

Research Paper

울산 지역 대기질 모의능력 개선을 위한 배출량자료 평가

조유진 · 김철희

부산대학교 대기환경과학과

Assessment of Emission Data for Improvement of Air Quality Simulation in Ulsan

Yu-Jin Jo · Cheol-Hee Kim

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Korea

요약 : 배출량 자료는 대기질 수치모의에 있어서 큰 영향을 주는 요소로서 정확한 대기질 수치모의를 위해서 배출량 자료의 정확성과 신뢰도 향상은 대기질 모델 연구에 있어 필수적이다. 본 연구에서는 울산지역을 대상으로 2003년과 2010년 CAPSS 배출량 자료인 CAPSS-2003과 CAPSS-2010를 입력자료로 하여 WRF-CMAQ 모델을 수행하여 울산지역 배출량 자료의 타당성을 검토하였다. 우선 오염물질의 장거리 수송 영향을 배제하기 위하여 울산지역 자체 내의 배출량 영향이 우세한 종관 기상조건을 가진 사례일을 선정하고 선정된 사례일에 대해서 WRF-CMAQ모델을 수행한 후 그 결과인 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ 농도와 관측 값을 비교하여, 과소 혹은 과대 모의되는 정도를 분석하여 모의결과를 보정 할 수 있는 'scaling factor'를 제시하였다. 그 결과 CAPSS-2003을 이용한 모의결과는 CO와 NO₂에 대해서는 관측과 유사한 수준으로 모의하였으나 SO₂는 약 12배 과대모의, PM₁₀은 약 27배나 과소모의하는 결과를 얻었다. 반면 CAPSS-2010을 이용한 모의결과에서는 CO와 NO₂의 모의결과는 유사하였으며, SO₂는 약 2배 과대모의, PM₁₀은 약 5배 과소모의 하여 SO₂와 PM₁₀ 배출량이 상당히 개선됨을 확인하였다. SO₂와 PM₁₀ 역시 이전 보다는 관측에 가깝게 모의되었으나 현실적 모델링 결과를 도출하기 위해서 배출량은 향후 개선되어야 할 부분으로 판단되었다. 따라서 보다 현실적인 모델링 결과를 도출하기 위해서는 본 연구에서 제시한 울산 지역 배출량의 'scaling factor'를 이용하면 보다 안정된 모델링 결과가 도출 될 것으로 판단된다.

주요어 : CAPSS 배출량 자료, 대기질 수치 모의, 배출량 자료 검증

Abstract : Emission source term is one of the strong controlling factors for the air quality simulation capability, particularly over the urban area. Ulsan is an industrial area and frequently required to simulate for environmental assessment. In this study, two CAPSS (Clean Air Policy Support System) emission data; CAPSS-2003 and CAPSS-2010 in Ulsan, were employed as an input data for WRF-CMAQ air quality model for emission assessment. The simulated results were compared with observations for the local emission dominant synoptic conditions which had negative vorticities and lower geostrophic wind speed at 850hPa weather maps. The measurements of CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ concentrations were compared with simulations and the 'scaling factors' of emissions for

CO, NO₂, SO₂, and PM₁₀ were suggested in aggregative and quantitative manner. The results showed that CAPSS-2003 showed no critical discrepancies of CO and NO₂ observations with simulations, while SO₂ was overestimated by a factor of more than 12, while PM₁₀ was underestimated by a factor of more than 20 times. However, CAPSS-2010 case showed that SO₂ and PM₁₀ emission were much more improved than CAPSS-2003. However, SO₂ was still overestimated by a factor of more than 2, and PM₁₀ underestimated by a factor of 5, while there was no significant improvement for CO and NO₂ emission. The estimated factors identified in this study can be used as 'scaling factors' for optimizing the emissions of air pollutants, particularly SO₂ and PM₁₀ for the realistic air quality simulation in Ulsan.

Keywords : CAPSS emission data, Air quality simulation, Emission data assessment, Scaling factor

I. 서론

최근 중국에서 배출된 오염물질의 장거리 이동으로 우리나라 대기질 악화 현상이 빈번하게 발생하고 있으며 황사, 미세먼지 등 대기질 예보에 대한 국민들의 관심과 인식 또한 매우 높아지고 있다. 환경부에서는 대기오염 실태파악 및 환경기준 적합여부 판단의 기초자료로 활용하기 위해 국가대기오염 측정망을 통해 CO, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등을 측정하고 있으며, 2014년 2월부터는 미세먼지 예·경보제를 전면적으로 시행하고 있다. 이러한 미세먼지 예보는 대기오염물질의 수치모의를 기반으로 시행되고 있으며, 수치모의의 입력 자료인 배출량 자료는 미세먼지 등의 대기질 예보 적중률에 매우 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

울산지역은 국가산업단지조성사업으로 대단위 공업단지가 조성되었고 거대한 규모의 산업단지가 들어서며 따라 공장이 밀집된 지역이 많다. 이에 따라 울산지역은 1986년부터 환경정책기본법에 의해 대기오염 특별 대책지역으로 지정되어 있으며, 타 지역보다 엄격한 배출허용기준이 적용되고 있다(변승혁 외, 2009). 울산지역의 이러한 특수성 때문에 대기오염물질에 대한 농도 측정 및 화학적 분석에 대한 선행 연구는 꾸준히 수행되어오고 있다(나광삼 외, 1998; 문지용 외, 2001). 반면 모델링 연구는 주로 서울 및 수도권 등 특정 지역에 편중하여 연구되는 경향이 많았으며, 특히 울산은 공단지역이면서도 모델링을 위한 기초 연구조차 많지 않았고 모델링과 연관된 울산 지역 배출량 특성이나 배출량 자료 검증에 대한 연구

또한 충분히 이루어지지 않았다.

대기 중 오염물질의 농도는 자체 오염원에서 배출되는 오염물질에 의해 결정될 뿐만 아니라 종관기상장에 따라 인접지역에서 배출된 오염물질의 장거리 수송에 의한 영향을 크게 받으며, 모델링을 통한 대기질 진단은 환경영향평가에 있어 중요하다. 특히 우리나라는 지리적 특성상 동북아시아 및 중국의 풍하측에 위치하여 풍상측에서 과다 배출된 인위적인 오염물질과 몽골 등 황사 발원지에서 수송된 자연적인 오염물질의 영향을 직·간접적으로 받고 있다(박신영 외, 2012). 따라서 보다 의미있는 환경영향평가를 위한 대기질 모델링을 수행하기 위해서는 그 입력 자료인 배출량 자료가 대단히 중요하며 대기질 모델링의 선행 연구로서 특히 배출량의 불확실성을 평가하여 적절한 배출량을 구축할 필요가 있으며, 또한 특정 지역의 배출량 자료를 평가하기 위해서는 장거리 이동 영향을 최대한 배제하여 보다 과학적이고 합리적으로 평가되어야 한다.

본 연구에서는 울산지역을 대상으로 대기질 모델링을 위한 기초 연구로서 현재 통합대기질예보센터에서 이용되고 있는 CAPSS 배출량 자료의 특성을 분석하였다. 먼저 대기오염물질의 장거리 이동 영향을 최소화하고 지역 자체 배출량이 해당지역의 대기질에 중요하게 작용하는 기상조건을 선정하고, 선정된 날을 대기화학 수송모델인 WRF-CMAQ(Weather Research and Forecasting-Community Multiscale Air Quality)모델로 수행하여 그 결과를 대기오염측정망에서 직접 측정된 농도와 비교함으로써 울산 지

역 배출량 자료에 대한 정량적인 평가를 수행하였다.

II. 자료 및 연구방법

본 연구에서는 환경부의 대기정책수립지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)에서 제공하는 2003년과 2010년 울산지역 배출량 자료 (각각 CAPSS-2003과 CAPSS-2010으로 명명함)의 공간분포 특성과 두 배출량 자료간의 오염물질별 차이를 분석하였으며 나아가 WRF-CMAQ 모델의 배출량 입력자료로 사용하였다. 모델 및 배출량 자료의 지리적 범위는 울산지역 전체를 포함하는 128.9°~129.6°E, 35.25°~35.84°N이다. CAPSS 배출량 자료는 배출계수를 이용하여 모델링에 활용할 수 있는 지자체단위별 격자별 배출량을 산출하는 시스템이다 (김정·장영기, 2014).

울산지역의 배출량 검증을 위하여 본 연구에서 사용된 대기질 수치모델은 국내에서도 많이 사용되고 있는 CMAQ(Community Multiscale Air Quality, v.4.6) 모델로서, 미국 EPA가 정한 규제모형 중에서 국내에서는 제일 많이 이용되는 3차원 광화학 오일러리안 대기질 모델이다. CMAQ은 대기 중 오염농도, 건성침적, 습성침적 등을 관련 물리·화학 반응 모듈을 사용함으로써 3차원 공간상에서 매 시간별 오염물질의 농도를 산정하게 된다(Byun *et al.*, 1999).

CMAQ 모델을 구동하기 위하여 필요한 기상 자료 생성은 기상모델인 WRF(Weather Research and Forecasting Model, v.3.5.1)를 이용하였으며, MCIP (Meteorological-Chemistry Interface Processor, v.3.6)을 이용하여 CMAQ 대기질 모델의 입력자료 형태로 변환하였다. WRF 모델은 완전압축성 비정수계(Fully compressible nonhydrostatic)모형으로 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계, 연직격자로는 오일러리안 질량 좌표계(Mass-bases terrain following coordinate)를 사용한다(국립환경과학원, 2011). 도시규모 특성을 모의하기 위하여 1km의 상세한 공간 해상도와 27개의 연직층으로 모델을 구성하였으며 모델 수행기간은 2009년으로서 각 계절을 대표하는 1, 4, 7, 10월을 대상으로 하였다.

CAPSS-2003과 CAPSS-2010을 이용하여 모의된 오염농도 값의 검증을 위해 환경부에서 운영하는 울산지역의 13개 대기오염측정망에서 측정된 1시간 평균 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ 농도 값을 이용하였으며, 본 연구의 필요에 따라 13개 지점을 4개 구역-A1(주거 지역), A2(공단 지역), A3(항구 지역), A4(조선소 지역)-으로 구분하여 울산 전체와 각 구역별 분석을 병행하였다. Figure 1에 울산지역의 대기오염측정망 위치와 4개 구역을 나타내었다.

대기오염물질의 장거리 수송 영향을 배제하고 자체 배출량 영향이 우세한 날을 선정하기 위하여 이전 연구 방법(박신영 외, 2012)을 참고하여 당일 두 가지 종관기상의 조건, 한반도 상공 850hPa 와도 (vorticity, $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$)와 지균폭속을 사용하였다. 즉 와도의 부호가 (-)이면서 지균폭속이 적은 (예를 들어 4.5m/s 이하) 날을 배출량 분석의 사례일로 선정하였다. 와도의 부호가 (-)이며 지균폭속이 약하다는 것은 한반도 상공의 기압 시스템의 이동 속도가 느려서 자체 배출된 대기오염물질이 해당 지역 내에 갇혀 있고 외부와의 통풍(ventilation)이 적음을 의미한다. 850hPa 와도와 지균폭속은 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/

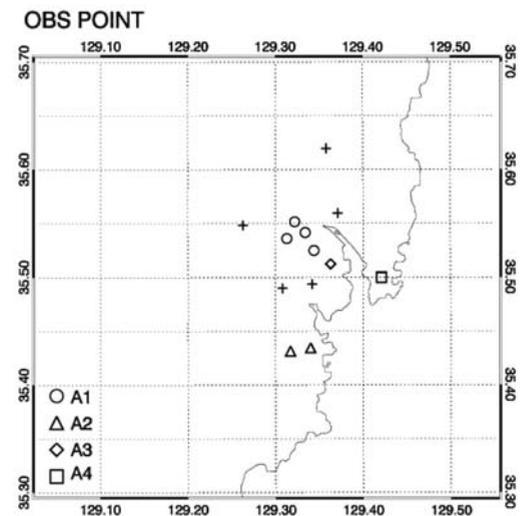


Figure 1. Locations of air quality monitoring network in Ulsan and four subdivided areas : A1(residential area), A2(industrial complex), A3(port), A4(shipyard)

National Centers for Atmospheric Research)의 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final analyses) 자료로 부터 한반도 중앙(37°N, 128°E)을 기준으로 동서방향과 남북방향으로 4개의 격자점을 잡고 와도 및 지균풍속의 동서(u_g) 및 남북(v_g)성분을 구하여 지균풍속($|V_g| = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}$)을 계산하였다(박신영 외, 2012).

결론적으로 본 연구에서는 장거리 이동 영향을 최대한 배제하고 자체 대기오염 배출량이 우세한 정체성 사례일을 대상으로 두 배출량 자료를 입력자료로 이용하여 모델링을 수행하고, 그 결과와 관측 값을 정량 비교하여 보다 정확한 지역규모 배출량 자료를 간접적으로 검증하고자 한다. 이를 위하여 대기질 모델의 입력자료인 배출량 자료의 문제점을 분석하고 개선하여 보다 현실적인 모델링 결과를 도출하기 위한 각 오염물질별 배출량 scaling factor를 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 배출량 자료 비교

CAPSS 배출원 분류체계는 2007년부터 도로이동오염원으로 분류되던 도로 재비산 먼지를 대분류 비

산먼지로 분리하였고, 자연오염원을 기타 먼오염원으로 이동하여 산불 및 화재로 인한 배출량을 추가하여 CAPSS-2003에서는 11개였던 대분류에서 CAPSS-2010에는 12개 대분류로 변경되었다(국립환경과학원, 2012). Figure 2는 전국의 2003년과 2010년 대분류별 대기오염물질 배출량을 나타낸 것으로, CO, NO_x, SO_x의 배출량은 감소, PM₁₀의 배출량은 증가한 것으로 나타났다. CO는 CAPSS-2010 도로이동오염원(CO 배출량의 약 70%를 차지)의 배출량이 감소하여 총 CO 배출량이 소폭 감소하였고, NO_x의 경우 자동차 주행거리감소 및 자동차 배출개선 등으로 도로이동오염원 부문과 에너지산업 부문에서 감소하여 전반적으로 NO_x 배출량이 감소하였다. SO_x는 주요 배출원인 에너지산업 연소 부분이 정부의 저유황유 공급정책 및 청정연료 사용 확대 시행에 따라 지속적으로 감소하였고, 특히 도로이동오염원 부문의 경우 2005년 10월부터 저황경유에서 초저황경유로 전환되어 배출량이 대폭 감소한 것으로 분석하였고, PM₁₀의 경우 누락된 수입무연탄 통계자료가 추가되어 제조업 연소 부문에서 배출량이 증가하여 전반적인 PM₁₀ 배출량이 증가한 것으로 조사되었다(국립환경과학원, 2012).

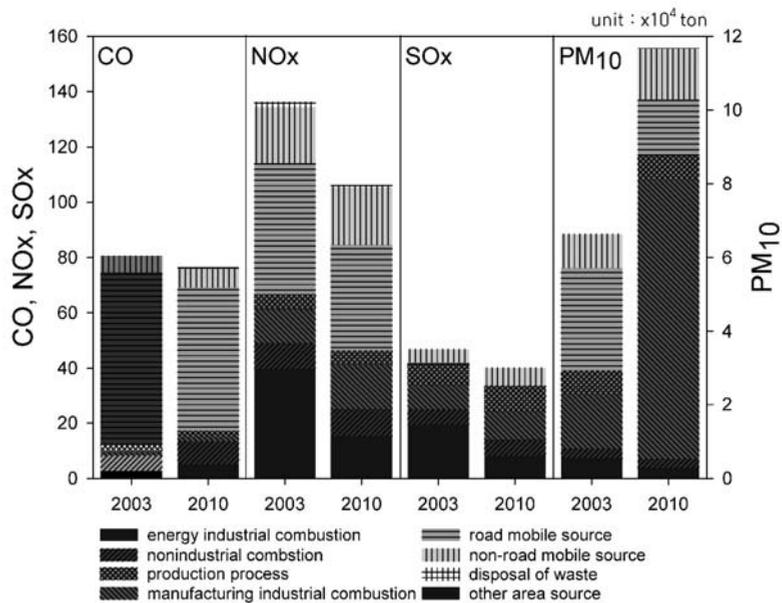


Figure 2. Emission amounts of CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ with the contribution of emission source categories

Figure 3는 CAPSS-2003과 CAPSS-2010의 정량적 차이를 울산전체와 각 구역-A1(주거지역), A2(공단지역), A3(항구지역), A4(조선소지역)-별로 나타낸 것이고 Figure 4은 두 배출량 자료의 공간분포를 나타낸 그림이다. 공간분포는 각 오염물질별로

월평균 배출량을 나타낸 것으로서 1, 4, 7, 10월이 모두 유사한 분포를 보였다. 본 연구에서는 대표적으로 1월의 결과만을 제시하였다.

그 결과 CO의 경우 CAPSS-2003에 비해 CAPSS-2010에서 울산전체와 모든 구역에서 크기는 8.8배

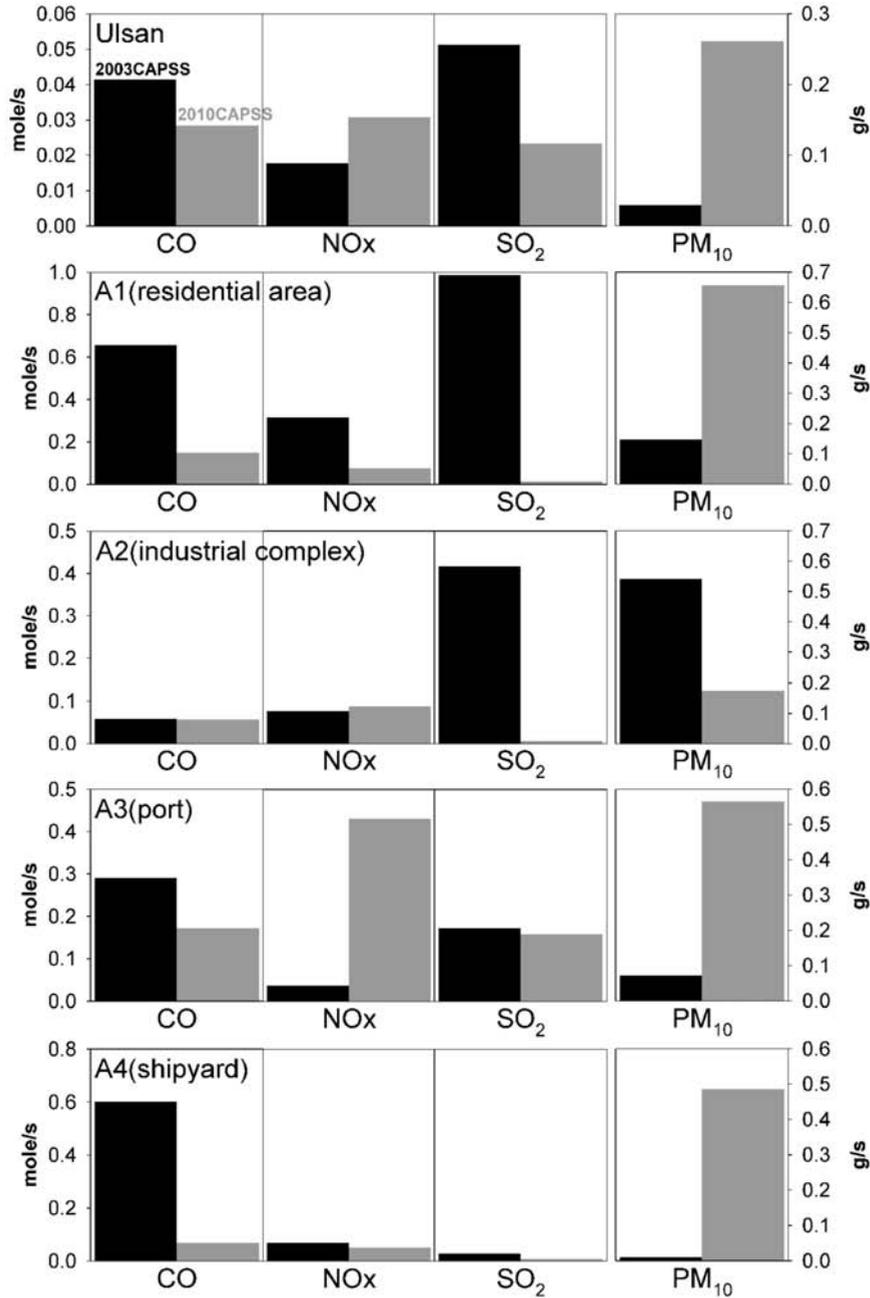


Figure 3. Quantitative differences between CAPSS-2003 and CAPSS-2010 emission data

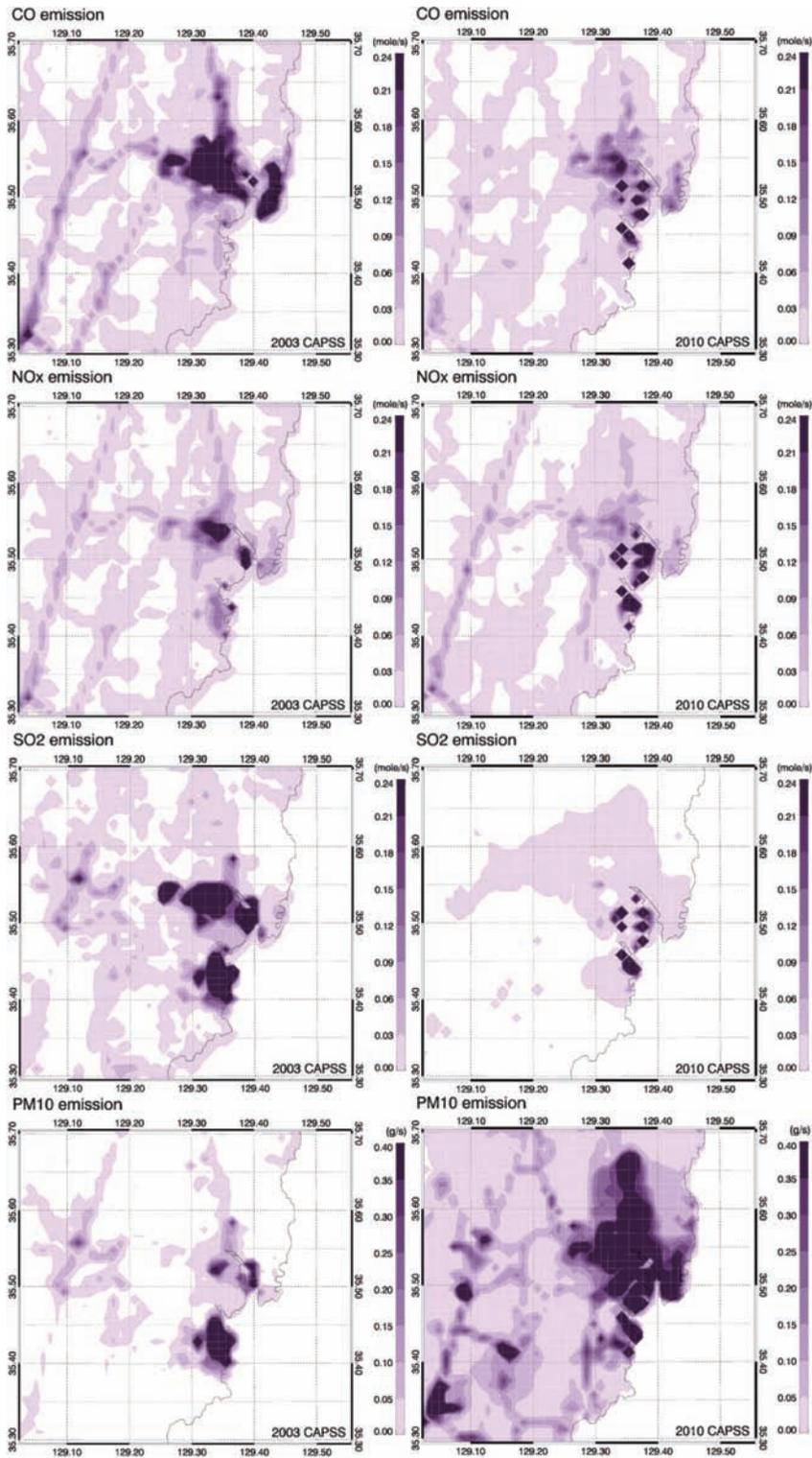


Figure 4. Spatial distributions of CO, NO_x, SO₂ and PM₁₀ emissions of CAPSS-2003(left panel) and CAPSS-2010 (right panel)

(A4구역)까지 감소하였으며, 먼 오염원의 배출량이 CAPSS-2003에 비하여 감소하였고 상대적으로 공단 등의 점 오염원이 더 뚜렷하게 나타났다. NO_x의 경우 CAPSS-2003에 비하여 CAPSS-2010 배출량이 전체적으로 약 1.7배 증가하였고, 구역별로는 A2구역과 A4구역은 큰 변화가 없었으나 A1구역은 3.5배 감소, A3구역은 13배 이상 크게 증가하였다. 또한 CO와 마찬가지로 CAPSS-2003 보다 점 오염원이 더 뚜렷하게 나타났다. SO₂의 경우 전체적으로 배출량이 감소하였고 특히 A1구역과 A2구역에서 무려 80배 이상 배출량이 감소하였다. SO₂ 역시 CO, NO_x와 유사하게 점 오염원의 특성이 더 뚜렷하게 나타났다. PM₁₀의 경우 전체 배출량이 CAPSS-2010에서 약 9.5배 증가하였으며 A2 구역을 제외한 모든 구역에서 많게는 45배(A4구역)까지 배출량이 크게 산출되었으며, CAPSS-2010에서 주거 밀집지역 등의 먼 오염원, 도로 등의 선 오염원, 공단 등의 점 오염원의 특성이 모두 잘 나타났다.

CAPSS 배출량은 배출원 추가 및 산정방식 개선 등에 의해 해마다 일부 배출원의 산정방법이 달라지고 있어 과거 자료와의 직접적인 비교에 어려운 점이 있다(국립환경과학원, 2012). 이러한 점을 고려하더라도 울산지역의 CAPSS-2010은 CAPSS-2003에 비해 급격히 증가 또는 감소하는 경향이 나타났는데, 예를 들어 SO₂ 배출량의 80배 이상 감소 혹은 PM₁₀ 배출량의 45배 증가 정도의 차이는 결국 추정된 배출량 자료의 신뢰도가 매우 낮고 안정화 되지 못함을 간접적으로 의미하여, 따라서 보다 현실적인 대기질을 모의하기 위한 신뢰도 확보 차원의 배출량 자료 검증이 시급한 것으로 판단된다.

2. 정체성 사례일 선정

모델링 대상 기간으로 선정된 2009년에 대하여 통풍이 적은 경우의 종관기상상태를 만족하는 경우는 총 40일이었으며, 각 선정된 사례별 지균폭속과 와도를 Table 1에 나타내었다. 또한 Table 2에 사례기

Table 1. Summary of meteorological variables for local emission dominant cases selected in 2009

case	Geostrophic wind speed (m/s)	Vorticity ($\times 10^{-6} \text{s}^{-1}$)	case	Geostrophic wind speed (m/s)	Vorticity ($\times 10^{-6} \text{s}^{-1}$)
1/29	3.89	-11.2	8/4	2.01	-4.1
2/3	3.38	-3.9	8/5	3.28	-5.0
2/27	4.24	-0.2	8/6	4.14	-10.7
3/2	2.63	-1.9	8/7	1.67	-13.0
4/10	3.02	-4.6	8/8	2.34	-4.7
4/23	4.23	-0.8	8/9	4.13	-0.3
5/26	2.04	-1.3	8/10	1.83	-6.6
6/3	3.31	-12.9	8/11	4.13	-22.5
6/8	2.51	-1.0	8/14	3.96	-2.8
6/18	3.78	-4.5	8/18	4.39	-2.1
7/3	3.87	-3.6	8/29	2.06	-5.0
7/4	2.75	-4.4	9/3	0.57	-7.7
7/5	0.96	-1.8	9/4	1.08	-5.9
7/6	4.20	-3.0	9/10	4.07	-11.6
7/24	2.46	-14.5	9/22	3.38	-5.4
7/25	3.29	-14.4	9/28	3.32	-15.8
7/26	0.84	-3.5	10/11	1.95	-0.2
7/28	1.91	-7.3	10/30	4.38	-5.0
7/29	4.04	-0.3	11/9	0.88	-14.7
8/3	0.65	-8.3	12/9	3.00	-6.0

Table 2. Statistics summary of CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ simulations

	Correlation				RMSE			
	CO	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀	CO	NO ₂	SO ₂	PM ₁₀
Jan.	0.50	0.68	0.26	0.15	0.46	0.02	0.05	47.21
Apr.	0.58	0.56	0.30	0.36	0.40	0.02	0.06	70.36
Jul.	0.27	0.26	0.12	0.44	0.27	0.01	0.04	41.67
Oct.	0.56	0.69	0.21	0.27	0.33	0.01	0.06	60.06

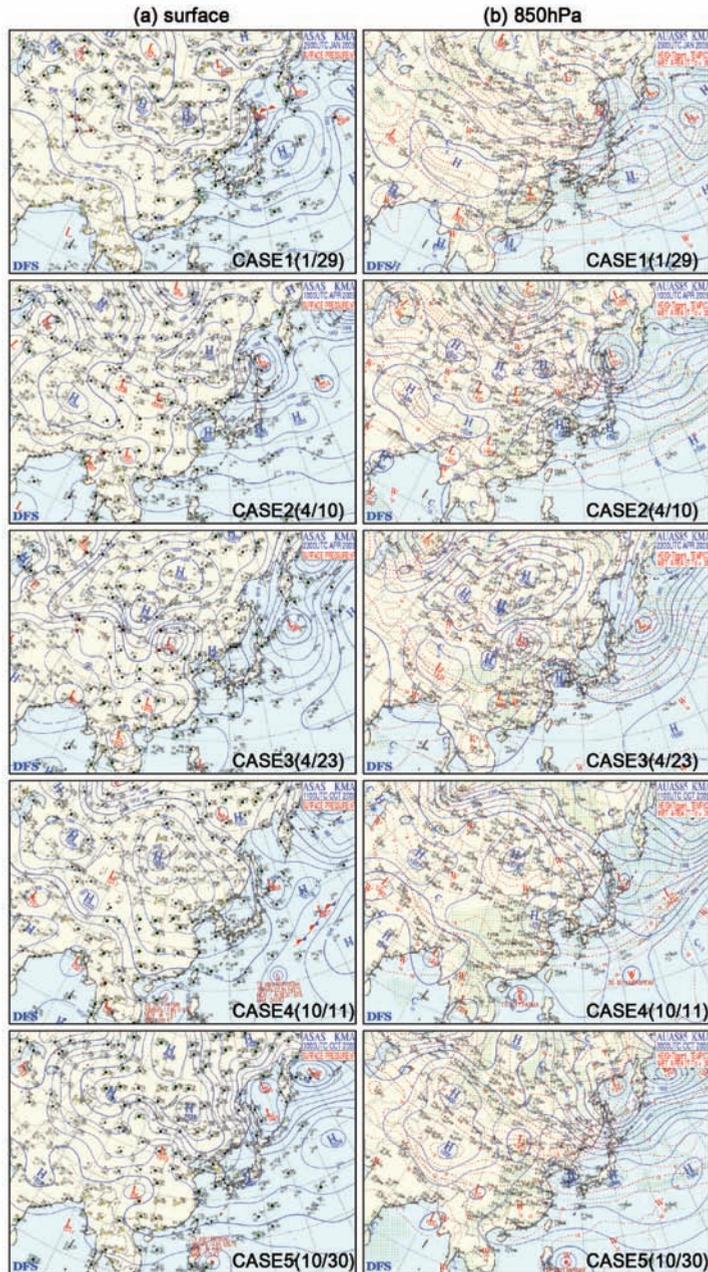


Figure 5. Synoptic weather charts of (a) surface and (b) 850hPa at 00UTC for local emission dominant cases

간(2009년 1, 4, 7, 10월)에 대하여 모의된 농도 값과 관측 값의 상관계수(Correlation coefficient)와 RMSE(Root Mean Squared Error)를 수록하였으며, 그 결과 모든 오염물질에 대해 특히 7월에 상관관계가 낮게 나타났다. 이는 7월에 증가하는 강수 등 오염농도에 영향을 줄 수 있는 기상요건이 더 다양해짐에 따라 모델이 기상조건을 모의하는데 있어서 정확도가 감소한 것으로 사료되어 상대적으로 상관계수가 높은 1, 4, 10월의 경우만을 선정하여 본 연구의 배출량 자료 검증 사례일로 최종 선정하였다.

최종 선정된 각 사례일의 00UTC 지상과 850hPa 일기도를 Figure 5에 나타내었으며 모든 사례일에서 한반도 상공에 고기압의 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 선정된 사례일은 대부분 이러한 중관기상 조건의 영향으로 안정된 기류가 정체되어 외부에서 배출된 오염물질의 장거리 이동 및 확산에

한 영향이 적고 대신 자체 대기오염 배출량 영향이 우세하여 지역 규모의 배출량을 검증해 볼 수 있는 좋은 사례로 판단된다.

또한 모든 오염물질에 대해서 사례기간 전체(2009년 1, 4, 7, 10월)에 대한 일평균 관측 농도 값은 CO(0.38ppm), NO₂(23.37ppb), SO₂(0.007ppm), PM₁₀(50.18 μ g/m³)였으며, 이에 비해 본 연구에서 선정된 사례일의 평균 농도 값은 CO(0.56ppm), NO₂(30.88ppb), SO₂(0.009ppm), PM₁₀(60.09 μ g/m³)로서 상대적으로 높게 나타났다.

3. 모의 결과 고찰

1) 배출입력자료에 따른 모의결과 비교

각 사례일별로 두 배출자료를 이용한 모의결과를 관측 값과 비교하여 Figure 6에 나타내었으며 각 일

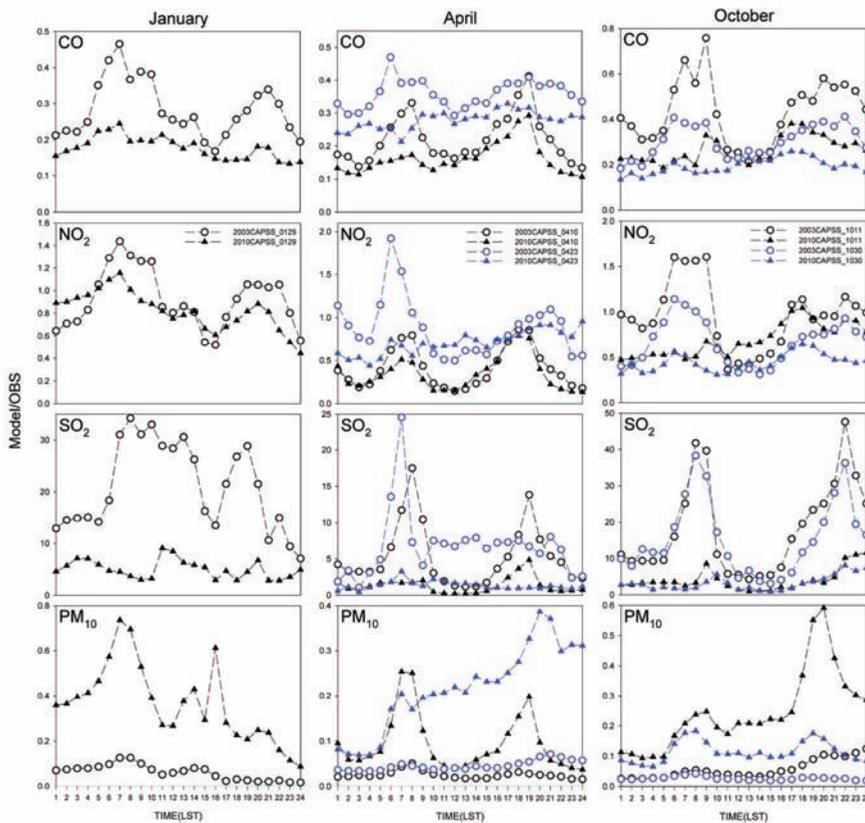


Figure 6. Diurnal variations of ratios of simulations to observations for CO, NO₂, SO₂, and PM₁₀ for the case of CAPSS-2003 and CAPSS-2010

Table 3. Average concentrations for CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀, and the ratio of simulations to observations in each selected cases-CASE1(1/29), CASE2(4/10), CASE3(4/23), CASE4(10/11), and CASE5(10/30)

POLLUTANT	CASE	OBS	MODEL		MODEL/OBS	
			CAPSS-2003	CAPSS-2010	CAPSS-2003	CAPSS-2010
CO (ppm)	CASE 1	0.742	0.208	0.129	0.281	0.174
	CASE 2	0.715	0.157	0.113	0.220	0.158
	CASE 3	0.347	0.125	0.096	0.361	0.276
	CASE 4	0.426	0.184	0.110	0.433	0.259
	CASE 5	0.591	0.182	0.111	0.307	0.188
	mean	0.564	0.171	0.112	0.320	0.211
NO ₂ (ppb)	CASE 1	35.750	32.669	28.867	0.914	0.807
	CASE 2	48.327	19.447	15.714	0.402	0.325
	CASE 3	13.291	11.607	9.525	0.873	0.717
	CASE 4	23.157	22.730	16.094	0.982	0.695
	CASE 5	33.887	23.066	14.841	0.681	0.438
	mean	30.882	21.904	17.008	0.770	0.596
SO ₂ (ppm)	CASE 1	0.006	0.121	0.027	21.806	4.808
	CASE 2	0.019	0.092	0.023	4.938	1.208
	CASE 3	0.008	0.043	0.009	5.615	1.186
	CASE 4	0.005	0.074	0.016	16.112	3.499
	CASE 5	0.006	0.082	0.017	12.966	2.675
	mean	0.009	0.082	0.018	12.287	2.675
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CASE 1	50.411	2.843	17.127	0.056	0.340
	CASE 2	106.10	2.616	9.713	0.025	0.092
	CASE 3	33.297	1.484	7.063	0.045	0.212
	CASE 4	42.625	2.329	10.168	0.055	0.239
	CASE 5	78.002	2.037	8.822	0.026	0.113
	mean	62.088	2.262	10.579	0.041	0.199

평균 농도와 비(ratio)를 Table 3에 나타내었다. 모의 결과만을 놓고 볼 때 CAPSS-2003 결과는 CO는 약 3배 과소모의, NO₂는 약 1.4배 과소모의, SO₂는 약 12배 과대모의, PM₁₀는 무려 27배 과소 모의하여 SO₂와 PM₁₀의 모의결과가 관측 값과 특히 큰 차이를 보였다.

각 오염물질별로 살펴보면 PM₁₀의 경우 국내외 다른 선행연구들에서도 비슷한 결과를 확인 할 수 있는데(경기개발연구원, 2010), 이렇게 PM₁₀ 농도가 과소모의 되는 이유에는 여러 분석 결과가 보고되고 있으며, 특히 CAPSS 배출량 중 PM₁₀ 비중이 큰 생물성연소에 따른 배출량 산정이 제외된 점, 비산먼지 배출량에 대한 신뢰도가 낮은 점 등으로 인해 결과적으로 PM₁₀ 배출량이 매우 과소평가되었다는 점이 주

목할 만하다(장영기 외, 2009). SO₂의 경우 다른 오염물질과는 다르게 오히려 약 12배 과대 모의하는 것으로 나타났는데, 이는 저황유와 LNG 등 청정연료의 공급확대, 배출 규제강화 등을 포함한 정부의 지속적인 연료규제 제도로 인해 지난 20년간 꾸준히 감소하고 있는 SO₂농도 추세(대기환경연보, 2012)가 전국적으로 확인이 되었으나, 울산의 경우 공단으로 인한 여러 점 오염원 형태의 배출량이 많아서 배출자료 구축에 정확히 반영되지 못한 것으로 판단된다.

요약하면 CAPSS-2003에서는 최신의 SO₂ 배출량 감소추세와 실제 PM₁₀ 배출량이 제대로 반영되어 있지 못하여 SO₂와 PM₁₀의 모의결과가 관측 결과와 큰 차이를 보였고, 따라서 CAPSS-2003을 이용하여 모델링을 수행할 경우 대기화학적 생성 과정에 대한

불확실성을 충분히 감안한다고 하더라도 SO₂와 PM₁₀의 모델링 결과 해석에는 매우 비현실적인 농도가 모의될 수 있음을 알 수 있다.

반면 CAPSS-2010을 사용한 경우 CO를 약 5배 과소모의, NO₂를 약 1.8배 과소모의, SO₂를 약 2.6배 과대모의, PM₁₀을 약 5.7배 과소모의하여 모든 사례일에서 CAPSS-2010을 이용한 모의결과의 신뢰도가 CAPSS-2003을 이용한 결과보다 CO와 NO₂에 대해서는 감소, SO₂와 PM₁₀에 대해서는 증가함을 확인하였다.

각 오염물질별로 살펴보면 CO와 SO₂의 경우 모든 시간대에서 기존보다 농도를 낮게 모의하였으며, 특히 오전과 저녁의 모의농도가 크게 감소하여 CO의 신뢰도가 감소하고 SO₂의 신뢰도는 크게 증가하였다. NO₂의 경우 대부분의 사례일에서 기존에 오전에 관측 값보다 높게 모의되었던 농도가 관측 값과 유사한 수준으로 모의되었으나 전반적으로는 기존보다 낮게 모의하는 경향을 보여 신뢰도가 약간 감소하였다. 이렇게 CO, SO₂, NO₂의 모의농도가 감소한 것은 CO 배출량의 약 70%를 차지하면서 NO₂의 주요 배출원이기도 한 도로이동오염원에서의 배출량이 크게 감소하고, SO₂의 주요배출원인 에너지산업 연소 부분에서의 배출량이 크게 감소하였기 때문인 것으로 보인다. PM₁₀의 경우 모든 시간대에서 기존보다 농도를 높게 모의하였으며, 특히 오전과 저녁시간의 농도가 크게 증가하여 CAPSS-2003을 사용했을 경우에 비하여 모델의 신뢰도가 증가함을 확인하였다. PM₁₀의 모의농도가 증가한 것은 2003년 자료에서는 누락되었던 수입무연탄 통계자료가 확보되어 주요배출원인 제조업연소 부분의 배출량이 크게 증가했기 때문인 것으로 보인다.

2) 배출량 자료의 일변화 경향 분석

두 배출량 자료를 이용한 모의 결과 및 관측 값의 일변화 경향을 비교하여 Figure 7에 나타내었고 Figure 8에 각 오염물질의 배출량 일변화를 나타내었다. 그 결과 CO와 NO₂의 경우 관측 값에서 오전과 오후에 두 번의 피크가 나타나는 일변화 경향을 보였으며 CMAQ 모델결과에서도 두 번의 피크가 모의되

었다. 또한 CAPSS-2003을 이용한 모의결과에서 오전의 피크가 과대모의 되었으나 CAPSS-2010을 이용한 경우 이러한 경향이 개선되어 관측 일변화와 유사하게 개선되었다. 결국 이러한 일변화 경향의 차이는 두 배출량 자료의 CO와 NO_x 배출량의 일변화 경향 차이에서 기인한 것으로 볼 수 있는데, CAPSS-2003의 경우 배출량이 오전 7~10시 사이에 가장 높게 산정되었던 반면, CAPSS-2010의 경우 오전의 배출량이 감소하고 오후 3~5시 사이에 배출량의 피크를 보였다.

SO₂와 PM₁₀의 경우 CO와 NO₂와 마찬가지로 오전과 오후에 두 번의 피크가 모의되었으나 관측에서는

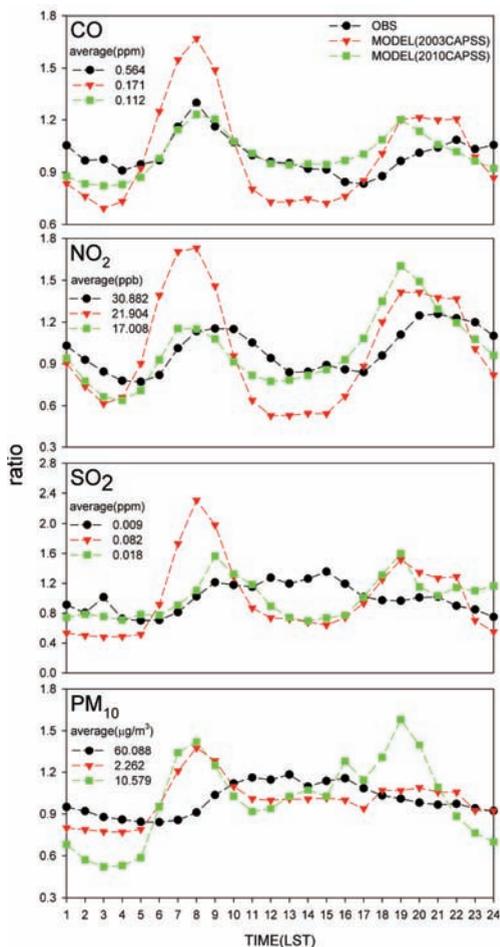


Figure 7. Diurnal variations of simulations and observations for CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀. All of concentrations are normalized by mean values

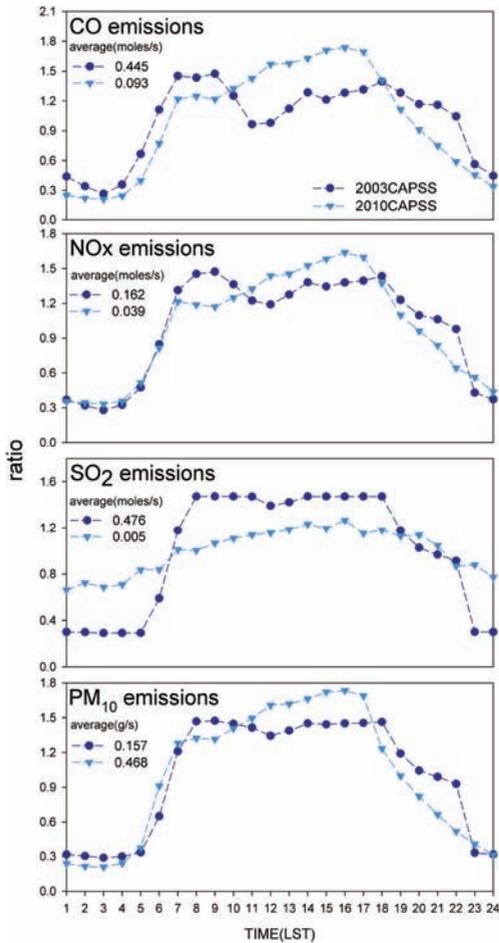


Figure 8. Diurnal variations of CO, NO_x, SO₂, and PM₁₀ emissions for CAPSS-2003 and CAPSS-2010. All of emissions are normalized by mean values

두 번의 피크가 나타나지 않아 CMAQ 모델이 일변화 경향을 제대로 모의하지 못하였다. 하지만 SO₂의 경우 CAPSS-2003을 이용한 모의결과에서 자정부터 오전 11시까지 관측 일변화에 비해 농도변화의 폭이 크게 나타났으나 CAPSS-2010을 이용한 경우 관측되는 일변화와 유사한 수준으로 개선되었다. 이는 SO₂ 배출량 변화에서도 확인 할 수 있는데, 전반적으로 일변화 폭이 CAPSS-2010의 경우 CAPSS-2003에 비해 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. PM₁₀의 경우 CO, NO_x와 마찬가지로 오전의 배출량이 감소하고 오후의 배출량이 증가하였으며, 이로 인해 모의

농도의 일변화에서 관측에서는 나타나지 않았던 오후의 피크가 모의되는 등 여전히 배출량의 일변화에서는 개선의 여지가 많음을 확인할 수 있었다.

요약하면 CAPSS-2003을 이용한 모의결과에서 가장 관측 값과 차이가 많이 났던 SO₂와 PM₁₀의 경우 CAPSS-2010을 이용한 모의 결과를 분석해 볼 때 그 신뢰도가 증가하였으며, 특히 SO₂의 경우 일변화 경향에서도 이전보다 관측과 유사하게 모의되어 상당히 배출량이 개선되었음을 확인하였다. 하지만 CO와 NO₂의 일변화의 경우 CAPSS-2010을 이용했을 때 CAPSS-2003을 이용한 경우 보다 관측 값에 더 유사한 일변화 패턴을 모의하였으나 전반적인 농도 수준은 이전보다 더 과소모의 하였다. PM₁₀의 경우 CAPSS-2010을 이용한 경우 CAPSS-2003을 이용했을 때 보다 상당히 관측 값에 가깝게 모의하기는 하였으나 여전히 그 농도 수준은 과소모의하고 있으며 일변화 경향에서도 관측과 다르게 모되어 CO, NO₂, PM₁₀에 대한 전반적인 배출량 개선이 필요한 것으로 사료된다.

3) Scaling factor를 이용한 모의결과 보정

본 연구에서 과소 혹은 과대 모의되는 정도를 나타내는 단순 수치들은 광화학 반응 등 대기오염물질의 2차 생성에 대한 오차 등을 모두 포함한 것으로 해석되나 본 연구에서는 다른 부차적인 오차는 배출량보다 상대적으로 적다고 판단하고, 모델 결과만을 이용한 단순 선형적 차원에서 배출량 자료를 평가한 결과이므로, 모델 자체 불확실성 및 다양한 모델링 과정에 따른 대기화학적 상대오차가 정량적으로 제시된다면 보다 더 정확한 배출량 오차를 도출할 수 있을 것이다. 하지만 어떠한 경우에도 관측치와 비교하여 모델이 최소 20배 이상 차이가 나는 것은 대기화학 모델링 오차 차원에서 해석할 수 있는 수치라기보다는 원천적인 배출량의 오차에서 기인한 극단적 오차로 해석할 수밖에 없을 것으로 판단된다.

각 오염물질별로 두 배출량 자료를 이용한 모의 결과를 관측값과 비교하여 그 상대적 비(ratio)로 추론된 scaling factor를 Table 4에 제시하였다. 또한 제시된 scaling factor를 확인하기 위하여 모델 결과에

Table 4. The scaling factors of emissions for each pollutant in Ulsan.

	CAPSS-2003	CAPSS-2010
CO	3.30	5.04
NO ₂	1.41	1.82
SO ₂	0.11	0.50
PM ₁₀	27.45	5.87

이를 곱하여 보정된 결과와 관측값을 비교한 산포도 (scatter diagram)를 Figure 9에 나타내었으며, 보정된 결과는 보정 전 보다 훨씬 관측값과 유사해졌음을 확인하였다. 따라서 모델 결과와 배출량과의 선형적 상관성이 어느 정도 유지한다는 가정하에, 본 연구에서 제시한 계수를 각 오염물질별 CAPSS 배출량의 scaling factor로 활용한다면 보다 현실적인 모델링 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만

CAPSS-2003은 배출자료 그 자체의 불확실성이 CAPSS-2010의 경우보다 크다고 판단되므로 CAPSS-2003의 scaling factor로 배출량을 보정하여 사용한 모델 결과가 관측과 더 유사한 결과를 얻는다고 해도 CAPSS-2003의 문제점이 많이 보완된 CAPSS-2010 자료를 scaling factor로 사용하는 것이 더 타당할 것으로 판단된다. 아울러 본 연구에서 제시한 scaling factor는 지역별 변동, 시간별 변동 등을 고려하지 않고 단순히 일평균농도에 초점을 맞추어 계산된 수치이므로 보정 후에 평균적으로는 관측과 더 유사한 결과를 얻을 수 있으나 특정 시간대 및 특정 지역의 관점에서 해석할 때에는 그 신뢰도가 높지 않을 것으로 사료된다.

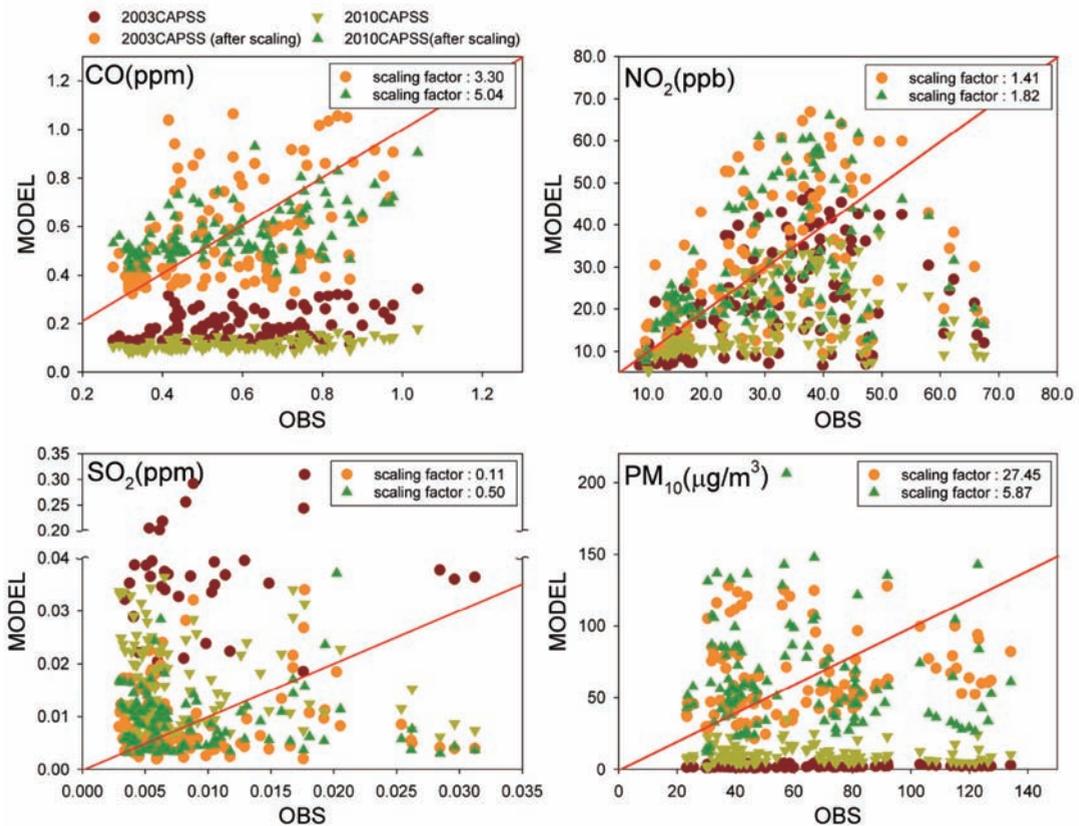


Figure 9. Scatter diagram of the observed and simulated CO, NO₂, SO₂ and PM₁₀ concentrations for all local emission dominant cases. Orange circle and green triangle show the adjusted model results by using scaling factors with the red lines of y=x.

IV. 결론

CAPSS와 같은 배출 입력자료는 대기정책수립, 정책시행 효과분석, 대기오염관련 연구 등의 기초자료로 활용되고 있으며, 본 연구에서 확인한 바와 같이 대기질 수치모의의 결과에 상당한 영향을 준다. 또한 대기오염은 인간의 건강과 생활에 직접적으로 영향을 주며 그로 인해 국민들의 대기질에 대한 관심과 보다 정확한 대기질 예보에 대한 수요가 갈수록 증가하고 있다. 따라서 정확한 대기질 수치모의를 위해서는 배출 입력자료의 정확성과 신뢰도 향상이 필수적이며 이를 위한 연구가 꾸준히 수행되어야 한다.

본 연구에서는 울산지역에 대해 동일한 기상조건에서 CAPSS-2003 및 CAPSS-2010 배출량 자료를 모두 적용하여 대기화학수송모델인 CMAQ을 통해 모의된 CO, NO₂, SO₂, PM₁₀ 농도와 실제 관측된 값을 비교함으로써 배출량 자료에 대한 평가를 수행하였다. 또한 보다 정확한 지역규모 배출량 자료 검증을 위해 외부, 특히 풍상측에서 배출되어 장거리 이동하는 영향을 최대한 배제한 사례일을 선정하여 배출량을 평가하였다.

먼저 CAPSS-2003과 CAPSS-2010 배출량 자료를 비교해 본 결과 CAPSS-2003에 비해 CAPSS-2010에서 전체적으로 점 오염원의 특성이 잘 나타났으며, 일부 구역에서 SO₂ 배출량은 80배 감소하고 PM₁₀ 배출량은 45배나 증가하였다. 이렇게 극단적으로 두 배출량 자료간의 차이가 크다는 것은 결국 울산지역의 배출량의 신뢰도가 낮음을 간접적으로 의미하며, 보다 안정된 배출량 구축이 필요하다. 이를 위해 각 오염물질 별로 배출계수, 적용된 배출량 저감 기술의 고려, 연료 사용량 및 activity data 등이 종합적으로 그리고 보다 정확하게 고려되어야 할 것으로 판단되며, 파악되지 못한 배출목록의 발굴 등의 연구는 계속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

두 배출량을 이용하여 수행한 WRF-CMAQ 모델 결과를 살펴보면, CAPSS-2003 결과에서는 CO, NO₂, PM₁₀ 농도를 과소모의, SO₂ 농도를 과대모의하는 것으로 나타났으며 PM₁₀과 SO₂의 경우 각각 약 27배 과소모의, 약 12배 과대모의를 하여 다른 오염

물질보다 관측 값과 차이가 특히 큰 것을 확인하였다. CAPSS-2010 결과에서는 SO₂와 PM₁₀ 모의결과가 CAPSS-2003을 이용한 결과보다 관측 값에 가깝게 모의되었으며, SO₂의 경우 일변화 경향에서 나타난 문제점도 개선되어 CAPSS-2003보다 신뢰도가 크게 향상되었음을 확인하였다. 하지만 PM₁₀의 경우 이전보다 관측 값에 가깝게 모의를 하긴 했으나 여전히 과소모의를 하고 일변화 경향에서 나타난 문제점 또한 개선되지 않았으며, CO와 NO₂의 경우 CAPSS-2003결과보다 신뢰도가 감소하여 배출량 자료의 개선되어야 할 부분이 많은 것으로 사료된다.

모델링 연구에 있어서 모델 결과가 너무 비현실적인 결과가 도출되면 모델 자체의 개선뿐만 아니라 그 선행 연구로서 모델 입력 자료의 보정을 통한 현실적인 모델 수행 능력을 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 특정 배출량을 이용한 모델 결과를 관측치와 우선 비교하여 과소 혹은 과대 모의되는 정도를 분석하여 과소 또는 과대 모의되는 수준을 평가하였는데, 이 때 도출된 수치들은 단순한 입력자료와 최종 결과치를 선형적으로 반영한 수치이며, 결국 모델 자체 내부 오차 즉, 광화학 반응 등 복잡한 대기화학적 오차 등을 모두 포함한 오차로 그 수치가 전적으로 배출량에 의해 발생한 오차로 해석하기에는 무리가 있다. 하지만 최소한 20배 이상의 배수는 원천적인 배출량의 오차가 제일 크게 기여한 것으로 해석할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 보다 현실적인 모델링 결과를 도출하기 위해서는 본 연구에서 제시한 배출량의 배수차이 만큼을 보정하는 수치, 즉 울산지역 배출량의 'scaling factor'를 사용한다면 보다 안정된 모델링 결과가 도출 될 것으로 판단되며, 이후 모델 자체의 불확실성, 기상 모델의 오차 및 다양한 모델링 과정에 따른 대기화학적 수치해석상의 오차 등 각 과정별 종합적 오차 분석 연구 또한 병행되어야 할 것이다.

본 연구는 울산지역을 대상으로 전 도심지역의 배출 총량을 논의하고 평가하기 위하여 동일한 기상조건하에 서로 다른 두 배출량 자료를 입력자료로 하여 그 모의결과를 비교·분석함으로써 각 배출량 자료의 상대적 문제점을 논의하였다. 이와 같은 연구를

통해 국내 모델링 연구 그룹에서 보다 원천적이고 중요한 정보를 공유할 수 있으며, 나아가 국내 대기질 모델링 연구가 더 현실적이고 성공적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 국립기상과학원의 응용기상기술개발연구(Advanced Research on Applied Meteorology)의 일부지원과 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(NO.2013R1A1A2057732).

인용문헌

- 국립환경과학원. 2011. 국가 대기정책 수립 및 평가를 위한 대기질 모델링 가이드라인에 따른 대기질 모델링 보고서 작성 예시, pp.2-3.
- 국립환경과학원. 2012. 대기오염물질 배출량 2010 국립환경과학원. 대기환경연보(2012), p.31.
- 김동영. 2010. 수도권 대기오염물질 배출의 공간분포 분석, 경기개발연구원, pp.70-71.
- 김정, 장영기. 2014. DARS에 의한 CAPSS 배출자료의 불확도 평가, 한국대기환경학회지, 30(1), 26-36.
- 나광삼, 김용표, 진현철, 문길주. 1998. 울산 대기 중의 입자상, 기체상 물질의 수용성 이온 성분과 휘발성 유기화합물의 농도, 한국대기보전학회지, 14(4), 281-292.
- 문지용, 김영복, 이지영, 정기호. 2001. 울산 대기 중 중금속 분포특성, Journal of analytical science and technology, 14(5), 442-450.
- 박신영, 김연중, 김철희. 2012. 동북아시아 대기오염물질의 이동 패턴에 따른 장거리 수송 특성 연구, 한국대기환경학회지, 28(2), 142-158.
- 변승혁, 이병규, 김지태, 이연송. 2009. 울산지역 고정오염원의 대기오염물질 배출 기여도 평가, 한국대기환경학회 2009 추계학술대회

논문집, pp.411-413.

- 장영기, 김정, 김필수, 신용일, 이호진, 최민애. 2009. 비산먼지와 생물성연소가 보완된 PM₁₀의 지역별 배출량 비교, 한국대기환경학회 2009 춘계학술대회 논문집, pp.169-170.
- Byun DW, Ching JKS (Eds.). 1999. Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report No.EPA-600/R-99/030.

References

- Byeon SH, Lee BG, Kim JT, Lee US. 2009. The Estimation of Source Apportionment of Air Pollutants Emissions from Stationary Sources in Ulsan, Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE, pp.411-413.
- Byun DW, Ching JKS (Eds.). 1999. Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA Report No.EPA-600/R-99/030.
- Jang YG, Kim J, Kim PS, Sin YI, Lee HJ, Choi MA. 2009. Comparison of Regional PM₁₀ Emission Complemented Fugitive Dust and Biomass burning, Proceeding of the 48th Meeting of KOSAE, pp.169-170.
- Kim DY. 2010. Spatial Analysis of Air Pollutants Emission in the Seoul Metropolitan Area, Gyeonggi Research Institute, pp.70-71.
- Kim J, Jang YG. 2014. Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(1), 26-36.
- Moon JY, Kim YB, Lee JY, Jeong GH. 2001. Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Ambient Air of Ulsan Area, Journal of analytical science and technology,

- 14(5), 442-450.
- Ministry of environment. 2011. The Example of Air Quality Modeling Report according to Air Quality Modeling Guideline for National Air Policy Development and Evaluation, pp.2-3
- Ministry of environment. 2012. National Air Pollutants Emission 2010, pp.33-49.
- Ministry of environment, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea 2012, p.31
- Na KS, Kim YP, Jin HC, Moon KC. 1998. Concentrations of Water-soluble Particulate, Gaseous Ions and Volatile Organic Compounds in the Ambient Air of Ulsan, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 14(4), 281-292.
- Park SY, Kim YJ, Kim CH. 2012. Characteristics of Long-Range Transport of Air Pollutants due to Different Transport Patterns over Northeast Asia, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, pp.142-158.