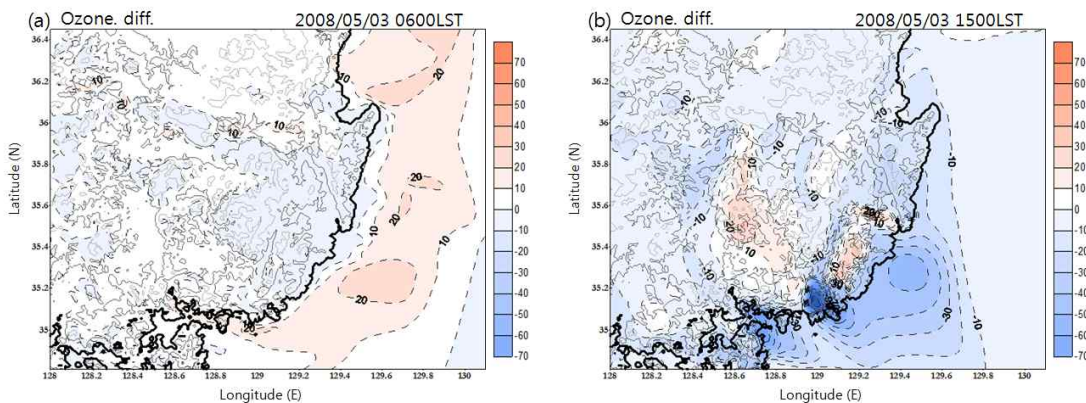


Fig. 10. The horizontal distribution of case T\_up and case BASE ozone concentration difference. ( $\Delta$  = case T\_up - case BASE)

15 ppb의 양의 값이 나타난 것으로 사료된다. 일중 오존 농도의 최고값은 고농도 오존 발생 지점인 울산 공업 단지에서 case T\_UP의 결과가 국지적으로 약 30 ppb 높게 모의하였으며, 동남지역 전 영역 평균 농도 값은 case T\_UP에서 낮 시간 동안 약 6 ppb의 음의 값이, 야간 시간 동안은 약 5.5 ppb의 양의 값이 나타났다. 이는 동남지역의 지역적 특징에 의해 기온 상승에 따른 오존 농도의 증가와 감소가 다르게 나타나는 결과로 사료된다.

#### 4. 결론

지구온난화가 국지지역의 기상장 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 한반도 동남지역을 대상으로 향후 지구온난화를 가정한 수치실험을 실시하였다. 기상장에 대한 요소를 계산하기 위하여 이용한 대기 수치모형은 WRF-CMAQ 이다.

2003년부터 2009년까지의 동남지역 5대 대도시의 기상 관측 자료와 대기질 관측 자료를 바탕으로 요인 분석과 중회귀 방정식의 통계분석결과, 오존 농도에 가장 민감하게 작용하는 기상요소가 기온임을 확인하였으며, 실험에 이용된 지구 온난화에 따른 기온상승률은 IPCC 4차 보고서 지구온난화 시나리오에서 제시한 값인 2°C로 설정하여 수치모형의 초기 및 경계 값을 상승시킨 경우에 대한 수치실험을 실시하였다.

수치실험은 2003년부터 2009년까지 동남지역의 대표도시인 포항과 울산, 부산, 경주 그리고 대구의 일 최고 오존농도가 80 ppb를 초과하는 고농도 사례일 중 국지적인 기온의 상승으로 인한 기상장의 변화가 모의 될 수 있도록 종관장의 영향이 약하게 나타난 고농도 오존 사례일인 2008년 5월 2일부터 5월 4일 기간을 선정하였다.

수치실험 결과 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1) 기상장 수치모의 결과, 향후 지구온난화를 가정한 case T\_UP에서 내륙을 중심으로 야간 기온에 대해 현재 상태를 고려한 case BASE에 비하여 높게 모사되었으며, 이러한 기온 상승은 연직 운동의 강화로 이어졌다. 내륙의 기온 상승은 주간의 해풍강도를 강화시키는 결과를 유도했고, 이러한 해풍의 강화는 연안 지역의 기온 하강에 기여하는 것으로 나타났다.

2) 대기오염 모델을 통한 오존농도의 변화를 보면, case T\_UP 고농도 오존의 분포영역의 경우 지역적으로 확산성이 도심에 따라 다르게 나타났으며, 이로 인해 국지적인 지역에서 농도는 더욱 높게 모의 되었고, 늦은 오후의 소멸속도는 더욱 빠르게 나타나는 지역도 있었다. 이러한 오존 이동 분포는 초기 기상환경의 변화에 따른 국지지역의 수평 풍속 및 연직 확산 강도의 변화에 의한 것으로 판단된다.

연구결과 전 지구온난화에 따른 한반도 동남지역의 기상장의 변화는 동남지역 도시에 일률적으로 작용하는 것이 아니고, 내륙과 연안 도심 등 지역에 따라 다른 결과를 나타내었다. 따라서 정확한 기상장 및 대기오염의 예측을 위하여 도시별 장기적인 기후변동에 따른 지역적 반응 특성을 사전에 확인하여야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- 오인보, 김유근, 황미경, 2004, 연안도시지역 해풍지역이 오존분포에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 20(3), 345-360.
- 이상득, 이종명, 하훈, 박창근, 김동수, 2005, 광양만권의 오존농도 특성과 기상인자에 관한 연구, 2005추계 학술대회 논문집, 한국대기환경학회, 101-103.
- 이종범, 송은영, 2006, Models-3/CMAQ을이용한고농도 오존현상모사, 2006 추계학술대회논문집, 한국대기환경학회, 455-456.
- 이화운, 박순영, 이순환, 임현호, 2009, 연직관측자료를 통한 복잡 연안지역의 오존 이류특성, 한국대기환경학회지, 25(1), 57-74.
- 이화운, 정우식, 현명숙, 2002, 경주지역오존의고농도현상예측기상학적분석 I, 한국기상학회지, 38(1), 59-68.
- 이현미, 2010, 광양지역 오존의 재순환 특성에 관한 수치 연구, 석사학위논문, 부산대학교.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1995, 부산 지역의 오존 농도 특성과 기상 인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(1), 45-56.

- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 임현호, 2009, 상세 해수면 기온자료의 반영에 따른 국지 기상장 개선에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지, 25, 304-315.
- 최봉욱, 정중현, 최원준, 손병현, 오광중, 2006, 오염원 및 기상 조건에 따른 울산지역의 고농도 대기오염 분포 특성, 한국환경보건학회지, 32(4), 324-335.
- 최현정, 이화운, 김민정, 2010, 도심 실제 거칠기 적용과 장래 도심 개발계획에 따른 국지 기상장 변화 수치모의, 한국환경학회지, 19(6), 703-714.
- 현명숙, 이화운, 정우식, 오성남, 2004, 경주지역오존의 고농도현상에관한기상학적분석II, 한국기상학회지, 40(1), 49-59.
- Carvalho, A., Monteiro, A., Ribeiro, I., Tchepela, O., Mirandaa, A. I., Borrego, C., Saavedra, S., Souto, J. A., Casares, J. J., 2010, High ozone levels in the northeast of Portugal: Analysis and characterization, Atmospheric Environment, 44(8), 1020-1031.
- Camalier, L., Cox, W., Dolwick, P., 2007, The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, Atmospheric Environment, 41(33), 7127-7137.
- Gabriel, A. V., Brian, J. S., 2007, Increased tropical Atlantic wind shear in model projections of global warming, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 34, L08702, doi:10.1029/2006GL028905.
- Jeremy, E. D., 2009, Atmospheric characteristics conducive to high-ozone days in the Atlanta metropolitan area, Atmospheric Environment, 43(25), 3902-3909.
- John, P. D., Peter, J. A., Spyros, N. P., 2007, Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study, Atmospheric Environment, 41(7), 1494-511.
- Lee, H. W., Choi, H. J., Lee, S. H., Kim, Y. K., Jung, W. S., 2008, The impact of topography and urban building parameterization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, Atmospheric Environment, 42(18), 4232-4246.
- Lee, S. H., Sung, K. H., Lee, H. W., 2008, Impact of regional trans-boundary ozone associated with complex terrain on urban air quality, Atmospheric Environment, 42(32), 7384-7396.
- Oouchi, K., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Mizuta, R., Kusunoki, S., Noda, A., 2006, Tropical Cyclone Climatology in a Global-Warming Climate as Simulated in a 20 km-Mesh Global Atmospheric Model: Frequency and Wind Intensity Analyses, Journal of the Meteorological Society of Japan, 84, 259-276.