

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 미세먼지 최근 경향 분석 - 수도권과 비교연구 (I)

김종민 · 조유진 · 양금희 · 허국영¹⁾ · 김철희*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, ¹⁾환경부 국가미세먼지정보센터 정책지원팀

Analysis of Recent Trends of Particulate Matter Observed in Busan - Comparative Study on Busan vs. Seoul Metropolitan Area (I)

Jong-Min Kim, Yu-Jin Jo, Geum-Hee Yang, Gookyoung Heo¹⁾, Cheol-Hee Kim*

Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾Policy Support Team, National Center for Fine Dust Information, Chungju 28166, Korea

Abstract

We analyzed the recent characteristics of Particulate Matter (PM) including PM₁₀ (PM with diameter of less than 10 μm) and PM_{2.5} (PM with diameter of less than 2.5 μm) observed in Busan metropolitan area, and compared them with those measured in Seoul metropolitan area. This analysis includes the monthly, seasonal, and annual variations and differences, in emissions and chemical compositions observed in both Busan and Seoul areas. Synoptic meteorological conditions were investigated at the time when high PM concentrations occurred in each of the two areas. The results showed clearly decreasing trends of annual mean concentrations with strong seasonal variations: lower in summer and higher in winter in both areas. In comparison with Seoul, the seasonal variation in Busan demonstrated relatively lower, but showed greater summer fluctuations than in Seoul metropolitan area. This is implying the importance of secondary generation of PM in summer via active photochemical reaction in Busan area. In high concentration days, Busan's chemical composition of sulfate was higher than that of nitrate in summer, whereas nitrate was higher than sulfate in Seoul. The ratios of NO₃⁻ to SO₄²⁻ (N/S ratio) showed lower in Busan approximately by a factor of 1/2 (half of N/S ratio) in Busan compared with that in Seoul. Others such as synoptic characteristics and emission differences were also discussed in this study.

Key words : Particulate matter, Busan metropolitan area, Seoul metropolitan area, Time variations of particulate matter

1. 서론

대기 중에 부유하는 미세먼지는 입자상 오염물질로서 인체에 매우 해로운 영향을 줄 뿐만 아니라 지구온난화와 같은 지구규모의 대기환경, 동식물 생태계 등 매우 다

양한 분야에 영향을 미친다. 인체에 대한 악영향으로 호흡기 질환 등 사람의 건강에 유해할 뿐만 아니라, 전 지구적으로 볼 때는 빛을 직접 산란 또는 흡수함으로써 복사 평형에 영향을 미친다. 예를 들어 PM₁₀을 포함한 대기 중의 스모그 층은 태양복사 에너지를 흡수하여 오히려

Received 31 January, 2020; Revised 10 February, 2020;

Accepted 12 February, 2020

*Corresponding author: Cheol-Hee Kim, Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-3687
E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

운량을 감소시키는 작용을 하기도 하며(Twomey et al., 1984; Kiehl and Briegleb, 1993), 간접적으로는 구름 응결핵으로 작용하여 알베도와 구름의 수명에 영향을 미치기도 한다(Toon, 1995). 또한, 미세먼지는 광합성 작용의 억제로 인한 식물의 고사, 가시거리 저해로 인한 시정 악화(Lee et al., 1986; Choi et al., 1999) 등 생활 환경적으로도 많은 영향을 미치고 있다.

미세먼지 연구는 우선 지역에 따른 특성을 규명하는 노력이 활발하다. 모델링 연구는 대부분 지역 기반으로 진행되고 있으며(Bae et al., 2018; Yu et al., 2019), 측정 분석적 연구는 특히 지역 고유의 배출 특성을 반영한다는 측면에서 거의 전국적으로 활발히 진행되고 있다. 이는 지역별 미세먼지 특성이 각각 다르며, 미세먼지 저감 정책을 도출하는 데에도 지역별로 다르게 도출되어야 한다는 사실을 잘 반영한다고 할 수 있다. 이러한 지역 기반 특성 분석적 연구는 최근에도 활발한데, 특히 수도권 대상 연구로는 모델링 연구를 비롯하여, 측정자료분석 및 정책제안 등 다양하다(Byun et al., 2018; Lee et al., 2018; Choi et al., 2019; Kim et al., 2019; Yeon and Kim, 2019). 연구 대상 지역 분포는 동남권(Ju et al., 2018; Park et al., 2019), 광주(Yu et al., 2019), 경북지역(Hwang and Kim, 2019), 춘천(Byun et al., 2018), 그리고 백령도, 안면도 등 배령 농도 지역의 측정 분석적 연구 또한 활발하다(Han et al., 2018; Kim et al., 2018). 향후에도 최근 측정 장비의 확충과 보편화로 국내 대도시에서의 측정 분석적 연구는 매우 활발해 질 것으로 기대된다.

현재 부산지역에서도 정규 측정소 등 환경부 및 지자체에서 20개 이상의 측정소가 운영되어 부산지역 특성을 어느 정도 확보할 수 있는 것으로 평가된다. 그러나 화학 성분 자료 등이 수도권, 백령도 등에 비해 상대적으로 많지 않아 상세한 부산지역 특성 분석이 쉽지 않아 보인다. 아울러 최근 부산지역은 상하이, 광저우 등과 더불어 전 세계 항만의 NO_x와 SO_x 배출의 20%를 차지하는 10대 컨테이너 항만으로 선정되는 등 대기환경적 측면에서 매우 취약하다고 볼 수 있으며(Wan et al., 2016), 이는 부산지역의 미세먼지 연구가 절실히 필요함을 역설적으로 말해 주는 것으로 이해된다.

본 연구에서는 부산지역 측정소에서 수집한 최근의 미세먼지 질량농도와 부산 지자체에서 측정된 몇 가지

화학성분 측정자료를 기반으로 부산지역 미세먼지 최근 경향을 분석하였다. 즉, 현재 수집 가능한 자료를 토대로 부산지역의 미세먼지 최근 경향, 배출 특성, 고농도 시의 기상 및 물리화학적 경향과 특성을 다각적으로 정리하였다. 또한 부산의 PM_{2.5} 고농도 사례를 선정하고 종관 일기도 및 이온 특성을 도출하여 고농도 발생과 연관된 다양한 분석을 수행하였다. 아울러 본 연구에서는 서울 포함 수도권 미세먼지 농도 특성 분석을 동시에 수행하였는데, 최종적으로 서울과 부산의 분석된 결과를 대비시켜 그 차이점을 비교함으로써 부산지역의 미세먼지 특성을 보다 심도 있게 파악하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 측정망 자료 및 배출량

부산지역 미세먼지 특성을 수도권과 비교 분석하기 위하여 두 지역에서 측정된 최근 기상관측 자료, 미세먼지 농도 자료, 화학성분 자료를 수집하였다. 서울과 부산의 도시 대기질 측정망은 2018년 대기환경연보 기준 서울 25개, 부산 20개의 측정소가 설치되어 있으며, Fig. 1에 본 연구에서 사용한 서울과 부산의 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System; ASOS) 및 도시 대기질 측정망 위치 분포를 나타내었다. 종관기상 자료는 ASOS에서 1시간 단위로 관측된 지상 기온과 풍속 자료를, 그리고 농도 자료는 도시 대기질 측정망에서 1시간 단위로 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 자료를 지역 평균하여 이용하였다. 단, 황사가 발생한 날은 발원지 특성이 반영되므로 지역 특성을 분석하는 본 연구에서는 제외하였다. PM_{2.5} 성분자료로서 본 연구에 사용된 질산염과 황산염 농도 자료는 서울의 경우 고려대학교 1개 지점(NIER, 2019)에서, 부산은 장림, 연산, 신항 3개 지점(<http://heis.busan.go.kr/data/data001.aspx>)에서 수집한 자료를 이용하였다.

분석 기간은 10년으로서 PM₁₀은 2009년부터 2018년까지, PM_{2.5}는 2015년부터 2018년까지이며, 계절 구분은 봄철은 당년 3월부터 5월, 여름철은 당년 6월부터 8월, 가을철은 당년 9월부터 11월, 겨울철은 전년 12월부터 당년 2월까지로 하였다. PM_{2.5} 수집 기간이 PM₁₀과 다른 것은 PM_{2.5} 측정이 최근(2015년부터)에 와서야 시작되었기 때문이다. 고농도 발생일 선정은 2018년 3월

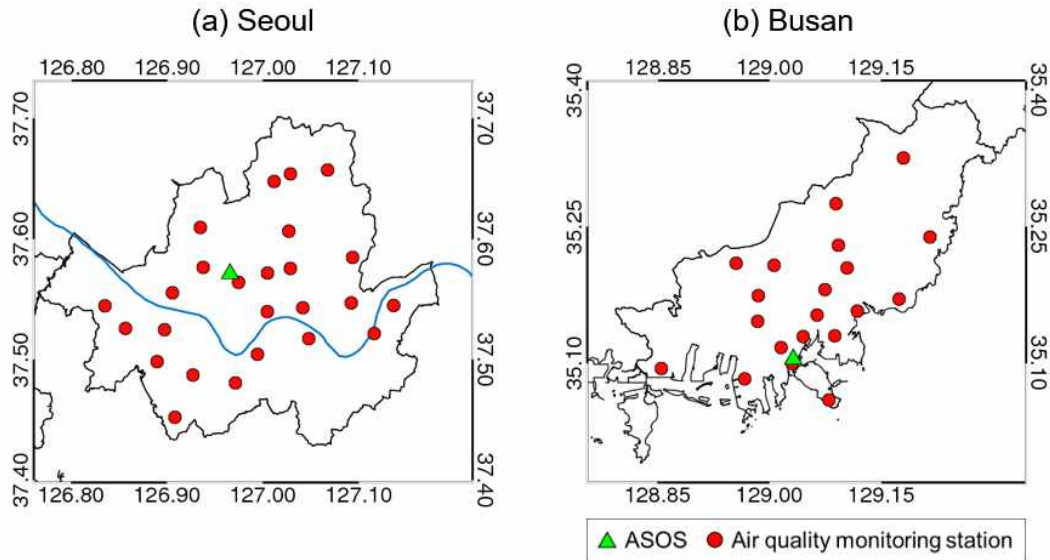


Fig. 1. Locations of ASOS and air quality monitoring stations in (a) Seoul and (b) Busan areas.

환경기준을 적용하여, PM₁₀ 일평균 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과, PM_{2.5} 일평균 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날(등급 예보 ‘나쁨’ 기준)로 선정하였다.

서울과 부산의 NO_x, SO_x, PM_{2.5} 배출량 정보는 대기 정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)의 2014년 자료를 이용하였다. CAPSS의 배출원 분류는 2014년 기준 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로 이동 오염원, 비도로 이동 오염원, 폐기물처리, 농업활동, 기타 면오염원, 비산먼지, 생물성 연소로서 총 13개 대분류이다. 이 중 서울과 부산에서 중요하게 분류되는 비산업 연소는 상업 및 공공기관시설, 주거용 시설 등 비산업 시설에서의 연료 연소를, 제조업 연소는 공정로 등의 제조 시설에서의 연료 연소를, 생산공정은 석유제품산업, 제철제강업, 화학제품 등의 생산공정에서 발생하는 배출을, 도로 이동 오염원은 각종 자동차 등을, 비도로 이동 오염원은 항공, 선박, 건설기계 등을 의미한다(NIER, 2016).

2.2. 고농도 사례 선정

본 연구에서는 미세먼지 고농도 사례 분석을 수행하였다. 고농도 사례는 부산지역 화학성분 자료가 활용가

능한 2018년 이후를 대상으로 하였다. 고농도 사례는 계절별로 구분하여 2018년 6월부터 8월까지(여름)와 2018년 12월부터 2019년 2월까지(겨울) 부산의 일평균 PM_{2.5} 농도를 기준으로 고농도 발생일을 선별하였다. 선정된 고농도 발생일 전후로 1일씩 추가하여 종관 일기도 분석을 수행하였고, 그 결과를 다시 세 가지 타입으로 세분화하였다. 첫째는 상층(850 hPa)과 지상에서 한반도 부근 고기압이 정체하여 자체 배출된 오염물질이 잘 축적되어 발생한 전형적인 정체성 고기압에 의한 상하층 모두 ‘정체형’ 고농도 유형이다. 둘째는 상층 서풍계열의 바람이 존재하면서 외부에서 한반도로 유입된 상층 대기 오염물질이 지상 농도에 영향을 주고, 반면 지상에서는 낮은 풍속으로 자체 배출된 오염물질이 축적되어 발생한 소위 상하층 ‘복합형’ 고농도 유형이다. 셋째는 상층 서풍계열 바람과 함께 외부에서 유입된 오염물질이 지상 농도를 높이는 외부 ‘유입형’ 고농도 유형이다. 이 경우 지상에서는 다소 강한 풍속으로 자체 배출된 오염물질이 환기(ventilation)되어 타 지역으로 수송되면서 지상 농도에는 외부 유입에 의한 영향보다 적은 경우이다. 위 세 가지 유형을 상하층 일기도를 통해 직접 확인하고 이를 정성적으로 1차 분류하여, 각 고농도 세 유형별 특징적인 사례기간을 각각 선정하여 상하층 일기도 특징을 구분하여

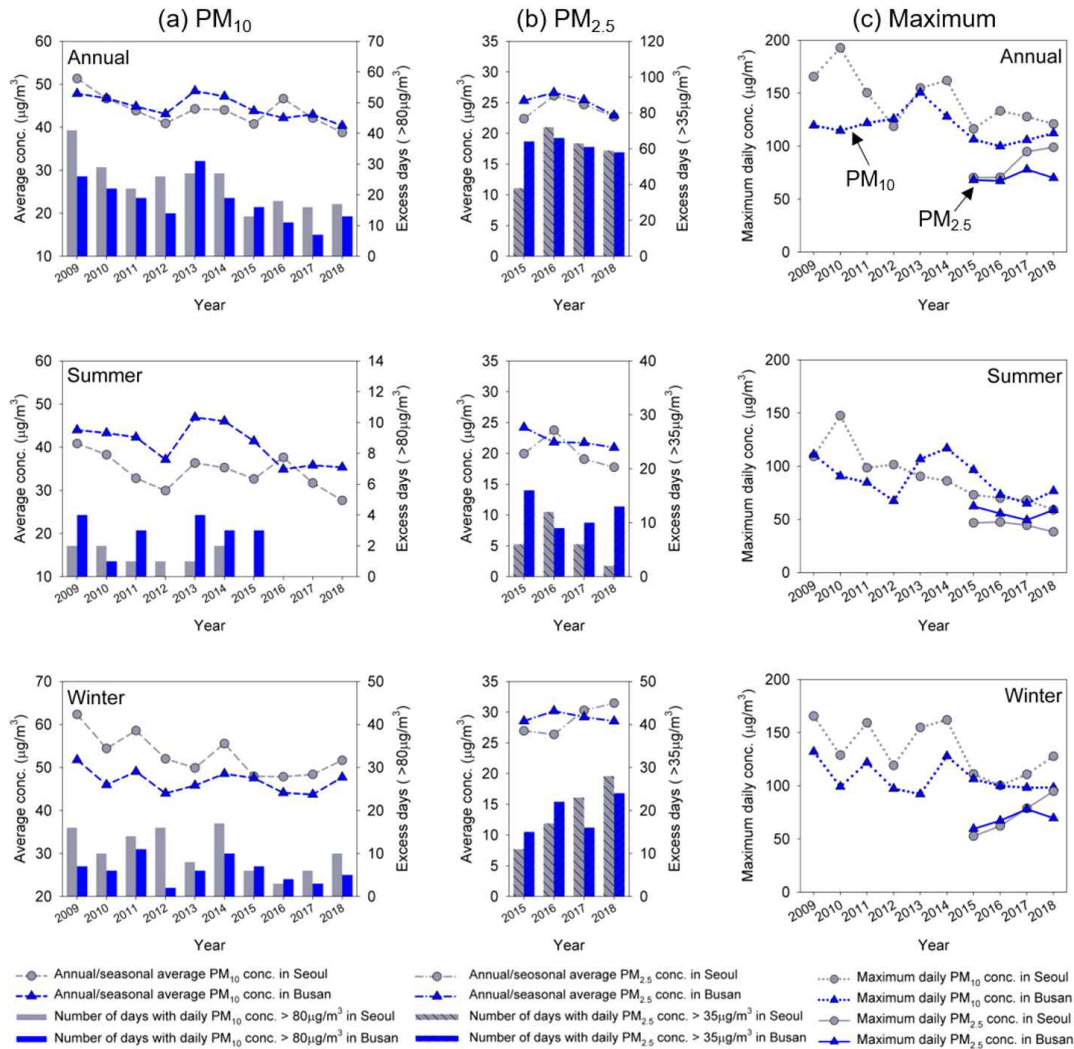


Fig. 2. Annual trends of seasonal (a) PM₁₀, (b) PM_{2.5}, and (c) PM maximum daily mean concentrations in Seoul and Busan areas.

기술하였다.

3. 결과 및 분석

3.1. 미세먼지 농도 특성 분석

Fig. 2는 서울과 부산 두 지역의 연도별 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도와 계절별(여름, 겨울) 평균, 나쁨 이상 고농도 발생 일수, 최고 일평균 농도를 나타낸다. 서울과 부산의 연평

균 PM₁₀ 농도, 고농도 발생 일수는 두 지역 모두 감소하고 있으며, 반면 겨울철 평균 PM₁₀ 농도는 최근 증가하는 공통된 추세를 보였다. 여름철의 경우 2016년 이후 서울의 PM₁₀ 농도는 감소추세이지만, 부산의 PM₁₀ 농도는 약 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 수준을 유지하여 감소하지 않는 특징을 보이는 등 부산지역은 서울과 다소 다른 추세를 보였다. 여름철 PM₁₀ 최고 일평균 농도는 서울의 경우 꾸준히 감소하지만, 부산은 2018년 다시 증가하여 약

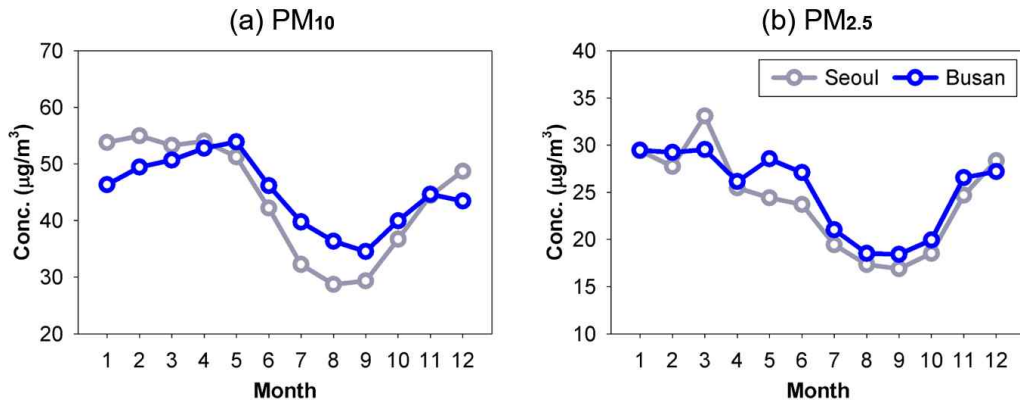


Fig. 3. Monthly variations of (a) PM₁₀ and (b) PM_{2.5} concentrations in Seoul and Busan areas.

76.7µg/m³을 기록하는 등의 특성을 보여, 여름철 미세먼지 농도는 서울과 부산이 다른 특성을 뚜렷이 보였다 (Fig. 2).

PM_{2.5} 농도 특성 또한 PM₁₀과 대체로 유사한 추세를 보였다. 서울과 부산 두 지역 모두 연평균 PM_{2.5} 농도, 고농도 발생 일수는 감소 추세이며, 겨울철 고농도 발생 일수는 증가하는 공통된 추세를 보인다. 반면 여름철의 경우 PM₁₀과 유사하게 나타났다. 서울은 평균 PM_{2.5} 농도, 고농도 발생 일수, 최고 일평균이 꾸준히 감소하는 추세를 보이지만, 부산은 2016년부터 평균 농도의 감소 추세가 둔화되어 감소 추세가 거의 나타나지 않고 약 21 µg/m³의 농도 수준을 일정하게 유지하는 특성을 보였다. 부산의 PM_{2.5} 고농도 발생 일수는 오히려 증가(13일)하였고, 2018년의 경우 부산의 PM_{2.5} 최고 일평균 농도가 다시 증가하여 58.8 µg/m³을 기록했다. 겨울철에는 서울이 부산보다 미세먼지 농도가 전반적으로 더 높은 특성을 보이지만, 여름철에는 서울보다 부산이 PM₁₀ 평균 농도는 약 6.4 µg/m³, PM_{2.5}의 평균 농도는 약 2.0 µg/m³, PM₁₀ 고농도 발생 일수는 약 5.5일, PM_{2.5} 고농도 발생 일수는 약 0.9일 더 높게 나타났다. 2013년부터는 최고 일평균 농도 또한 비슷하거나 더 높아지는 경향을 보였다. 2013년부터 2018년까지 PM₁₀ 최고 일평균 농도가 약 14.7 µg/m³, 2015년부터 2018년까지의 PM_{2.5} 최고 일평균 농도는 약 12.2 µg/m³ 더 높아진 것으로 나타나, 확실히 여름철 미세먼지 농도는 서울지역과 비교하여 부산이 전반적으로 더 높은 특성을 확인할 수 있다(Fig. 2).

이는 기온이 상대적으로 높은 부산 지역이 여름철 상대적으로 더 활발한 광화학 반응을 보여서 2차 생성되는 미세먼지가 더 증가할 수 있다는 가능성을 시사해 준다.

Fig. 3은 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 월별 평균 농도를 나타낸 그래프이다. PM₁₀ 월별 평균 농도에서 서울의 경우 2월에 약 54.98 µg/m³로 최고 농도를, 8월에 약 28.72 µg/m³로 최저 농도를 보여 약 26.26 µg/m³의 차이를 보였다. 부산의 경우 5월에 약 53.91 µg/m³로 최고 농도를, 9월에 약 34.57 µg/m³로 최저 농도를 보여 약 19.34 µg/m³의 차이를 보였다. 결론적으로 서울은 겨울에 높고, 여름에 낮으며, 부산은 겨울보다는 봄에 더 높고, 여름에 낮은 것으로 나타나는 계절적 특성을 보여, 계절 간 편차가 서울보다 부산지역이 상대적으로 훨씬 적은 것으로 나타났다. 평균 농도 또한 12월부터 4월까지의 서울이 부산보다 높게 나타났지만, 5월에서 11월까지의 서울보다 부산이 높은 것으로 나타났다(Fig. 3).

PM_{2.5} 월별 평균 농도 또한 PM₁₀ 경향과 계절 특성이 유사하였는데, 서울의 경우 3월 약 33.09 µg/m³로서 최고 농도를, 9월 약 16.90 µg/m³로서 최저 농도를 보여, 약 16.19 µg/m³의 최대-최소 차이를 보였으며, 부산의 경우 3월 약 29.54 µg/m³로서 최고 농도를, 9월에 약 18.42 µg/m³로서 최저 농도를 보여 약 11.12 µg/m³의 차이를 보였다. 역시 서울과 부산 모두 겨울에 높고, 여름에 낮은 것으로 나타났으며, 계절 간 편차는 PM₁₀과 마찬가지로 서울보다 부산이 더 적은 것으로 나타났다. 평균 농도 또한 PM₁₀과 유사하게 4월부터 11월까지 서울보다 부산이

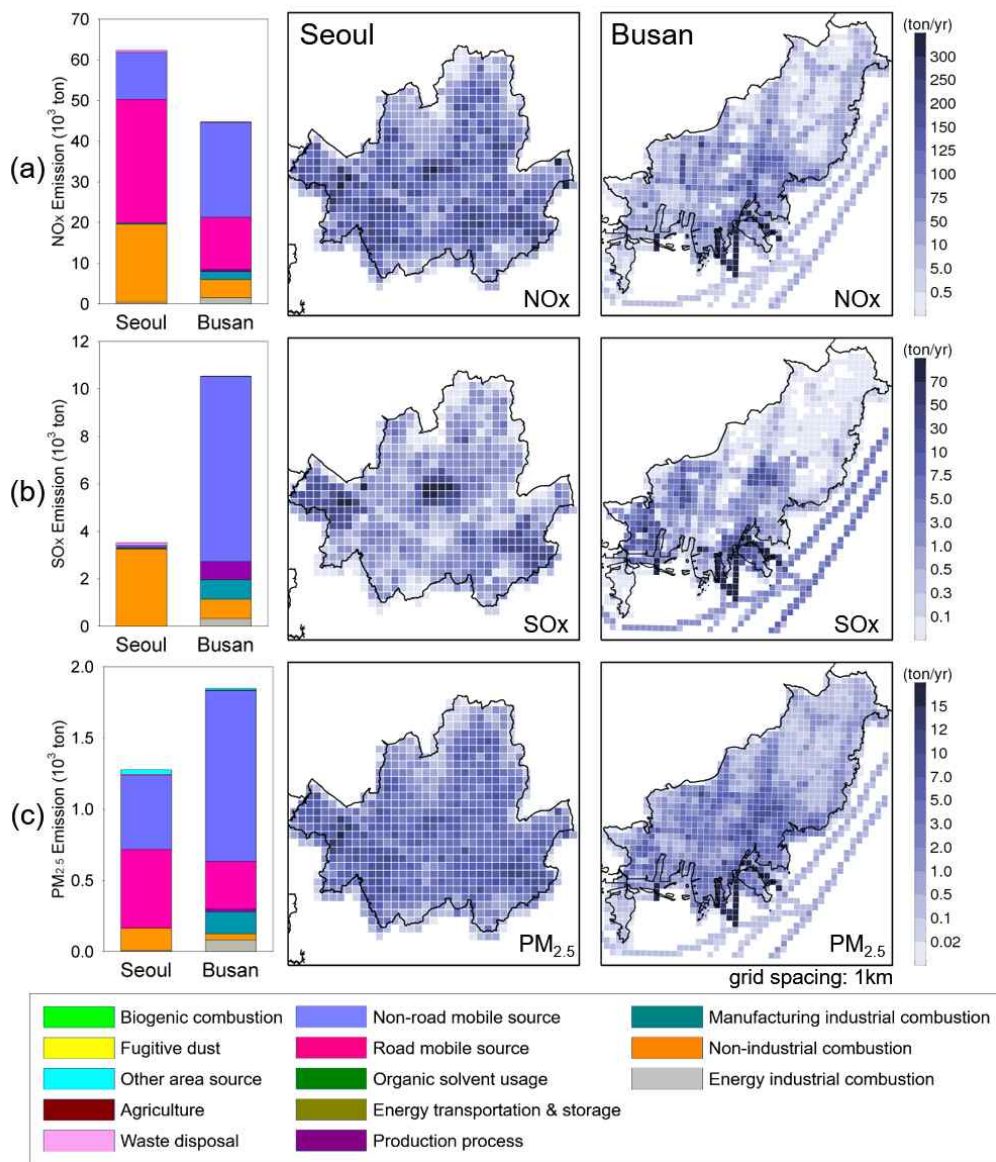


Fig. 4. Total emission amounts and horizontal distributions of emissions of (a) NO_x, (b) SO₂, and (c) PM_{2.5} from CAPSS (2014) in Seoul and Busan areas.

높은 것으로 나타나, Fig. 2에서 기술한 결과와 마찬가지로 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 여름철에 부산이 서울보다 더 높은 것으로 나타났다(Fig. 3). 따라서 여름철 미세먼지 농도 특성은 부산지역이 서울과 비교하여 뚜렷이 높은 특징을 보여서, 고온의 계절에 광화학 반응에 의한 2차 미세먼지 생성에 대한 더 심도 있는 연구가 필요할 것으

로 판단된다.

3.2. 미세먼지 화학성분 특성

Fig. 4는 2014년 CAPSS 배출량 자료로부터 도출한 서울과 부산의 2014년 연간 NO_x, SO_x, PM_{2.5}의 점, 이동, 먼 오염원을 모두 합한 총 배출량의 공간 분포를 나타

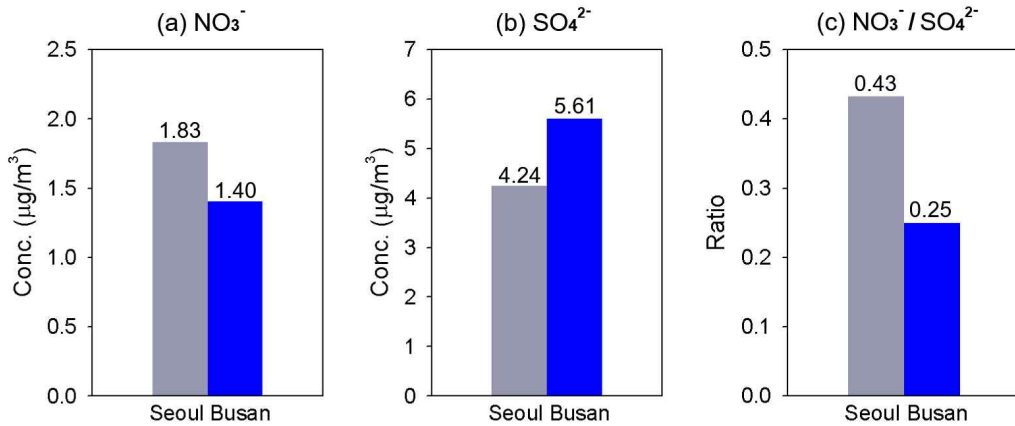


Fig. 5. Measurements of (a) NO₃⁻ and (b) SO₄²⁻ concentrations in summer, and (c) their ratios of NO₃⁻ to SO₄²⁻ in Seoul and Busan areas.

낸다. 총 배출량은 NO_x의 경우 서울약 62,350 톤, 부산 약 44,796 톤으로 부산보다 서울이 약 1.4배 많은 것으로 나타났다. 분야별로는 서울은 도로 이동 오염원이 약 30,383 톤(약 48.7%)으로 가장 많았으며, 그 다음으로 비산업 연소부문에서 약 19,207 톤(약 30.8%)으로 두 번째로 높게 나타났다. 반면 부산의 경우 비도로 이동 오염원이 약 23,356 톤(약 52.1%)으로 제일 높게 나타났으며, 도로 이동 오염원이 약 12,818 톤(약 28.6%)으로 두 번째로 높게 나타났다. 그 결과 NO_x 배출량의 공간 분포 또한 서울의 경우 강 혹은 산악지역보다 교통량, 상업 시설, 주거 시설 등이 많은 중구, 강남구 등의 지역에서 높게 나타났고, 부산의 경우 항구가 위치한 북항, 남항 등 연안지역과 연제구, 동래구 등의 산업지역에서 높게 나타났다(Fig. 4(a)).

SO_x 배출량은 서울의 경우 약 3,527 톤, 부산이 약 10,536 톤으로 부산보다 부산이 약 3배가량 더 높게 나타났다. 분야별로는 서울의 경우 비산업 연소가 약 3,256 톤(약 92.3%)을 차지해 가장 높게 나타났다. 부산의 경우 비도로 이동 오염원 약 7,797 톤(약 74.0%)을 차지하여 선박 등의 요인이 월등함을 보였으며, 두 번째로 높은 분야는 비산업 연소, 제조업 연소, 생산 공정 등이 약 76~83 톤(약 7~8%)으로서 소폭으로 나타났다. 따라서 SO_x 배출량의 공간 분포는 서울은 중구, 강서구, 송파구 등의 상업 및 주거 시설 등이 많은 지역에서 높게 나타났고, 반면 부산은 북항, 남항 등의 항구가 있는 지역과 산

업 단지가 밀집된 강서구 등의 지역에서 높게 나타나, 역시 지역별 특징을 잘 보여 주었다(Fig. 4(b)).

PM_{2.5} 배출량은 서울의 경우 약 1,278 톤, 부산이 약 1,849 톤으로 서울보다 부산이 약 1.4배 더 많았던 것으로 나타났다. 서울은 도로 이동 오염원이 약 553 톤(약 43.2%)으로 가장 많았고, 이와 유사하게 비도로 이동 오염원이 약 519 톤(약 40.6%)으로 두 번째로 높게 나타났다. 반면 부산의 경우 비도로 이동 오염원이 약 1,199 톤(약 64.9%)으로 가장 많았고, 도로 이동 오염원이 약 334 톤(약 18.1%)으로 두 번째로 높게 나타났다. PM_{2.5} 배출량의 공간 분포는 서울은 중구, 강서구, 송파구 등의 지역에서 높게, 부산은 북항, 남항, 연제구 등의 지역에서 역시 높게 나타났다(Fig. 4(c)).

Fig. 5에서는 2018년 여름철 서울과 부산의 질산염과 황산염 평균 농도와 황산염 평균 농도에 대한 질산염 평균 농도의 비를 비교하였다. 본 연구에서 기간을 여름철에 국한한 것은 위에서 기술하였듯이, 여름철 서울과 부산의 상이한 특성이 뚜렷하게 나타난 것과 같은 맥락에서 수행되었다. 향후 모든 계절적 이온 특성은 향후 보다 정밀하게 분석하고자 하며, 본 연구에서는 개괄적인 서울과 부산의 두 지역 간 특성을 정성적으로 요약 기술하고자 한다. 질산염 평균 농도는 서울이 약 1.83 µg/m³, 부산이 1.40 µg/m³로 서울이 부산보다 높게 나타났으며, 반면, 황산염 평균 농도는 서울이 약 4.24 µg/m³, 부산이 약 5.61 µg/m³로 서울보다 부산이 높게 나타났다. 두 이온

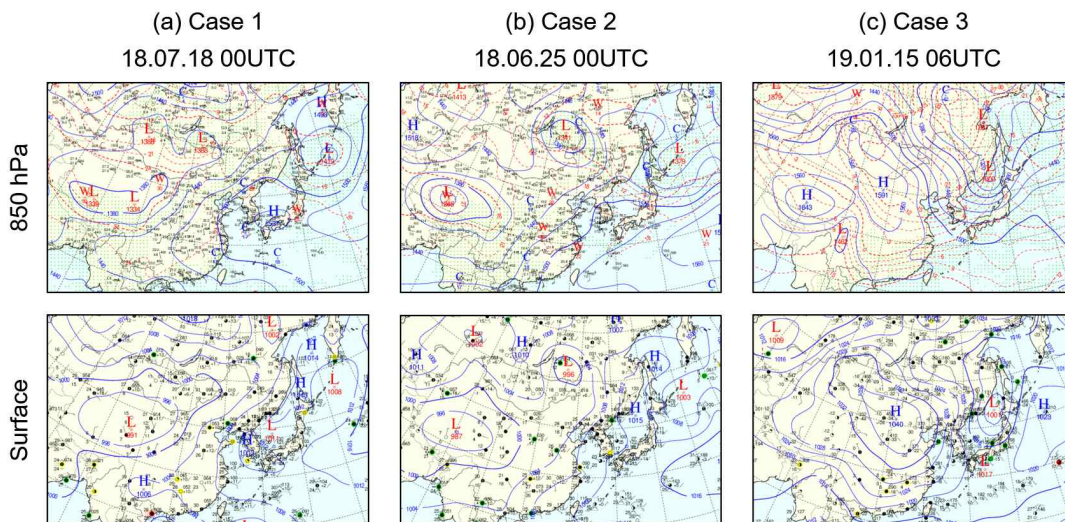


Fig. 6. Weather maps at surface and 850hPa for three representative high polluted cases: (a) Case 1 (Stagnant), (b) Case 2 (Mixed), and (c) Case 3 (Long-range transport).

농도, 즉 황산염 평균 농도에 대한 질산염 평균 농도의 비 (N/S ratio)는 서울이 약 0.43, 부산이 약 0.25로 나타나, 서울이 부산보다 더 높은 것으로 나타났다(Fig. 5). 이는 결국 서울의 경우 질소와 연관된 화학성분이, 그리고 부산의 경우 황과 연관된 화학성분이 우세함을 재차 확인할 수 있다.

3.3. 고농도 사례 분석 - 종관 일기도 및 대기화학 특성

본 연구의 고농도 사례는 2018년 기준 고농도 사례를 선정하고 선정된 각 사례별 일기도를 정성적으로 해석하여 세 가지 일기도 유형(정체형, 혼합형, 외부 유입형)으로 분류하였다. 본 연구에서는 고도의 군집분류와 같은 통계적 수단을 동원하지 않고 단지 상층과 하층의 고기압의 위치, 등압선 간격, 상하층 바람의 방향과 풍속을 해당 기간 전체를 두고 대략적으로 그 특징만을 구분하였음을 밝혀 두며, 향후 통계 패키지를 활용하여 보다 상세하게 분류하여 그 종관기상 특징을 분석할 예정이다.

본 연구의 정성적인 유형분류 결과, 부산의 경우 2018년 기준 여름철(6월~8월) 고농도 발생일은 총 13일이었으며, 그 중에서 정체형(정체성 고기압에 의한 고농도) 사례는 10일, 복합형 사례일은 3일이었고, (외부)유입형 사례는 본 연구에서는 발생하지 않았다. 여름철 중국 상하이에서 부산지역으로 장거리 이동되는 종관기상 특징

이 제한적으로 나타났으나, 지상 일기도에서는 정체형으로 나타남에 따라 이 경우 복합형 사례로 분류하였다. 반면 겨울철(2018년 12월~2019년 2월) 고농도 사례는 총 17일이었으며 복합형 사례 9일, 장거리 수송에 의한 유입형 사례는 8일이었다. 겨울철에는 복합형 고농도 사례와 장거리 수송에 의한 유입형 사례가 비슷하게 발생했던 반면, 여름철에는 정체성 고기압에 의한 정체형 사례가 약 77%로 매우 우세하였다. 여름철 고농도로 분류된 사례별 부산의 평균 PM_{2.5} 농도는 복합형 약 39.21 μg/m³, 정체형 약 45.33 μg/m³로서 정체형 고농도 유형인 경우가 약 6.12 μg/m³ 더 높게 나타났다. 그러나 앞서 기술하였듯이 정성적인 방법으로 분류한 것으로서 향후 보다 정량적 분석 기법을 도입하여 연구할 예정이다.

앞에서의 여름철 부산의 각 유형별 고농도 사례 중에서 그 특징이 가장 잘 나타난다고 판단되는 세 가지 사례 기간 중 일기도를 선정하여 상층 및 하층 일기도의 특징을 살펴보았다. 유형별 선정된 사례로 정체형 사례기간은 2018년 7월 18일부터 20일까지(Case 1), 복합형 사례기간은 2018년 6월 23일부터 25일까지(Case 2), 장거리 수송에 의한 유입형 사례기간은 2019년 1월 13일부터 15일까지(Case 3)이다. 각 유형별 사례기간 중에서 정체형(2018년 7월 18일 00UTC), 복합형(2018년 6월

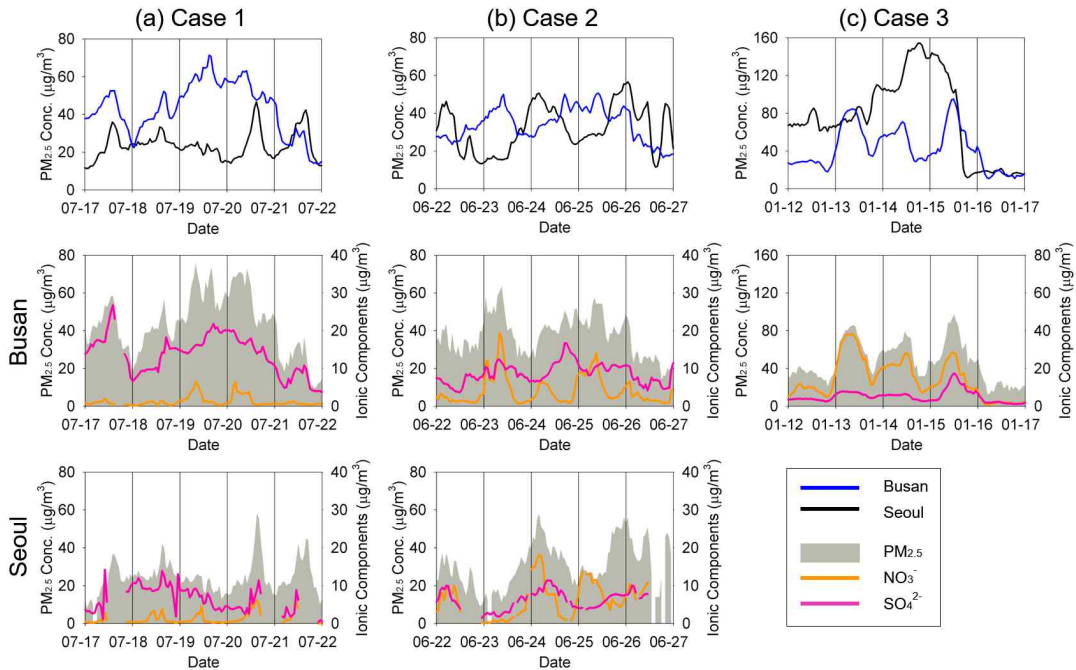


Fig. 7. Diurnal variations of PM_{2.5} and chemical components concentrations for three representative cases: (a) Case 1 (Stagnant), (b) Case 2 (Mixed), and (c) Case 3 (Long-range transport).

25일 00UTC), 유입형(2019년 1월 15일 06UTC)의 일기도를 선택하여 지상 및 850 hPa 일기도를 Fig. 6에 제시하였다.

Fig. 6에 제시된 유형별 종관기상 특징을 살펴보면, 정체형(Case 1)은 상층 한반도 남동쪽에 고기압 중심이 위치해 있고, 지상에서는 서울 부근에 고기압 중심이 위치해 있으며, 등압선 간격이 넓고 풍속이 낮은 전형적인 정체형 사례이다(Fig. 6(a)). 이러한 기압 배치는 사례기간 내내 유지되어 한반도 전체가 고기압 중심에 오랜 시간 머물렀던 것으로 나타났고, 이에 따라 지상에서 자체 배출된 대기오염 물질이 오랫동안 축적되어 고농도 현상이 유발된 것으로 판단된다. 복합형(Case 2)에서는 상층에서 남서쪽에서 동쪽까지 상대적으로 좁은 등압선 간격을 보인 반면, 지상에서는 넓은 등압선 간격을 보여 준 사례이다. 즉 상층에서는 서풍계열의 지균풍이 우세하지만, 지상에서는 풍속이 약하게 나타나는 특징을 보였다(Fig. 6(b)). 따라서 지상에서는 자체 배출된 오염물질이 축적되고, 상층에서는 장거리 수송에 의해 유입된 오염물질

이 지상 농도에 영향을 주면서 지상 고농도 현상이 나타난 것으로 판단된다. 유입형(Case 3)의 경우, 상층에서는 한반도 북동쪽에 기압골과 좁은 등압선이 나타났으며, 그 결과 북서풍 계열의 바람이 우세하였고, 지상에서도 상당히 좁은 등압선 간격을 보이며, 역시 서북서풍 계열의 바람이 우세한 것으로 나타났다(Fig. 6(c)). 따라서 자체 배출된 오염물질은 수송되어 사라지고, 서북서풍계열의 바람으로 인해 동남동쪽으로 수송되어지는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 7에 각 유형별 선정된 사례기간에 측정된 서울과 부산의 PM_{2.5}, 질산염, 황산염 농도의 변화를 나타내었으며, Table 1에 각 유형별 선정된 사례기간에 측정된 서울과 부산의 PM_{2.5}, 질산염 및 황산염 농도, 기온, 풍속의 평균값을 나타내었다. 이때 질산염과 황산염 측정 농도는 서울의 고려대학교 1개 지점과 부산의 장림, 연산 2개 지점에서 측정된 질산염과 황산염의 평균 농도를 이용하였다. 부산의 신항 지점 자료는 세 사례기간 모두 결측으로 제외되었다. 또한 장거리 수송에 의한 외부 유입형

Table 1. Averages of PM_{2.5}, NO₃⁻, and SO₄²⁻ concentrations, ratios of NO₃⁻ to SO₄²⁻, temperature, and wind speed observed for three representative cases: Case 1(Stagnant), Case 2(Mixed), and Case 3(Long-range transport), respectively

City	Category		Case 1	Case 2	Case 3
Busan	All Station	PM _{2.5} (μg/m ³)	50.60	39.21	56.03
		PM _{2.5} (μg/m ³)	51.52	42.79	60.61
	Janglim & Yeonsan	NO ₃ ⁻ (μg/m ³)	1.68	5.48	20.38
		SO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	15.75	10.11	6.80
		NO ₃ ⁻ / SO ₄ ²⁻	0.11	0.54	3.00
	ASOS	Temperature (°C)	28.93	23.66	6.63
		Wind Speed (m/s)	2.24	3.52	2.41
Seoul	All Station	PM _{2.5} (μg/m ³)	23.57	32.91	98.01
		PM _{2.5} (μg/m ³)	24.94	32.23	-
	Korea Univ.	NO ₃ ⁻ (μg/m ³)	1.38	6.12	-
		SO ₄ ²⁻ (μg/m ³)	7.33	6.00	-
		NO ₃ ⁻ / SO ₄ ²⁻	0.19	1.02	-
	ASOS	Temperature (°C)	28.75	25.54	0.43
		Wind Speed (m/s)	1.52	1.66	1.63

고농도 사례에서는 고려대학교 지점의 화학성분 자료가 결측으로 분석에서 제외되었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 첫 번째 유형(정체형) 고농도 사례에는 부산의 PM_{2.5} 농도가 약 50.60 μg/m³, 서울에서는 약 23.57 μg/m³로 나타나, 서울보다 부산의 PM_{2.5} 농도가 사례기간 전반에 걸쳐 평균 2배 이상 높게 나타났다. 이는 앞서 Fig. 2와 3에서도 알 수 있듯이 여름철 PM_{2.5} 농도가 서울보다 부산이 높게 나타난 것과 같은 맥락으로 판단된다. 이온 성분의 평균 농도는 부산의 경우 질산염 약 1.68 μg/m³, 황산염 약 15.75 μg/m³로 나타나, 사례기간 전반에 걸쳐 질산염보다 황산염의 농도가 높게 나타났다. 황산염 농도에 대한 질산염 농도 비율(N/S Ratio)은 약 0.11로서, 앞서 Fig. 5에서 제시한 결과보다 더 낮게 나타났다. 서울의 경우도 질산염 농도가 약 1.38 μg/m³, 황산염 농도가 약 7.33 μg/m³로 나타나, 부산과 마찬가지로 사례기간 전반에 걸쳐 질산염보다 황산염의 농도가 높았고, N/S Ratio 역시 약 0.19로 Fig. 5에서의 제시한 결과보다 더 낮은 것으로 나타났다.

두 번째 유형(복합형) 고농도 사례에서는 PM_{2.5} 농도가 부산에서는 약 39.21 μg/m³, 서울에서는 약 32.91 μg/m³로 나타나, 정체형 사례에 비해 사례기간 평균 농도 차이가 적었다. 또한 선정된 사례에서는 서울에서 고농도를 기

록하고 약 12시간 이후에 부산에서도 고농도를 기록한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 2와 Fig. 3에서 제시한 여름철 부산의 PM_{2.5} 농도가 서울보다 높은 특징을 장거리 수송에 의해 외부 유입된 오염물질이 부산과 서울 두 지역 간 농도 차이를 줄인 결과이며, 또한 서울에서 부산까지 수송되면서 소요된 시간차가 측정자료에서 나타나는 결과로 판단된다. 이온 성분의 농도는 부산의 경우 질산염이 약 5.48 μg/m³, 황산염이 약 15.75 μg/m³로 나타나, 정체형 사례와 마찬가지로 질산염보다 황산염의 농도가 더 높게 나타났으나 사례기간 질산염이 더 높게 나타난 경우도 있어서 사례 기간 전체 N/S Ratio는 약 0.54로 정체형 사례에 비해 높게 나타났다. 서울의 경우는 질산염 약 6.12 μg/m³, 황산염 약 6.00 μg/m³로 나타나, 두 이온 간 유사한 농도 수치를 보였다. 또한 사례기간동안 서울에서 부산에 비해 황산염보다 질산염이 높은 경우가 많았으며, N/S Ratio는 약 1.02로 거의 비슷하게 계산되었다.

세 번째 유형(유입형) 고농도 사례에서는 PM_{2.5} 농도가 부산 약 56.03 μg/m³, 서울 약 98.01 μg/m³로 나타났으며, 서울이 부산보다 사례기간 전반적으로 높게 조사되었다. 이온 성분은 부산의 경우 질산염 약 20.38 μg/m³, 황산염 약 6.80 μg/m³로 나타나, 앞의 두 사례와는 다르게

황산염보다 질산염 농도가 더 높은 것으로 나타났고, 마찬가지로 사례기간 전반에 대해서도 질산염이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 겨울철 외부로부터 장거리 수송에 의해 유입된 오염물질과 기온 등 여러 기상 인자들의 영향과 대기화학적 반응성이 크고 질산염의 생성 경로 또한 황산염보다 훨씬 다양하기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 8은 2018년 여름철 서울과 부산의 $PM_{2.5}$ 일평균 농도에 대한 질산염과 황산염 일평균 농도의 비(ratio)를 보여 주는 그림이며, 이 때 Case 1의 3일, Case 2의 3일을 각각 표시하였다. 그림에서 보면 서울의 경우 그 분포가 다양한 반면, 부산의 경우 서울에 비해 그 분산 정도가 적었지만 사례에 따라 다른 분포 양상을 보였다. 부산의 2018년 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율은 평균 약 0.06, 황산염 비율은 약 0.24로 나타났다. 정체형 사례의 경우 부산의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율은 약 0.03, 황산염 비율의 약 0.31로서 대부분 자료가 x축에 근접한 분포를 보였다. 복합형 사례에서는 부산의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율의 평균은 약 0.13, 황산염 비율은 약 0.24로 나타나 정체형 사례와 다른 분포를 보였다. 부산의 복합형 사례에서는 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 황산염 비율은 2018년 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 황산염 비율과 비슷하게 나타났으나, 복합성 사례의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한

질산염 비율은 2018년 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율보다 높아, 부산의 복합성 사례에서는 $PM_{2.5}$ 의 질산염 비중이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 그러나 부산의 정체형 고농도 사례에서는 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율은 2018년 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 질산염 비율보다 낮고, 정체형 사례에서의 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 황산염 비율은 2018년 여름철 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 황산염 비율보다 높았다. 이로부터 부산의 정체형 고농도 사례에서의 $PM_{2.5}$ 질산염 비중은 수도권 대비 상대적으로 더 낮고, 황산염 비중은 상대적으로 더 높게 나타난다는 사실을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

미세먼지의 지역 특성 규명 연구는 지역의 배출 특성에 기반하여 각 지역에 맞는 맞춤형 저감 정책을 펴야 한다는 측면에서 매우 중요하다. 이러한 측면에서 본 연구는 서울을 포함한 수도권의 최근의 경향과 부산지역의 미세먼지 최근 특성을 비교 분석하여, 서울지역 대비 부산지역의 특성을 도출하기 위한 연구로서, 최근 경향, 배출량, 종관 일기도, 화학 이온성분 등 다양한 측면에서 연구를 수행하였다.

본 연구의 부산 지역 특성을 수도권과 비교 분석하기 위하여 두 지역의 최근 측정 자료를 수집하였다. 분석 기간은 PM_{10} 은 2009년부터 2018년까지, $PM_{2.5}$ 는 2015년부터 2018년까지이며, 특히 고농도 사례를 선정하여 두 도시 간 차이를 조사하였다. 또한 고농도 사례의 유형을 세 가지 타입(정체형, 복합형, 유입형)으로 구분하여 각각 그 특징을 살펴보았다.

먼저 서울과 부산 두 도시 간 최근 미세먼지 자료를 다양하게 조사해 본 결과, 연평균 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도, 고농도 발생 일수는 서울 부산 두 도시 모두 감소하고 있었으나, 계절 간 편차는 서울보다 부산지역이 상대적으로 훨씬 적은 것으로 나타났고, 부산은 최근 여름철 농도 수준이 증가하는 등 서울과 매우 다른 양상을 보였다. 이는 여름철 더 활발한 2차 생성 과정에 기인한 것으로 판단된다.

이온 성분 중에서 질산염 농도는 서울이 부산보다 높게 나타났으며, 황산염 농도는 부산이 훨씬 높게 나타나는 특징을 보였다. 황산염 대비 질산염 농도의 비(N/S

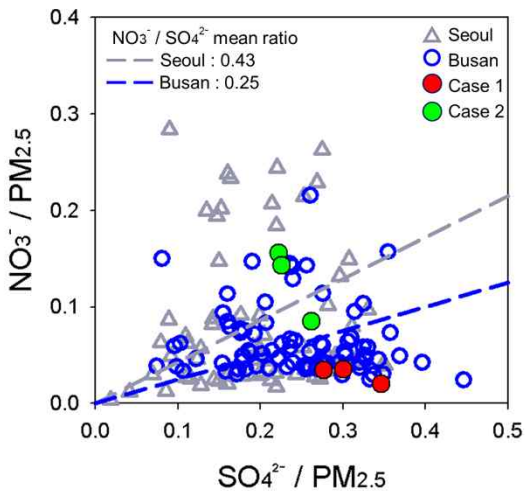


Fig. 8. Scatter diagram of ratios of NO_3^- and SO_4^{2-} to $PM_{2.5}$ in 2018 summer for Busan and Seoul areas.

ratio)는 서울이 약0.43, 부산이 약0.25로 나타나, 서울의 경우 질소와 연관된 화학성분이, 그리고 부산의 경우 황과 연관된 이온성분이 우세함을 확인할 수 있다.

고농도 사례를 유형별로 분류하여 본 결과, 부산의 여름철의 경우 대부분 정체형으로 고농도 사례가 발생하였고, 그 농도 수준 또한 겨울철 고농도에 비해 낮지 않았다. 특히 여름철 정체형 사례에서 부산지역 PM_{2.5} 농도가 서울보다 평균 2배 이상 높게 나타는 등 훨씬 높은 농도를 보였고, 사례기간 전반에 걸쳐 질산염보다 황산염이 훨씬 높게 나타났고 N/S Ratio는 약0.11로서 서울에 비해 약 1/2 정도로 나타났다. 복합형 고농도 사례에서도 부산의 경우 질산염보다 황산염의 농도가 더 높게 나타났으나 질산염의 비중은 정체형에 비하여 상대적으로 소폭 높게 나타났으며, 복합형 사례 기간 전체 N/S Ratio는 약0.54로 정체형에 비해 높게 나타났고, 서울의 약 1.02에 비해 역시 1/2 정도로 나타났다. (외부)유입형 고농도 사례는 여름철의 경우 부산지역에서는 최근 발생하지 않은 것으로 판단하였다.

이상에서 본 연구에서는 서울을 포함한 수도권 대비, 부산지역 미세먼지의 최근 경향, 배출 특성, 고농도 시의 기상 및 물리화학적 경향을 다각적으로 분석하였다. 그러나 기간 등을 전반적으로 고려해 볼 때 매우 제한된 사례에 불과하므로, 기간과 자료 양을 충분히 수집하고, 이를 바탕으로 보다 다양한 사례를 검토하여야 할 것이다. 아울러 미세먼지 모델링을 부산을 포함한 경남 지역에 대하여 수행하여, 측정소가 없는 지역 등을 보완하여 분석할 예정이며, 이와 병행하여 세부적으로는 부산지역의 더 심도 있는 미세먼지 측성을 분석하기 위하여, 배출량, 일기도 유형, 이온 성분 특성 등을 수도권과 비교하여 보다 면밀히 분석할 예정이다.

감사의 글

본 논문을 심사해 주신 심사위원분께 감사드립니다. 이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Bae, M. A., Kim, H. C., Kim, B. U., Kim, S. T., 2018, PM_{2.5} simulations for the Seoul metropolitan area : (V) estimation of North Korean emission contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 294-305.
- Byun, J. Y., Cho, S. H., Kim, H. W., Han, Y. J., 2018, Long-term characteristics of PM_{2.5} and its metallic components in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 406-417.
- Choi, J. C., Cho, H. M., Kim, J. Y., Kim, S., Park, K. J., 1999, A Comparison of chemical properties of TSP and PM₁ during the spring of 1998 in Seoul, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 35(1), 38-46.
- Choi, T. Y., Kang, D. I., Cha, J. G., 2019, An Analysis of the correlation between Seoul's monthly particulate matter concentrations and surrounding land cover categories, *J. Environ. Impact Assess.*, 28(6), 568-579.
- Han, S. H., Lee, J. Y., Lee, J. S., Heo, J. B., Jung, C. H., Kim, E. S., Kim, Y. P., 2018, Estimation of the Source Contributions for Carbonaceous Aerosols at a Background Site in Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(4), 311-325.
- Hwang, I. J., Kim, T. O., 2019, Chemical characteristics of ambient PM_{2.5} at industrial complex in Gyeongbuk area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 336-345.
- Ju, H. J., Bae, C. H., Kim, B. U., Kim, H. C., Yoo, C., Kim, S. T., 2018, PM_{2.5} source apportionment analysis to investigate contributions of the major source areas in the southeastern region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533.
- Kiehl, J. T., Briegleb, B. P., 1993, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, 260, 311-314.
- Kim, D. Y., Choi, M. A., Yoon, B. M., 2019, Analysis of PM hot-spot emission zone in Seoul metropolitan area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 476-501.
- Kim, K. A., Lee, J. S., Kim, E. S., Jung, C. H., Kim, Y. P., Lee, J. Y., 2018, Monthly variation of n-alkanes concentration in PM_{2.5} of the Anmyeon island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 166-176.
- Lee, M. H., Han, E. J., Won, Y. S., 1986, Yellow sand phenomena influence to the atmosphere in Korea,

- Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 2(3), 34-44.
- Lim, J. H., Kwak, K. K., Kim, J., Jang, Y. K., 2018, Analysis of annual emission trends of air pollutants by region, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(1), 76-86.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2016, 2014 national air pollutants emission, NIER-GP2016-287, Incheon, Republic of Korea.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2019, Construction and improvement of air quality modeling system based on the measurement (III), NIER-SP2019-249, Incheon, Republic of Korea.
- Park, Y. M., Kim, L. E., Choi, W. S., 2019, Comparison of transit user's inhalation rates of PM_{2.5} between three transportation types (walk, bus, subway) in spring and summer in urban areas of Busan, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(5), 577-592.
- Toon, O. B., 1995, Modeling the relationships between aerosol properties and the direct and indirect effects of aerosols on climate, Aerosol forcing of climate, 197-213.
- Twomey, S. A., Piepgrass, M., Wolfe, T. L., 1984, An Assessment of the impact of pollution on global cloud albedo, Tellus, 36B, 356-366.
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., Sperling, D., 2016, Pollution: three steps to a green shipping industry, Nature, 530, 275-277.
- Yeo, M. J., Kim, Y. P., 2019, Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ concentration cases in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 249-264.
- Yu, G. H., Lee, B. J., Park, S. S., Jung, S. A., Jo, M. R., Lim, Y. J., Kim, S. T., 2019, A Case study of severe PM_{2.5} event in the Gwangju urban area during February 2014, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(2), 195-213.
-
- Master's course. Jong-Min Kim
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University
jm6449@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Yu-Jin Jo
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University
yujinjo@pusan.ac.kr
 - Doctor's course. Geum-Hee Yang
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University
geumhee@pusan.ac.kr
 - Doctor. Gook-Young Heo
Policy Support Team, National Center for Fine Dust Information
gookyoun@korea.kr
 - Professor. Cheol-Hee Kim
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University
chkim2@pusan.ac.kr