기후변화에 따른 도시별 기상기여도 차이가 고농도 오존분포에 미치는 영향

정여민 · 이화운* · 최현정¹⁾

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경연구원
(2011년 2월 17일 접수; 2011년 3월 4일 수정; 2011년 3월 10일 채택)

The Impact of Regional Warming On the Ozone Concentration According to the Differences in Meteorological Contribution in Each City over the South-Eastern Part of the Korean Peninsula

Yeo-Min Jeong, Hwa Woon Lee*, Hyun-Jung Choi¹⁾

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

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

(Manuscript received 17 February, 2011; revised 4 March, 2011; accepted 10 March, 2011)

Abstract

In order to clarify the impact of regional warming on the ozone concentration according to the differences in meteorological contribution in each city over the South-Eastern part of the Korean Peninsula, several numerical experiments were carried out. WRF - CMAQ model was used to access the ozone differences in each case, during the episode day. Meteorological contributions estimated by WRF command a reasonable feature on the dispersion of ozone concentrations in each city according to regional warming. This causes a difference in estimated ozone concentration. A higher ozone concentration difference tend to be forecasted in coastal cities than in upcountry city. Therefore, the emission reduction policy according to the regional warming should consider the characteristics of meteorological contribution of each city.

Key Words : Regional warming, Meteorological contribution, Ozone concentration, WRF - CMAQ

1. 서론

지구규모의 기온상승은 전 지구적인 기류 뿐 아니라 국지규모의 기류 변화에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한 기온 상승은 단순히 기상장의 변화 뿐 아니라 대기오염 특히 광화학 반응성 오염 물질의 농도 변화에도 영향을 미친다 (Jianhui 등, 2005; Gabriel와

Brian, 2007; Fujibe, 2009; Carvalho 등, 2010). Camalier 등(2007)은 미국 39개 대도시의 오존농도의 시간 변화를 분석한 결과 오존농도가 지표면 기온과 습도의 변화와 밀접하게 관련된다고 보고하였으며, John 등(2007)은 미국 동부 지역의 기후 변화에 따른 기상장 변화를 수치모의 하고 민감도 분석을 통해 기후 변화에 따른 오존 농도의 분포를 연구하였다. 특히 한반도를 포함한 동아시아지역의 기온 상승이 급격하게 이루어지고 있기 때문에 이 지역의 기온 상승이 국지규모의 기상에 미치는 영향을 정확히 파악할 필요가 있다. 따라서 지구온난화에 따른 기후변화가 국지규모의 기류변화와 광화학 반응성 오염물질의 농도변화에

*Corresponding author : Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-583-2651
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

직간접적으로 영향을 미침을 가정하고 그 영향에 관한 세밀한 연구와 정책적인 접근이 필요하다고 판단되었다. 따라서 장기적인 환경 변화 예측의 측면에서 지구 온난화에 따른 이들 도시에서의 국지기상상의 변화와 이에 따른 대기오염의 변화 경향성을 파악하고자 한다.

본 연구에서는 복잡한 국지순환계가 나타나는 한반도 동남지역 대도시를 대상으로 대표적인 2차 대기 오염 물질인 오존의 기상요인에 의한 변동성을 살펴보고, 기상장과 대기질 수치모의를 통하여 지구 온난화를 가정한 기상 변화로 인한 도시별 오존 농도의 변동성을 살펴보고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 수치모의 설계

2.1.1. 기상장 수치모의

본 연구에서는 동남지역 대도시(부산, 울산, 대구)의 고농도 오존 사례일 중 종관장의 영향이 크지 않고 맑았던 2008년 5월 2일 0900LST부터 4일 0900LST까지를 사례일로 선정하였다. 기상장 수치 모델의 초기 입력장은 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 1 km 해상도의 가로와 세로의 격자수를 199개로 하여 수치모의 하였고

모델링 영역은 Fig. 1에 나타내었다. 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 Survey) 30초 자료에 비해 해상도가 10배 높으며, KLU 1초 자료는 환경부에서 Landsat M 위성영상과 SPOT 위성 영상의 합성을 통해 제작한 토지 이용 자료로서 USGS 토지 이용 자료에 비해 해상도가 30배 높아 수치모의에서의 정확도를 향상시켰다(Lee 등, 2008; 전원배 등, 2009). 수치모의에 사용된 물리 모수화 방안은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The configuration 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		
Initial data	Dudhia short-wave scheme		
	NCEP FNL Operational Global Analysis data		
Time Period	2008. 05. 02. 0900LST ~ 2008. 05. 04. 0900LST

Fig. 1. WRF model domains and nested domain used in this study.

2.1.2. 대기질 수치모의

WRF 모델 결과를 대기질 수치모의 입력자료로 사용하여 대기질 수치모의를 수행하였다. 동남지역의 대표 도시가 포함되는 WRF 수치모의 Domain 3에서 경계값의 오차가 나타나지 않을 범위를 지정하여 186×186 수평격자로 설정하였다. CMAQ의 구성은 Table 2에 나타났다.

Table 2. The configuration of CMAQ modeling

CMAQ domain	
Input Data	WRF Domain 3 Output Data
Horizontal Grid	186×186
Horizontal Resolution	1 km
Vertical Layers	28 layers
Emission Data	CAPSS
Chemical Mechanism	CB-IV
Time period	2008. 05. 02 0900 UTC ~ 2008. 05. 04 0900 UTC

CMAQ 모델링 수행시 사용된 배출량 자료는 CAPSS (Clean Air Policy Support System)를 이용하여 산정하였다. CAPSS는 국립환경 연구원에서 생산하는 배출물질을 격자별 연간 총 배출량의 형태로 제공한다. 광화학 수치모의 수행시 사용된 반응 메커니즘은 CB-IV (Carbon Bond Mechanism - Version IV)로 36개의 물질을 고려하고 93개의 화학반응을 고려한다. 대기질 수치모의 기간은 기상장 수치모의와 동일하게 48시간으로 설정하여 수치 계산을 실시하였다. 기온과 풍속의 변화에 따른 오존 농도의 지역별 분포를 살펴보기 위해 CMAQ에서 각 기상요소를 변화시킨 실험을 실시하였다. Fig. 2에 나타난 MCIP은 기상장 수치모의

의 결과를 광화학 모델링을 수행할 기상장으로 변환시키는 과정으로, 본 연구에서는 MCIP에서 기온을 변화시킨 case T와 풍속을 변화시킨 case WS의 실험을 설정하였다(Table 3). IPCC 4차 보고서의 기후변화 시나리오에 따라 향후 100년간의 기온상승이 $2.4^{\circ}\text{C} \sim 6.4^{\circ}\text{C}$ 로 예상되므로 case T의 실험은 2°C 와 6°C 를 상승시킨 case T2와 case T6로 실시하였다. 기후변화에 따른 풍속의 변화는 명확한 예측이 어려운 실정으로 국지적 기상과 지형의 차이가 풍속의 변화를 유도할 것이라는 잠정적인 연구결과가 있다. John 등(2007)이 기후 변화에 따른 기상요소의 변화로 미국 동부지역의 오존 분포를 모델링을 실시한 연구에서 풍속의 변화에 따른 오존의 농도를 수치모의 한 선행연구에 따라 case WS의 실험은 풍속을 10% 상승시킨 case WS10%와 20% 상승시킨 case WS20%의 기상장으로 수치실험을 실시하였다.

Table 3. Design of the Air Quality Modeling

Experiments	case	case T2	Increase temperature 2°C
	T	case T6	Increase temperature 6°C
	case	case WS10%	Increase wind speed 10%
	WS	case WS20%	Increase wind speed 20%

3. 대기질 수치모의 결과

3.1. 기온 변화에 따른 오존 농도

Fig. 3에는 두 수치모의 결과와 기상장 변화를 주지 않고 사례일의 기상장 수치모의 결과를 적용시킨 사례(case BASE)의 수평장의 차이를 나타내었다. case T2와 case T6의 0900 LST의 경우 오존의 형성이 시작되는 울산 지역에서 각각 양의 값이 나타나 기온의 상승이 오존 형성 초기의 농도를 증가시키는 것을 확

Fig. 2. Meteorology preprocessing for CMAQ with MCIP.

인 할 수 있었다. case T2의 경우 울산 지역을 제외하고는 차이가 나타나지 않았으나 case T6의 경우 내륙의 낮은 고도가 나타나는 지역으로 양의 값이 나타나서 내륙에서의 오존형성이 기온 상승으로 인해 빠르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 1500 LST의 경우 값의 차이가 크게 나타났는데 먼저 case T2의 경우에는 울산에서 형성되어 부산 지역으로 이루어진 오존의 농도가 case BASE에 비해 10 ppb 정도 높게 나타났으며 대구와 진해로도 오존이 최고 3 ppb 이상 더 높게 나타났다. case T6의 결과를 살펴보면, 동남지역 대부분에서 양의 값이 나타나는 것을 확인할 수 있으며 특히 울산에서 형성되어 부산 지역으로 이루어진 오존의 농도가 case BASE에 비해 최고 33 ppb 높게 나타났

으며 또한 대구와 진해를 잇는 내륙으로 양의 값이 크게 나타났다. 0900 LST와 1500 LST의 각각의 시간에서 case T2에 비해 case T6의 오존 농도가 높게 수치화된 것이 확인되었다. 기온을 상승시킨 case T2와 case T6의 오존 농도의 수평장 결과를 보면 부산과 울산, 대구에서 오존의 농도가 동남권역의 다른 지역에 비해 더욱 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 수평장 분석을 통해 기온의 상승이 오존의 농도를 증가시키는 요인이 되는 것으로 확인되었다.

기온 상승에 따른 대기질 모델링의 결과를 권역별로 살펴보기 위해 Fig. 4를 나타내었다. 여기에서 제시된 값은 case T2의 부산, 울산, 대구권역의 일 최고 농도와 case BASE의 일 최고 농도의 차이, case T6의

Fig. 3. Difference of simulated ozone concentration at 0900LST and 1500LST ((a): Δ = case T2 - case BASE and (b): Δ = case T6 - case BASE).

Fig. 4. The difference of ozone concentration effected by case T at Busan, Ulsan and Daegu.

세 도시권역의 일 최고 농도와 case BASE의 일 최고 농도의 차이, 그리고 case T6와 case T2의 일 최고 차이를 나타내었다. case T2의 수치모의 결과와 case BASE의 결과에서 일 최고 농도의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 10.813 ppb, 5.357 ppb, 2.853 ppb 증가로 나타났다. 그리고 case T6의 수치모의 결과와 case BASE의 결과에서 일 최고 농도의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 33.313 ppb, 13.292 ppb, 6.218 ppb 증가로 나타났다. case T6와 case T2의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 22.5 ppb, 7.936 ppb, 3.365 ppb로 나타났다.

기온 상승에 의한 도시별 연직 농도의 차이를 분석하기 위해 case BASE와 case T2, case T6의 수치모의 결과를 부산과 울산, 대구 3개 도시에서 1500 LST의 농도 profile로 나타내었다(Fig. 5). 부산의 연직 농도를 살펴보면 case BASE의 경우 지표에서 138 ppb 정도의 오존이 상층으로 올라갈수록 점차 증가하여 6층에서는 150 ppb로 나타난다. case T2의 경우 지표에서 142 ppb의 농도가 상층으로 갈수록 증가하여 6층에서 154 ppb로 나타났다. 그리고 case T6에서는 지표에서 160 ppb의 오존이 증가하여 6층에서는 177 ppb로 최고 농도가 나타났다. 7층에서 모든 수치모의 결과의 연직 농도 값이 점차 감소하고 8층에서는 3개의 수치모의 농도 결과에서 차이가 거의 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 지표 농도의 수평장의 결과와 유사하게 기온 상승에 의해 연직 오존 농도 또한 상승

하는 결과가 나타났다. 그리고 울산의 연직 농도를 살펴보면 case BASE의 경우 지표에서 120 ppb의 오존이 상층으로 갈수록 점차 증가하다 5층에서는 127 ppb로 최고 농도값을 나타낸다. case T2의 경우 지표에서 123 ppb의 농도가 상층으로 갈수록 증가하여 5층에서 최고 농도 130 ppb가 나타났다. case T6에서는 지표에서 130 ppb의 오존이 증가하여 5층에서는 140 ppb로 최고 농도가 나타났다. 6층에서부터 모든 농도 값이 점차 감소하고 8층에서는 3개의 수치모의 농도가 거의 일치하였다. 울산 지역에서도 기온 상승에 의해 연직 오존 농도 또한 상승하는 결과가 나타났다. 대구의 경우 case BASE의 결과 지표에서 나타난 64 ppb의 오존 농도가 상층까지 거의 일정하게 나타나다가 9층에서 감소하였다. case T2와 case T6의 오존 농도 profile은 지표에서부터 8층에 이르기까지 각 실험의 지표 농도 66 ppb, 71 ppb가 상층까지 거의 동일하게 나타났는데 내륙에 위치한 대구의 경우 1500 LST의 대기 경계층이 약 1.5 km 높이로 형성되었기 때문에 연직 대기 운동이 활발해서 하층과 상층의 농도 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 사료되었다.

이러한 결과로 기온상승에 따른 오존 농도의 증가는 국지적으로 수평과 연직의 분포 특징이 다른 것으로 확인되었다. 지형적 특징에 의해 대기경계층이 높은 대구의 경우 연안지역보다 높은 고도까지 오존 농도의 증가가 나타나 기온 상승에 따른 오존 농도의 증가는 대기 경계층 높이에 제한을 받는 것으로 사료되었다.

Fig. 5. Vertical profile of simulated ozone concentration.

3.2. 풍속 변화에 따른 오존 농도

풍속을 증가한 대기질 모델링의 결과를 권역별로 살펴보기 위해 Fig. 6을 나타내었다. 여기에서 제시된 값은 case WS10%의 부산, 울산, 대구권역의 1500 LST 농도와 case BASE의 1500 LST 농도의 차이, case WS20%의 3 도시권역의 1500 LST 농도와 case BASE의 1500LST 농도의 차이, 그리고 case WS20%와 case 10%의 1500 LST 농도의 차이를 나타내었다.

case WS10%의 수치모의 결과와 case BASE의 1500 LST 농도의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 -28.557 ppb, -13.799 ppb, -2.677 ppb로 나타났다. 그리고 case WS20%의 수치모의 결과와 case BASE의 결과에서 1500 LST 농도의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 -32.443 ppb, -17.511 ppb, -5.213 ppb로 나타났다. case WS10%와 case WS20%의 차이는 부산, 울산, 대구에서 각각 -3.885 ppb, -3.711 ppb, -2.535

Fig. 6. The difference of ozone concentration effected by case WS at Busan, Ulsan and Daegu.

ppb로 나타났다.

풍속의 증가에 따른 오존 농도의 변화를 살펴보기 위해 부산과 울산, 대구의 위도에서 단면으로 잘라 기상장의 수렴과 발산향, 그리고 농도 분포를 분석하였다. 부산, 울산, 대구의 수렴과 발산향을 Fig. 7에서 살펴보면, 부산 상층으로 약하게 발산이 나타나고 있다. 같은 시간대 울산의 상층으로는 명확한 수렴과 발산의 형태가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 대구에서는 울산의 상층과 같이 명확한 수렴과 발산의 형태가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 case BASE, case WS10%, case WS20%의 1500LST 농도를 부산, 울산, 대구에서 중심위도를 중심으로 단면을 잘라 분석한 결과이다. 부산의 경우 풍속의 증가는 발산을 더욱 가중시켜 case BASE의 농도보다 case WS10%의 농도가 내륙으로 침투하여 나타났다며, case WS20%은 case WS10%의 결과보다 더욱 내륙으로 침투한 결과가 나타난다. 풍속의 증가로 인해 발산이 강해지고 오존이 빠르게 내륙으로 끌려 들어가고 있으며 최고 농도도 풍속이 증가하면서 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 울산의 경우 case BASE의 농도보다 case WS10%와 case WS20%의 결과에서 농도가 점차 낮아지는 결과가 나타난다. 최고 농도가 130 ppb에서 풍속을 10% 증가시킨 경우에는 120 ppb, 풍속을 20% 증가시킨 경우에는 110 ppb로 감소하였다. 울산의 상층에서 풍속의 증가는 나타났으나 뚜렷한 발산이나 수렴이 나타나지 않아서 내륙으로의 진입이 더디게 나타나는 것을 확인할 수 있었

다. 또한 600 m 높이의 산에 가로막혀 오존의 이동 속도가 상대적으로 느렸던 것으로 사료된다. 대구에서는 case BASE, case WS10%, case WS20%의 1500LST 농도를 대구의 단면으로 잘라 나타낸 것이다. case BASE의 농도보다 case WS10%와 case WS20%의 결과에서 농도가 점차 낮아지는 결과가 나타난다. 최고 농도가 95 ppb에서 풍속을 10% 증가시킨 경우에는 90 ppb, 풍속을 20% 증가시킨 경우에는 85 ppb로 감소하였다. 풍속이 증가하면서 수렴이 더 강해져 오존은 거의 이류 되지 않는 상태로 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 대규모 오염물질의 배출원이 위치하며 산악과 분지, 연안의 특징적 지형으로 인한 복잡한 국지순환이 발생하는 동남지역을 대상으로 기후변화에 의한 기상요인의 변화와 오존 농도의 변동을 분석하기 위해 수치모의를 수행하였다. 중규모 기상모델인 WRF를 통해 기상장 수치모의를 실시하였으며, 대기질 수치모의는 CMAQ으로 수행하였다.

동남 지역의 부산과 울산, 대구를 중심으로 각 기상요인(기온, 풍속)을 대기질 수치모의에 적용하였다. 기온의 변화에 따른 오존 농도 분석을 위해 기온을 2℃, 6℃ 상승시킨 case T2와 case T6의 수치실험을 실시하였다. 풍속 변화에 따른 오존 농도의 분석을 위해 풍속을 10%, 20% 상승시킨 case WS10%와 case WS20%의 수치실험을 실시하였다.

Fig. 7. Vertical distributions of the simulated convergence & divergence for Busan, Ulsan, Daegu cross section at 1500LST.

Fig. 8(a). Vertical distributions of the simulated ozone concentration for Busan cross section at 1500LST.

Fig. 8(b). Vertical distributions of the simulated ozone concentration for Ulsan cross section at 1500LST.

Fig. 8(c). Vertical distributions of the simulated ozone concentration for Daegu cross section at 1500LST.

수치모의 결과를 통해 기온의 상승에 따라 부산과 울산, 대구의 오존 농도는 증가하는 결과를 보였고, 부산 지역에서 가장 많은 오존 농도의 증가가 나타났으며 기온이 6℃ 상승했을 경우 최고 33.3 ppb 이상 오존의 농도가 증가되었다. 다음으로 울산(6℃, 13.3 ppb), 대구(6℃, 6.2 ppb)의 순으로 오존 농도의 증가를 보였다. 기온을 2℃ 상승시킨 결과에서는 부산에서 10.8 ppb, 울산에서 5.3 ppb 대구에서 2.9 ppb의 증가가 나타났다. 이러한 결과는 지형적 특징으로 인해 내륙지역인 대구에서 연안지역인 부산과 울산 보다 높은 고도까지 오존 농도의 증가가 나타나기 때문이다. 풍속의 증가에 따라 동남 지역의 도시에서는 오존 농도의 감소가 나타났다. 1500 LST의 기준으로 풍속을 20% 증가시켰을 때, 수치모의 결과에서 부산의 경우 오존 농도 32.4 ppb의 감소가 나타났으며, 울산의 경우 17.5 ppb, 대구의 경우 5.2 ppb의 감소가 나타났다. 풍속을 10% 증가시킨 결과 부산에서 28.5 ppb, 울산에서 13.7 ppb 대구에서 2.6 ppb의 감소가 나타났다.

이는 풍속의 증가로 지형적 발산장이 강화 혹은 약화 되어 오존 농도의 감소와 이류를 초래하기 때문으로 판단된다. 수치모의 결과를 통해 도시별 특징을 살펴보면, 부산과 울산의 경우 기온과 풍속의 변화에 따라 오존의 농도가 큰 폭으로 증가·감소하는 경향이 나타났고, 대구의 경우 기상 요인의 변화에 대한 오존 농도의 변동성이 다른 두 도시에 비해 작게 나타났다. 향후 기후 변화에 따른 기상 요인의 변동은 불가피 할 것으로 전망되는 가운데 각 도시의 기상 요인에 의한 오존 농도의 변동성 자료는 활용도가 높다고 전망되며, 이에 따른 오존에 관한 저감 대책은 도시별 기상요인의 변동성을 고려해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)의 지원을 받아 연구되었음을 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 임현호, 2009, 상세 해수면 기온자료의 반영에 따른 국지 기상장 개선에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지, 25, 304-315.
- 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.
- Fujibe, F., Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan, 2009, INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, 29(12), 1811-1822.
- 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.
- Jianhui, B., Gengchen, W., Mingxing, W., 2005, An empirical correlation between surface O₃ and its factors, Atmospheric Environment, 39(25), 4419-4423.
- 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.