

논문

강릉항에서 2018년 가을 집중관측기간 동안 측정된 대기질의 특성 분석

Characteristics of Air Quality Measurements during the 2018 Intensive Observation Period in Gangneung Port

이권호*, 최미경¹⁾, 박승식²⁾, 홍천상³⁾

강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과,

¹⁾강릉원주대학교 복사위성연구소 공간정보협동과정,

²⁾전남대학교 환경에너지공학과, ³⁾한국외국어대학교 연구산학협력단

접수일 2022년 6월 25일
수정일 2022년 7월 13일
채택일 2022년 7월 13일

Received 25 June 2022
Revised 13 July 2022
Accepted 13 July 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)33-640-2319

E-mail : kwonho.lee@gmail.com

Kwon-Ho Lee*, Mi-Kyung Choi¹⁾, Seung-Shik Park²⁾, Chun-Sang Hong³⁾

Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

¹⁾Spatial Information Cooperative Program, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

²⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

³⁾Research & Business Foundation, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

Abstract Despite the importance of air pollution emissions in port areas, traditional air quality monitoring has mainly been carried out in populated areas or industrial complexes. However, air pollutants emitted in port areas also make an important contribution to local air quality. Therefore, the particle number concentrations and NO₂ concentrations were measured using the optical particle counter (OPC) and the gas detector during the air quality intensive observation period from October 11 to November 1, 2018 at Gangneung Port (37.76°N, 128.954°E). The averaged particle number concentrations increased mainly under land breeze conditions rather than sea breeze wind, and the contribution of pollutants originated from the surrounding area was greater than that from the coastal ocean. The hourly change in NO₂ concentrations showed a relatively high correlation with air temperature and ship operation frequency. Diurnal change of NO₂ concentration also followed the photochemical reaction cycle according to the change of insolation. Overall, the particle number concentrations and NO₂ concentrations measured at Gangneung Port were largely influenced by the local emissions and weather system. Additional research will be able to provide information on air quality changes and impacts in the port area.

Key words: Coastal air quality, Air pollutants, Aerosol, OPC, NO₂

1. 서론

세계 주요 대도시의 대기질 수준은 지난 수십 년간 인구 증가와 도시화 및 산업화과정을 거치면서 지속적으로 악화되었으나(WHO, 2016), 최근에는 세계 각국의 대기오염물질과 온실가스 관련 배출 저감 정책과 주요 대기오염물질 배출원의 제어 기술의 발달은

대기질 개선을 위한 긍정적인 효과를 유발된 것으로 보고되고 있다(Wong *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). 그러나, 항만 지역은 화물운송과 레저활동의 증가로 인하여 연안 도시권의 주요 대기오염원으로 인식되고 있으며, 각종 선박이나 자동차, 운반 기기 등과 같이 엔진에서 배출되는 대기오염물질은 항만 지역뿐만 아니라 인근 지역이나 해상에서도 농도를 가중하고 있

다(Wan *et al.*, 2016). 그럼에도 불구하고 지금까지의 대기질 개선을 위한 노력은 주로 육상의 주요 배출원에 대한 규제가 주로 진행되었으며, 항만에서 발생하는 대기오염에 대한 연구 및 정책대안은 상대적으로 부족한 상황이다.

현재 해상 화물 운송은 항공 및 육로 운송에 비하여 무게당 비용이 낮으므로 운송 분야에서 상대적 인 비중이 커지고 있다(Grewal and Haugstetter, 2007). 전 세계에서 운항 중인 선박으로부터 배출되는 NO_x, SO₂ 및 PM_{2.5}의 연간 배출량은 각각 2×10^7 , 9.7×10^6 및 1.5×10^6 t로 추정된다(Johansson *et al.*, 2017). 선박에서 사용되는 석유계 연료의 연소로 인한 배출로 바나듐(V), 니켈(Ni), 토륨(Th), 납(Pb), 아연(Zn) 및 황산염(SO₄) 등이 선박 배출의 지표로 사용된다(Viana *et al.*, 2014). 이러한 선박 운송 활동은 경제성 측면에서 매우 효과적이거나, 선박으로부터의 배출량은 인간 건강에 대한 부정적인 영향(Corbett *et al.*, 2007) 외에도 지역 및 지구 규모의 환경 변화(Fuglestedt *et al.*, 2009)에 큰 영향을 준 것으로 보고되었다(Mueller *et al.*, 2015; Blasco *et al.*, 2014).

선박에서 배출되는 대기오염물질의 전 세계 분포는 남중국해와 동중국해 지역이 가장 높은 오염 물질 배출 밀도를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Johansson *et al.*, 2017). 최근에 중국 상하이 항만에서 관측된 선박 기원의 PM_{2.5}는 약 0.63~3.58 µg/m³ 범위이며, 상하이항의 총 PM_{2.5} 중 약 4.23%를 차지하는 것으로 보고되었다(Zhao *et al.*, 2013). 또한, 상하이 항만 지역의 선박에서 배출되는 입자는 주로 0.4 µm보다 작은 입경을 가지고 있으며 입자의 질량보다는 개수에 관한 기여도가 더 크게 나타났다(Wang *et al.*, 2019). 국내 항만 지역의 경우, 미세먼지 배출원의 약 10%를 차지하는 선박과 대형 경유 자동차 출입 등으로 인해 국내 주요 미세먼지 배출원으로 간주되고 있다(Yu *et al.*, 2019). 이러한 연안의 항구 지역에서의 대기질 측정 정보는 인근 주거 지역과 매우 가깝기 때문에 대기질 관리를 위하여 지속적인 관측 및 분석이 필요하다.

그동안 항만 지역의 대기오염물질 배출은 선박이나

이동 차량 등에 관한 정량적인 연구가 이루어지지 않았으나, 선행 연구를 통하여 특정 항만 지역에서 관측된 결과, 집중적으로 발생하는 오염물질은 주변지역의 대기질과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고하였다(Park *et al.*, 2022; Lee and Park, 2020; Yu *et al.*, 2019, 2018). 따라서, 본 연구에서는 2018년 가을 집중관측기간에 강릉항에서 대기오염물질의 특성 연구를 위하여 지상에서의 지점 대기질 관측과 기상 관측자료를 이용하여 항만 지역의 대기오염물질이 지역 대기질에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여, 항만 지역의 대기오염물질의 거동에 관한 현황과 원인 규명을 위하여 관측지점의 대기오염물질의 농도 변화 특성과 주요 배출원 및 기상학적 조건에 관한 요인적 분석을 수행하였다. 본 연구 결과는 항만 지역의 대기오염물질 현황 및 지역 내 대기질에 미치는 관계를 이해하고 배출 저감을 위한 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 자료 및 방법

본 연구의 대기 집중관측장소는 강원도 강릉시 강릉항에 위치한 동해해양경찰서 송정출장소 옥상(128.95°E, 37.77°N)에 대기질 관측장비가 설치되었다(그림 1 참조). 부가적으로 인접한 강릉시 강문(128.923°E, 37.787°N)에 설치되어 있는 자동 기상관측장비(Automatic Weather System; AWS) 관측자료를 사용하였다. 강문 사이트는 강릉항에서 북서쪽으로 약 3 km 정도에 위치하고 있으며, 강릉원주대는 강릉항에서 서쪽으로 약 7 km 정도 떨어진 곳에 위치하고 있다.

강릉항 집중관측기간은 2018년 10월 24일~11월 1일까지의 기간으로서, 비교적 외부로부터 유입되는 장거리 이동성 오염에 의한 영향이 적은 기간을 설정하였다. 관측장소는 해안 인접 지역으로 강릉-울릉도 구간의 여객선과 어선 및 각종 레저용 선박이 사용하는 곳이다. 또한, 연구 대상 지역은 선박 관련 운송차량이나, 관광객으로 인한 자동차의 빈번한 출입과 주



Fig. 1. Locations of the Gang-Neung Port (GNP) station (128.95°E, 37.77°N) for ground based air quality measurements in this study. The locations of the Automatic Weather System (AWS) measurement site in Gang-Mun Station (GMS) are also shown in left plate.

Table 1. Specification of measurement instruments and measured parameters used in this study.

Data	Instruments	Measured parameters	Resolution
Particle numbers	TSI 9306-V2 OPC	Number counts at 0.3, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10 μm	Minute, point
Gas	PGM6248 gas detector	NO ₂ concentrations	Minute, point
Meteorology	AWS	Air temperature, wind speed, wind direction, relative humidity, precipitation	Hourly, point
Ship records	-	Ship operation numbers, Weight tonnage	Daily

변의 민가나 상업시설 등에서 배출되는 대기오염물질의 영향과 기상 조건(해륙풍, 해무 등)에 따른 환경요인이 복잡하게 영향을 미칠 수 있다.

강릉항에서의 집중관측기간 동안 관측된 대기오염물질의 특성과 영향요인을 정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 대기질 관측자료, 기상 관측자료, 강릉항 선박 운항정보가 사용되었으며, 각 자료는 표 1에 상세하게 설명되어 있다. 지상 관측은 입자상 물질과 기체상 물질을 측정하기 위하여 OPC (모델명: TSI 9306-V2)와 가스 디텍터(모델명: PGM6248)를 사용하였다. OPC는 2.83 L/min의 유량으로 공기를 흡입하여 0.3~25 μm 크기의 에어로솔 입자를 6개 채널

(0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 3.0 μm , 5.0 μm , 10.0 μm)에서 수 농도를 측정한다. PGM6248 가스디텍터는 VOCs, NO₂, CO, Gamma선, SO₂의 농도를 측정하였으나, 강릉항에서 NO₂를 제외한 나머지는 검출한계보다 낮거나 일 변화가 매우 적게 나타났으므로 NO₂ 관측자료만 사용하였다.

항만 지역에서의 기상 관측 요소는 대기오염물질의 확산과 이동에 영향을 미치는 인자이므로, 집중관측기간 동안 기상 환경 변화와 관련된 분석은 매우 중요하다. 본 연구에서 사용된 기상자료는 관측지점에서 가장 근접한 지점에 위치한 강원도 강릉시 강문동 (37.787°N, 128.923°E)에 설치되어 있는 AWS를 이용

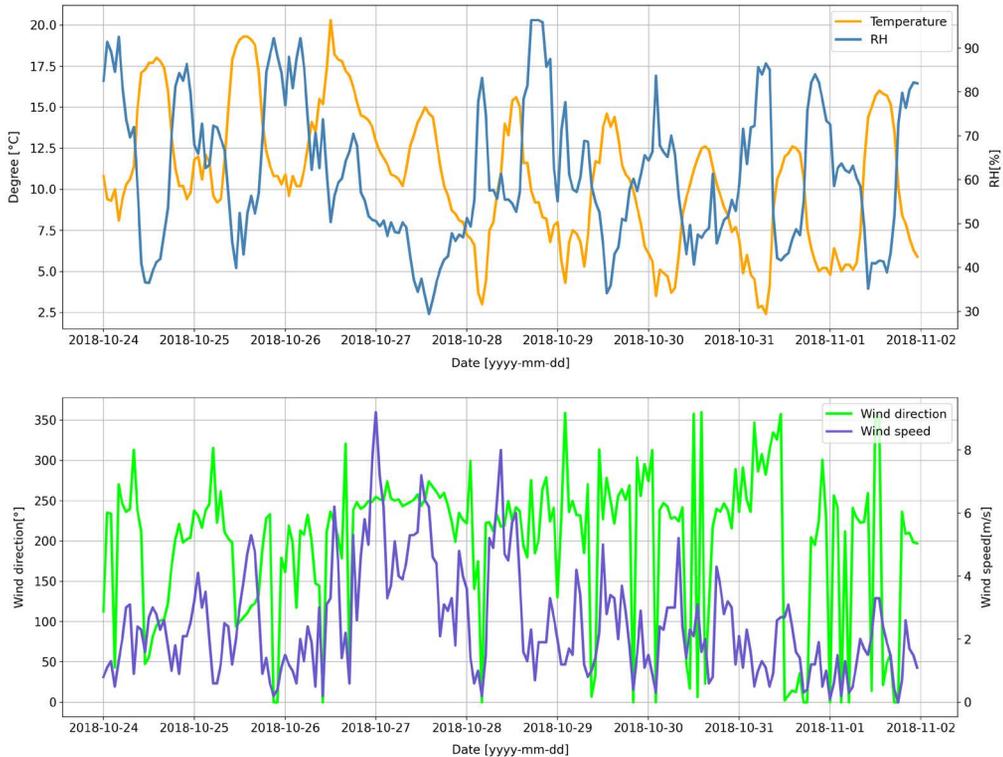


Fig. 2. Hourly meteorological observation data during the intensive observation data.

하여 관측된 자료이며, 강릉항 대기질 관측지점과의 거리는 약 3 km 정도 떨어져 있다.

추가적으로, 항만 지역의 대표적인 배출원으로 간주 되는 선박 활동에 의한 영향을 분석하기 위하여 사용된 강릉항에서 운항 중인 선박의 입출항 기록자료는 강릉항을 기점으로 하는 선박의 입출항 시간과 선박의 톤수를 포함하며, 동해해양경찰서에서 제공받았다.

3. 결과 및 토의

3.1 기상 환경

강릉항 집중관측기간 동안의 기상 조건은 대기오염 물질의 이류와 확산에 영향을 미칠 수 있으므로, 시간 대별 기온, 상대습도, 풍속, 풍향 관측자료에 대한 시계열 분석 결과는 그림 2와 같다. 전체 관측기간 동안

강릉항의 평균 기온은 $10.74 \pm 4.07^\circ\text{C}$ 이며, 상대습도는 $61.28 \pm 16.07\%$, 풍속은 $2.48 \pm 1.72 \text{ m/s}$, 풍향은 $199.22 \pm 91.63^\circ$ 로서 전형적인 가을철 맑은 기상 조건과 남풍계열의 바람이 주풍으로 나타났다. 그리고 10월 28일에는 강수량 1 mm 이하의 약한 강수사례가 발생하였다. 관측지점에서 기상의 일 변화 특성은 주간 동안의 기온 상승 시 바다에서 불어오는 바람과 야간의 육지에서 불어오는 바람이 상시 영향을 미치는 전형적인 해륙풍이 나타나는 것을 알 수 있다.

일반적으로 기온이 증가할수록 대기 중 포화 수증기량이 증가하므로 상대습도는 낮아지게 된다. 그림 2의 기온과 상대습도와 시계열 변화 곡선에서는 이러한 관계가 잘 나타나고 있으며, 관측된 기온과 상대습도의 변화가 반대로 나타나고 있다. 그러나, 10월 26일 정오 시간부터 10월 27일 오전 07시 시간까지의 기온과 상대습도의 변화는 같이 낮아지고 있는 추세

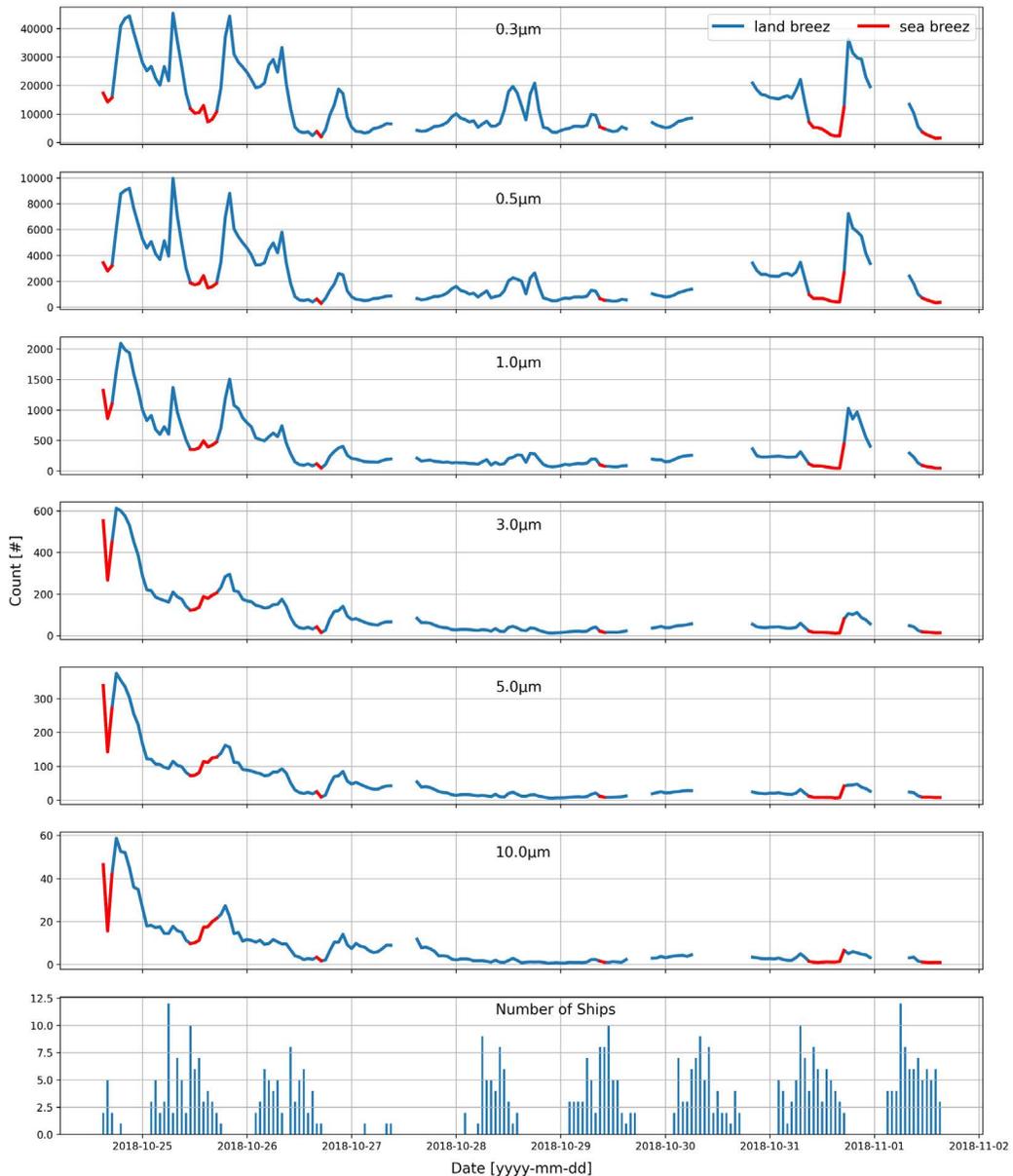


Fig. 3. Time series of OPC observations and number of ships operated at Gangneung port during 10/24/2018~1/11/2018. OPC data under the land breeze and sea breeze have been colored by blue and red.

를 보였다. 동일 시간대에 관측된 바람의 특성은 풍속이 비교적 높고(평균: 4.59 ± 1.72 m/s, 시간 최대: 9.2 m/s) 남서풍 계열(평균: $235.2^\circ \pm 52.46^\circ$)의 바람이 불었다. 이로 인해 해당 기간 동안에는 낮은 온도와 건

조한 상태의 공기가 유입된 결과로 판단된다.

3.2 OPC 관측 결과

그림 3은 집중관측기간 중 OPC로 측정된 입자의

크기별 수 농도 (number concentration)를 나타내는 결과로서 시간에 따른 크기별 입자상 물질의 특성 변화를 분석할 수 있는 수단이 된다. 관측기간 동안 수 농도 (Nsize) 평균값의 범위는 $N_{0.3} = 13283 \pm 10522$, $N_{0.5} = 2281 \pm 2131$, $N_{1.0} = 378 \pm 409$, $N_{3.0} = 96 \pm 118$, $N_{5.0} = 54 \pm 69$, $N_{10.0} = 8 \pm 10$ 으로 관측되었다. 그림 3의 풍향 조건에 따른 OPC 수 농도 관측 결과는 바다에서 바람이 부는 즉, 해풍이 부는 조건에서 수 농도 값이 낮게 변하고 있으나, 육지에서 불어오는 육풍 조건에서는 수 농도 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 강수가 있었던 10월 28일을 제외한 날짜 중 선박 활동은 주로 새벽 시간대에 입출항 활동이 시작되어 정오 시간대까지 활발히 발생하였다. 선박의 활동으로 인한 입자상 오염물질의 배출량과 OPC 관측 결과와의 뚜렷한 관련성을 찾기는 어려웠으나, 10월 25일 오전 시간에는 선박의 활동 숫자와 직경 $1\mu\text{m}$ 보다 작은 크기의 미세입자의 수 농도 값이 증가한 것으로 확인하였다. 이 사례는 인위적 활동에 의하여 미세입자의 증가가 단시간 동안에 발생하였으며, 해당 시간대에 선박의 활동 숫자도 갑자기 증가한 것과 겹치게 되므로 선박의 영향이 직접적으로 미치는 것으로 보인다. 그러

나 선박 활동으로 인하여 배출된 입자상 물질은 사용되는 연료의 화학적 조성이나 엔진의 타입, 기상 조건이나 지형 등의 다양한 변수 요인으로 인하여 영향을 받을 수 있으므로, 보다 정밀한 관측 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.

그림 4는 OPC 수 농도의 일 변화를 나타내는 결과로서, 각 시간대별 입자 크기별 수 농도의 일 변화를 확인할 수 있다. 이 결과에는 강릉항에서 관측된 입자 크기별 수 농도 값이 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 입자와 이보다 큰 입자로 구분된 일 변화 특징을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 직경 $1\mu\text{m}$ 이하의 미세입자는 오전 7시경과 오후 20시경에 첨값을 나타내고 있고, 직경 $3\mu\text{m}$ 이상의 조대입자는 주로 오후 20시경에만 첨값을 보이고 있다. 이러한 결과는 미세입자의 배출이 오전과 오후에 집중적으로 증가하였고, 특히 항만 지역에서의 교통 활동(선박 및 자동차)의 증가 등으로 인한 인위적 활동으로 인한 배출량 증가와 기상 조건(느린 풍속, 공기정체 등)에 의한 영향을 받은 결과로 판단된다. 15시 이후의 오후 시간대에는 다시 항만 지역의 교통의 증가로 인한 미세입자의 증가 및 해염이나 재비산 먼지 등의 증가로 인한 조대입자가 동시에 발생하여 크

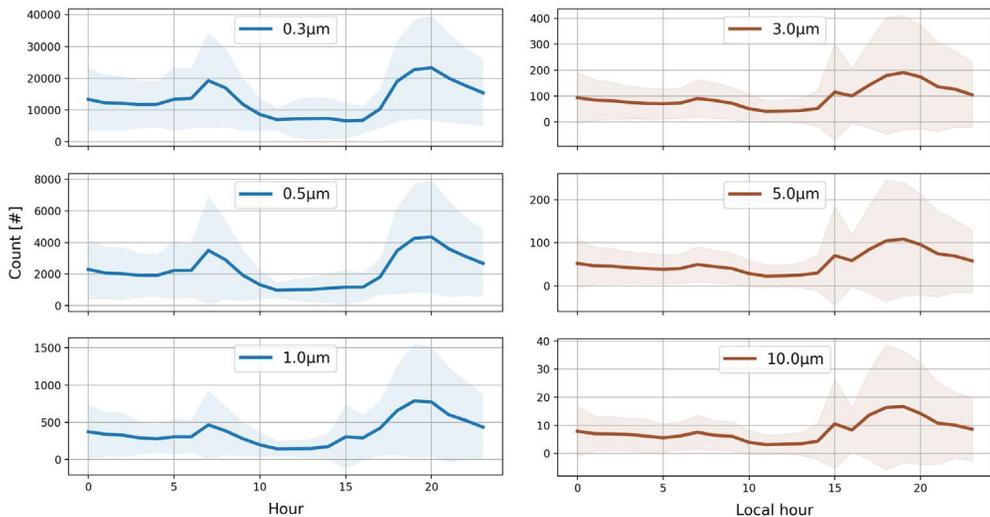


Fig. 4. Diurnal variations of OPC measured number concentrations.

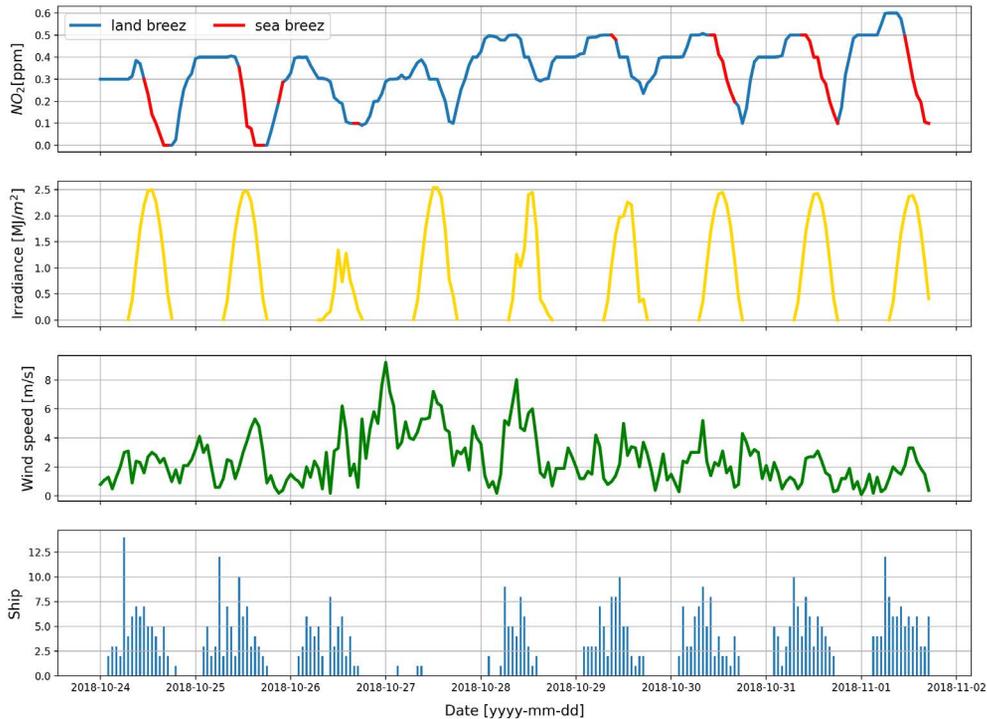


Fig. 5. Time series of NO₂ concentration, solar irradiance, wind speed, and number of ships operated at Gangneung port during 24/10/2018~1/11/2018. NO₂ concentration data under the land breeze and sea breeze have been colored by blue and red.

기별 입자의 농도 증가와 관련이 있는 것으로 보인다.

3.3 Gas 관측 결과

그림 5는 전체 관측기간 중 NO₂ 농도(단위: PPM)의 시계열 변화이며, NO₂ 평균값의 범위는 NO₂ = 0.33 ± 0.14 PPM으로 관측되었다. 그림 3의 풍향 조건에 따른 OPC 수 농도 관측 결과와 마찬가지로 NO₂ 농도는 해풍이 부는 조건에서 농도 값이 낮게 변하고 있어서, 육풍보다는 해풍 조건하에서 환기에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 일반적으로, NO₂ 농도의 일 변화는 배출량의 증가로 인한 대기 중에 농도의 증가와 광화학 반응과정으로 인하여 농도가 감소하는 일 변화 경향을 가지고 있다. 따라서, 강릉항에서 관측된 NO₂ 농도의 일 변화도 이러한 경향을 따르고 있어서, 일사량이 최대인 시간까지 증가하다가 정오 시간 이후에는 감소한 경향이 나타난다. 10월 27일의 강한 풍

속도 NO₂ 농도에 영향을 미쳤으며, 전체 기간 중 가장 낮은 NO₂ 농도가 관측되었다.

그림 6은 NO₂ 농도의 평균적인 일 변화를 나타내며, 강릉항에서 관측된 각 시간대별 NO₂ 농도의 변화 경향을 확인할 수 있다. 각 관측 날짜에 대한 시간별 NO₂ 농도 값의 표준편차 값의 변화폭은 0.09로서 변화폭이 상대적으로 적었으나, 일 변화는 0.33 ± 0.11 PPM이었다. 특히, 오전 시간대의 최대 농도는 0.45 PPM이었으나, 오후 시간대에 최소 약 0.13 PPM으로 약 28.9% 감소되었다. 이러한 결과는 NO₂의 배출이 오전과 오후에 지속적으로 발생하였으며, 일사량이 강한 오후 시간에 감소하는 일 변화가 주기적으로 반복될 것을 반영한다.

3.4 요인별 상관분석 결과

강릉항에서 관측된 개별 자료에 대한 요인별 상관

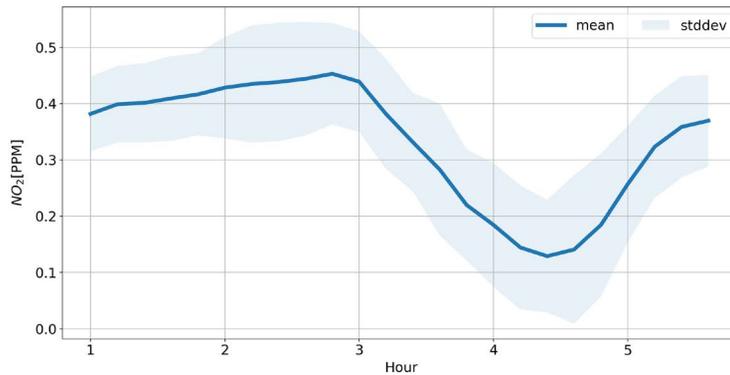


Fig. 6. Diurnal variations of NO₂ measured number concentrations.

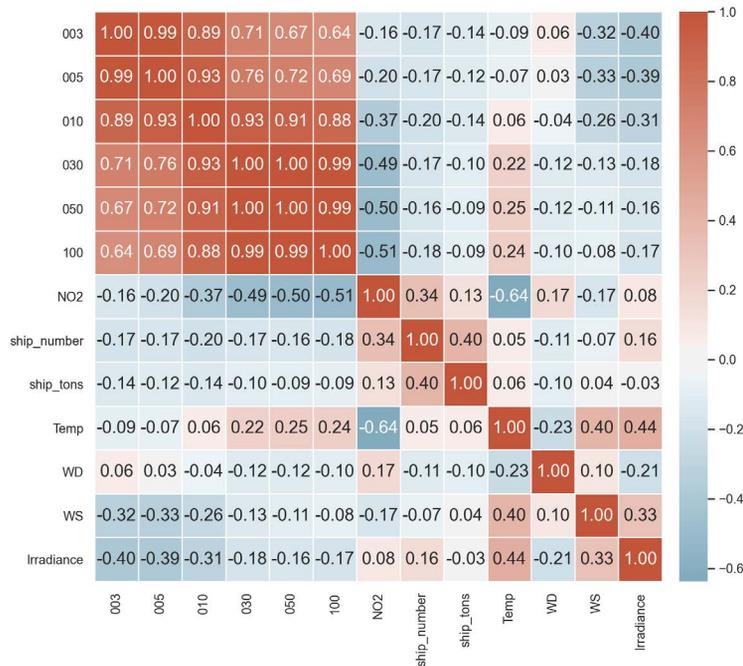


Fig. 7. Correlation matrix for the air quality measurements, meteorological data, and ship records used in this study.

분석을 위하여 각각 2개의 변수에 대한 각 입자 크기 별 수 농도의 관련성을 알아보기 위하여 시간별로 관측된 크기별 수 농도, NO₂ 농도, 선박 운항 횟수, 운항 선박의 총 톤수, 그리고 기상관측자료에 대한 상관계수 행렬은 그림 7과 같다. 그림 7의 결과에 의하면, OPC를 이용하여 관측한 각 입경별 수 농도 값은 직경

1 μm 이하의 입자의 집단(상관계수 > 0.79)과 이보다 큰 입자의 집단(상관계수 > 0.99)으로 구분되어 상관계수 값이 분포하고 있다. 3.1장에서도 언급되었지만, 직경 1 μm 이하의 입자의 미세입자 수 농도와 이보다 큰 입자의 수 농도 값의 시간별 증가 경향이 입경별 수 농도 자료의 상관성 차이로 나타나는 것이다. 그리

고 미세입자에 대한 수 농도 값은 풍속(상관계수 < -0.26) 및 태양 일사량(상관계수 < -0.31)과는 음의 상관관계를 보임으로 풍속의 증가에 따른 환기효과 및 일조시간별 수 농도의 일 변화 경향으로 설명할 수 있다.

NO₂ 농도는 OPC 수 농도 관측자료와 모두 음의 상관관계를 나타내며, 특히 3 μm 이상의 크기를 가지는 입자의 집단과 음의 상관관계가 비교적 크게(상관계수 < -0.49) 나타났다. 이것은 오후 시간에 조대입자의 수 농도가 증가하는 것과 NO₂ 농도의 감소 경향이 나타나는 시간대가 유사하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 그리고 선박의 출항 횟수는 입자의 수 농도와 높은 상관성을 찾을 수는 없지만 NO₂ 농도와의 상관계수는 상대적으로 약한 양의 상관계수 값(0.34)을 보였다.

4. 결 론

대기질 개선을 위한 노력으로 대기오염물질의 배출량을 산정하기 위한 노력은 배출원의 제어와 저감정책 시행을 위하여 중요한 역할을 수행한다. 그러나 국내 주요 대기오염 배출원을 대상으로 한 배출원 조사 및 배출량 산정 부분에 있어 항만이나 연근해 지역에서의 배출은 불확실한 것으로 알려져 있다. 본 연구는 항만 지역의 대기질 현황과 관련 요인을 찾기 위하여 강원도 강릉시에 위치한 강릉항에서 2018년 가을 집중관측기간 동안 대기오염물질의 관측 농도 변화 및 영향인자와의 연관성을 분석하였다. 분석 결과를 토대로 강릉항 지역의 대기오염물질의 발생과 현황 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 강릉항에서 2018년 10월 24일부터 11월 1일 기간 동안의 OPC를 이용한 입경별 평균 수 농도는 $N_{0.3} = 13283 \pm 10522$, $N_{0.5} = 2281 \pm 2131$, $N_{1.0} = 378 \pm 409$, $N_{3.0} = 96 \pm 118$, $N_{5.0} = 54 \pm 69$, $N_{10.0} = 8 \pm 10$ 으로 관측되었다. 입경별 수 농도는 주로 해풍보다는 육풍 조건에서는 증가하였으며, 주변 지역에서 발생하는

오염물질이 연근해 기원보다는 기여도가 크게 나타났다.

둘째, 강릉항에서 관측된 입자상 오염물질은 직경 1 μm 이하의 미세입자와 이보다 큰 조대입자로 구분된 일 변화 특징을 나타내었다. 즉, 미세입자는 오전 7시경과 오후 20시경에 교통 활동(선박 및 자동차)의 증가와 기상 조건(느린 풍속, 공기정체 등) 등으로 인하여 집중적으로 증가하였다. 조대입자는 주로 오후 20시경에만 일 최대값을 보였으므로, 늦은 오후부터 야간까지 지역적으로 발생하는 먼지의 재비산이나 해염의 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 보다 정확한 분석을 위하여 추가 연구를 통하여 항만 지역 에어로솔에 대한 화학종 성분 분석이 필요하다.

셋째, 전체 관측기간 중 NO₂ 평균 농도는 0.33 ± 0.14 PPM으로서 주로 육풍 조건에서 농도가 증가하였다. 그리고 NO₂ 농도의 일 변화는 일사량이 최대인 시간까지 증가하면서 정오 시간 이후에는 감소하는 경향이 나타난다. 이러한 경향은 오전과 오후의 인위적인 배출원에서 배출된 NO₂는 평균 수준을 유지하다가 광화학반응에 의하여 농도가 감소하는 순환이 나타남이 확인되었다.

넷째, 강릉항에서 관측된 입자상 물질, 가스상 물질, 선박 운항, 기상 자료에 대한 각 요인별 상관분석을 수행한 결과, 직경 1 μm 이하의 미세입자와 이보다 큰 조대입자 수 농도 값의 군집이 나타나며, 서로 다른 발생원과 시간대별 거동에 의한 차이를 가지는 것을 확인하였다. 그리고 음의 상관관계를 보이는 인자들(미세입자 수 농도와 풍속, 미세입자 수 농도와 일사량, NO₂ 농도와 OPC 수 농도)은 시간대별 환기조건 변화와 각 요소 값의 일 변화 경향으로 설명할 수 있었다.

마지막으로, 강릉항에서 선박의 운항 횟수는 입자의 수 농도와 높은 상관성을 찾을 수는 없었으나, NO₂ 농도와의 상관계수는 약한 양의 상관계수 값(0.34)을 보였다. 입자상 물질의 배출량보다는 가스상 물질의 확산 및 이류 현상으로 관측지점에서 보다 정량적인 변화값으로 반영된 것으로 판단된다.

이상으로 위와 같은 결론을 종합하면, 2018년 가을 집중관측기간에 강릉항에서 관측된 입경별 수 농도와 NO₂ 농도는 항만 지역에서의 대기 중 농도 수준의 현황과 시간대별 변화 경향에 관한 정보를 제공함과 동시에 선박 운항이나 기상 요소의 변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 변화 영향이 복합적으로 영향을 받고 있는 것으로 정리할 수 있다. 그러나, 본 연구는 항만 지역의 주요 배출원으로서 선박의 운항 및 엔진 가동시간, 선박 하역작업 시 사용되는 자동차의 영향, 그리고 인근 주거/상업 지역에서 영향 등이 정밀하게 고려되지 못한 한계점이 있다. 따라서, 항만 지역의 배출원의 특성을 고려한 대기오염물질의 배출에 따른 지역 대기질에 미치는 기여도 평가 등의 추가연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2019R1I1A3A01062804)으로 지원받아 수행된 연구입니다.

References

- Blasco, J., Durán-Grados, V., Hampel, M., Moreno-Gutiérrez, J. (2014) Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems, *Environment international*, 66, 44-47.
- 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>
- Fuglestedt, J., Bernsten, T., Eyring, V., Isaksen, I., Lee, D.-S., Sausen, R. (2009) Shipping Emissions: From Cooling to Warming of Climate - and Reducing Impacts on Health, *Environmental Science & Technology*, 43, 9057-9062. <https://doi.org/10.1021/es901944r>
- Grewal, D., Haugstetter, H. (2007) Capturing and sharing knowledge in supply chains in the maritime transport sector: critical issues, *Maritime Policy & Management*, 34(2), 169-183.
- Johansson, L., Jalkanen, J.-P., Kukkonen, J. (2017) Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmospheric Environment*, 167, 403-415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042>
- Lee, K.-H., Park, S.-S. (2020) Characteristics of Haze Episode in 2019 December by Using Satellite and Ground Measurements with Trajectory Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 128-138, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.128>
- Mueller, L., Jakobi, G., Czech, H., Stengel, B., Orasche, J., ArteagaSalas, J.-M., Kara, E., Elsasser, M., Sippula, O., Streibel, T., Slowik, J.-G., Prevot, A.-S.-H., Jokiniemi, J., Rabe, R., Harndorf, H., Michalke, B., Schnelle-Kreis, J., Zimmermann, R. (2015) Characteristics and temporal evolution of particulate emissions from a ship diesel engine, *Applied Energy*, 155, 204-217.
- Park, T.-E., Son, S.-C., Lee, K.-H., Park, S.-S. (2022) Differences in chemical, light absorption, and spectroscopic characterizations of PM_{2.5} during spring at an urban site in Gwangju and a port site in Gangneung, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, (in printing).
- Viana, M., Hammings, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Viegler, I., van Aardenne, J. (2014) Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe, *Atmospheric Environment*, 90, 96-105.
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., Sperling, D. (2016) Pollution: three steps to a green shipping industry. *Nature News*, 530(7590), 275-277.
- Wang, P., Chen, K., Zhu, S., Wang, P., Zhang, H. (2020) Severe Air Pollution Events not Avoided by Reduced Anthropogenic Activities During COVID-19 Outbreak, *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104814. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104814>
- Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P.K.-K., Li, M., Fu, Q. (2019) Atmospheric pollution from ships and its impact on local air quality at a port site in Shanghai, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 6315-6330. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6315-2019>
- Wong, M.-S., Zhu, R., Kwok, Y.-C.-T., Lee, K.-H. (2021) Association Between NO₂ Concentrations and Spatial Configuration: A study of the Impacts of COVID-19 Lockdowns in 54 US cities, *Environmental Research Letters*, 16(5), 054064.

- World Health Organization (WHO) (2016) Air Pollution Levels Rising in Many of the World's Poorest Cities. <https://www.who.int/news/item/12-05-2016-air-pollution-levels-rising-in-many-of-the-world-s-poorest-cities> (accessed on May, 12, 2016).
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Lee, K.-H. (2018) Enhanced light absorption due to aerosol particles in ship plumes observed at a seashore site, *Atmospheric Pollution Research*, 9(6), 1177-1183. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.05.005>
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Lee, K.-H. (2019) Light Absorption Characteristics of Fine Particles Using a Real-Time Optical Absorption Measurement Instrument at a Seashore Wharf, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 564-567, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564>
- Zhao, M., Zhang, Y., Ma, W., Fu, Q., Yang, X., Li, C., Zhou, B., Yu, Q.,

Chen, L. (2013) Characteristics and ship traffic source identification of air pollutants in China's largest port, *Atmospheric Environment*, 64, 277-286.

Authors Information

- 이권호 (강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gmail.com)
- 최미경 (강릉원주대학교 복사위성연구소, 공간정보협동과정 박사과정) (mkchoi0411@gmail.com)
- 박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)
(park8162@chonnam.ac.kr)
- 홍천상 (한국외국어대학교 연구산학협력단 산학협력연구교수)
(hcs103@gmail.com)