

논문

2016년 국가배출목록 기반 기초 지자체별 초미세먼지 기여도 분석: (VIII) 부산, 경남

Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam

강윤희¹⁾, 유승희¹⁾, 김은혜^{1),3)}, 배민아²⁾, 손규원²⁾, 김순태^{4),*}

¹⁾아주대학교 환경연구소, ²⁾아주대학교 환경공학과,

³⁾국가미세먼지정보센터 배출량조사팀, ⁴⁾아주대학교 환경안전공학과

Yoon-Hee Kang¹⁾, Seunghee You²⁾, Eunhye Kim^{1),3)}, Minah Bae²⁾,
Kyuwon Son²⁾, Soontae Kim^{4),*}

¹⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

³⁾Emission Inventory Management Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Ministry of Environment,
Chungcheongbuk-do, Republic of Korea

⁴⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2021년 9월 13일

수정일 2021년 11월 12일

채택일 2021년 11월 23일

Received 13 September 2021

Revised 12 November 2021

Accepted 23 November 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511

E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

Abstract In this study, source-contributions on PM_{2.5} concentrations in five regions of Busan and eighteen local authorities of Gyeongnam was estimated with the Comprehensive Air quality Model with eXtensions with Particulate Source Apportionment Technology (CAMx-PSAT) for the whole year of 2016. The domestic contributions to the annual mean PM_{2.5} concentrations in Busan and Gyeongnam were 8.5 µg/m³ and 7.5 µg/m³, respectively. In Gyeongnam, the provincial self-contribution to the annual mean PM_{2.5} was the higher (2.8 µg/m³) than that from the individual neighboring province. The contribution of Jeonnam, Gyeongbuk, Chungnam, and Ulsan to the annual mean PM_{2.5} in Gyeongnam were 1.2, 0.8, 0.6, 0.5 µg/m³, respectively. In Namhae-si and Hadong-gun, locating in the western part of Gyeongnam and adjacent to Jeonnam, the contributions of Jeonnam to the PM_{2.5} concentrations were higher than the provincial self-contribution. In Busan, the provincial self-contribution to the annual mean PM_{2.5} was 3.4 µg/m³. In particular, the self-contribution in the central western region, where Busan port is located, was highest among the five regions in Busan. However, the over-predicted NO₂ and SO₂ concentrations in this region can be in part due to the overestimations of NO_x and SO₂ emissions used in this study (i.e., Clean Air Policy Support System 2016). Among the neighboring provinces, the contribution of Gyeongnam showed the highest to annual mean PM_{2.5} in Busan for the year, followed by Ulsan, Gyeongbuk, and Chungnam. In Busan, the control measures on the Primary PM_{2.5} emissions are recommended to mitigate the PM_{2.5} concentrations due to the high emission-to-concentration conversion rate and the self-contribution.

Key words: PM_{2.5}, Busan, Gyeongnam, Coastal region, Self-contribution, Neighboring provincial contributions

1. 서 론

부산광역시(이하, 부산)와 경상남도(이하, 경남)의 2016년 평균 초미세먼지(PM_{2.5}; Particulate matter of

which diameter is less than 2.5 µm)의 관측농도는 각각 26.9, 25.3 µg/m³이었다. 이후 PM_{2.5} 농도는 감소 추세를 보여 2019년 부산은 21.5 µg/m³, 경남은 18.5 µg/m³를 기록하였으나 여전히 대기환경기준(연평균 농

도 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)보다 각각 6.5 , $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고 (MOE, 2020), 부산과 경남이 포함된 ‘동남권 대기환경 관리 기본계획’의 $\text{PM}_{2.5}$ 개선목표인 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다도 높은 수준이다.

경남과 부산은 국내 최대 항만인 부산항뿐 아니라 삼천포항, 통영항, 하동항 등 연안을 따라 크고 작은 항만시설을 갖추고 있으며, 철강, 조선, 석유화학 업종의 대규모 국가/일반산업단지, 농공단지, 삼천포 및 하동 화력발전소 등이 위치하여 대기오염물질 배출이 많다. 특히, 항만을 중심으로 활동하는 선박 및 대형/컨테이너선적 화물차량에서 배출되는 대기오염물질에는 다량의 중금속과 독성이 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 가 포함되어 (Lee *et al.*, 2020; Corbett *et al.*, 2007) 인체 위해도가 매우 높으므로 이에 대한 관리가 우선적으로 필요하다.

부산과 경남지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 관련 연구는 상대적으로 인구와 배출이 밀집된 부산을 중심으로 수행되었다. Jeon (2020a, b)에서 부산의 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도의 시·공간 특성을 분석하였고, 여름철 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 발생의 원인이 대기정체 하에 해륙풍 순환의 발달과 광화학 반응에 의한 2차 생성이라고 제시하였다. Lee *et al.* (2020)에서는 부산 신항에서 $\text{PM}_{2.5}$ 와 성분농도 (OC, EC, 원소성분, 이온성분)를 측정하여 기간 (2019년 2월 11일~3월 4일) 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 $32.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 탄소성분과 수용성 이온성분이 각각 32.87%, 50.69%를 차지함을 확인하였고, Conditional Probability Functions (CPF) 분석을 통해 성분별 주요 배출원을 추정하였다. Kim *et al.* (2020a)에서는 2015년부터 부산에서 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 기반으로 여름철 농도 수준이 증가함을 확인하였고, 이온성분 중 황산염 농도가 서울과 비교하여 상대적으로 높게 나타나는 특징을 제시하였다 (N/S 비: 서울 0.43, 부산 0.25). 하지만 부산 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 특성과 생성원인을 분석한 대부분의 선행 연구에서 주변 지자체 배출의 영향을 고려하지 못하였고, 경남의 경우는 $\text{PM}_{2.5}$ 연구 자체가 부족한 상황이다. 경남/부산은 NO_x , SO_2 배출량이 많은 울산, 전라남도 여수/광양과 맞닿아 있고, 편서풍과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 높은 겨울철의 계절풍을 고려하면 중국뿐 아

니라 국내 지자체 중에서도 풍하측에 해당하여 다른 지자체에서 배출된 오염물질의 영향을 크게 받을 것이라 예상된다.

본 연구에서는 수도권과 전북, 전남, 충북, 울산 $\text{PM}_{2.5}$ 의 배출원-수용지 관계를 분석한 동반논문 (Bae *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021b, c; Son *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2021; You *et al.*, 2020)에 이어 동남권역에 해당하는 부산과 경남의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 성분 농도 특성을 파악하고, 이에 대한 국내외 배출 기여도와 자체 및 주변 시도의 배출 기여도를 정량적으로 제시하였다. 이를 위해 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with eXtension) - PSAT (Particulate Source Apportionment Technology) 모사를 수행하였으며, 대상기간은 2016년으로 ‘권역별 대기환경 관리 기본 계획’ 수립 시 사용된 국가배출목록 기준연도 및 대기질 모사의 대상연도와 동일하게 설정하였다. 이를 바탕으로 경남의 18개 기초 지자체와 부산의 5개 권역별 $\text{PM}_{2.5}$ 및 구성성분 농도에 대한 지자체별 기여도를 시·공간적으로 상세히 분석하였다. 이와 함께 $\text{PM}_{2.5}$ 를 포함한 대기오염물질에 대한 모사-관측 비교를 통해 CAMx 모델의 배출량 입력자료로 사용된 부산/경남의 국가 대기오염물질 배출목록의 불확도를 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역 및 배출 특성

경남과 부산은 각각 총면적 $10,540 \text{ km}^2$, 770 km^2 로 우리나라 전체 국토면적의 약 11%에 달한다. 인구는 부산 3,395,386명, 경남 3,416,090명 (2021년 4월 기준)으로, 우리나라 전체 인구의 13%가 부산과 경남에 거주하고 있다 (KOSIS, 2021). 부산의 행정구역은 15개 구 (금정구, 북구, 동래구, 연제구, 해운대구, 사상구, 부산진구, 수영구, 강서구, 서구, 동구, 중구, 남구, 사하구, 영도구)와 1개 군 (기장군)으로 구분되어 있고, 경남은 8개의 시 (창원시, 진주시, 통영시, 사천시, 김해

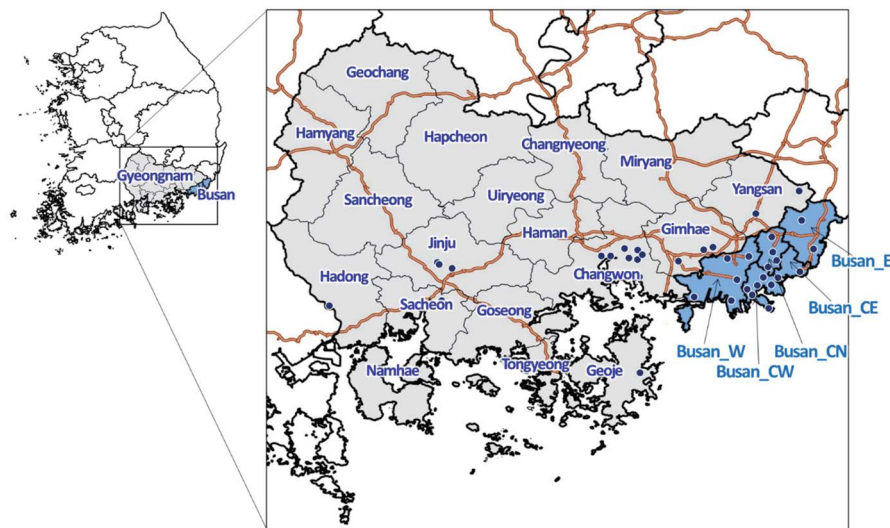


Fig. 1. The location of eighteen local authorities in Gyeongnam and five regions in Busan. Busan_E, Busan_CE, Busan_CN, Busan_CW, and Busan_W indicate eastern, central eastern, central northern, central western, and western regions in Busan. The blue circles and orange lines represent the urban air quality monitoring network and major expressways in Gyeongnam and Busan, respectively.

시, 밀양시, 거제시, 양산시)와 10개의 군(의령군, 함안군, 창녕군, 고성군, 남해군, 하동군, 산청군, 함양군, 거창군, 합천군)으로 구성되어 있다. 2016년 기준 도시대기측정소는 부산 19지점, 경남 19지점이지만(그림 1) 경남의 경우 18개 시군 중 창원시, 거제시, 진주시, 하동군, 김해시, 사천시, 양산시에만 측정소가 존재하였고, 그중에서도 $PM_{2.5}$ 유효 측정소는 창원시, 진주시, 하동군, 김해시, 양산시에만 위치하여(9지점) 나머지 지역의 $PM_{2.5}$ 농도는 파악하기 어렵다. 2018년부터 경남의 $PM_{2.5}$ 측정소가 확충되어 2019년에는 18개 시군에 대해 1지점 이상의 도시대기측정소가 신설되었다.

부산은 16개 행정구역을 지리적 위치와 배출환경을 고려하여 5개 권역으로 구분하여 분석하였다(그림 1). 부산 동부권역(Busan_E)은 기장군이 해당되고 부산 전체 면적의 28.4%를 차지하나, 일부 주거지를 제외하곤 낮은 구릉성 산지가 대부분이다. 부산 도심에 해당되는 중부권역은 3개의 세부권역으로 구분하였는데 중동부권역(Busan_CE)은 해운대구와 수영구, 중북부권역(Busan_CN)은 금정구, 동래구, 연제

구, 중서부권역(Busan_CW)은 남구, 부산진구, 동구, 서구, 중구, 영도구가 해당된다. 중서부권역의 경우, 부산항이 남구, 동구, 중구, 영도구로 둘러싸인 부산만에 형성되어 선박 및 대형화물차량에 의한 배출이 많은 지역이다. 서부권역(Busan_W)은 낙동강을 중심으로 서쪽의 강서구와 동쪽의 북구, 사상구, 사하구가 해당된다. 이 지역은 평야지대로 김해국제공항과 명지·녹산 국가산업단지, 신평장리 등 일반산업단지가 조성되어 있고, 강서구와 경남 창원시에 걸쳐 부산항이 위치하고 있다.

부산은 2016년 국가 대기오염물질 배출목록(Clean Air Policy Support System; CAPSS) 기준으로 SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$, NH_3 각각에 대해 10,777톤, 49,468톤, 2,544톤, 1,744톤이 산정되었고 이는 각각 국내 배출량의 3%, 4%, 3%, 1%에 해당하는 양이다. 배출부문별로는 NH_3 를 제외하고는 선박배출이 포함된 비도로이동오염원이 부산 전체 SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$ 의 각각 72%, 51%, 48%를 차지하여 가장 많았다(선박배출은 동일물질 순으로 71%, 39%, 39% 차지). 권역별로 살펴보면, 중서부권역과 서부권역에서 각각 부산 전체 SO_2

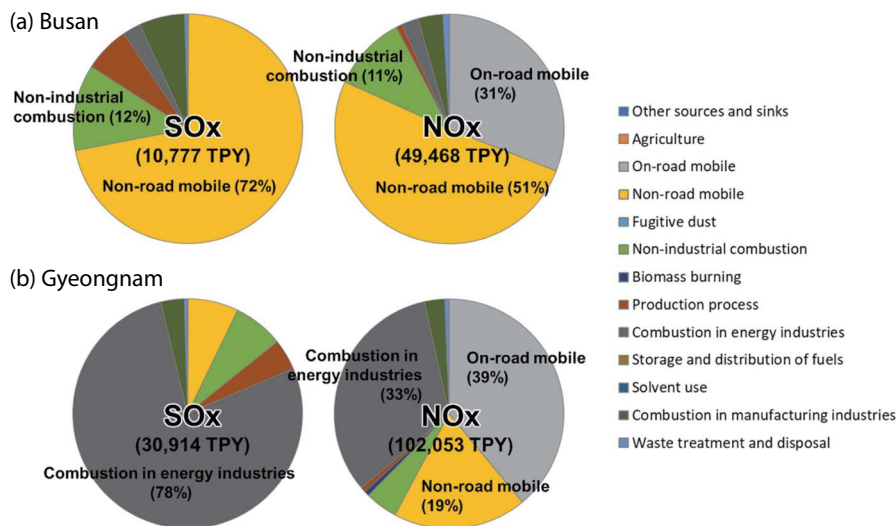


Fig. 2. National air pollutant emissions for SO₂ and NO_x in (a) Busan and (b) Gyeongnam during the study period of 2016.

의 48%와 51%, NO_x의 35%, 44%, PM_{2.5}의 35%, 42%이 배출되어 부산 대기오염물질별 배출량의 77~99%를 차지하였다. 이는 중서부권역은 부산항, 서부권역은 부산신항이 위치하여 선박과 화물차량에서 배출되는 다량의 대기오염물질이 포함되었기 때문이다.

반면 경남은 SO₂, NO_x, PM_{2.5}, NH₃ 각각에 대해 연간 30,914톤, 102,053톤, 25,389톤, 5,548톤이 배출되었고, 이는 국내 배출량의 9%, 8%, 6%, 8%를 차지한다. 배출부문별로 살펴보면 SO₂는 에너지산업연소에서 경남 전체 SO₂ 배출의 78%로 가장 높았고, NO_x는 도로이동오염원에서 전체의 39%를 차지하여 가장 높았다. 18개 시군 중에서는 NH₃를 제외하고는 고성군과 하동군에서의 대기오염물질 배출 비중이 높았다. 특히, 에너지산업연소 부문에서 고성군은 경남 전체 NO_x와 SO₂의 55%와 22%를 차지하였는데, 이는 고성군에 위치한 삼천포 화력발전소의 영향으로 예상된다. 하동군의 에너지산업연소 부문 또한 경남 전체 NO_x와 SO₂의 23%와 10%를 차지할 정도로 높았는데, 한국남부발전(주) 하동발전본부가 위치하고 있다.

2.2 대기질 모사 및 기여도 분석 방법

대기질 모사에 사용된 모델은 CAMx ver. 6.1 (Ram-

boll-Environ, 2021)이며, Gas-phase chemistry는 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center, Version 99; Carter, 1999), 수평이류는 Piece-wise Parabolic Method (Colella and Woodward, 1984), Aerosol Chemistry는 SOAP (Strader *et al.*, 1999)와 Static 2-mode (Coarse-Fine Scheme) for size distribution (ENVIRON International Corporation, 2014)을 적용하였다. CAMx 모사영역은 국외 지역에서 배출되는 대기오염물질을 고려하기 위해 동북아 영역(174×128 격자, 27 km 수평해상도)과 한반도 영역(71×89 격자, 9 km 수평해상도), 그리고 부산/경남을 포함한 국내 지자체별 배출량에 대한 기여도를 분석하기 위한 남한 영역(119×173 격자, 3 km 수평해상도)으로 구성하였다. 기상 입력자료는 Weather Research and Forecasting (WRF) ver. 3.9.1 (Skamarock *et al.*, 2008)을 이용하였으며, 경남/부산지역의 기상모사 평가는 영역 내 ASOS (Automated Synoptic Observing Systems) 자료와의 비교를 통해 보충자료 그림 S1과 S2에 제시하였다. 보다 상세한 기상 및 대기질 모사 수행 방법은 동반논문 (You *et al.*, 2020)을 참고할 수 있다.

CAMx 모델에서 제공하는 PSAT 방법은 배출원별

또는 지역별 배출량을 표식하고 추적하는 방법으로, 배출물질의 물리적, 화학적 변화를 모의하여 생성물질의 농도에 대한 배출물질의 기여도를 산출한다(Ju *et al.*, 2018). PSAT 방법은 반응 이전 물질로 표식한 후 추적하기 때문에 2차로 생성된 오염물질을 고려할 수 있다는 장점이 있으며(Yarwood *et al.*, 2007) 이를 통해 고농도 미세먼지 현상의 원인규명과 정책효과 등을 분석할 수 있다(Koo *et al.*, 2009). 본 연구에서는 부산과 경남을 포함하여 PM_{2.5} 농도에 영향을 주는 국내 지자체별 기여도를 산출하기 위하여 모사영역 중 남한 영역(3 km 수평해상도)에서 각 시군별(160개 기초 지자체) 대기오염물질 배출량(1차 PM_{2.5}, NO_x, SO₂, NH₃, VOC 등)을 표식하고 추적하였다.

경남 및 부산의 PM_{2.5} 기여도는 Kang *et al.* (2021a)에서 정의한 것과 동일하게 PM_{2.5} 모사농도 중 국내 배출에 의한 PM_{2.5} 기여농도를 ‘국내 기여농도’로, 이를 제외한 PM_{2.5} 농도를 ‘국외 기여농도’로 정의하였다. 국내 기여농도에 대해서는 경남과 부산 자체 배출에 의한 PM_{2.5} 기여농도인 ‘자체 기여농도’와, 경남/부산이 아닌 주변 지자체에 의한 PM_{2.5} 기여농도를 의미하는 ‘주변 시도 기여농도’로 구분하였다. 이때 주변 시도 기여농도의 경우, 국내 17개 광역 지자체 중 경남/부산 PM_{2.5} 농도에 상대적으로 영향이 크다고 파악된 부산(경남 분석에만 해당), 울산, 경남(부산 분

석에만 해당), 경상북도(경북), 전라남도(전남), 충청남도(충남)로 구성된 6개 시도에 대해 제시하였다. PM_{2.5} 구성성분 중 1차 PM_{2.5} (Primary PM_{2.5}), 질산염(NO₃⁻), 황산염(SO₄²⁻), 암모늄(NH₄⁺)에 대해서도 동일한 방법으로 구분하여 기여도를 제시하였다. 1차 PM_{2.5}에는 동반논문 Kim *et al.* (2021c)에서 언급한 것처럼 배출목록상의 물질에 대한 평가를 위해 무기탄소(Elemental Carbon; EC), 1차 유기탄소(Primary Organic Carbon; POC)와 구분되지 못한(Unknown) 구성성분 등이 포함된다.

3. 연구 결과

3.1 경남과 부산의 국내·외 기여농도

경남과 부산의 2016년 연평균 PM_{2.5} 모사농도는 각각 19.5 µg/m³ (18개 기초 지자체 평균), 19.9 µg/m³ (5개 권역 평균)로 비슷하였다. 경남과 부산의 PM_{2.5} 모사농도를 공간적으로 살펴보면(그림 3a) 도서지역인 거제시는 16.3 µg/m³로 가장 낮았고 내륙의 남해고속도로와 중부내륙고속도로가 지나는 진주시와 김해시(21.1 µg/m³), 사천시(21.3 µg/m³), 창원군(21.5 µg/m³), 함안군(21.9 µg/m³)에서는 20 µg/m³을 초과하였다. 부산의 PM_{2.5} 모사농도는 동부권역에서 18.3 µg/m³로

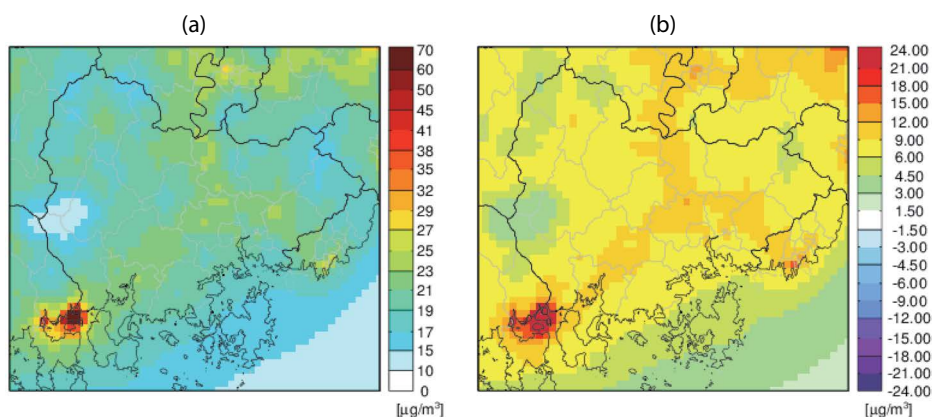


Fig. 3. Spatial plots of the simulated (a) annual mean PM_{2.5} concentrations, and (b) the domestic contributions in and around Gyeongnam and Busan during the simulation period of 2016.

가장 낮고, 중서부권역이 $21.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 대상기간의 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도는 부산과 경남 내 모든 지자체에서 대기환경기준(연평균 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 특성을 보였다.

$\text{PM}_{2.5}$ 모사농도 중 국내배출에 의한 기여농도(그림 3b) 또한 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도가 높았던 고속도로 인근 지역을 중심으로 $9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 값을 보였다. 기초 지자체별 국내 기여농도를 살펴보면(그림 4) 경남은 함안군에서 $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 김해시, 창녕군이 각각 $9.3, 9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 남해 연안 및 도서지역인 통영시와 거제시에서 각각 $5.3, 5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 하지만 남해의 도서지역 중에서도 남해군의 경우, 국내 배출에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도가 $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 통영시 및 거제시와 비교하여 약 $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 높게 평가되었다. 이는 남해군과 인접한 전남의 광양시/여수시의 배출이 많기 때문으로 판단되며, 3.3절 주변 시도별 기여농도에서 면밀히 살펴보았다. 부산의 국내 기여농도는 $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (동부권역)~ $10.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (중서부권역)의 범위를 보였다.

국외 배출에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도에서 경남은 기초 지자체별로 $11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (양산시)~ $12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (창녕군)의 범위를 보였고, 평균 $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 부산은 5개 권역 평균 $11.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 권역 간 차이가 크지 않았다(동부권역 $11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ~서부권역 $11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 동반논

문 중 비슷한 위도대의 전남지역(Kim *et al.*, 2021a)의 $14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비교하면 경남은 $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부산은 $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮은 국외 기여농도가 계산되었다. 이는 우리나라가 편서풍대에 위치하여 남한의 서쪽 지역이 중국의 배출 영향을 크게 받는 점을 고려하면 부산과 경남이 한반도의 동남쪽에 위치한 지리적 특성 때문으로 이해된다. 한편, 비슷한 정도대의 울산(Kang *et al.*, 2021a)과는 비슷한 수준의 국외 기여농도를 보였다. 다만, 최근 보고되고 있는 중국의 배출 변화와 국외 배출목록의 오차를 고려할 때 본 연구에서 제시된 국외 기여농도는 다소 과대평가되었을 가능성이 있으므로(Bae *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021a), 본 연구에서는 국내 지역별 배출량에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도에 중점을 두고 분석하고자 한다.

국내 배출에 의한 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도는 경남 $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부산 $8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 월변화는 경남과 부산이 비슷한 패턴을 보였다(그림 5). 1년 중 국내 기여농도가 가장 높은 시기는 3월로 경남은 $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 부산은 $11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모사되었다. 경남과 부산의 국내 기여농도는 3월과 4월인 봄철에 높았는데, 이 시기는 국외 기여농도도 높아 1년 중 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도가 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 가장 높은 기간이었다. 특징적으로 두 지역 모두 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도가 1월부터 6월인 초여름까지 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높게 유지되다가 7월에 낮

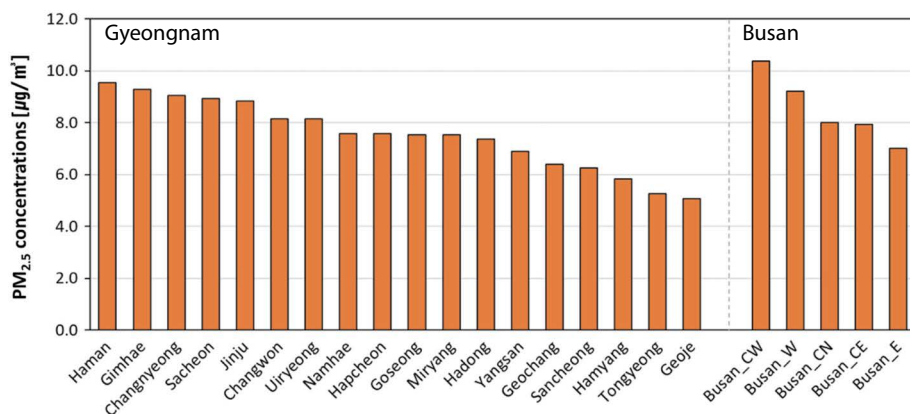


Fig. 4. Domestic contributions to the annual mean $\text{PM}_{2.5}$ in local authorities in Gyeongnam and Busan during the simulation period of 2016.

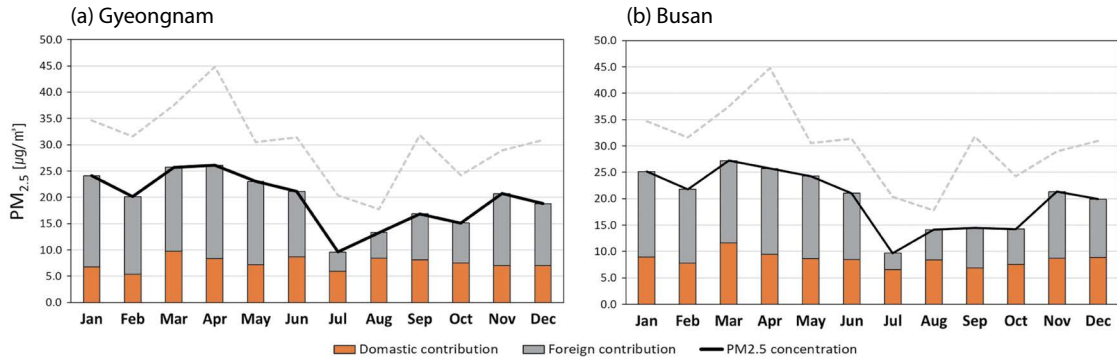


Fig. 5. Monthly mean simulated $PM_{2.5}$ concentrations, domestic and foreign contributions to the $PM_{2.5}$ in (a) Gyeongnam and (b) Busan during the simulation period of 2016. Gray dot lines indicate the monthly mean simulated $PM_{2.5}$ concentrations over Seoul Metropolitan Area including Seoul, Incheon, and Gyeonggi-do.

아지는 경향을 보였다. 봄철의 높은 $PM_{2.5}$ 농도는 관측에서도 확인되었는데, 부산은 3월에서 5월 $PM_{2.5}$ 평균농도가 $30.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였고 이는 동일기간 서울의 평균농도($30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높은 수치이다. 동반 논문 중 수도권(서울과 인천, 경기도)에서는 1월부터 4월의 평균 $PM_{2.5}$ 모사농도가 $37.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 유지되다가 5월과 6월 평균 $31.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 약 $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮아졌는데(Bae *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021c; You *et al.*, 2020), 동남권에 해당하는 경남과 부산, 울산(Kang *et al.*, 2021a)에서는 1~4월 평균 $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 5~6월 평균 $24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 겨울부터 초여름까지 비슷한 농도 수준이 유지되었다. 이는 우리나라 북서쪽에 위치하여 중국의 영향을 직접적으로 받는 수도권의 경우, 1~4월 국외 배출의 영향을 크게 받다가 5월이 되면서 급격히 줄어드는 반면, 동남권은 지형, 계절풍 등의 영향으로 국내·외 배출 영향이 완만하게 줄어들기 때문에 사료된다. 따라서 동남권의 $PM_{2.5}$ 농도를 효과적으로 줄이기 위해서는 이러한 $PM_{2.5}$ 농도와 국내·외 기여농도의 시간 변화 특성을 고려한 관리대책이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 경남과 부산의 $PM_{2.5}$ 에 대한 자체 및 주변 시도 기여농도

국외 배출의 기여농도를 제외한 국내 배출에 의한 경남과 부산의 연평균 $PM_{2.5}$ 기여농도는 부산 중서부

권역을 제외하고 대부분의 기초 지자체에서 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하였다(그림 6). 부산과 경남 평균적으로는 국내 기여농도 중 각 지자체의 자체 배출에 의한 영향이 가장 높았고, 주변 시도에 대해서는 배출량 및 배출원·수용지 거리에 따라 영향이 다르게 나타났다. 경남의 $PM_{2.5}$ 모사농도는 자체 배출에 의한 기여농도가 $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 큰 비중을 차지하였고, 전남($1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경북($0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 충남($0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 울산($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 영향이 크게 나타났다. 반면 경남의 기초 지자체별로 살펴보면, 자체 기여농도는 김해시($4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 가장 높고 함양군($1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 가장 낮았다. 경남지역에 대한 주변 시도 기여농도는 기초 지자체의 지리적 위치에 따라 다르게 계산되었다. 예로, 경남의 서쪽에 위치하여 전남과 인접한 남해군과 하동군은 전남의 배출 영향이 각각 3.4 , $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 자체 기여농도(각각 1.9 , $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높게 나타났는데, 이들 지역의 $PM_{2.5}$ 농도 개선을 위해서는 경남과 기초 지자체의 자체적인 노력과 함께 전남과의 협력을 통한 배출관리가 필요함을 보여준다. 또한 양산시와 김해시는 울산의 배출 기여농도가 각각 1.4 , $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 자체 기여농도 다음으로 높았고, 경북과 인접한 창녕군, 밀양군, 함천군은 경북의 배출 기여농도가 각각 1.7 , 1.4 , $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높았다.

부산의 $PM_{2.5}$ 모사농도 중 부산 자체 배출의 기여농도는 권역 평균 $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 동부권역($1.4 \mu\text{g}/$

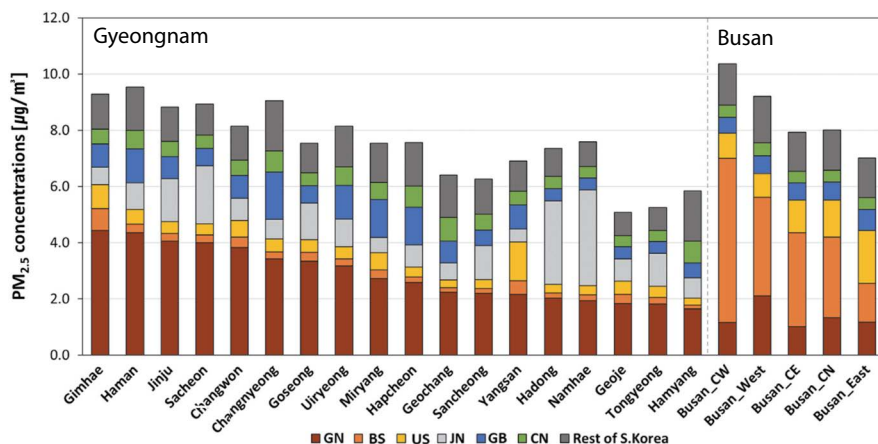


Fig. 6. The self- and neighboring provincial contributions to annual mean $PM_{2.5}$ concentrations in Gyeongnam and Busan during the simulation period in 2016. GN, BS, UL, JN, GB, and CN indicate Gyeongnam, Busan, Ulsan, Jeonnam, Gyeongbuk, and Chungnam.

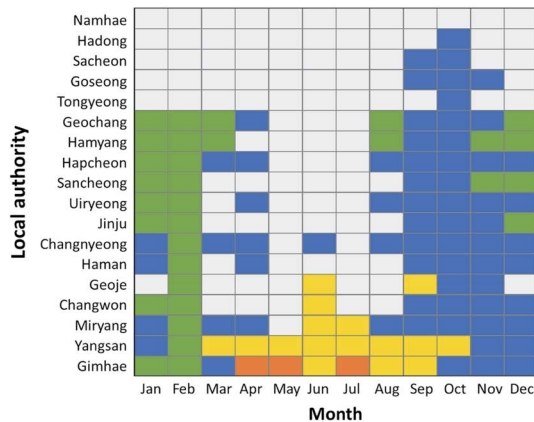
m^3)~중서부권역($5.8 \mu g/m^3$)의 범위를 보여 약 $4 \mu g/m^3$ 이상의 큰 지역 차이를 보였다. 부산항이 위치한 중서부권역의 경우, 국외 영향을 제외한 국내 기여농도 중 자체 배출에 의한 기여농도가 51%나 차지하는데 반해, 동부권역은 자체 기여농도가 12.3%로 낮고 상대적으로 주변 시도 배출의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 특히 동부권역과 맞닿아 있는 울산의 기여농도는 $1.9 \mu g/m^3$ 로, 자체 기여농도($1.4 \mu g/m^3$)보다 높았다. 부산 권역 평균적으로는 경남($1.4 \mu g/m^3$), 울산($1.2 \mu g/m^3$), 경북($0.6 \mu g/m^3$)의 순으로 높았고, 부산과 떨어져 있는 충남의 기여농도 또한 $0.4 \mu g/m^3$ 로 적지 않았다.

월별로 경남의 기초 지자체 및 부산의 권역별 $PM_{2.5}$ 기여농도가 가장 높은 주변 시도를 살펴보면 경남의 경우(그림 7a), 비슷한 패턴의 주변 시도 기여변화를 보이는 기초 지자체끼리 묶어 세 그룹으로 나눌 수 있다. 첫 번째 그룹은 경남의 남서쪽에 위치하면서 전남과 인접한 남해군, 하동군, 사천군, 고성군, 통영군이다. 남해군은 연중 전남 배출의 기여농도가 가장 많은 비중을 차지하였고, 하동군, 사천군, 고성군, 통영군은 가을철(9~11월)의 경북 배출 영향을 제외하면 나머지 기간에 대해서는 전남 배출의 기여가 주요하였다. 반면 두 번째 그룹에 속하는 거창군, 함양

군, 합천군, 산청군, 의령군, 진주시, 창녕군, 함안군은 겨울철인 1~2월과 12월은 충남 배출의 기여, 9~11월은 경북 배출의 기여, 그리고 봄철과 여름철인 3~8월은 전남 배출의 기여가 가장 컸다. 세 번째 그룹은 경남의 동쪽에 해당하는 창원시, 밀양시, 양산시, 김해시로, 이들 지역은 겨울철은 북서/북쪽에 위치한 충남과 경북 배출의 기여가, 여름철은 울산 배출의 기여가 주요하였다. 그중 김해시는 부산 중에서도 대기오염물질 배출량이 많은 서부권역과 접해 있어 4월과 5월, 7월에는 부산 배출의 기여농도가 높은 특징을 보였다.

이처럼 경남의 주변 시도 기여농도가 월별, 기초 지자체별로 다르게 나타나는 이유는 배출원 및 수용지인 기초 지자체의 지리적 위치와 계절풍의 영향 때문으로 분석된다. 평균적으로는 경남과 접해 있으면서 북쪽에 위치한 경북(가을)과 서쪽에 있는 전남(봄~여름)의 배출 기여가 높다. 하지만 전남과 근접한 첫 번째 그룹을 제외한 나머지 기초 지자체의 경우, 강한 풍속의 북서계절풍이 나타나는 1~2월에는 전북을 넘어 충남에서 배출된 대기오염물질이 수송되어 경남지역의 $PM_{2.5}$ 농도 상승에 기여함을 보여준다. 반면 거제시, 창원시, 밀양시, 양산시의 지역의 북/북동/동쪽에 위치한 울산의 배출 기여가 높았는데, 하계에는 상대적으로 약해진 계절풍과 기초 지자체별 지리·지형

(a) Gyeongnam



(b) Busan

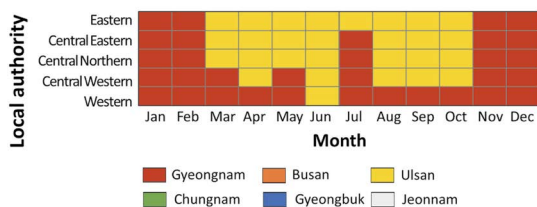


Fig. 7. Monthly dominant neighboring provinces that have the greatest contributions to $PM_{2.5}$ concentrations in (a) Gyeongnam and (b) Busan during the simulation period of 2016.

의 영향을 받아 형성되는 국지풍이 결합된 바람 특성에 의한 것으로 사료된다. 예를 들어, 밀양시와 양산시 는 2016년 여름 각각 남풍(9.5%), 남서풍(23.3%)이 주풍으로 관측되어 여름계절풍의 영향을 보여주었지만 북북동/북동/동북동풍의 바람 빈도도 15.4% (밀양시), 24.0% (양산시)로 적지 않았고(보충자료 그림 S3) 이는 울산 배출의 영향을 높일 수 있다. 또한 울산의 대기오염물질이 야간에 발달한 육풍으로 인해 해상으로 이동한 뒤 재순환되어 경남 동부지역으로 유입될 가능성이 존재하므로, 이에 대해서는 추후 상세한 분석이 필요하다.

부산의 월간 $PM_{2.5}$ 농도에 주요하게 작용하는 주변 시도의 경우(그림 7b), 1~2월, 11~12월은 권역에 관계없이 경남 배출의 영향이 지배적이었고, 3~10월은 서부권역을 제외한 지역에서 울산 배출의 기여가 가

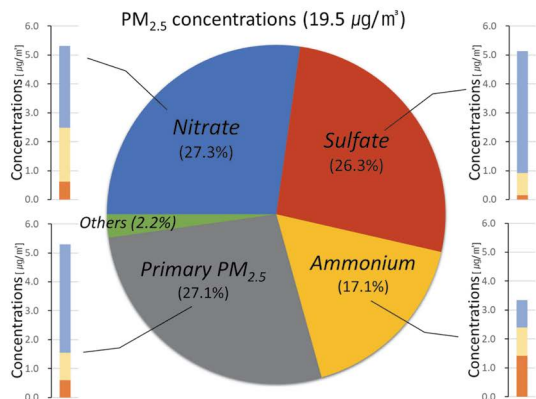
장 높았다. 부산 서부권역의 경우, 울산과 상대적으로 거리가 멀기 때문에 울산 배출의 영향이 6월에만 주요한 것으로 판단된다. 여름철 부산의 북쪽에 위치한 울산의 대기오염물질 배출이 부산의 $PM_{2.5}$ 농도에 크게 기여하는 것은 앞서 설명한 밀양시와 양산시처럼 여름철 부산의 국지풍이 남서/남남서풍(26.8%)뿐 아니라 북동풍의 빈도(16.1%)도 높기 때문으로 이해될 수 있다.

3.3 경남과 부산의 $PM_{2.5}$ 구성성분에 대한 자체 및 주변 시도 기여농도

경남의 연평균 $PM_{2.5}$ 모사농도에 대한 구성성분비를 살펴보면 질산염, 황산염, 1차 $PM_{2.5}$ 에 대해 각각 27.3% ($5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 26.3% ($5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 27.1% ($5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 비슷하였고, 암모늄은 상대적으로 낮은 17.1% ($2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 차지하였다(그림 8a). 하지만 자체 기여농도에서는 성분 중 암모늄이 $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 질산염, 황산염, 1차 $PM_{2.5}$ 는 각각 0.6, 0.2, $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 암모늄의 높은 자체 기여농도는 동반논문인 전남($1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Kim *et al.*, 2021a)과 유사하며, 전북($2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Kim *et al.*, 2021b)에 비해서는 다소 낮게 제시되었는데, 경남 농축산 지역에서의 많은 암모니아 배출(연간 25,389톤, 2016년 CAPSS 기준)이 암모늄으로 전환된 것으로 판단된다.

반면 부산의 연평균 $PM_{2.5}$ 모사농도에서는 질산염 23.5% ($4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 황산염 25.6% ($5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 1차 $PM_{2.5}$ 33.4% ($6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 암모늄 15.6% ($3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 계산되었다. 1차 $PM_{2.5}$ 보다는 2차로 생성된 성분농도(질산염, 황산염, 암모늄)가 $PM_{2.5}$ 전체 농도의 64.7%로 높은 비중을 차지하였으나, 각 $PM_{2.5}$ 성분 중에서는 1차 $PM_{2.5}$ 가 가장 높은 비율을 차지하였다(그림 8b). 또한 부산의 자체 기여농도에서는 1차 $PM_{2.5}$ 의 농도가 $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 암모늄 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 질산염 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 황산염 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 높았다. 부산의 1차 $PM_{2.5}$ 자체 기여농도를 국내 타 대도시와 비교하면 인천($2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Kim *et al.*, 2021)과는 비슷하고, 서울($2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Bae *et al.*, 2021b)과 울산($2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$;

(a) Gyeongnam



(b) Busan

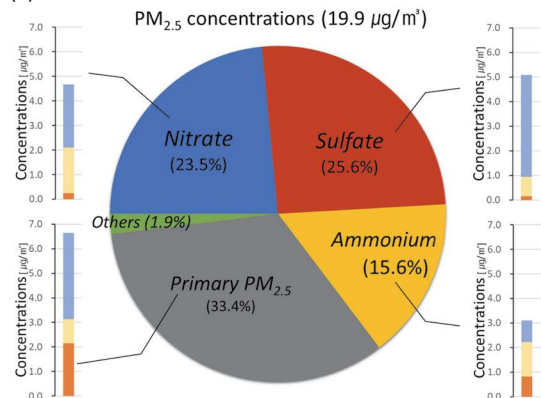


Fig. 8. Annual simulated PM_{2.5} concentrations and ratio of nitrate, sulfate, ammonium, and primary PM_{2.5} in (a) Gyeongnam and (b) Busan during the simulation period of 2016. Bar graphs indicate the self-, the rest domestic, and foreign contributions for nitrate, sulfate, ammonium, and primary PM_{2.5} concentrations.

Kang *et al.*, 2021)보다는 다소 낮다. 한편 타 지자체의 기여농도가 가장 높은 PM_{2.5} 성분은 질산염으로, 1.9 µg/m³을 차지하였다.

경남의 평균 질산염 모사농도는 자체 기여농도가 가장 높았고, 주변 시도에 대해서는 전남(0.34 µg/m³), 경북(0.29 µg/m³), 충남(0.25 µg/m³), 울산(0.15 µg/m³), 부산(0.14 µg/m³) 순으로 기여농도가 높았다. 이를 기초 지자체별로 살펴보면(그림 9a), 질산염의 자체 기여농도는 0.30 µg/m³(함양군)~0.95 µg/m³(함안군)의 범위였고, 국내 기여농도 중 자체 배출이 차지

하는 비율은 16.5%(함양군)~31.0%(사천시) 수준이었다. 반면, 황산염(그림 9b)은 전남과 울산의 기여농도가 기초 지자체 평균 각각 0.26 µg/m³, 0.17 µg/m³로 자체 기여농도(0.16 µg/m³)보다 높았고, 충남과 경북의 황산염 기여농도도 각각 0.11, 0.10 µg/m³를 차지하였다. 경남 중 황산염의 자체 기여농도가 가장 높은 기초 지자체는 사천군(0.27 µg/m³)이었으나, 동쪽에 위치한 김해시를 제외하고 대부분의 기초 지자체에서 자체 기여농도보다는 전남의 기여농도가 최대 4배까지 높은 특징을 보였다.

암모늄(그림 9c)은 그림 8에서 언급한 것처럼 자체 기여농도(1.42 µg/m³)가 주변 시도 기여농도보다 월등히 높았는데, 전남 0.23 µg/m³, 경북 0.19 µg/m³, 충남과 울산이 각각 0.11 µg/m³의 기여농도를 보였다. 경남 중에서도 암모늄의 자체 기여농도가 가장 높은 기초 지자체는 함안군 2.04 µg/m³이었다. 1차 PM_{2.5}(그림 9d) 또한 자체 기여농도가 가장 높았고, 전남(0.35 µg/m³), 경북(0.23 µg/m³), 충남과 부산, 울산이 각각 0.09, 0.08, 0.04 µg/m³의 기여농도를 보였다. 다만, 1차 PM_{2.5}의 경우 기초 지자체별로 자체 기여농도의 편차가 컸는데, 김해시의 자체 기여농도가 1.32 µg/m³로 가장 높았고, 함양군에서 0.27 µg/m³로 가장 낮았다.

특징적으로 경남의 가장 서쪽에 위치하며 전남과 접해 있는 남해군과 하동군은 모든 구성성분에서 자체 기여농도보다 전남 배출의 기여농도가 비슷한 수준이거나 더 높았다. 남해군의 경우, 질산염, 황산염, 1차 PM_{2.5}에 대해 자체 기여농도보다 전남 배출에 의한 기여농도가 각각 1.2배, 4.1배, 4.2배 높았고, 하동군은 각각 1.1배, 3.3배, 3.9배 높았다. 전남 배출에 의한 황산염과 1차 PM_{2.5}의 높은 기여농도는 전남의 광양시와 여수시의 높은 배출량이 원인으로 사료되며, 이들 지역에 대한 PM_{2.5} 농도 감소를 위해서는 전남의 배출관리가 함께 고민되어야 할 것으로 판단된다. 또한 Kim *et al.* (2021a)에서 제시한 것처럼 전남의 주요 산업도시인 광양시와 여수시의 PM_{2.5}와 SO₂에 대한 모델의 과대모사 경향이 뚜렷한 만큼 배출량의 과대산정 또는 잘못된 배출정보 등에 대한 개선이 시급

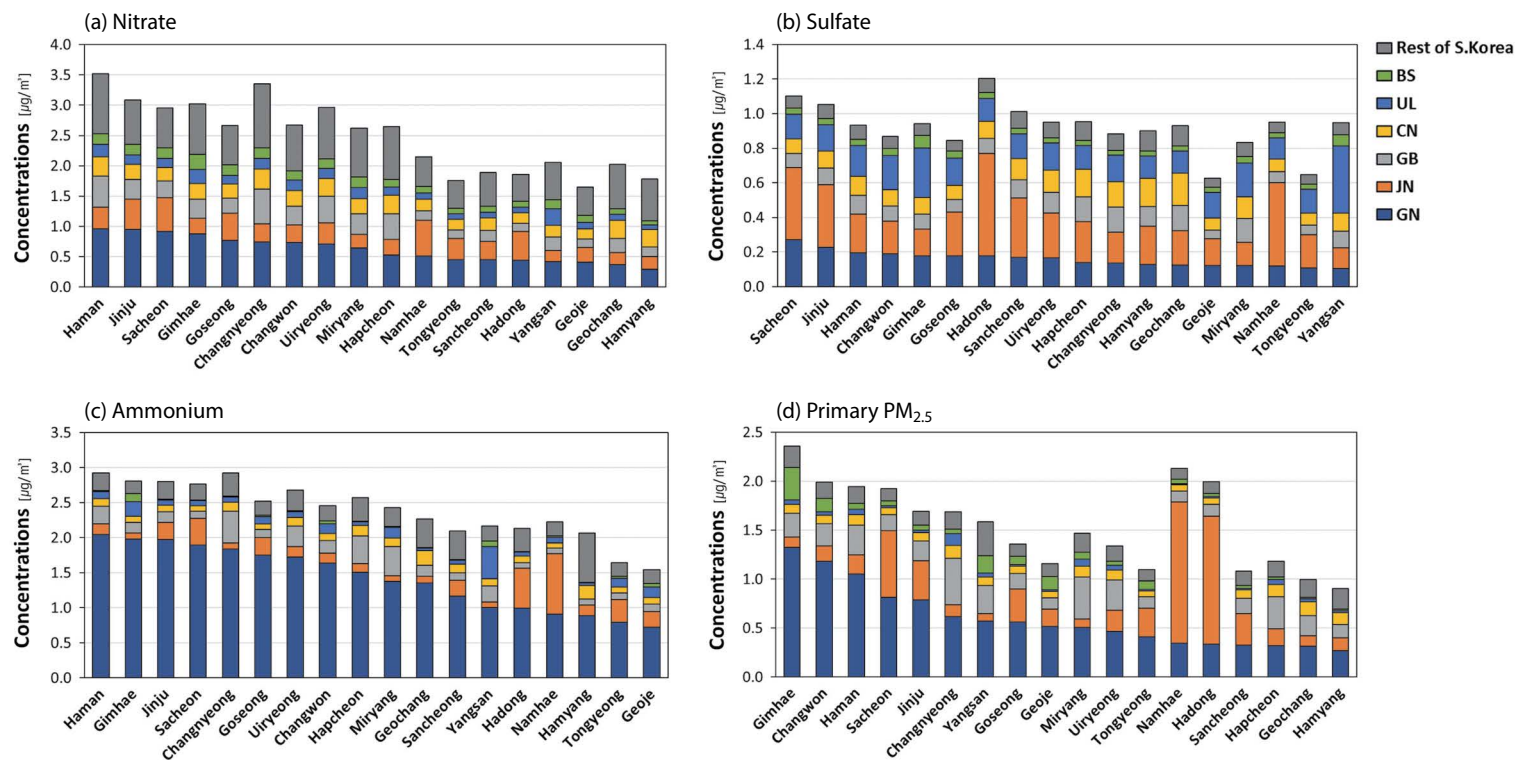


Fig. 9. The self- and neighboring provincial contributions to annual mean (a) nitrate, (b) sulfate, (c) ammonium, and (d) primary $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in eighteen local authorities over Gyeongnam during the simulation period of 2016.

해 보인다.

경남과 다르게, 부산의 권역 평균 질산염 모사농도(그림 10a)는 자체 기여농도($0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 경남($0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 울산($0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 배출의 기여농도가 더 높았고, 권역별 국내 기여농도 중 자체 기여농도가 차지하는 비율은 최대 13% 수준이었다. 부산의 NO_x 배출이 높음에도 불구하고 질산염의 자체 기여농도가 상대적으로 낮은 이유는 Bae *et al.* (2021b)에서 제시한 서울과 마천가지로 NO -titration으로 인해 $\text{NO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$ 의 산화가 제한되었기 때문으로 생각된다. 황산염의 자체 기여농도(그림 10b)는 $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (동부권역)~ $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (중서부권역)의 범위였고, 권역 평균으로는 $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보였다. 황산염은 특히 울산의 기여농도가 상대적으로 높았는데, 울산과 인접한 동부권역에서는 자체 기여농도의 5배 수준인 $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 울산 기여농도가 계산되었다. 부산 권역 평균적으로는 울산($0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경남($0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 충남($0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경북($0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 기여농도가 높았다.

부산의 암모늄 모사농도(그림 10c)는 자체 기여농도가 $0.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경남과 울산 배출에 의한 기여농도가 각각 0.51 , $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주요하였다. 권역별로는 중서부권역의 암모늄 자체 기여농도가 $1.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상대적으로 높았는데, 중서부권역은 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 의 자체 기여농도 또한 $4.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았다. 이는 2.1절에서 제시한 것처럼 중서부권역이 타 권역과 비교하여 상대적으로 좁은 면적임에도 불구하고 부산항과 관련된 비도로이동오염원의 배출이 집중되어 있기 때문이다. 다만, CAPSS에서 제공하고 있는 해상배출량에 대해서는 지자체 구분이 없어 본 연구에서는 부산항 앞해상의 선박에서 배출되는 대기오염물질은 표식하지 못하였으므로, 해상배출량이 고려될 경우 부산의 자체 기여농도는 증가할 수 있다.

부산의 배출량 삭감에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선 효과를 살펴보기 위해 $\text{PM}_{2.5}$ 구성성분별 자체 기여농도를 이용하여 부산의 평균적인 배출-농도 전환율(Kang *et al.*, 2021a, b)을 추정하였다. 배출-농도 전환율은 지역

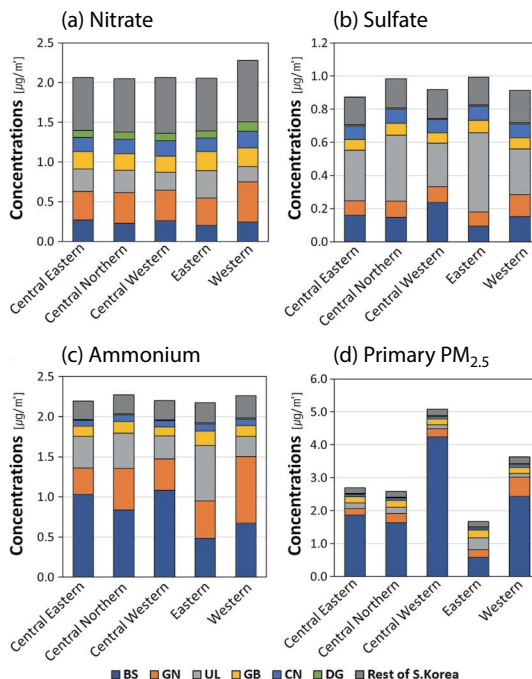


Fig. 10. The self- and neighboring provincial contributions to annual mean (a) nitrate, (b) sulfate, (c) ammonium, and (d) primary $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in five regions of Busan during the simulation period of 2016.

에서 배출된 SO_2 , NO_x , NH_3 , 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 의 단위 배출량당 각각 대기 중 황산염(SO_4^{2-}), 질산염(NO_3^-), 암모늄(NH_4^+), 1차 $\text{PM}_{2.5}$ ($\text{PPM}_{2.5}$)로 전환되는 농도를 의미한다. 본 연구에서 산정된 부산지역의 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$, $\text{NO}_x \rightarrow \text{NO}_3^-$, $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3$ 의 전환율은 각각 0.019 , 0.004 , $0.459 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{kton}/\text{yr}$ 이었고, 1차 $\text{PM}_{2.5} \rightarrow$ 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 의 전환율은 $0.865 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{kton}/\text{yr}$ 으로 $\text{PM}_{2.5}$ 구성성분 중에서는 가장 크게 나타나 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 배출 관리가 우선적으로 필요해 보인다.

앞서 분석한 $\text{PM}_{2.5}$ 와 마찬가지로 경남과 부산의 $\text{PM}_{2.5}$ 성분농도에 영향을 주는 주변 시도 배출의 기여농도는 월별/계절별로 차이를 보인다(그림 11). 경남의 질산염 모사농도는 11월을 제외하고는 자체 기여농도가 가장 주요하였고 특히, 3~4월에 약 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 반면 주변 시도 기여농도에 대해서 3~6월은 전남의 기여농도가 높고, 가을/겨울에는

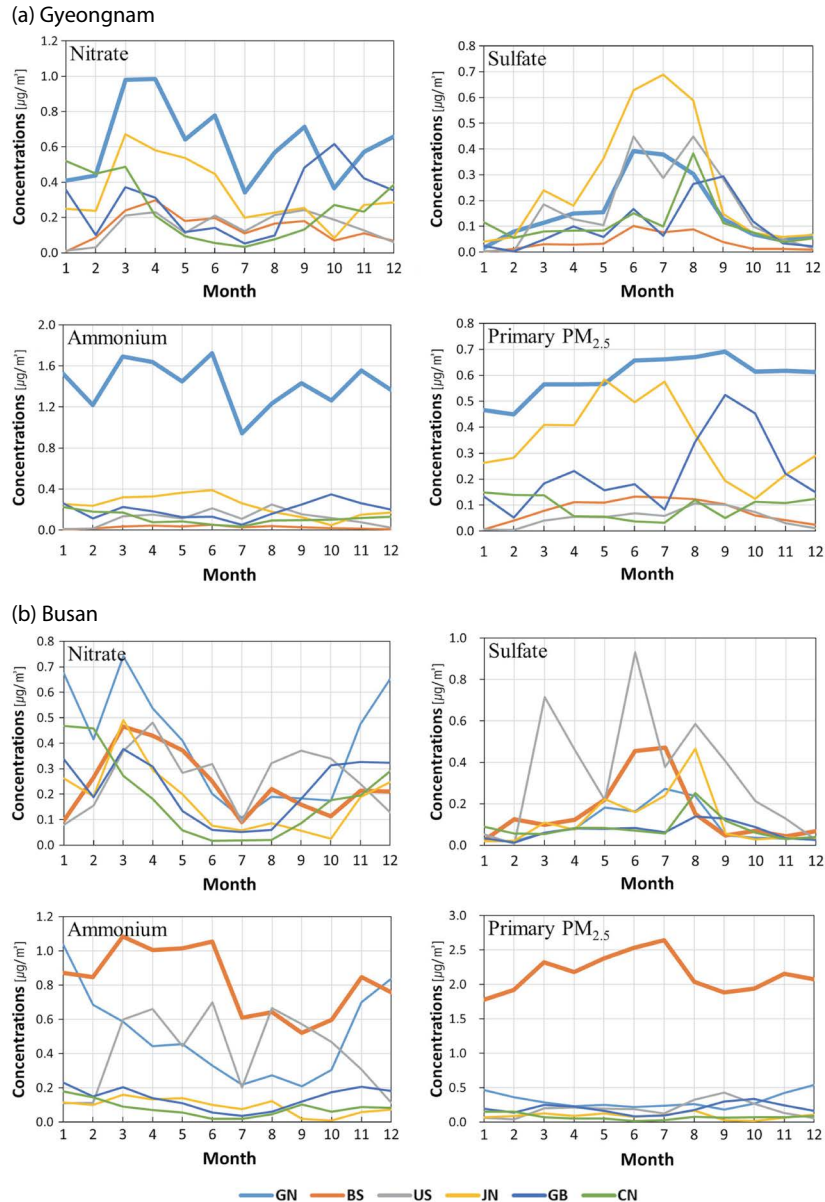


Fig. 11. The monthly self- and neighboring provincial contributions to nitrate, sulfate, ammonium, and primary $PM_{2.5}$ concentrations in (a) Gyeongnam and (b) Busan during the simulation period of 2016.

경북과 충남의 기여농도가 상대적으로 높아졌다. 황산염은 광화학반응이 활발한 여름철에 기여농도가 상승하는데, 9~10월을 제외하고 전남의 기여농도가 자체 기여보다 높았고 특히 여름철(6~8월)에는 자체 기여농도의 2배를 차지한다. 암모늄과 1차 $PM_{2.5}$ 는 연중

자체 기여농도가 가장 높았고, 1차 $PM_{2.5}$ 의 경우에는 12월, 1~7월은 전남, 8~9월은 경북의 기여농도도 적지 않다. 따라서 효율적인 $PM_{2.5}$ 농도 감소를 위해서는 물질별로 시기를 고려한 주변 지자체와의 배출저감 노력이 강구되어야 한다.

부산은 겨울철과 봄철에 질산염의 자체 및 주변 시도 기여농도가 증가하며, 다양한 주변 시도의 배출이 질산염 농도에 영향을 주지만, 그중에서는 경남의 기여농도가 특히 높았다. 1~2월의 경우, 충남의 기여농도도 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높아 충남의 대기오염물질 배출관리는 겨울철 부산의 질산염 농도 개선에 도움이 될 수 있을 것으로 예상된다. 반면 황산염은 경남과 마찬가지로 여름철에 자체 및 주변 시도의 기여농도의 증가가 뚜렷하고 그중에서도 울산의 기여농도가 연중 자체 기여농도보다 높아 중요해 보인다. 암모늄과 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 는 대체로 자체 기여농도가 가장 높는데, 암모늄은 경남(겨울철)과 울산(여름철) 배출의 기여농도도 높은 비중을 차지하였지만, 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 는 연중 부산의 자체 기여농도가 $1.7\sim 2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위로 가장 높았다. 부산 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 의 자체 기여농도는 7월에 가장 높았는데, 이는 7월의 1차 $\text{PM}_{2.5}$ 배출량이 1년 중 가장 많고, 여름철 남동계절풍의 영향으로 부산항 등에서 배출된 대기오염물질이 도심으로 유입되기에 좋은 기상조건이 형성되어 기상과 배출조건이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

3.4 기본모사 평가 및 모사 불확도 평가

본 절에서는 CAMx 모사를 통해 계산된 $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 농도를 경남과 부산의 관측농도와 비교하여 모사 정확도를 평가하였다. 대기질 모사평가에 앞서 입력자료로 사용된 기상 모사평가를 수행하였다(보충자료 그림 S1, S2). 기상관측자료는 경남과 부산에 각각 위치한 ASOS 9지점, 1지점에서 관측된 기온, 상대습도와 풍속을 WRF 모델에서 계산된 2-m 기온과 상대습도, 10-m 풍속과 비교하였다. 경남은 2016년 연평균 관측과 모사 기온이 각각 14.4 , 13.9°C 로 모델이 약 0.5°C 정도 과소모사하였고, 부산도 모사 기온이 관측보다 약 0.7°C 정도 낮았다. 반면, 풍속은 부산과 경남 모두 WRF 모사값이 관측값보다 높은 과대모사 경향을 보였는데, 평균 편의는 경남이 부산보다 크게 나타났다(경남: $+1.2 \text{ m/s}$, 부산: $+0.3 \text{ m/s}$). 이는 WRF 모델에서 매우 복잡한 남동연안의 해안선 및

지형을 현실과 똑같이 재현하기에 한계가 있기 때문인데(Jeong *et al.*, 2012), 특히 거제시와 남해시의 경우 풍속의 평균 편의가 각각 $+1.7$, $+2.3 \text{ m/s}$ 로 과대모사가 크게 나타나 대기오염물질의 모사농도에 오차로 작용할 수 있다.

경남의 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도는 $20.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 관측농도 $24.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하여 약 $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 낮게 모사되었고(그림 12a) 이러한 $\text{PM}_{2.5}$ 과소모사 경향은 부산에서도 유사하였다(평균 편의: $-6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 그림 13a). $\text{PM}_{2.5}$ 성분농도의 경우, 경남과 부산에는 대기환경연구소가 위치하지 않아 모사평가를 수행하기에 한계가 있다. 본 연구에서 사용한 CAMx 모사농도를 영남권 대기환경연구소 측정자료와 비교한 동반논문(Kang *et al.*, 2021a)에 따르면 OC(Organic Carbon)를 제외하고 $\text{PM}_{2.5}$, 질산염과 황산염, 암모늄에 대해 CAMx 모델이 과대모사함을 보였다. 하지만 영남권 대기환경측정소의 경우, 울산 산업단지와 인접하여 산업단지에서의 배출 영향이 반영되어 있으므로, 경남과 부산의 평균적인 $\text{PM}_{2.5}$ 성분농도를 대변하기는 어렵다고 판단된다. 향후 경남과 부산의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 상세한 분석과 정확한 대기질 모사평가를 위해서는 $\text{PM}_{2.5}$ 성분농도의 확보가 필요할 것이다.

경남의 NO_2 는 관측농도 19.6 ppb , 모사농도 16.5 ppb 로 모델이 4.1 ppb 정도 과소모사하였는데, 관측-모사농도의 시간 변화를 살펴보면 겨울철과 봄철에 해당하는 1~5월, 11~12월의 과소모사가 두드러진다. 이러한 모사 경향은 진주시, 거제시, 김해시, 양산시 등 도시대기측정소가 위치한 대부분의 지자체에서 확인되었는데, NO_x 배출과 관계된 시간분배계수, 앞서 언급된 경남지역 지표 풍속의 과대모사 등이 원인이 될 수 있다. 지역별로는 진주시(대안동 측정소)와 양산시(웅상읍 측정소)에서 NO_2 관측농도의 절반수준(각각 40%, 52%)의 모사농도가 계산되어 과소모사 경향이 크게 나타났고, 이들 지역을 중심으로 NO_x 배출 목록 검토가 필요해 보인다.

SO_2 에 대해서는 경남은 모사농도 3.9 ppb 로 관측농도인 4.3 ppb 와 비교하면 약 0.4 ppb 정도 과소모사된

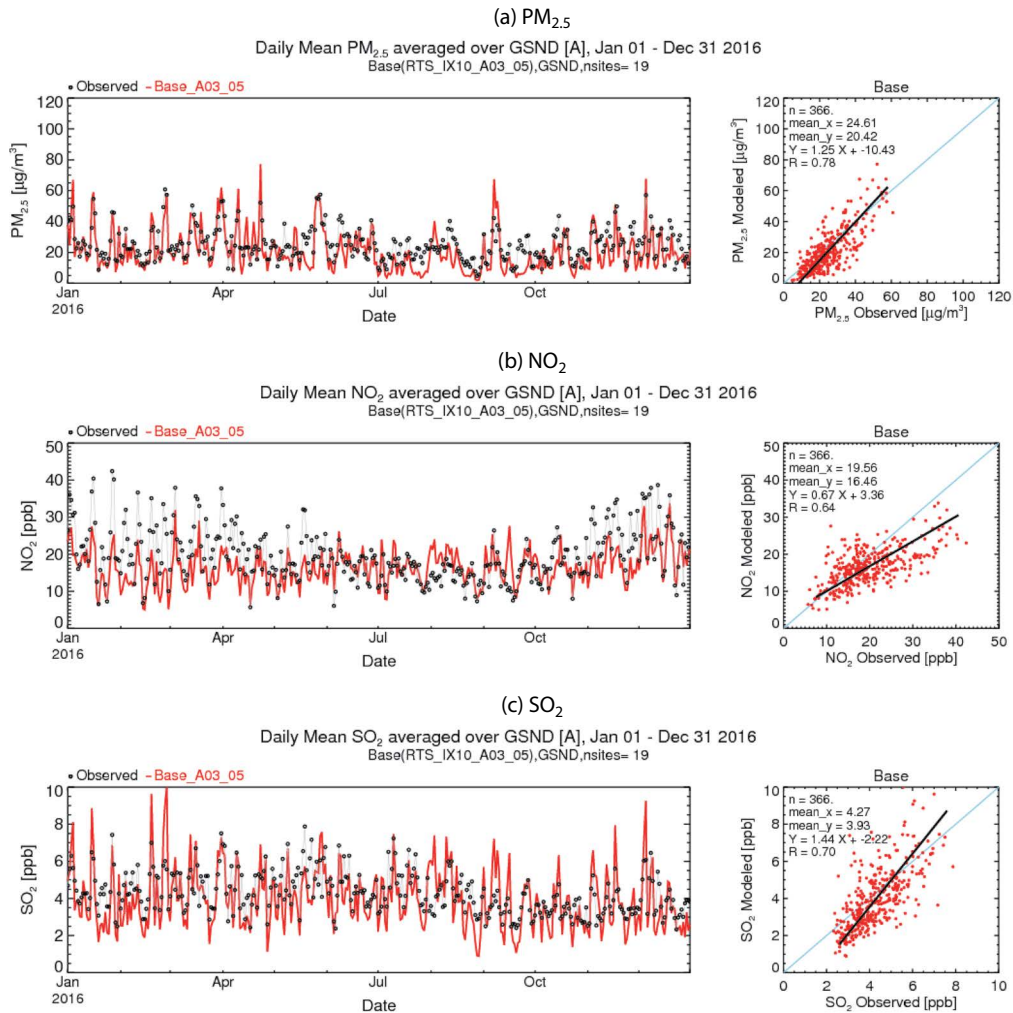


Fig. 12. Comparison of observed and simulated daily mean (a) PM_{2.5}, (b) NO₂, and (c) SO₂ concentrations at fourteen urban air quality monitoring stations in Gyeongnam during 2016.

반면, 부산은 2.4 ppb 과대모사로 평가되었다. 부산의 경우, 중서부권역에 해당하는 광복동과 수정동에서 SO₂ 관측농도는 각각 6.5, 6.0 ppb이나 모사농도는 18.7, 22.5 ppb로 관측-모사 간 농도 차이가 크게 나타났다. 또한 NO₂에 대해서도 광복동, 수정동 각각 평균 편의 +9.3 ppb, +25.6 ppb로 과대모사 경향이 매우 컸다. 이들 지역은 부산항과 인접하여 항구에 정박한 선박 및 화물차량에서 배출되는 오염물질의 영향을 직접적으로 받는 곳으로, 대기질 모델에 입력된 해당

지역 CAPSS의 SO₂, NO_x 배출량이 과대산정되었을 가능성을 시사한다.

4. 결 론

본 연구에서는 동반논문 울산에 이어 동남권역에 해당하는 경남과 부산에 대한 PM_{2.5}와 구성성분에 대한 국외 및 국내 배출에 의한 기여농도, 자체 기여농도

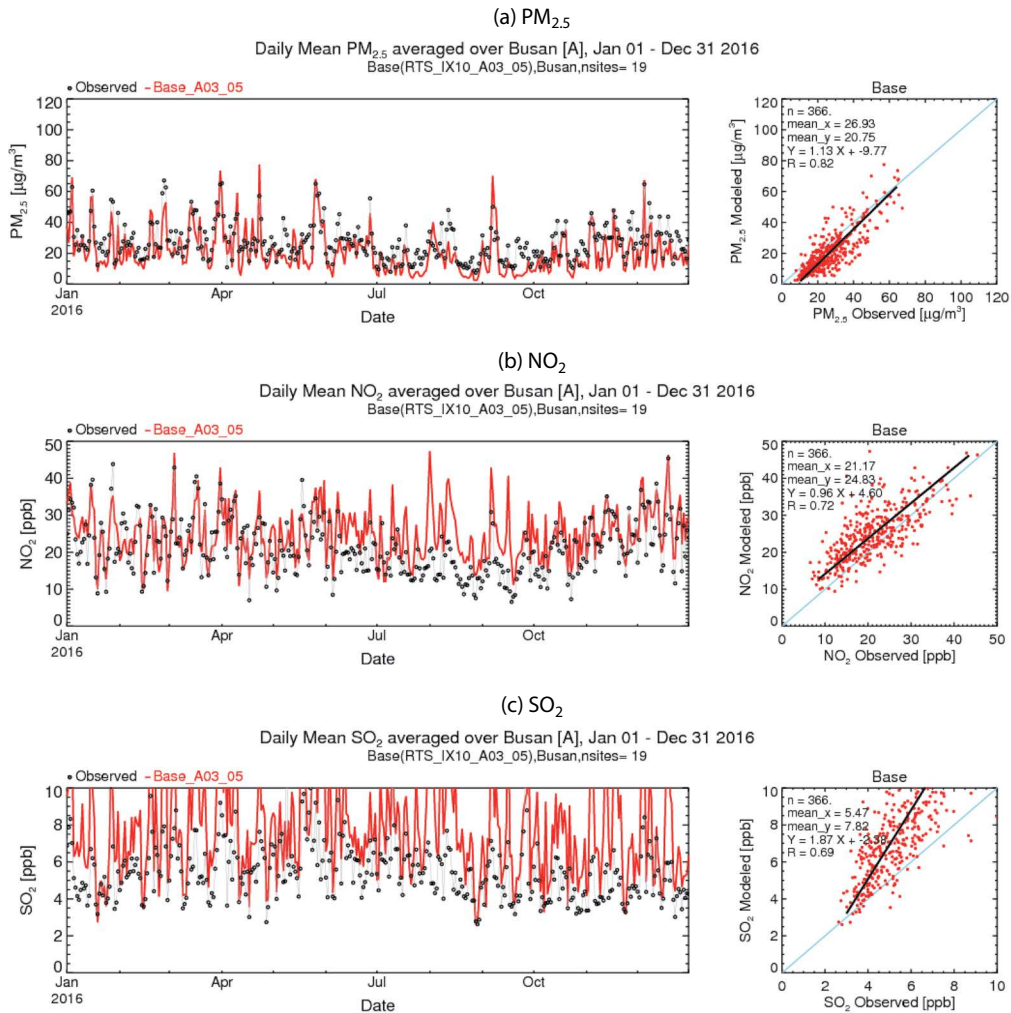


Fig. 13. Comparison of observed and simulated daily mean (a) PM_{2.5}, (b) NO₂, and (c) SO₂ concentrations at nineteen urban air quality monitoring stations in Busan during 2016.

와 주변 시도 기여농도를 2016년 CAPSS 배출량을 입력한 CAMx-PSAT 모사결과를 토대로 정량적으로 제시하였다. 경남과 부산은 우리나라 남동단에 위치하여 수도권과 비교하여 중국을 포함한 국외 배출의 영향은 상대적으로 적었으나, 국내 배출에 있어서는 풍하지역에 해당되어 다양한 주변 지자체로부터 배출에 의한 PM_{2.5} 농도 기여가 확인되었다. 경남과 부산 각각에 대한 PM_{2.5} 기여도 평가 결과를 요약하면 다음과 같다.

경남의 2016년 연평균 PM_{2.5} 모사농도(19.5 µg/m³)

에 대한 국내 기여농도는 7.5 µg/m³로 계산되었다. 경남의 자체 기여농도는 기초 지자체 평균 2.8 µg/m³이었고, 경남의 시군 중에서는 김해시의 자체 기여농도가 4.4 µg/m³로 가장 높았다. 경남의 PM_{2.5} 농도에 대한 주변 시도 기여농도는 전남(1.2 µg/m³), 경북(0.8 µg/m³), 충남(0.6 µg/m³), 울산(0.5 µg/m³) 순으로 영향이 크게 나타났으며, 전남과 인접한 남해군과 하동군에서는 전남의 기여농도가 각각 3.4, 4.0 µg/m³로 자체 기여농도보다 높게 나타나 이들 지역에 대한 PM_{2.5}

농도 관리는 전남과의 협력이 중요할 것으로 판단된다. 경남의 질산염, 황산염, 1차 PM_{2.5} 농도는 PM_{2.5} 모사농도의 각각 27.3%, 26.3%, 27.1%를 차지하였다. 암모늄의 경우, PM_{2.5} 모사농도에 대한 비율은 17.1%로 낮았으나 자체 기여농도는 1.4 µg/m³로 가장 높았다. 대기질 모사평가에서는 대부분의 기초 지자체에서 겨울철 NO₂ 농도가 과소모사되었고, 특히 양산시와 진주시에서는 NO₂ 모사농도가 관측농도의 절반 수준으로 계산되어 이들 지역을 중심으로 국가 배출목록의 개선과 배출량 시간분배계수에 대한 검토가 필요해 보인다.

부산은 연평균 PM_{2.5} 모사농도(19.5 µg/m³) 중 국내 기여농도는 8.5 µg/m³로 계산되었다. 부산의 5개 권역 중 PM_{2.5} 자체 기여농도가 가장 높은 지역은 부산항이 위치한 중서부권역(5.8 µg/m³)이었고, 항구에 정박된 선박 및 화물차량에 의한 다량의 오염물질 배출이 원인으로 사료된다. 하지만 대기질 모사평가 중 부산항 인근 수정동 측정소에서는 NO₂와 SO₂의 심각한 과대모사 경향을 보였고, 신뢰성 있는 선박배출에 의한 PM_{2.5} 기여농도 평가를 위해서는 정확한 국가 배출량 산정과 해상배출량의 지자체 구분이 우선되어야 할 것이다. 부산 PM_{2.5} 농도에 대한 주변 시도의 기여농도는 경남(1.4 µg/m³), 울산(1.2 µg/m³), 경북(0.6 µg/m³)의 순으로 높았고, 부산과 떨어져 있는 충남의 기여농도도 0.4 µg/m³로 적지 않았다. 부산의 질산염, 황산염, 1차 PM_{2.5}, 암모늄의 모사농도는 PM_{2.5} 모사농도의 각각 23.5%, 25.6%, 33.4%, 15.6%를 차지하였고, 이 중 자체 기여농도가 가장 높으면서, 배출-농도 전환율도 상대적으로 높게 계산된 1차 PM_{2.5}에 대한 배출관리가 우선적으로 필요함을 확인하였다.

부산과 경남이 가지고 있는 복잡한 해안선과 도서 지역, 산지 등의 지형조건은 계절풍과 국지풍(해륙풍/산곡풍)의 결합으로 계절과 지역에 따라 복잡한 풍계를 형성하고 있었다. 이로 인해 부산/경남의 PM_{2.5} 및 성분농도는 지자체를 둘러싼 광역적인 배출 환경과 시기(계절)에 따라 각기 다른 주변 시도의 배출 영향을 받음을 본 연구를 통해 확인하였다. 이와

함께 PM_{2.5} 및 NO₂, SO₂ 농도의 모사정확도 평가를 통해 대기질 모사과정 및 입력자료의 문제점을 시·공간적으로 파악할 수 있었다. 본 연구에서 도출된 부산과 경남의 PM_{2.5} 기여도 평가와 모사정확도 평가 결과는 보다 효과적인 동남권 초미세먼지 정책수립의 과학적 근거로 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터와 환경부 연구용역사업(미세먼지-건강영향 평가를 위한 모델링 기반 노출특성 평가연구)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, M., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2021a) Role of emissions and meteorology in the recent PM_{2.5} changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.466>
- Corbett, J.J., Winebrake, J.J., Green, E.H., Kasibhatla, P., Eyring, V., Lauer, A. (2007) Mortality from ship emissions: a global assessment, *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8512-8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- Jeon, B.-I. (2020a) Characteristics of Summertime High PM_{2.5} Episodes and Meteorological Relevance in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 29(7), 761-772. <https://doi.org/10.5322/jesi.2020.29.7.761>
- Jeon, B.-I. (2020b) Spatiotemporal Variation of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentration for 2015 to 2018 in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 29(7), 749-760. <https://doi.org/10.5322/jesi.2020.29.7.749>
- Jeong, J.-H., Song, S.-K., Lee, H.W., Kim, Y.-K. (2012) Effects of high-resolution land cover and topography on local circulations in two different coastal regions of Korea:

- a numerical modeling study, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 118(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s00703-012-0211-y>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.517>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021a) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 206-230, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.206>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021b) Source sectoral impacts on provincial PM_{2.5} concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Son, K., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.292>
- Kim, J.-M., Jo, Y.-J., Yang, G.-H., Heo, G., Kim, C.-H. (2020a) Analysis of Recent Trends of Particulate Matter Observed in Busan - Comparative Study on Busan vs. Seoul Metropolitan Area (I), *Journal of Environmental Science International*, 29(2), 177-189. <https://doi.org/10.5322/jesi.2020.29.2.177>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021a) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.206>
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021c) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 144-168, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.144>
- Koo, B., Wilson, G.M., Morris, R.E., Dunker, A.M., Yarwood, G. (2009) Comparison of source apportionment and sensitivity analysis in a particulate matter air quality model, *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6669-6675. <https://doi.org/10.1021/es9008129>
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2021) <https://kosis.kr/index/index.do> (accessed in June 16, 2021).
- Lee, Y., Song, M., Kim, E., Oh, S.-H., Park, C., Choi, W., Lee, T., Shon, Z.-H., Bae, M.-S. (2020) Source Identification of PM_{2.5} Major Elemental Components at the Harbor Industrial Area in Busan: Comparison of Trace Elemental Concentrations Using Two XRFs, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 216-227. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.2.216>
- Ministry of Environment (MOE) (2020) Annual report of air quality in Korea 2019, (in Korean).
- Ramboll-Environ (2021) Comprehensive Air Quality Model with Extensions. <http://www.camx.com/> (Accessed in February 10, 2021).
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.429>
- Yarwood, G., Morris, R.E., Wilson, G.M. (2007) Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model Air Pollution Modeling and Its Application XVII (pp. 478-492): Springer.
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.785>

Authors Information

강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
 유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구원, 국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)
 배민아 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 손규원 (아주대학교 환경공학과 석사과정)
 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

Supplementary Materials

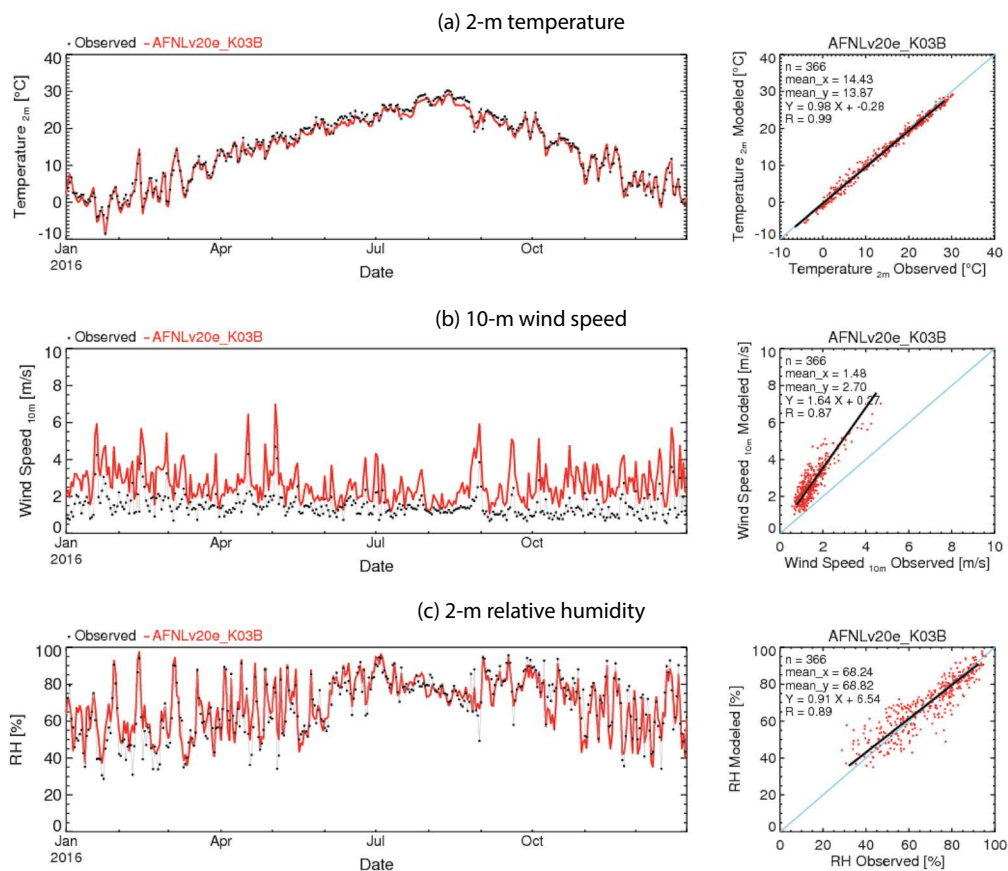


Fig. S1. Comparison of observed and simulated daily mean (a) 2-m temperature, (b) 10-m wind speed, and (c) 2-m relative humidity at the ASOS in Gyeongnam during 2016.

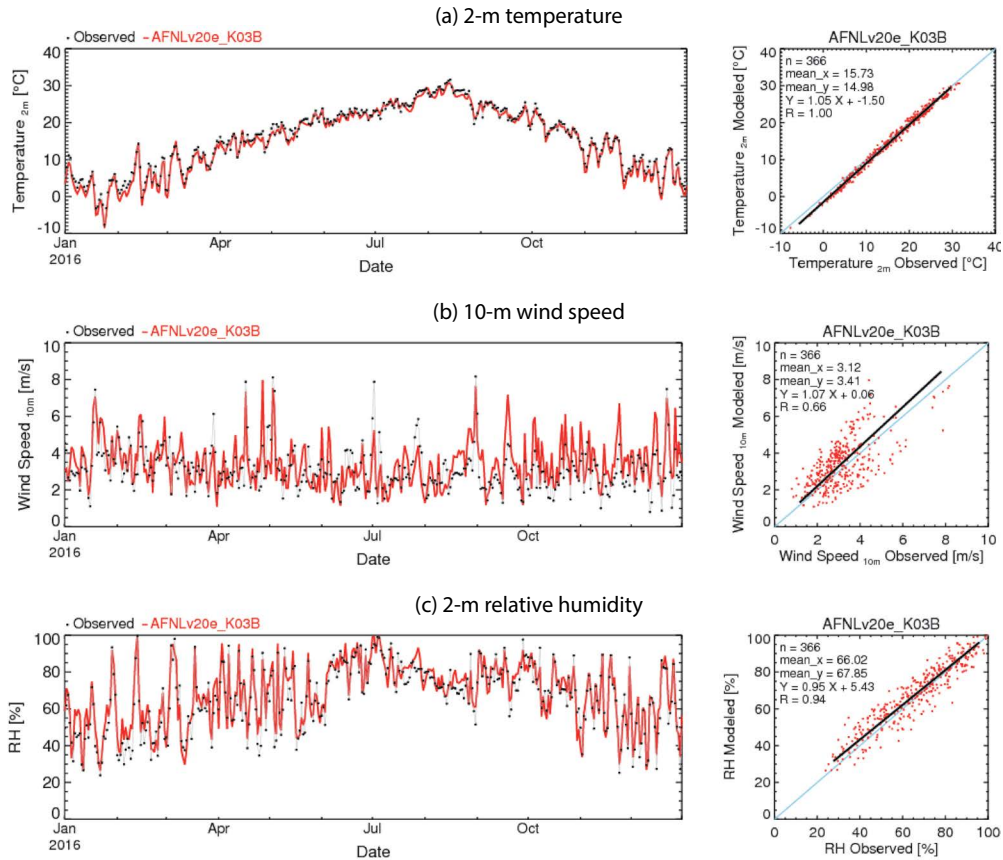


Fig. S2. Comparison of observed and simulated daily mean (a) 2-m temperature, (b) 10-m wind speed, and (c) 2-m relative humidity at the ASOS in Busan during 2016.

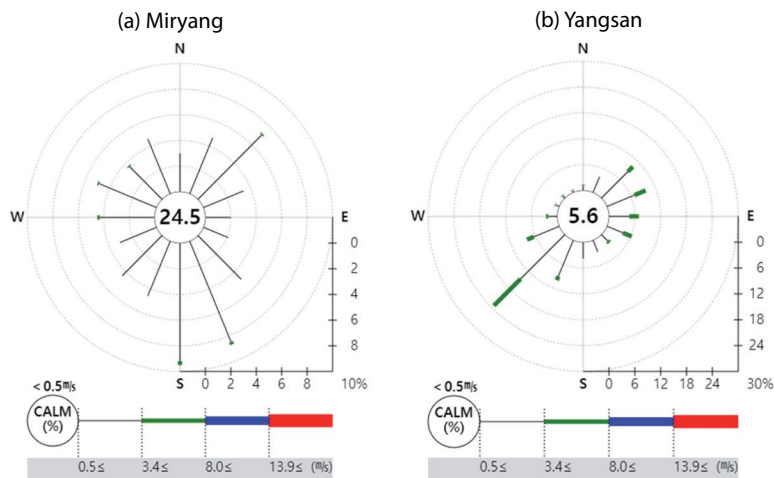


Fig. S3. Wind roses in (a) Miryang and (b) Yangsan during the summer of 2016.