Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 32, No. 4, August 2016, pp. 372-383
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.372
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

기상자료동화에 따른 CMAQ 모델의 오존농도 모의 민감도 연구

Sensitivity Analysis of Ozone Simulation according to the Impact of Meteorological Nudging

김태희 · 김유근[1] · 손장호[2] · 정주희[1],*
부산대학교 지구환경시스템학부, [1]부산대학교 대기환경과학과, [2]동의대학교 환경공학과

(2016년 5월 19일 접수, 2016년 6월 29일 수정, 2016년 7월 19일 채택)

Taehee Kim, Yoo-Keun Kim[1], Zang-Ho Shon[2] and Ju-Hee Jeong[1],*
Division of Earth Environmental System, Pusan National University
[1]Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
[2]Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University

(Received 19 May 2016, revised 29 June 2016, accepted 19 July 2016)

Abstract

This study aimed at analyzing the sensitivity of ozone simulation in accordance with the meteorological nudging for a high nocturnal ozone episode. To demonstrate the effectiveness of nudging methods (e.g., nudging techniques and application domains), the following six experiments were designed: (1) control without nudging, (2) experiment with application of observation nudging to all domains (domain 1∼4), and (3)∼(6) experiments with application of grid nudging to domain 1, domain 1∼2, domain 1∼3 and all domains, respectively. As a result, the meteorological nudging had a direct (improvement of input data) and indirect (estimate natural emission) effect on ozone simulation. Nudging effects during the daytime were greater than those during the nighttime due to low accuracy of wind direction during the nighttime. On comparison of the nudging techniques, the experiments in which grid nudging was applied showed more improved results than the experiments in which observation nudging was applied. At this time point, the simulated concentrations were generally similar to the observed concentrations due to the increase in the nudging effect when grid nudging was applied up to the sub-domain. However, for high nocturnal ozone uptakes, the experiment in which grid nudging was applied do domain 1∼3 showed better results than the other experiments. This is because, when grid nudging was applied to the high resolution domain (e.g., domain 4 with 1 km), the local characteristics were removed due to the smoothing effects of meteorological conditions.

Key words : Meteorological nudging, Ozone, CMAQ, Nudging techniques, Application domains, Grid nudging, Observation nudging, Objective analysis

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : jeongjuhee@pusan.ac.kr

1. 서 론

오존(Ozone, O_3)은 질소산화물(Nitrogen Oxides, NO_X)과 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC_S)이 광화학반응을 거쳐 생성되는 2차 오염물질로 생성 · 소멸기작에 다양한 기상요소(기온, 습도, 풍속 등)가 직 · 간접적으로 영향을 미친다(Dawson *et al*., 2007; Mao *et al*., 2006; Hanna, 1994). 일반적으로 기온의 경우 열 플럭스에 비례하여 PBL(Planetary Boundary Layer) 고도의 성장과 오염물질의 확산 그리고 화학종 형성에 영향을 주고 대기 중 수분분포는 광분해율과 오염물질의 습식침적과 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 풍향 · 풍속은 하층 오염물질의 수송 및 확산과 관련 있고 PBL 고도는 경계층 내부에서의 온도상승, 대류, 오염물질의 혼합 · 정체를 나타내는 중요한 요소로 알려져 있다(Yerramilli *et al*., 2010; Borge *et al*., 2008; Queen and Zhang, 2008). 이뿐만 아니라 대기안정층 파괴에 따른 상부 오존의 연직혼합과정과 수평적인 수송에 영향을 주어 야간 고농도 오존을 발생시키기도 하고(Eliasson *et al*., 2003), 전구물질의 자연배출량 산정에도 관여한다. 특히 오존 생성에 중요한 역할을 하는 휘발성유기화합물의 자연배출량은 기온, 일사와 밀접하게 관련되어 있다(Chameides *et al*., 1998; Singh and Zimmermann, 1992; Lamb *et al*., 1987). 우리나라는 전 국토의 60% 이상이 산림지역으로 휘발성유기화합물질의 자연배출량과 인위적 배출량은 유사한 수준이다. 따라서 산정과정에 있어 기상입력자료의 높은 정확성이 요구된다(Cho *et al*., 2006). 이와 같이 오존농도 모의 시 기상입력자료의 중요성은 많은 선행연구를 통해 명확하게 증명되었다(Jeong *et al*., 2011; Seaman, 2000; Pielke and Uliasz, 1998).

기상모델의 정확도 향상 연구는 자료동화의 일환인 FDDA(Four Dimensional Data Assimilation)를 이용하여 다수 수행되었다(Choi and Lee, 2015; Liu *et al*., 2012; Choi *et al*., 2009). FDDA는 불규칙한 관측 오차를 포함하고 있는 자료를 활용하여 대기의 상태를 규칙적인 자료의 값으로 변환하는 방법으로 너징(nudging)이라 일컫는다. 너징의 종류는 관측과 모델값 차이의 가중평균을 해당 격자에 더해주는 방법인 관측너징(observation nudging)과 관측과 배경장의 격자값의 차이를 구하여 내삽과정을 통해 새로운 초기장으로 생성하는 방법인 분석너징(analysis nudging)이 있다.

Barna and Lamb (2000)는 관측너징의 적용 유무에 따른 기상자료동화가 오존모의 정확도에 미치는 영향을 분석하고자 MM5 (Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model) 모델과 CALMET/CALGRID 모델을 이용하였다. 그 결과 관측너징을 적용하였을 때 일 최고농도에 대한 정확도가 사례일의 특성에 따라 20~40% 가량 향상됨을 보였다. Otte (2008)는 MM5 모델과 CMAQ (Models-3 Community Multiscale Air Quality) 모델을 사용하여 분석너징의 적용 유무에 따른 기상자료동화가 오존모의에 미치는 영향을 분석하였고, 분석너징을 적용하였을 때 기온과 풍속에 대한 모의 정확도 향상과 더불어 PBL 고도의 성장이 발생하였고 이로 인해 시간별, 일 최고농도에 대한 오차가 감소하여 정확도가 증가함을 보였다. Lee *et al*. (2013)은 각기 다른 기상자료를 사용하여 실시한 기상자료동화가 오존농도 모의에 미치는 영향을 분석하고자 MM5 모델과 CMAQ 모델을 이용하여 수도권 지역에 대해 분석을 실시하였다. 그 결과 전반적으로 기상대와 기상자동측정망의 자료를 사용하였을 때 상관계수와 일치도 지수가 가장 높게 나타나고 오차가 감소하는 경향을 보였으나 인천의 경우 국지적 영향을 갖는 관측을 반영하지 않았을 때 가장 높은 정확도를 보이며 기상자료를 사용함에 있어 지역의 기상특성이 중요함을 밝혀냈다.

이처럼 기상자료동화가 오존모의에 미치는 영향을 분석한 선행연구가 수행되었지만 너징 적용 유무와 사용한 자료특성에 초점을 맞춘 연구들이 주를 이루었고 너징 종류 및 적용 도메인에 대한 연구는 이루어지지 않았다. 또한, 주로 사용된 MM5 모델은 밀도와 바람장의 질량보존 연속 방정식을 만족시키지 못하여 CMAQ 모델의 기상입력자료 생성 시 한계점이 존재하며(Kim and Byun, 2005), 고농도 오존일 중에서도 기상의 변화가 주요 원인인 야간 고농도 오존에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다.

본 연구에서는 한반도 남동해안 지역의 오존농도 예측 정확도를 향상시키고자 그리드너징과 관측너징을 이용한 너징 종류 및 너징을 적용하는 도메인에 따른 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델의 기상자료동화 효과가 야간 고농도가 포함된 오존일(2012년 5월 4일~8일) 모의에 미치는 영향 분석을 실시하였

다. 이는 Kim *et al.*(2016)에서 제시된 너징 종류 및 적용 도메인에 따른 기상(기온, 습도, 풍속, PBL 고도) 모의 민감도 분석의 결과를 참고하여 분석되어졌다.

2. 모델 및 연구방법

2.1 모델링 구성

2.1.1 기상모델

본 연구에서는 기상입력자료 생성을 위해 중규모 기상모델 WRF ver3.6을 사용하였다. 초기 · 경계조건은 각각 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research)에서 제공하는 FNL (Final analyses) 자료와 SST (Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. 모델링 영역은 Two-way nesting 기법을 이용하여 총 4개의 도메인으로 구성하였다(그림 1). 각 도메인은 National Institute of Environmental Research (2014)를 참고하여 동아시아영역(27 km, D1), 한반도영역(09 km, D2), 영남권영역(03 km, D3)을 구성하였고, 보다 상세한 모의를 위해 부산지역을 중심으로 한 남동해안영역(01 km, D4)을 추가 구성하였다(그림 1, 검은색 실선). SRTM 3sec (Shuttle Radar Topography Mission 3sec) 고해상도 지형고도와 EGIS (Environmental Geographic Information System)에서 제공하는 토지피복자료를 사용하여 대상 지역의 지형과 지표면 상태를 현실적으로 반영하였다. 모델링 시 물리옵션은 대기질 연구 시 대표적으로 많이 사용하는 물리옵션을 사용하기 위해 National Institute of Environmental Research (2014)를 참고하여 표 1과 같이 적용하였다. 모델링 기간은 모델링의 초기불안정성과 기상입력자료 생성과정을 고려한 spin-up 기간을 포함하는 2012년 4월 30일~5월 10일로 설정하였다.

OBSGRID를 이용하여 자료동화 및 보간 과정인 너징을 수행하였고 기온, 상대습도, 풍속에 대해 그리드 너징과 관측너징을 실험별로 실시하였다. 영향반경의 경우 원형의 Cressman 방법을 적용하였고 영향계수는 내정값인 3×10^{-4}을 사용하였다. 너징에는 NCEP에서 제공하는 지상 및 고층 관측자료를 사용하였다.

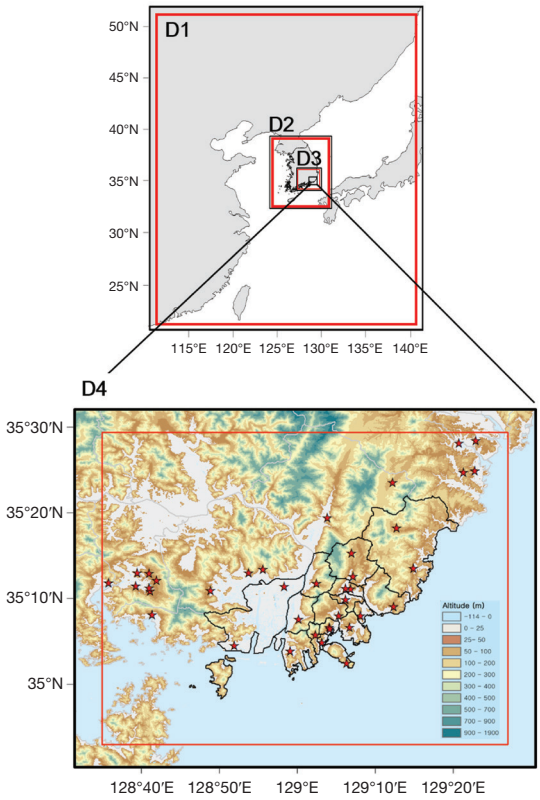

Fig. 1. The nested model domains for Domain1 (D1), Domain2 (D2), Domain3 (D3) and Domain4 (D4). The bottom figure is enlarged details of the target areas of D4 and the red stars indicate the air pollution measurement networks. Black and red lines mean the WRF and CMAQ model domains, respectively.

Table 1. Details of the physical options used in the WRF model.

	D1	D2	D3	D4
Microphysics	WSM5		WDM6	
Radiation (long/short wave)	RRTMG / RRTMG			
Planetary boundary layer	YSU			
Surface layer option	MM5			
Land surface option	Noah land surface model			
Cumulus	KF		–	

2.1.2 대기질모델

오존농도 모의를 위해 U.S. EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발한 3차원 광화학 수송모델인

CMAQ ver5.0.2를 사용하였다. 모델링 영역은 WRF 모델링 영역과 동일하게 4개의 영역으로 구성하였고(그림 1, 빨간색 실선) 3일의 spin-up 기간을 포함하는 2012년 5월 2일~5월 9일에 대해 모델링을 수행하였다. 모델링 수행 시 사용한 옵션 중 기체상 물질에 대한 화학 메커니즘과 에어로졸 모듈은 SAPRC99와 Aero5를 선택하였고 수평/연직 이류모듈과 확산모듈은 hyamo/vwrf와 multiscale/acm2를 적용하였다. 또한, 침적속도 계산모듈과 구름 모듈은 m3dry와 cloud_acm_ae5를 선택하였고 그 외 상세 옵션들은 기본 옵션을 사용하였다.

기상입력자료는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 통해 WRF 모델링 결과를 재구성하여 사용하였고 초기 · 경계농도자료는 기본 프로파일 입력자료를 이용하였다. 배출량입력자료는 인위적 배출량과 자연배출량으로 구성하였다. 자연배출량은 BEIS ver3.1.4를 이용하여 D3, D4에 대해 산출하였고 인위적 배출량은 CMAS (Community Modeling and Analysis)에서 제공하는 공간할당 프로그램을 이용하여 격자별 할당 과정을 거친 후, 종 할당 스크립트를 이용하여 전도메인에 대해 산정하였다. 인위적 배출량은 남한을 제외한 동아시아 영역에는 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-B) 2006년 자료를, 남한에는 국립환경과학원에서 제공하는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2012년 시군구별 자료를 사용하여 선행연구(National Institute of Environmental Research, 2014)를 참고한 임의의 계수를 이용해 재산정하였다.

2.2 수치실험 설계 및 연구방법

기상자료동화에 따른 오존농도 민감도를 분석하기 위해 총 6개의 실험을 구성하였다. 실험 구성을 위해 너징 종류에 따른 기상입력자료를 생성하였고, 그리드너징의 경우 적용 도메인에 따라 너징 효과가 다르게 나타남으로 적용 도메인에 따른 기상입력자료를 추가 생성하였다. 실험은 너징을 실시하지 않은 기상입력자료, 전 도메인에 대해 관측너징을 실시한 기상입력자료, 각기 다른 도메인(D1/D1~D2/D1~D3/D1~D4)에 그리드너징을 실시한 기상입력자료를 적용한 CMAQ 모델링으로 구성하였고 이를 각각 CNTL, ONE, GNE-1/GNE-2/GNE-3/GNE라 명하였다.

분석은 낮 시간(07~18 LST)과 야간 고농도일의 밤 시간(00~04 LST)에 대해 실시하였고 각 실험별 최종 도메인(D4)의 모의결과를 이용하였다. CNTL, ONE, GNE 실험의 비교를 통해 기상자료동화 시 너징 종류에 따른 영향을 분석하였고 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE 실험의 비교를 통해 적용 도메인에 따른 영향을 살펴보았다. 분석요소로는 기상의 경우 기온, 습도, 풍속, PBL 고도를 이용하였고 오존은 시간별 농도를 사용하였다. 오존 분석은 시간별 농도와 더불어 일 최고농도, 일 최고 8시간 평균농도를 분석하는 것이 일반적이나 사례일의 특성상 데이터가 충분하지 않아 낮은 신뢰성을 보여 제외하였다.

정량적인 비교평가를 위하여 오차를 나타내는 통계지표인 MBE (Mean Bias Error)와 RMSE (Root Mean Square Error) 그리고 일치도를 나타내는 IOA (Index of Agreement)를 근거로 통계 분석을 실시하였다. MBE와 RMSE는 0에 가까울수록 모델이 관측과 유사한 값을 모의하고 양의 값이면 과대모의, 음의 값이면 과소모의를 하고 있음을 의미한다. IOA는 0~1 사이의 값을 가지고 1일 때 수치모의 결과가 완벽하게 관측과 일치함을 나타낸다. 통계 분석은 관측지점과 가장 인접한 격자값과 관측값을 이용하여 수행하였다. 이때 오존의 경우 총 37개의 대기오염측정망(그림 1), 기상의 경우 총 5개의 종관기상관측장비(ASOS)에서 측정된 관측자료를 이용하였다. 오존의 경우 각 실험별 평균값과 관측값의 관계를 가시적으로 확인하기 위해 산점도(scatter plot) 분석을 추가 수행하였다. 또한, 기상요소와 오존의 수평분포 분석을 통해 공간적인 특징을 살펴보았다.

3. 수치모델 결과 분석

3.1 WRF 모델링 결과 검증 및 분석

Kim *et al.* (2016)에서는 기상입력자료 생성을 위해 수행된 WRF 모델링의 정확도 검증 및 개선 효과를 분석하고자 전체 기간과 낮/밤 시간에 대해 관측된 기온, 상대습도, 풍속과 각 실험별 기상입력자료를 이용해 통계 분석을 실시하였다. 표 2는 규준실험인 CNTL의 통계 분석 결과 값으로서 기온과 풍속은 전체 기간과 낮 시간에 높은 정확도를 보였고, 이와 상반되게 습도는

Table 2. Statistical evaluation between the observed and predicted meteorological parameters (T2: temperature at 2 m, RH2: relative humidity at 2 m; WS10: wind speed at 10 m) for CNTL experiment during total analysis period, daytime and nighttime for Domain4.

Variable	T2 (°C)			RH2 (%)			WS10 (m/s)		
Statistics	MBE	RMSE	IOA	MBE	RMSE	IOA	MBE	RMSE	IOA
Benchmark	±0.50	<2.00	≥0.80				±0.50	<2.00	≥0.60
Total	−1.72	2.19	0.87	13.67	17.13	0.79	−0.10	1.21	0.60
Daytime	−1.63	1.98	0.85	13.34	16.18	0.74	−0.39	1.18	0.66
Nighttime	−2.75	2.82	0.54	7.19	10.71	0.88	−0.20	1.62	0.35

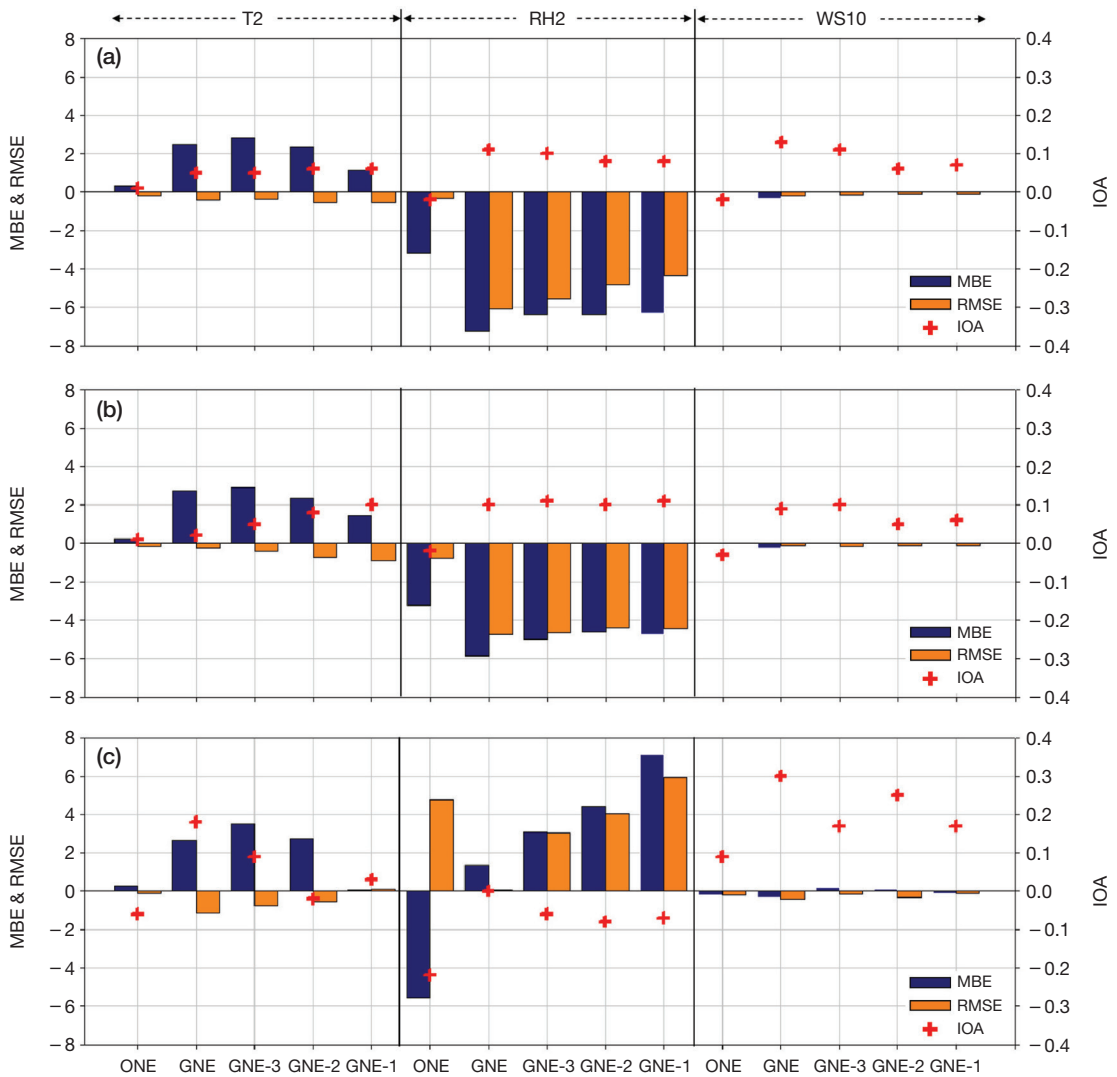

Fig. 2. Differences in statistical evaluation about meteorological parameters between each experiments (ONE, GNE, GNE-3, GNE-2, GNE-1) and CNTL during (a) total analysis period, (b) daytime and (c) nighttime, respectively.

밤 시간에 높은 정확도를 보였다. 따라서 너징을 적용한 실험(ONE, GNE, GNE-3, GNE-2, GNE-1)과 CNTL의 통계지표 차이(그림 2)가 MBE의 경우 기온과 풍속은 양의 값을, 습도는 음의 값을 나타낼 때 과소 · 과대모의 경향이 개선되었음을 의미하고, 기상요소에 대해 RMSE는 음의 값을, IOA는 양의 값을 나타낼 때 상대적으로 낮은 오차와 높은 일치도의 향상된 정확도를 보임을 의미한다.

전반적으로 너징을 적용한 실험은 CNTL보다 향상된 결과를 보였고 상대습도에 대해 가장 큰 정확도 향상이 나타났으며 풍속에 대해 가장 작은 정확도 향상을 보였다. 너징 종류에 따른 영향은 ONE보다 GNE에서 더 크게 나타났다. CNTL과 비교하여 ONE는 전체 기간과 낮 시간에 대해 전반적으로 낮은 오차와 일치도를 보였고 밤 시간에는 전반적으로 유사한 오차를 보였으나 기온과 상대습도에 대해서 낮은 일치도를 보였고 풍속에 대해서는 높은 일치도를 보였다. GNE는 전반적으로 낮은 오차와 높은 일치도를 보였고, 특히 밤 시간의 기온과 풍속에 대해 뚜렷한 정확도 향상이 나타났다. 그리드너징을 적용한 도메인에 따른 영향은 시간대 · 기상요소별로 상이하게 나타났다. 그리드너징을 하위 도메인까지 적용할수록 전체 기간과 낮 시간의 기온은 일치도의 감소를 보였으며 상대습도와 풍속은 증가를 보이며 일정한 경향성이 발견되었다. 마찬가지로 오차의 감소 경향성이 나타났으나 기온의 경우 D3까지 적용할수록 감소하다가 D4까지 적용하였을 때 미미한 증가를 보였다. 밤 시간의 기온과 풍속은 일정한 경향성을 보이지 않았으나 습도의 경우 오차의 감소와 일치도의 증가 경향을 보였다.

공간분포 분석에서도 ONE보다 GNE의 도메인 전역에서 자료동화 효과가 뚜렷하게 나타났으며 해양보다 내륙에서 큰 변화를 보였다. GNE는 해안선 인근 내륙지역에서 가장 뚜렷한 효과가 나타나는 특징을 보였다 (Kim *et al*., 2016, 그림 3~5).

3.2 CMAQ 모델링 결과 검증 및 분석

3.2.1 평균적/정량적 통계 분석

전체 기간에 대한 각 실험별 오존 모델링 결과와 대기오염측정망에서 관측된 시간별 오존농도와의 통계지표 값과 산점도를 그림 3에 나타냈다. 시간별 평균 관측농도는 54.20 ppb로 CNTL의 MBE와 RMSE는 각각 −13.28 ppb, 21.46 ppb로 계산되어 다소 높은 오차를 내포한 과소모의 경향을 보였고 IOA가 0.58로 낮은 일치도를 보였다. 너징을 적용한 실험은 CNTL과 평균 0.08 ppb, −1.52 ppb, 0.08의 MBE, RMSE, IOA 차이를 보이며 상대적으로 낮은 오차와 높은 일치도를 보였다. 이는 기상입력자료의 개선과 비교하여 미미한 차이이나, 오존모사능력 개선에 있어 기상입력자료의 개선은 절대적 영향을 미치는 것이 아니기 때문에 의미있는 차이이다. 예를 들어 CNTL의 IOA의 경우 0.58, GNE는 0.70으로 수치상으로는 미미한 차이가 있으나, 의미상으로는 CNTL은 절반 가량이, GNE는 대부분의 자료가 일치함을 의미한다.

너징 종류에 따른 영향 분석 결과, GNE가 ONE보다 향상된 결과를 보였다. CNTL과 비교하여 GNE는 낮은 오차와 높은 일치도를 보였고, ONE는 전반적으로 CNTL과 유사한 오차와 소폭 향상된 일치도를 보였다. 적용 도메인에 따른 영향은 그리드너징을 최종 도메인(D4)까지 적용한 GNE 실험이 가장 향상된 결과를 나타냈다. 이때 오차의 경우 GNE-1, GNE-2, GNE-3 실험으로 갈수록 증가하고 GNE 실험에서 크게 감소하는 경향을 보였으며, 일치도는 하위 도메인에 그리드너징을 적용할수록 증가하는 경향을 보였다. 이러한 오존모의 정확도의 차이는 기상입력자료의 정확도 개선에 따른 직 · 간접적인 영향으로 인한 결과로서, 특히 오존과 자연배출량의 생성과정에 관여하는 기온의 과소모의 경향 개선과 더불어 소멸과정에 관여하는 습도의 과대모의 경향의 개선으로 인한 결과로 보인다.

산점도 분석 결과(그림 3(b)), 실험별 관측값과의 상관관계의 변화는 통계 분석과 유사하였다. 전반적으로 모델 예측결과는 관측된 농도수준과 상당한 차이를 보였으며 과소모의 경향이 뚜렷하게 나타났다. 모델값과 관측값의 상관관계는 R^2이 0.5 이하로 약한 양의 상관관계에 있으며 GNE-3의 상관성이 0.358로 가장 높게 나타났고 CNTL의 상관성이 0.208로 가장 낮게 나타났다. 너징을 적용하였을 때 상관관계가 증가하였고 GNE가 ONE보다 높은 상관관계를 보였다. 또한, 그리드너징을 하위 도메인에 적용할수록 상관관계가 증가하여 D3까지 적용한 GNE-3이 가장 높은 상관관계를 보였으며, 이후 D4까지 적용한 GNE에서는 소폭 감소하는 경향이 나타났다.

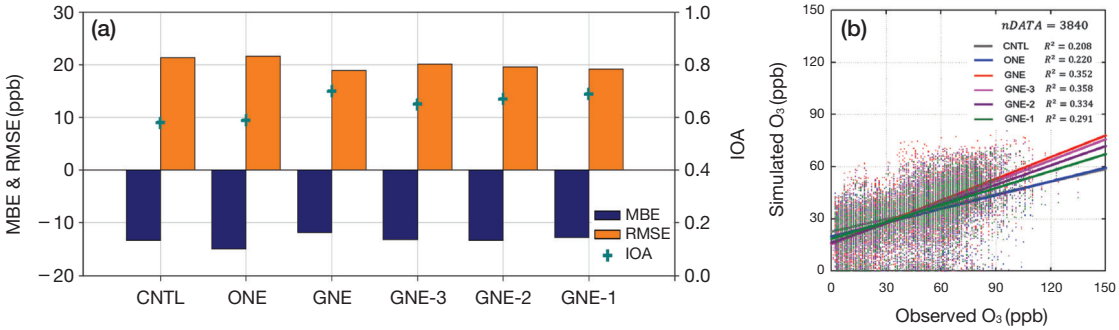

Fig. 3. (a) Statistical evaluation between the observed and predicted hourly ozone concentration during total analysis period at 35 monitoring sites for D4. (b) The scatter plots of ozone concentration between observations and CMAQ modeling results for total.

Table 3. Ozone concentration and natural emission in each experiments during daytime and nighttime.

		CNTL	ONE	GNE	GNE-3	GNE-2	GNE-1
Daytime	Ozone (ppb)	40.71	39.81	43.66	42.71	42.05	41.76
	variation (%)	–	−2.21	7.25	4.91	3.29	2.58
	NO (10^{-5} mol/s)	15.40	15.69	18.01	18.17	17.67	16.77
	variation (%)	–	1.87	16.94	17.94	14.73	8.86
	Isoprene (10^{-4} mol/s)	2.58	2.69	3.51	3.62	3.44	3.17
	variation (%)	–	4.09	36.02	40.43	33.23	22.85
Nighttime	Ozone (ppb)	38.87	33.66	42.71	40.59	39.29	38.67
	variation (%)	–	−13.40	9.88	4.43	1.08	−0.51
	NO (10^{-5} mol/s)	10.90	10.92	12.55	12.93	12.65	11.32
	variation (%)	–	0.17	15.11	18.58	16.03	3.82

3.2.2 오존농도 모의와 자연배출량의 상관성

낮 · 밤 시간에 대한 자연배출량의 특징과 오존농도와의 상관성을 분석하고자 실험별 D4의 평균 자연배출량과 오존농도 그리고 CNTL을 기준으로 한 각각의 변화율을 표 3에 제시하였다. 자연배출량은 BEIS을 통해 산정된 일산화질소와 이소프렌배출량이 사용되었고 밤 시간의 경우 이소프렌이 배출되지 않기 때문에 일산화질소 배출량에 대해서만 분석을 실시하였다.

낮 시간의 관측은 54.20 ppb로 CNTL은 평균 40.71 ppb의 오존농도를 보이며 과소모의하고 있었으며, 15.40×10^{-5} mol/s, 2.58×10^{-4} mol/s의 자연배출량을 보였다. 이와 비교하여 오존농도는 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE에서 증가하였으나 ONE는 감소하였고, 자연배출량은 너징을 적용한 실험 모두에서 증가하였다. 너징 종류에 따른 영향은 ONE보다 GNE에서 크게 나타났다. ONE의 경우 기온에 대한 정확도가 증가함에 따라 자연배출량 산정 시 사용되는 light correction factor의 불확실성이 감소하였고, 그 결과 1.87%, 4.09%의 자연배출량 증가를 보였으나 −2.21%의 오존농도 감소가 나타났다. 이는 기상입력자료에 있어 CNTL보다 상대적으로 큰 종관적 기압패턴의 불균형에 따라 전반적으로 기상입력자료의 오차가 개선되었으나 일치도의 감소로 인한 영향으로 판단된다. GNE는 7.25%의 오존농도 증가와 16.94%, 36.02%의 자연배출량 증가가 나타났고 실험 중 가장 큰 증가율을 보였다. 적용 도메인에 따른 영향은 하위 도메인까지 그리드너징을 적용할수록 크게 나타났다. 오존농도는 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE로 갈수록 증가 추세를 보였고, 자연배출량의 경우 그리드너징을 D3까지 적용할수록 증가추세를 보이다가 GNE에서 소폭 감소하였다. 낮 시간의 오존농도의 변화는 자연배출량의 변화와 선형적인 관계에 있지는 않았으나 일정 부분 영향을 준 것으로 사료되

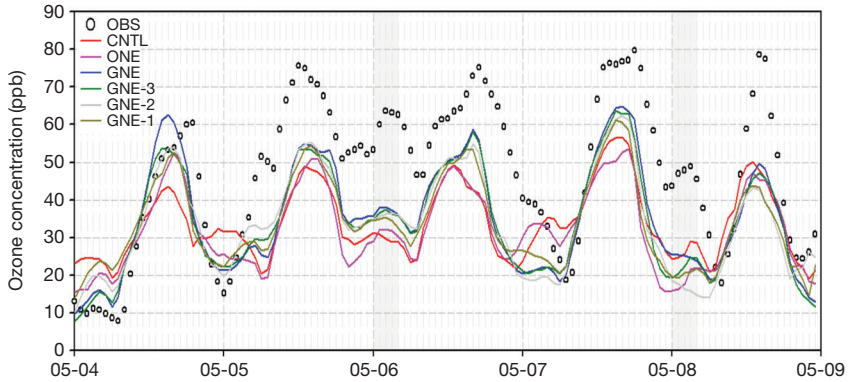

Fig. 4. Time series of ozone concentration in D4 during study periods.

며, 자연배출량의 변화는 기온의 모의 경향과 동일하였다.

밤 시간의 관측은 53.56 ppb로 CNTL은 평균 38.87 ppb의 오존농도와 10.90×10^{-5} mol/s의 일산화질소 배출량을 보이며 낮 시간보다 낮은 오존농도를 모의하였다. 너징을 적용하였을 때 오존농도는 −13.40~9.88%의 변화를 보였고 0.17~18.58%의 자연배출량의 변화를 보였다. 너징 종류에 따른 영향은 배출률의 절댓값에 있어 ONE가 GNE보다 크게 나타났다. ONE의 오존농도는 평균 33.66 ppb로 CNTL과 비교하여 −13.40% 감소하였다. GNE는 42.71 ppb의 오존농도를 보이며 실험 중 가장 큰 증가율을 보였으며 자연배출량은 15.11%의 증가를 보였다. GNE-1의 경우 기상입력자료의 높은 상대습도와 PBL 고도로 인하여 오존의 침적 · 확산이 활발하게 일어나 38.67 ppb의 낮은 오존농도를 모의하였다. 적용 도메인에 따른 영향은 −0.51%, 1.08%, 4.43%, 9.88%의 오존농도 증가를 보이며 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE로 갈수록 크게 나타났다. 이때 자연배출량은 GNE-1, GNE-2, GNE-3으로 갈수록 증가하였으나 GNE에서 소폭 감소를 보였다. 일반적으로 밤 시간의 높은 일산화질소 농도는 오존농도의 감소와 이어진다. 하지만 정량적 분석에서는 오존농도와 자연배출량의 변화의 상관성을 파악할 수 없었다. 따라서 추가적인 수평분포 분석을 통해 공간적 유사성을 파악

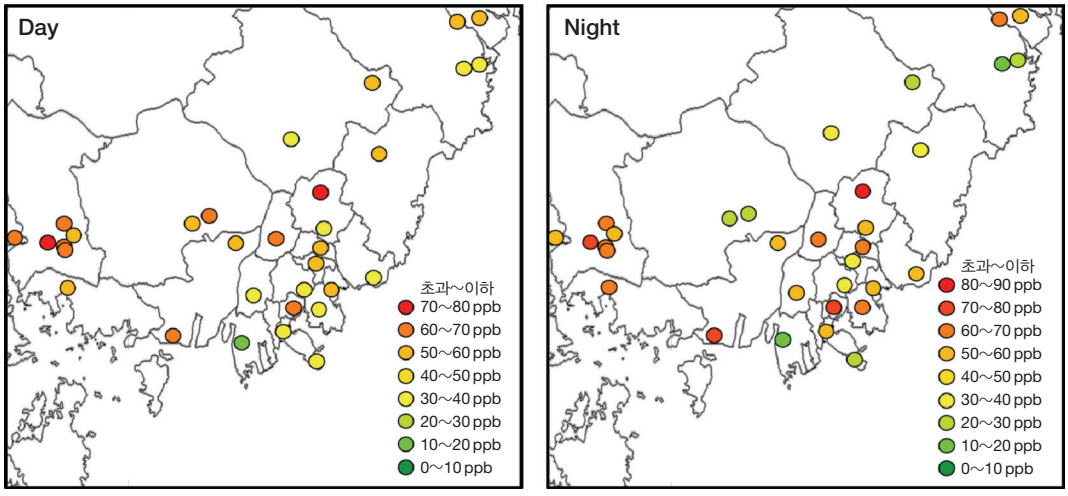

Fig. 5. Horizontal distribution of observed ozone concentration during daytime (left) and nighttime (right).

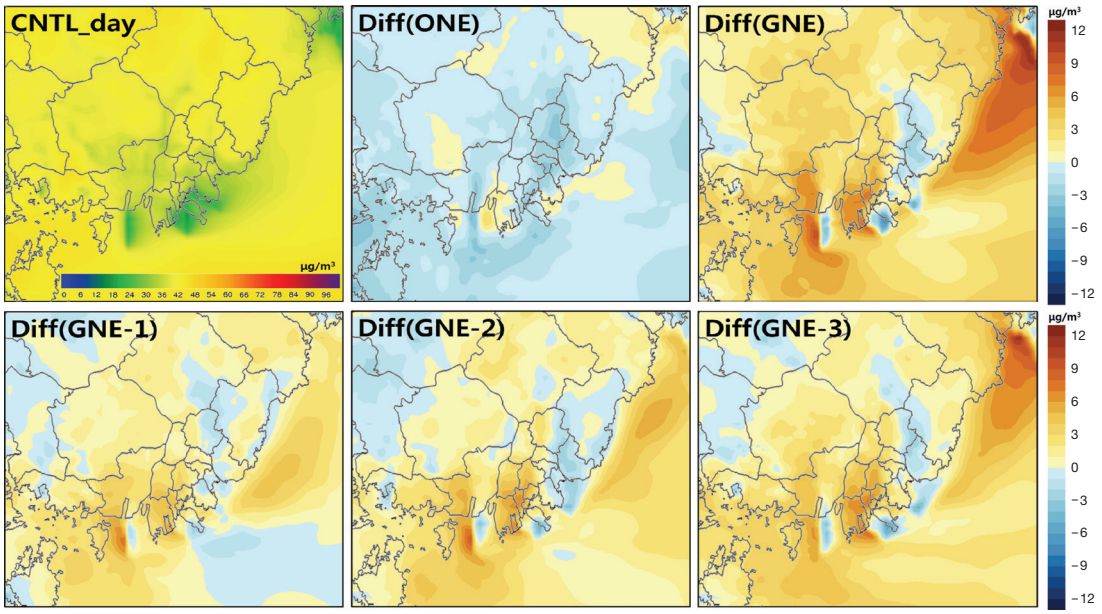

Fig. 6. Horizontal distribution of CNTL experiments and differences in ozone concentration between each experiments (ONE, GNE, GNE-3, GNE-2, GNE-1) and CNTL during daytime, respectively.

하여 3.2.3장에 제시하였다.

3.2.3 오존농도 시계열 및 수평분포 분석

낮/밤 시간의 경우 자료의 연속성과 충분하지 않은 데이터 수로 인하여 통계적으로 유의하지 않은 결과가 나타난다. 따라서 그림 4와 같이 사례일의 오존농도 시계열을 통해 낮/밤 시간의 오존농도 정확도를 정성적으로 확인하고자 한다. 또한, 공간적 오존모의 특징을 파악하고자 관측값(그림 5)과 각 실험별 모의 결과의 수평분포(그림 6, 7)를 분석하였다. 이때 그림 6과 그림 7은 각각 낮 시간과 밤 시간에 대해 CNTL 수평분포, 각 실험별 모의 결과와 CNTL의 수평분포의 차이를 나타내었다.

시계열 분석 결과(그림 4), 전반적으로 실험들은 오존농도를 과소모의하는 경향을 보였으며, 특히 밤 시간에 농도 차이가 가장 크게 나타났다. 낮 시간의 경우 너징을 적용한 실험들이 CNTL과 비교하여 향상된 정확도를 보였다. 너징 종류에 따라 GNE가 ONE보다 향상된 결과를 모의하였고 최종 도메인까지 그리드너징을 적용할수록 모의된 농도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 CNTL과 ONE는 06일의 오존농도 피크시간을 모의하지 못하였으나, 그리드너징을 적용한 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE는 잘 모의하는 특징을 보였다. 야간 고농도 오존일에 대한 기상자료동화의 영향은 사례일에 따라 약간의 차이를 보였다. 06일에는 모든 실험이 오존농도의 상승을 모의하고 있었으나, 08일에는 GNE와 GNE-2가 오존농도의 상승을 모의하지 못하였고, 실험 중 GNE-3이 농도상승을 가장 잘 모의하는 특징을 보였다. 전반적으로 낮 시간에는 기상입력자료의 정확도 개선과 더불어 높은 자연배출량의 복합적인 영향을 받을 것으로 보이나, 밤 시간의 경우 영향이 미미하게 나타났다. 이는 실험들이 전반적으로 밤 시간에 대한 풍속의 정확도는 개선되었으나 풍향에 대해 낮은 정확도를 보이며, 다른 지역으로부터의 오존의 수평적 수송을 잘 모의하지 못하였기 때문이다.

관측된 오존농도의 수평분포(그림 5)는 낮 시간에 도메인 전역에 높은 오존농도를 모의하였으나 부산 사하구에 위치한 지점의 경우 상대적으로 낮은 오존농도를 보였다. 밤 시간에는 전반적으로 낮 시간과 유사한 농도를 보이거나 소폭 상승한 농도를 보였으나 울산, 부산 영도구, 김해를 포함한 일부 내륙지역의 지점에서 낮은 농도가 나타났다. 실험별 수평분포 모의 결과,

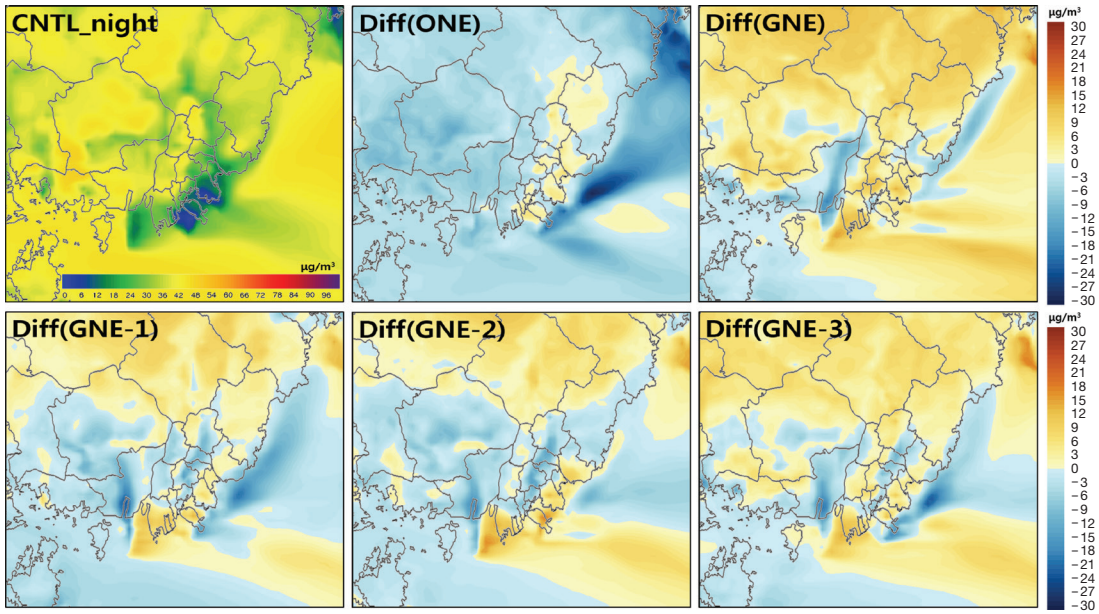

Fig. 7. Horizontal distribution of CNTL experiments and differences in ozone concentration between each experiments (ONE, GNE, GNE-3, GNE-2, GNE-1) and CNTL during nighttime, respectively.

낮 시간(그림 6)의 CNTL은 도메인 전역에 대해 유사한 수준의 오존농도를 보이며 일부 부산지역과 울산 신항 앞바다에서 상대적으로 낮은 농도를 모의하는 관측의 분포 특징을 잘 모의하였으나, 창원지역의 높은 농도를 모의하지 못하였다. 이와 비교하여 너징 종류에 따른 기상자료동화 효과는 상이하게 나타났다. ONE는 도메인 전역에 대해 낮은 오존농도의 고른 분포를 보인 반면, GNE는 전반적으로 높은 농도를 모의하며 해양에서 큰 차이를 보였다. 특히 부산 동부와 남부 앞바다 일부 지역에서 큰 차이는 기상입력자료의 분포에서 나타난 높은 기온과 낮은 풍속의 영향으로 사료된다. 적용 도메인에 따른 영향은 그리드너징을 하위 도메인까지 적용할수록 크게 나타났고 내륙보다 해양에서 일정한 경향성을 보였다. 또한, 부산 강서구와 사하구를 포함한 일부 내륙지역과 부산 동부 앞바다에서 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이때 농도가 증가하는 지역의 경우 기상입력자료의 분포에서 높은 기온과 낮은 상대습도, 풍속을 모의하는 특징을 보였으며 이에 오존 생성의 촉진과 확산 및 침적의 억제로 인한 결과로 사료된다.

밤 시간(그림 7)의 CNTL은 낮 시간과 비교하여 일부 지역에서 낮은 오존농도를 보였고, 특히 부산 연안과 울산 신항 앞바다에서 가장 낮은 농도를 모의하며 관측과 유사한 분포를 보였다. 너징 종류에 따른 기상자료동화 효과는 내륙과 해양에서 다르게 나타났다. ONE의 경우 전반적으로 도메인 전역에서 낮은 농도를 모의하였고 자료동화 효과는 부산 동부 앞바다와 울산 신항 앞바다에서 가장 크게 나타났다. GNE는 전반적으로 높은 농도를 모의하였으나 거제도와 부산 강서구 그리고 부산 동부 해안선을 따라 낮은 농도가 나타났다. 또한, 해양보다 내륙에서 기상자료동화 효과가 크게 나타났다. 적용 도메인에 따른 영향은 그리드너징을 하위 도메인까지 적용할수록 울산 신항 앞바다와 부산 사하구에서 남동쪽으로 나타나는 높은 오존농도 모의 영역이 점차 넓어지고 김해지역을 중심으로 오존농도가 증가하는 패턴을 보였다. 밤 시간의 공간적 분포는 대부분 습도의 분포와 유사하게 나타났으며 ONE의 경우 높은 습도로 인한 오존 침적현상의 촉진과 GNE-1, GNE-2, GNE-3, GNE의 해양에서의 습도변화에 영향을 받은 것으로 사료된다. 오존농도와 자연배출량의 수평분포는 낮 시간에는 상관성이 나타나지 않았으나 밤 시간에는 일산화질소의 배출량을 높게 모의한 지역

에서 낮은 오존농도를 보이는 공간적 분포특징을 확인하였다. 따라서 밤 시간의 오존농도와 자연배출량은 정량적 특징보다 분포특징이 더 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 한반도 남동해안 지역을 대상으로 기상자료동화에 따른 CMAQ 모델의 오존농도 모의 민감도 분석을 실시하였다. 분석을 위해 각기 다른 너징 종류와 적용 도메인에 따라 생산된 기상입력자료를 적용한 총 6개의 CMAQ 모델링 실험을 구성하였다. 분석은 전체 기간과 낮/밤 시간의 시간별 오존농도에 대한 통계 분석과 시계열 및 수평분포 분석을 실시하였고 이를 토대로 정확도 개선 효과와 시 · 공간적 특성을 살펴보았다.

전체 기간에 대해 CNTL은 오존농도 모의에 있어 다소 높은 오차를 내포한 과소모의 경향과 낮은 일치도를 보였으며, 너징을 적용하였을 때 상대적으로 낮은 오차와 높은 일치도를 보이며 향상된 결과를 나타냈다. 너징 종류에 따라 그리드너징을 적용한 실험이 관측너징을 적용한 실험보다 높은 정확도를 보였으며, 그리드너징을 최종 도메인까지 적용하였을 때 가장 향상된 결과를 보였다. 낮/밤 시간에 대해서는 전반적으로 관측과 비교하여 낮은 농도를 모의하며 과소모의 경향이 나타났으나 너징을 적용하였을 때 향상된 결과를 보였다. 너징에 따른 오존농도와 자연배출량의 변화는 낮 시간에 선형적인 관계에 있지는 않으나 일정부분 영향을 준 것으로 사료되며, 밤 시간의 경우 관계를 파악할 수 없었다. 낮/밤 시간에 대한 너징 종류에 따른 영향은 관측너징보다 그리드너징을 적용하였을 때 크게 나타났으며, 각각 해양/내륙지역에서 자료동화 효과가 크게 나타나는 상반된 특징을 보였다. 이때 최종 도메인까지 그리드너징을 적용할수록 높은 오존농도를 모의하였다. 특히 밤 시간에는 약 10.39%의 농도변화를 보이며, 4.67%의 농도변화를 보인 낮 시간보다 자료동화 효과가 크게 나타났고, D3까지 그리드너징을 적용하였을 때 야간 고농도 오존일의 농도상승을 가장 잘 모의하는 특징을 보였다.

기상자료동화는 기상입력자료의 정확도 개선과 자연배출량 산정에 영향을 주어 낮 시간의 오존모의에 복합적인 영향을 주었으나 밤 시간의 경우 풍향의 낮은 정확도로 인하여 야간 고농도 오존에 대한 기상자료동화의 영향은 미세하게 나타났다. 기상자료동화 효과는 전반적으로 그리드너징을 최종 도메인까지 적용하였을 때 가장 크게 나타났으나, 야간 오존농도 상승에 대해서는 D3까지 적용하였을 때 가장 향상된 결과를 보였다. 이는 적용한 도메인에 따라 종관적 기압패턴의 불균형의 개선이 차별적으로 나타나며, 고해상도의 도메인까지 그리드너징을 적용할 경우 평활화 효과로 인하여 국지적 특징이 제거됨에 따른 결과로 분석된다. 따라서 사례일의 기압특징에 따라 그리드너징을 적용하였을 때의 정확도 향상 정도와 적용 도메인에 따른 효과는 달라질 수 있으며, 너징 시 세부 옵션 조절에 따라 결과가 달라질 수 있다. 하지만 본 연구 결과는 너징을 이용한 기상입력자료 구축 및 오존 모델링연구에 있어 기초연구로서 세부 옵션 핸들링에 앞선 참고자료가 될 수 있다. 추후 본 연구 결과를 바탕으로 세부 옵션 핸들링에 따른 민감도 분석을 수행한다면 오존농도 모의에 있어 보다 향상된 정확도의 결과가 도출될 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2015R1A2A1A10053971).

References

Barna, M. and B. Lamb (2000) Improving ozone modeling in regions of complex terrain using observational nudging in a prognostic meteorological model, Atmospheric Environment, 34, 4889-4906.

Borge, R., V. Alexandrov, J.J. Vas, J. Lumbreras, and E. Rodriguez (2008) A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, Atmospheric Environment, 42, 8560-8574.

Chameides, W.L., R.W. Linsay, J. Richardson, and C.S. Kiang (1988) The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, Sci-

ence, 241, 1473-1475.

Cho, K.T., J.C. Kim, and J.H. Hong (2006) A study on the comparison of biogenic VOC (BVOC) emissions estimates by BEIS and CORINAIR methodologies, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(2), 167-177. (in Korean with English abstract)

Choi, H.-J., H.-W. Lee, K. Sung, and M.-J. Kim (2009) The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area, Journal of the Environmental Sciences, 18(3), 271-281. (in Korean with English abstract)

Choi, J.W. and J.G. Lee (2015) A sensitivity study of WRF model simulations to nudging methods for a Yeongdong heavy snowfall event, Atmosphere, Korean Meteorological Society, 25(1), 99-115. (in Korean with English abstract)

Dawson, J.P., P.J. Adams, and S.N. Pandis (2007) Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study, Atmospheric Environment, 41(7), 1494-1511.

Eliasson, I., S. Thorsson, and Y. Andersson-Skold (2003) Summer nocturnal ozone maxima in Goteborg, Sweden, Atmospheric Environment, 37, 2615-2627.

Hanna, S.R. (1994) Mesoscale meteorological model evaluation techniques with emphasis on needs of air quality models, Mesoscale Modeling of the Atmosphere, American Meteorological Society, 25, 47-58.

Jeong, Y.-M., H.-W. Lee, S.-H. Lee, H.-J. Choi, and W.-B. Jeon (2011) Numerical study on the impact of regional warming on the meteorological field and ozone concentration over the South-Eastern part of the Korean peninsula, Journal of the Environmental Sciences, 19(12), 1431-1445. (in Korean with English abstract)

Kim, S.B. and D.W. Byun (2005) Mass consistent on-line and off-line air quality modelng using WRF-CMAQ system, Proceeding of the 40th Meething of KOSAE, Korean Society for Atmospheric Environment, 21, 85-89.

Kim, T., J.-H. Jeong, and Y.-K. Kim (2016) Sensitivity analysis of the WRF model according to the impact of nudging for improvement of ozone prediction, Journal of the Environmental Sciences, 25(5), 683-694. (in Korean with English abstract)

Lamb, B., A. Guenther, D. Gay, and H. Westberg (1987) A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions, Atmospheric Environment, 21, 1695-1705.

Lee, D.-G., M.-H. Lee, Y.-M. Lee, C. Yoo, S.-C. Hong, K.-W. Jang, and J.-H. Hong (2013) An impact of meteorological initial field and data assimilation on CMAQ ozone predition in the Seoul metropolitan area during June, 2007, Journal of Environmental Impact Assessment, 22(6), 609-628. (in Korean with English abstract)

Liu, P., A.P. Tsimpidi, Y. Hu, B. Stone, A.G. Russell, and A. Nenes (2012) Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 3601-3610.

Mao, Q., L.L. Gautney, T.M. Cook, M.E. Jacobs, S.M. Smith, and J.J. Kelsoe (2006) Numerical experiment on MM5-CMAQ sensitivity to various PBL schemes, Atmospheric Environment, 40(17), 3092-3110.

National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, Korea, 1-556.

Otte, T.L. (2008) The impact of nudging in the meteorological model for retrospective air quality simulations. Part I: Evaluation against national observation networks, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47, 1853-1867.

Pielke, R.A. and M. Uliasz (1998) Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models - limitations and strengths, Atmospheric Environment, 32, 1455-1466.

Queen, A.N. and Y. Zhang (2008) Examining the sensitivity of MM5-CMAQ predictions to explicit microphysics schemes and horizontal grid resolutions. Part II - PM concentration and wet deposition predictions, Atmospheric Environment, 42(16), 3856-3868.

Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, Atmospheric Environment, 34(12-14), 2231-2259.

Singh, H.B. and P.B. Zimmermann (1992) Atmospheric distribution and sources of nonmethane hydrocarbons, In: Gaseous pollutants: Characterization and cycling, 1, 177-235.

Yerramilli, A., V.S. Challa, V.B.R. Dodla, H.P. Dasari, J.H. Young, C. Patrick, J.M. Baham, R.L. Hughes, M.G. Hardy, and S.J. Swanier (2010) Simulation of surface ozone pollution in the central Gulf coast region using WRF/Chem model: Sensitivity to PBL and land surface physics, Advances in Meteorology, 3(1), 55-71.