

# 항만 인근 미세먼지 노출 영향권 및 오염도 분석 : 동해항 운영현황을 중심으로

황제호\* · 김시현\*\* · † 강달원

\*한국해양대학교 박사과정, \*\*한국해양대학교 물류시스템공학전공 부교수, † 가톨릭관동대학교 항공교통물류학과 조교수

## Evaluation of Fine Dust Diffusion and Contamination Degree : Focused on the Operation Status of Donghae Port

*Je-Ho Hwang\* · Si-Hyun Kim\*\* · † Dal-Won Kang*

*\*PhD Candidate, Major of Logistics, Korea Maritime and Ocean University*

*\*\*Associate Professor, Major of Logistics, Korea Maritime and Ocean University*

*† Corresponding Author, Assistant Professor, Major of Aviation Management&Logistics, Catholic Kwandong University*

**요 약** : 동해항은 주거 생활권인 송정동, 북평동과 매우 인접한 거리에 위치하고 있으며 송정동에는 총 21,179세대, 북평동에는 5,754세대가 거주하고 있다. 동해항에서 처리되는 주요화물은 석회석, 시멘트, 무연탄, 유연탄 등으로 분진성이라는 특성을 갖는다. 따라서 동해항 운영으로 인해 산화물 분진, 미세먼지 등 대기오염물질이 발생하여 확산되는 과정에서 인근 주거지역에 심각한 대기공해를 유발하고 있다. 이는 주민들의 생활과 건강에 악영향을 미치고 있으며, 배후 주거지에 거주하는 주민들은 동해항을 혐오시설로 인식하고 있는 실정이다. 현재 동해항에서는 항만산업에 기인한 미세먼지 배출량을 저감하기 위한 목적으로 장기적인 관점에서 항만 인프라와 장비운영 환경을 개선하고자 단계적인 접근을 하고 있으나 항만 인근지역의 대기공해에 대한 개선효과가 점진적으로 나타나기까지 오랜 시간이 소요될 것으로 판단된다. 본 연구에서는 단기적인 관점에서 항만 인근지역 주민들이 상시적으로 체감할 수 있는 미세먼지 농도 관리가 실현될 수 있도록 주간, 야간 및 계절주기에 따른 동해항 주변지역의 미세먼지 농도추이, 미세먼지 확산 패턴, 고농도의 미세먼지가 발생하는 공간분포를 풍향, 풍속 변수를 고려하여 분석하였다. 현재 추진되고 있는 미세먼지 저감 장기계획과 더불어 동해항 배후 주거권역에 대한 미세먼지 확산 영향권과 오염도 분석결과를 기반으로 주간, 야간 및 계절 주기에 따른 상시적 미세먼지 농도관리가 병행된다면 더욱 효과적인 대기질 관리가 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 항만운영, 인근지역, 미세먼지, 대기확산, 분포특성

**Abstract** : Donghae Port is adjacently located to a residential area wherein 26,933 generations are creating a living environment. The areas comprise Song-jeong village (5,754 generations) and Bukp-yeong village (21,179 generations). Major cargoes handled in Donghae Port are dusty limestone, cement, anthracite, and bituminous coal, etc. In the process of handling such cargoes, air pollutants including oxide dust and fine dust which adversely impact the living conditions and health of residents are generated, causing air pollution in the vicinity of the port. Currently, Donghae Port is making an effort to improve the operation environment of the infrastructure and equipment in stages, for the purpose of reducing air pollutant emissions caused by the port industries in a long-term perspective. In this study, the sphere of influence of fine dust exposure and the degree of air pollution in the surrounding area were analyzed such as the state of fine dust concentration and diffusion in the vicinity of Donghae Port, fine dust diffusion pattern and spatial distribution of high-concentration considering wind direction and speed characteristics during the day and seasonal cycles. A more effective plan to reduce the concentration of fine dust in nearby areas by combining reduction plan, is being developed in terms of improvement regarding port infrastructure and equipment, and reduction measures considering the characteristics of the atmosphere environment according to the daytime, nighttime and season.

**Key words** : port operation, residential area, fine dust, atmospheric diffusion, distribution characteristics

### 1. 서 론

동해항은 국가 기간산업에 투입되는 원자재, 자원에 대한

처리비용이 높은 항만으로 주요 교역품목은 화물작업 시 분진을 유발하는 기타광석 및 생산품, 시멘트, 무연탄, 유연탄, 석회석 등이다. 동해항 배후 주거지역인 송정동과 구평동은

† Corresponding author : 정희원, kangdw@cku.ac.kr 033)649-7304

\* 정희원, jehoy288@g.kmou.ac.kr 051)410-4912

\*\* 종신회원, sihyunkim@kmou.ac.kr 051)410-4331

동해항으로부터 약 50m 이격거리에 위치하고 있으며 동해항 및 인근 산업단지를 기인으로 배출되는 고농도 미세먼지로 인해 심각한 대기공해를 입고 있다.

2021년을 기준으로 송정동과 구평동은 주거 밀집지역으로 동해시에 거주하고 있는 주민들의 약 18.5%가 거주하고 있다. 동해항을 기준으로 북측에 위치하고 있는 송정동에는 약 3,763명, 총 21,179세대, 남측에 위치하고 있는 북평동에는 12,879명, 총 5,754세대가 주거 생활권을 형성하고 있다<sup>1)</sup>.

현재 송정동과 북평동에 거주하고 있는 주민들은 심각한 대기오염문제, 이에 따른 삶의 질 저하, 건강에 대한 우려 등 동해항을 혐오시설로 인지하고 있다.

기본적으로 벌크항만에서는 항만기인 미세먼지 발생을 완화하기 위해 화물차량 세륜, 차량덮개 설치, 작업 시 살수시설, 집진설비 운영, 노후 하역설비 교체 등 다양한 활동을 수행한다. 동해항의 경우, 화물 야적장에서 발생하는 미세먼지 확산을 예방하기 위한 목적으로 2개소의 옥내 야적장을 운영하고 있으며 최근 1개소의 옥내 야적장을 증설하였다.

그러나 동해항에서는 현재 3단계 개발사업이 진행되고 있다. 사업완료 시 7선석이 확충되어 주요 처리화물인 석탄, 석회석, 시멘트 등의 물동량 규모가이 증가할 것이고 이에 따라 인근 주거지역에 대한 대기공해가 더욱 심화될 것으로 판단된다. 더욱이 부두증설 공사과정에서 발생하는 미세먼지 배출량 또한 주변지역 미세먼지 고농도에 상당한 영향을 미친다.

본 연구는 동해항 항만운영과 부두 증설공사에 따른 배후 주거지역의 미세먼지 오염현황을 정량적으로 분석하여 미세먼지 농도에 대한 상시적인 관리의 필요성 및 방향성과 관리방안 수립 시 주요 관리지역을 도출하는 것을 목적으로 하며 항만도시와 미세먼지에 대한 문헌연구, 동해항 운영현황 및 주거지역 및 주요시설에 대한 지리적 분포현황 조사, 주야간 미세먼지 농도 변화 추이분석, 계절별 특성에 기반한 바람장미 및 오염장미 분석, 고농도 공간 분포 분석 순으로 수행하였다.

항만 인프라와 선박기인 대기오염배출량을 산정하여 항만 및 선박 장비 개선을 통해 해운·항만산업 기인 대기오염물질 저감 방안을 도출하는 선행연구들과는 다른 관점에서 대기순환 특성을 고려한 접근으로 항만 배후지역의 미세먼지 농도 특성을 대기역학 관점에서 분석하여 효과적인 대기환경 개선방안이 마련될 수 있는 시사점을 제공하고자 한다.

학문적 관점에서 동해항 항만산업의 운영체제를 고려함과 동시에 배후 주거지역의 미세먼지 오염문제를 대기역학적 관점에서 정량적으로 분석하였으며 사회환경적인 관점에서 대기오염 예방을 위한 상시적 관리방안 마련의 필요성을 제시하고자 하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 항만도시와 미세먼지

항만도시에서는 항만산업과 도시의 여러 산업들이 연계되어 항만을 중심으로 지역산업이 발전하게 된다. 이 과정에서 항만의 기능이 확장되고 도시가 팽창하게 되어 항만과 지역사회 간의 갈등이 발생하게 된다. 특히 주거 생활환경에 직접적인 영향을 미치는 대기환경 오염이 심화되고 지속적으로 문제가 가시화되면서 항만의 경제적 기능과 함께 항만의 사회적 책임, 환경적 책임이 강화되었다(Kang and Kim, 2017).

항만 및 연관산업 시설에서 화물을 적하, 양하, 적재, 운송, 보관하는 등 화물을 처리하는 과정에서 다량의 미세먼지가 발생되고 있으며 취급화물의 종류에 따라 중금속 성분을 함유하는 비산먼지가 발생할 수 있다. 특히 산화물 분진, 미세먼지는 입자의 크기에 따라 지역대기환경과 인체에 상이한 피해를 미친다.

특히 대기오염물질의 일부인 미세먼지는 확산과정에서 타 대기오염물질(질소산화물, 휘발성 유기화합물, 블랙카본 등과 결합하여 이차적 대기오염물질을 생성한다(Rastogi et al., 2014).

가스 상태의 물질과 결합한 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )는 입자직경이  $2.5\mu m$  이하인 대기오염물질로 대기상 약 9%의 비중을 차지하지만 입자직경이  $10\mu m$  이하인  $PM_{10}$ 보다 대기환경, 기상, 인체에 미치는 영향이 치명적이다. 건강 측면에서 인체의 위해성은 폐, 호흡기, 중추신경계, 심혈관 등 질병을 유발하는 범위가 넓다. 더욱이  $1-5\mu m$  직경의 초미세먼지는 폐포로 침투가 가능하고 직경이  $0.5\mu m$  이하인 초미세먼지는 폐포 내에 지속적으로 축적된다(Pope et al., 2002).

국제 암연구소(IARC)는 미세먼지의 위해성에 대한 연구결과를 기반으로  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 를 1급 발암물질로 분류하였다(IARC, 2013).

항만의 입지와 항만인근 지역사회의 대기·환경적 요소, 지리적 요소 등에 따라 대기오염물질들은 특정한 패턴을 나타내며 주변으로 확산된다.

스페인에 위치한 발렌시아 항만에서 수행되는 화물처리작업 유형과 이에 따른 미세먼지 농도변화를 항만 내부에 설치한 4곳의 대기질 관측소 데이터를 분석한 결과 야적장에서 발생하는 미세먼지와 항만 증축공사 현장에서 발생하는 미세먼지 비중이 높게 나타났다(Natalia et al., 2009).

부산에 위치한 감천항에서 처리하는 품목별 벌크화물 물동량과 인근지역 인과관계 규명을 목적으로 기상변수들을 고려하여 월 단위 품목별 물동량과 인근지역 대기질 관측소에서 측정된  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  시계열 데이터를 투입하여 분석한 결과

1) 행정안전부 주민등록 인구통계, 2021년 10월 기준

고철, 모래, 시멘트 중 고철로부터 발생하는 미세먼지가 대기 질 관측소가 위치한 인근지역 미세먼지 농도에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다(Hwang and Kim, 2020).

광양항과 울산항을 기항하는 국제 화물선을 기인으로 항만 지역에서 발생하는 선종별 대기오염물질별 배출량을 산정하였으며 AMP 설치에 따른 대기오염물질 배출 개선효과를 예측하였다(Zhao et al., 2019).

북미, 유럽지역에 위치한 선진항만들의 그린포트 정책과 그린포트를 중심으로 수행된 연구들을 바탕으로 울산항에 적합한 그린포트 정책을 구축하기 위해 계층분석법을 활용하였으며 분석결과 장비적 측면, 제도적 측면에서 대기질 개선과 관련된 요인들의 우선순위가 높게 나타났다(Kim and Kim, 2014).

## 2.2 동해항 운영현황 및 인근지역

동해항은 크링카, 시멘트, 벌크시멘트, 석회석, 원목, 석탄을 처리하는 남부두, 크링카, 벌크시멘트, 기타광석을 처리하는 북부두, 석회석을 처리하는 중앙부두, 기계류, 유연탄, 무연탄을 처리하는 서부두, 석탄부두, 유류부두로 구성되어 있다.

동해항에서 처리되는 주요화물은 기타광석 및 생산품, 시멘트, 유연탄, 무연탄으로 2020년에 처리된 주요 품목별 물동량은 14,209 천톤(기타광석 및 생산품), 8,898 천톤(시멘트), 4,938 천톤(유연탄), 974 천톤(무연탄)이다.

동해항은 국내 유일의 굴입식 항만으로 인근지역인 송정동, 북평동 등은 항만과 불과 약 50m 거리에 위치하여 항만과 주거지역이 공존하고 있다. 동해항에서 처리하고 있는 분진성 화물로 인해 환경 관련 민원이 빈번하게 발생하고 있으며, 지역민들은 비산먼지의 영향으로 동해항을 혐오시설로 인식하고 있다. Fig. 1은 동해항과 주거지역 간의 인접성을 나타낸다.



Fig. 1 Adjacentness between Donghae Port and vicinity

주: 카카오 맵을 바탕으로 작성된 그림임.

자료: <https://map.kakao.com/>

동해항 인근에는 제조업체가 집적되어 있는 북평산업단지와 송정일반산업단지가 위치하고 있다. 북평산업단지에는 국가단지 내 41개소, 일반단지 내 133개소의 업체가 입지하고

있으며 송정일반산업단지에는 LS전선 1개소가 입지하고 있다. Fig. 2의 C 지점에 동양 시멘트공장, D 지점에 동부메탈 동해공장이 위치하고 있다.

또한 동해항 중앙부두 인근에 위치한 A 지점에는 한국환경공단 수도권동부환경본부에서 운영중인 동해항 대기질 측정소가 위치하고 있으며 동해항을 기준으로 약 2.5km 인접거리인 C지점에는 강원지방기상청에서 운영 중인 동해 기상대가 위치하고 있다.



Fig. 2 Residential and industrial infrastructure

주: 구글맵을 바탕으로 작성된 그림임.

자료: <https://www.google.co.kr/maps>

## 3. 연구 방법

### 3.1 데이터 수집

본 연구를 수행하기 위한 목적으로 에어코리아<sup>2)</sup>를 통해 동해항 대기질 관측소에서 측정된  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도 데이터를 수집하였고 기상청 기상자료개방포털<sup>3)</sup>을 통해 동해항 지역의 기상(풍속, 풍향) 데이터를 수집하였다. 데이터 수집의 시간적 범위는 총 9개월로 동해항 대기질 관측소에서 미세먼지 농도를 측정하기 시작한 2020년 8월 1일부터 미세먼지 농도 데이터가 업데이트 되어있는 2021년 4월 30일까지의 시간 단위 시계열 데이터를 활용하였다. 기상학적, 지리적 원인으로 지역마다 차이를 나타내는 계절별 변화주기를 고려하여 수집한 시계열 데이터를 사계절 단위로 분류하였다. 강원도 영동지방에 위치한 동해시의 뚜렷한 계절변화는 3월 중순-5월 말(봄), 6월 초-9월 중순(여름), 9월 중순-11월 중순(가을), 11월 중순-3월 중순(겨울)의 주기를 갖는다.

동해항 중앙부두 인근에 위치한 대기질 측정소를 기준으로 계절 변동성에 따라 미세먼지 농도 분포가 어떤 패턴을 나타내는지 분석하고자 시계열 데이터를 3월 16일-5월 31일(봄), 6월 1일-9월 15일(여름), 9월 16일-11월 15일(가을), 11월 16일-3월 15일(겨울)로 분류하여 분석을 수행하였다. 사계절 동안

2) <https://www.airkorea.or.kr/web>

3) <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>

시간대별 데이터셋은 결측치를 제외하고 봄철 1,042개( $PM_{10}$ ), 1,029개( $PM_{2.5}$ ), 여름철 915개( $PM_{10}$ ), 768개( $PM_{2.5}$ ), 가을철 1,422개( $PM_{10}$ ), 1,201개( $PM_{2.5}$ ), 겨울철 2,804개( $PM_{10}$ ), 2,686개( $PM_{2.5}$ )로 구성되었다.

### 3.2 분석절차

본 연구에서는 동해항 인근지역의 미세먼지 피해에 대한 동해항 산업지역의 기여도를 파악하고 일단위, 계절단위에 따른 인근지역 고농도 미세먼지의 분포특성을 분석하였다.

분석에 활용된 툴은 R 소프트웨어로 ‘Openair’ 패키지를 사용하기 위해 채택하였다. Openair 패키지는 2008년, 영국의 자연환경 연구위원회(NERC)에 의해 개발되었으며 대기환경과 대기오염 관련 데이터를 투입하여 대기오염 분산모델 시각화하고 측정된 데이터 분석을 분석하며 대기질 상태를 평가하기 위한 다양한 기능을 제공하기에 대기과학 분야에서 범용적으로 활용되고 있다(Carlsaw and Ropkins, 2012).

분석절차는 시간대별 미세먼지 배출농도 추이분석, 바람장미분석, 오염장미분석, 미세먼지 고농도지역 공간분포분석 순이다. 바람장미(Wind rose)는 풍향, 풍속에 대한 단위 시계열 데이터를 방위별, 풍향별 빈도에 따라 방사 그래프 형태로 표현하며 풍향에 따른 풍속의 빈도 등 동해항 인근지역 바람의 특성을 통계적으로 분석할 수 있다. 풍향과 풍속에 대한 값들은  $u = \bar{u} \cdot \sin(\frac{2\pi}{\theta}), v = \bar{u} \cdot \cos(\frac{2\pi}{\theta})$ 으로 표현되며  $\bar{u}$ 는 시간당 평균풍속,  $\theta$ 는 동측에서 불어오는 바람을 기준으로 나타나는 평균풍향을 의미한다.

오염장미(Pollution Rose)는 24시간 오염농도 변화와 바람장미가 합성되어 동해항 인근지역의 풍향별 빈도수( $t_{i,n}$ )와 각 방위별 풍향의 일 평균농도( $C_i$ )값을 곱하여 합산한 후, 풍향별 총 농도를 산출하여 풍향별 빈도수 합( $\sum t_{i,n}$ )으로 나누어 표현된다. 수식은  $(TWMC)_n = \frac{\sum(t_{i,n} \times C_i)}{\sum t_{i,n}}$ 로 표현된다. 오염장미 그래프를 통해 풍향과 풍속에 대한 대기오염물질 농도 관측 확률을 분석할 수 있다(Sung et al., 2014). 바람장미와 오염장미 분석에서 계산되는 mean 값은 평균 풍속을 나타내며 calm 값은 무풍일 때의 값을 나타낸다. 또한 16방위를 중심으로 형성된 원은 백분율(%)에 따라 빈도수에 대한 비중을 표현한다.

동해항 인근지역에 대한 미세먼지 고농도 분포는 풍향, 풍속에 대한 미세먼지 농도를 조건부 함수를 활용하여 인터플레이션 형태로 시각화하여 미세먼지 농도분포 사례 중 고농도 빈도수가 가장 높은 지역을 분석하였다. 조건부 함수는 분석에 입력된 전체 풍향, 풍속 단위 표본의 수에 대한 혼합비가 총 백분위수 농도보다 높은 경우에 대한 풍향, 풍속 단위 표본의 수로 계산된다(Ashbaugh et al., 1985; Uria-Tellaetxe and Carlsaw, 2014).

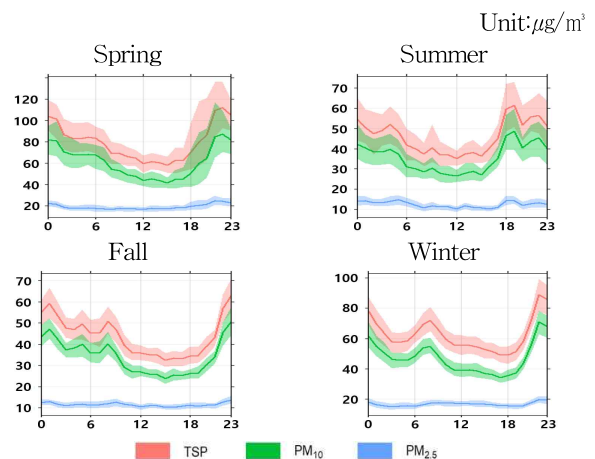
## 4. 실증분석

### 4.1 미세먼지 배출농도 추이분석

동해항 대기질 관측소에서 측정된 미세먼지 농도를 계절변화에 따라 분류한 후 일별 평균 미세먼지 농도 변화추이를 신뢰구간 95%에서 평균값을 분석한 결과는 Table 1으로 정리된다.  $PM_{2.5}$ 의 경우, 농도 변동폭이 TSP,  $PM_{10}$  대비 비교적 낮은 분포를 나타냈다. 입자별 미세먼지 농도 변화추이는 하루를 기준으로 사계절 모두 23시-00시 사이에 가장 높은 농도가 측정되었고 약 15시까지 하향추세를 나타낸 후 다시 00시까지 상승하였다. 이는 동해항 연안지역의 지리적인 특성에 의해 발생하는 일 단위 해륙풍의 영향으로 주간 해풍에 의해 미세먼지가 해상으로 이동하였다가 야간 육풍에 의해 다시 육상으로 이동하여 미세먼지 농도변화에 주기적 변동성을 유발하는 것으로 판단된다. 특히 저녁시간은 일몰 후 기온이 떨어지게 되고 지면냉각으로 인해 하부기온이 상부보다 낮아져 국지 복사역전 현상이 나타나게 되어 결과적으로 대기가 안정되고 풍속이 느려져 오염도가 증가하게 된다(Lee et al., 2019).

24시간 동안의 총 미세먼지 농도와  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도 수준은 봄, 겨울 순으로 비교적 높게 나타났고, 여름, 가을은 상대적으로 낮은 수치를 나타냈다. 봄철 총 미세먼지(TSP) 농도의 변동폭은 약 60-130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$ 의 경우, 약 40-110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{2.5}$ 의 경우, 약 18-22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었고 여름철에는 약 30-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP), 약 28-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{10}$ ), 약 10-18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{2.5}$ ), 가을철에는 약 30-68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP), 약 22-52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{10}$ ), 약 10-14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{2.5}$ ), 겨울철에는 약 40-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (TSP), 약 30-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{10}$ ), 약 16-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ( $PM_{2.5}$ )으로 봄, 겨울, 여름, 가을 순으로 변동폭 범위가 넓게 분석되었다.

Table 1 The trend of fine dust concentration



미세먼지 농도에 대한 환경부 규제농도 기준은 연평균  $PM_{10}$  농도  $50\mu g/m^3$  이하,  $PM_{2.5}$  농도  $15\mu g/m^3$  이하이다. 연평균 농도기준은 국내 426곳의 대기질 측정소에서 5분 단위로 측정된 미세먼지 농도를 시간평균을 산정한 후 이를 바탕으로 일, 월, 연 평균 농도를 산정하는 과정으로 계산된다. 연평균 미세먼지 농도기준은 가장 많은 대기질 측정 데이터를 기반으로 산정되기에 결측치, 이상치에 대한 데이터 변동 영향이 낮으며 국내 미세먼지 농도현황을 전반적으로 반영한다. 연평균 미세먼지 농도기준에 대한 동해항 인근지역 미세먼지 농도 초과비율은 Table 2로 정리된다. 환경부 기준에 따르면  $PM_{10}$ 의 경우, 봄(49.62%), 여름(18.58%), 겨울(18.08%), 가을(7.88%) 순으로 높은 비중을 나타냈고  $PM_{2.5}$ 의 경우, 봄(56.85%), 여름(30.33%), 겨울(24.39%), 가을(6.58) 순으로 높은 비중을 나타냈다. 즉, 계절별 데이터 수집기간인 봄철 43.42일 중, 21.54일( $PM_{10}$ ), 24.37일( $PM_{2.5}$ ), 여름철 38.12일 중, 7.08일( $PM_{10}$ ), 9.70일( $PM_{2.5}$ ), 가을철 59.25일 중, 4.67일( $PM_{10}$ ), 3.29일( $PM_{2.5}$ ), 겨울철, 116.83일 중 21.12일( $PM_{10}$ ), 27.30일( $PM_{2.5}$ ) 동안 미세먼지 농도가 높게 나타났다.

또한 연평균  $PM_{10}$  농도  $15\mu g/m^3$  이하,  $PM_{2.5}$  농도  $5\mu g/m^3$  이하로 기준규제를 강화한 세계보건기구(WHO)의 미세먼지 배출기준을 동해항 인근지역 대기질 현황에 적용할 경우, 환경부 기준 대비, 초과시간비율이 봄철 약 2배, 여름철 약 3-5배, 가을철 약 6-9배, 겨울철 약 2-3배로 증가하였다.

우리나라의 경우, WTO, EU, 호주 등 타 국가들 대비 미세먼지에 대한 규제수준이 낮은 편으로 2018년부터 미국, 일본의 농도기준으로 규제수준을 강화하였으나 대기환경 개선을 목표로 하는 세계적인 추세에 따라 향후 점진적인 규제강화가 필요할 것으로 판단된다.

Table 2 Time ratio exceeding the concentration standards Unit:%

		Spring	Summer	Fall	Winter
환경부	$PM_{10}$	49.62	18.58	7.88	18.08
	$PM_{2.5}$	56.85	30.33	6.58	24.39
WHO	$PM_{10}$	95.97	88.85	46.27	44.47
	$PM_{2.5}$	99.22	99.87	52.54	48.59

#### 4.2 바람장미(Wind Rose) 분석

계절별 풍향, 풍속과 미세먼지 확산에 대한 관계를 규명하기 위한 목적으로 바람장미 분석을 수행하였다. 풍속과 풍향 변화에 따른 계절별 특성은 지역에 미세먼지 농도 분포에 직접적인 영향을 미친다. 동해항 인근지역의 계절별 풍향, 풍속에 대한 방사형 그래프는 Fig. 3으로 표현된다.

봄철의 경우, 서남서, 남남동, 동북동( $1-44\mu g/m^3$ ), 서남서( $44-68\mu g/m^3$ ), 서남서, 남남동( $68-100\mu g/m^3$ ), 동북동, 남남동, 서남서( $100-796\mu g/m^3$ ) 풍향비율이 높게 나타났으며 여름철의 경우, 남서, 북( $0-58\mu g/m^3$ ), 동북동, 남남동( $58-178$

$\mu g/m^3$ ) 풍향비율이 높게 나타났다. 또한 가을철의 경우, 서남서, 서북서( $0-28\mu g/m^3$ ), 서남서, 동북동( $40-170\mu g/m^3$ ) 풍향비율이 높게 나타났으며, 겨울철의 경우, 분류된 농도구간 모두에서 서남서, 서북서, 북북서 풍향비율이 높게 나타났다. 풍속의 경우, 사계절 모두  $0-2ms^{-1}$ ,  $2-4ms^{-1}$ 의 비율이 높게 나타났으며  $4-6ms^{-1}$ ,  $6ms^{-1}$  이상의 풍속비율은 상대적으로 낮은 비율을 차지하였다.

결과적으로 동해항 인근지역에서는 계절별 고유한 풍향 변동성이 나타나며 풍속이 감소하면 오염도가 증가하여 풍향이 미세먼지 농도분포에 높은 영향을 주는 요인으로 판단된다.

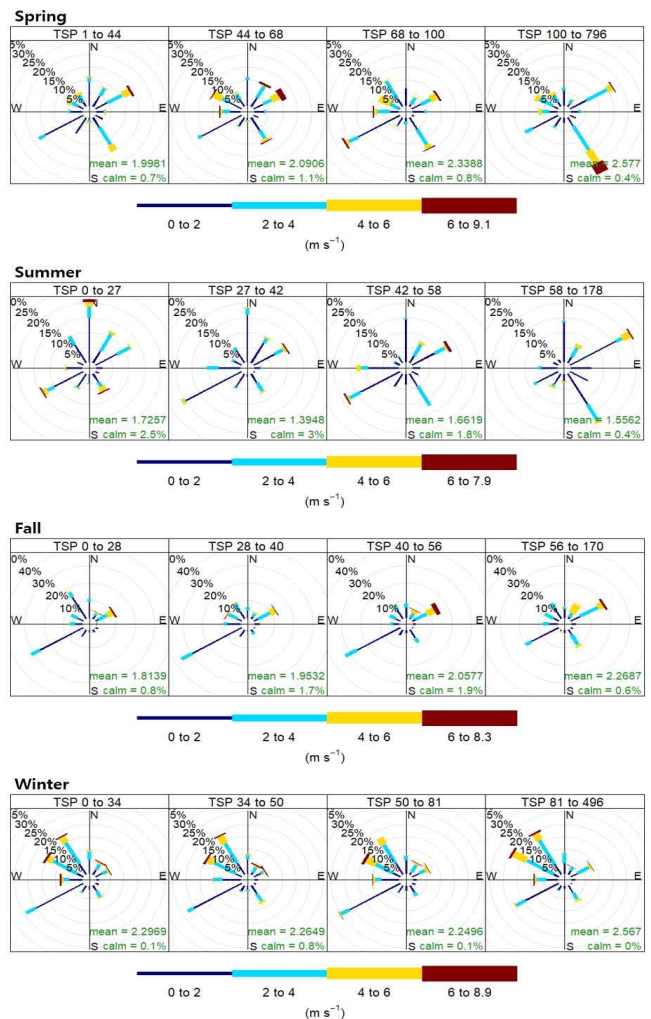


Fig. 3 Seasonal wind roses depending on TSP

#### 4.3 오염장미(Pollution Rose) 분석

오염장미 분석을 통해 동해항과 인근 산업 인프라를 발생원으로 배출된 미세먼지가 풍향 및 풍속의 영향으로 확산되는 입자크기별 미세먼지의 이동경로 방향을 계절별로 식별한 결과는 Fig. 4로 표현된다.

에어코리아에서 제공되는 미세먼지 농도범위에 따라 나뉘며, 매우 나뉘므로 분류되는  $PM_{10}$ ( $81\mu g/m^3$  이상),  $PM_{2.5}$ (36

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)을 기준으로 오염 장미도를 해석하였을 때, 사계절에 대한 모든 방위에서  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  고농도가 측정되었으며  $PM_{10}$ 의 경우, 봄철에는 서남서, 남남동, 동북동 방향, 여름철에는 남남동, 동북동 방향, 가을에는 서남서, 동북동 방향, 겨울에는 북북서, 서북서 방향에서 나뭇, 매우 나뭇이 빈번히 발생됨을 확인하였다. 또한  $PM_{2.5}$ 의 경우, 봄철, 가을철, 겨울철은  $PM_{10}$ 과 동일한 방향으로 나뭇, 매우 나뭇 발생률이 높았고 발생하였고 여름철의 경우, 북, 동북동 방향으로 나뭇, 매우 나뭇 발생률이 높게 분석되었다.

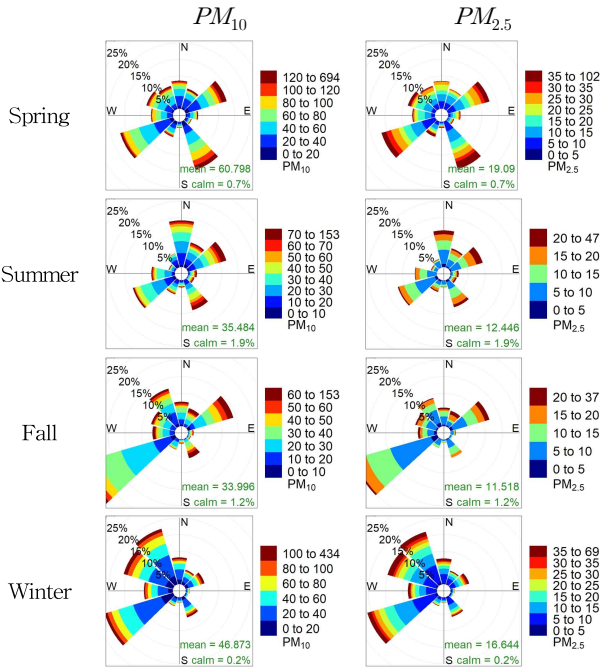


Fig. 4 Pollution roses by particle size

#### 4.4 동해항 미세먼지 고농도 공간분포

미세먼지 공간분포를 나타내는 Fig. 5에서 백분위수 기준 조건부함수 상위 20% 이상 고농도 미세먼지 분포는 짙은 적색으로 표현되며 이에 대한 농도기준은 Table 3으로 정리된다. 공간분포 상의 중심지역은 동해항 미세먼지 측정소 지점으로 분석 결과 내 16방위를 중심으로 형성된 원은 평균 풍속을 나타낸다.

Table 3 Top 20% standards for high concentration rate

	Spring	Summer	Fall	Winter
$PM_{10}$	84	48	47	68
$PM_{2.5}$	68	17	16	24

분석결과는 Fig. 5로 표현되며 동해항 대기질 측정소를 기준으로 인근지역에 대한 계절별 미세먼지 분포는 사계절 간 미세먼지 고농도 지역의 뚜렷한 차이를 나타냈다. 또한 겨울철, 여름철, 가을철, 봄철 순으로 미세먼지 고농도 일수가 늘어난 것을 확인하였다.

봄철의 경우, 미세먼지 고농도가 북평동과 북평산업단지 지역으로 분포되는 형태를 보였으며, 여름철에는 북평동, 송정동, 동해항 일대에 고농도 분포를 형성하였다. 가을철의 경우, 고농도 분포가 북평동, 송정동 쪽으로 집중되었으며 겨울철에는 사계절 중, 미세먼지가 전반적인 방위로 확산되는 형태가 가장 뚜렷하게 나타났다. 결과적으로 인근 주거지역인 송정동, 북평동 지역에 형성되는 미세먼지 고농도 분포가 타 계절 대비 겨울철에 가장 높을 것으로 분석된다. 봄철에는 최소분포를 나타내었지만  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 의 고농도 기준이 타 계절들에 비해 높다는 점과 봄과 겨울철에 발생하는 기온역전현상에 따라 대기순환이 정체되는 것을 고려한다면 봄철의 미세먼지 고농도 분포가 상대적으로 협소하더라도 지역주민들의 건강에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

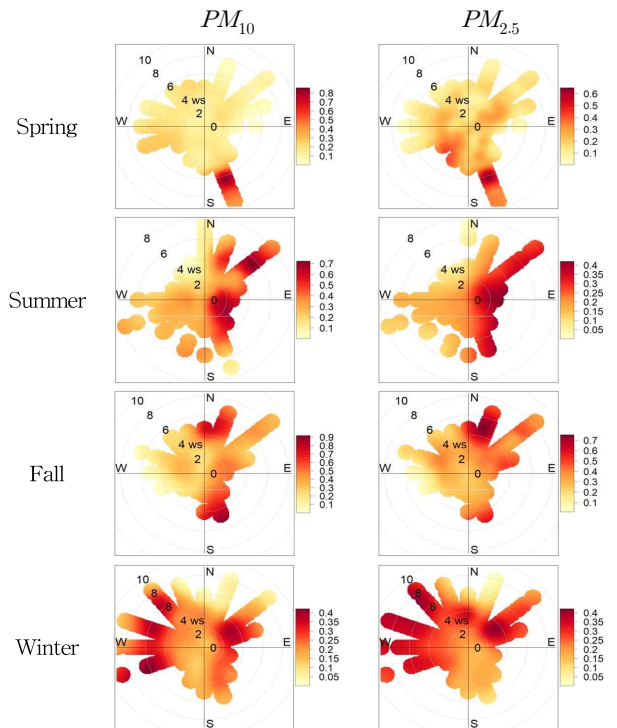


Fig. 5 Space distribution of high level concentration

## 5. 결 론

본 연구에서는 동해항의 지리적 입지조건과 기류변화 특성에 따라 상이한 양상을 나타내는 배후 주거지역의 주야간, 계절단위 미세먼지 농도 변화 추이, 미세먼지 확산 및 고농도 미세먼지 분포특성을 분석하였다.

미세먼지 배출농도 추이분석 결과 미세먼지 주요관리 시간대는 18:00-06:00시(봄, 여름철), 21:00-09:00시(가을, 겨울철)로 미세먼지로 인한 주민들의 이차적 피해를 효과적으로 예방하기 위해 야간 시간에 대한 미세먼지 관리방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 계절 주기별 바람장미 및 오염장미 분석결과를 통해 미세먼지 농도별 풍속, 풍향 변화와 미세먼지 확산

형태가 고유한 변동성을 나타내는 것을 확인하였다.

미세먼지 고농도 공간분포 분석을 통해 주요관리 계절이 봄, 겨울철임을 도출하였으며 항만 및 산업단지 지역에서 배출되는 미세먼지 배출량이 동해항 배후 주거지역 일대인 송정동, 불평동 일대의 미세먼지 고농도 분포에 직접적인 영향을 미친다는 것을 증명하였다. 종합적인 분석결과를 토대로 동해항 인근지역 대기질의 미세먼지 오염도가 심각한 수준임을 정량적으로 도출하였다.

현재 항만 기인 미세먼지 배출량 저감을 위한 방안은 항만 설비 및 장비운용 관점에서 선박 및 항만기인 미세먼지 배출 비중을 도출하고 물류기능에 따라 미세먼지 배출 비중을 도출하여 우선순위를 바탕으로 인프라를 개선하는 방향으로 추진되고 있다.

그러나 시차별, 계절별 미세먼지 확산 및 분포 특성이 상이하다는 점에 착안하여 주야간 및 계절주기 변화에 따른 상시적인 미세먼지 관리방안 마련이 필요하다.

도로 미세먼지 흡입차량 운용을 통한 항만 주변도로 개발생 분진 제거, 방진막, 살수시설 운용을 통한 미세먼지 확산 방지도 미세먼지 농도 저감을 위한 방안이 될 수 있다.

하지만 수증기를 대기중에 분사하여 미세먼지를 집진함과 동시에 화물과 수분 접촉을 완화하여 품질 손상을 예방하는 드라이 포그 시스템을 항만 내, 증설공사 현장, 미세먼지 고농도 발생 배후지역에 설치하여 주야간, 계절별 특성에 따라 유기적으로 운용한다면 배후지역 주민들이 체감할 수 있는 대기질 개선효과가 나타날 것으로 기대된다.<sup>4)</sup>

현재 항만 내 드라이 포그 시스템을 운용하고 있는 해외 사례는 네덜란드의 로테르담 항만, 미국의 에버글레이즈 항만, 대만의 칼롱 항만으로 드라이 포그 시스템을 통해 항만 기인 미세먼지를 가시적으로 저감하였다.

미세먼지 확산을 방지할 수 있는 설비나 장비를 교체 및 확충하는 과정도 중요하지만 항만지역의 지리적 입지, 기후적 특성, 산업 공간분포 등을 고려하여 미세먼지 확산형태와 집중도에 따라 상시적인 미세먼지 저감 관리가 병행된다면 동해항과 배후지역의 지속가능한 발전체제가 수립될 수 있을 것이다.

## 사 사

본 논문은 해양수산부 제4차 해운항만물류 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

This research was supported by the 4<sup>th</sup> Educational Training Program for the Shipping, Port and Logistics from the Ministry of Oceans and Fisheries.

## References

- [1] Ashbaugh, L. L., Malm, W. C. and Sadeh, W. Z.(1985), "A residence time probability analysis of sulfur concentrations at ground canyon national park", *Atmospheric Environment*(1967), Vol. 19, No. 8, pp. 1263-1270.
- [2] Carslaw, D. C. and Ropkins, K.(2012), "Openair-an R package for air quality data analysis", *Environmental Modelling&Software*, Vol. 27-28, pp. 52-61.
- [3] Hwang, J. H. and Kim, S. H.(2020), "Fine Dust and Sustainable Supply Chain Management in Port Operations: Focus on the Major Cargo Handled at the Dry Bulk Port", *Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 7, p. 530.
- [4] International Agency for Research on Cancer.(2013), "AIR POLLUTION AND CANCER", *IARC SCIENTIFIC*, No. 161.
- [5] Kang, D. W. and Kim, S. H.(2017), "Conceptual Model Development of Sustainability Practices: The Case of Port Operations for Collaboration and Governance.", *Sustainability*, Vol. 9, No. 12, p. 2333.
- [6] Kim, T. G. and Kim, H. S.(2014), "Study on establishing Green Port Policy in Korea to meet Ports' Characteristics: Development of Ulsan Green Port Policy by using AHP", *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 38, No. 5, pp. 549-559.
- [7] Lee, T. J., Park, M. B. and Kim, D. S.(2019), "Time Series Assessment of PM2.5 Source Contributions and Classification of Haze Patterns in Seoul", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 1, pp. 97-124.
- [8] Natalia, M., Mar, V., Marco, P., Andrés, A., Xavier, Q., Servando C., Juan, F. P., Francisco, T., Juan, M. D. and José, Saéz.(2009), "Determination of direct and fugitive PM emissions in a Mediterranean harbour by means of classic and novel tracer methods", *Journal of Environmental Management*, Vol. 91, No. 1, pp. 133-141.
- [9] Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. and Thurston, G. D.(2002), "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution", *JAMA* , Vol. 287, No. 9, pp. 1132-1141.

4) Dry fog agglomerative dust suppression systems by dust solutions. Available online: <https://www.nodust.com/>

- [10] Rastogi, N., Singh A., Singh D. and Sarin, M. M.(2014), “Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> at a source region of biomassburning emissions: Evidence for secondary aerosol formation”, *Environmental Pollution*, Vol. 184, pp. 563-569.
- [11] Sung, L. Y., Shie, R. H. and Lu, C. J.(2014), “Locating sources of hazardous gas emissions using dual pollution rose plots and open path Fourier transform infrared spectroscopy”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 265, pp. 30-40.
- [12] Uria-Tellaetxe, I. and Carslaw, D. C.(2014), “Conditional bivariate probability function for source identification”, *Environmental Modelling&Software*, Vol. 59, pp. 1-9.
- [13] Zhao, T. T., Yun, K. J. and Lee, H. S.(2019), “A Study on Estimating Ship Emission: Focusing on Gwangyang Port and Ulsan Port”, *Journal of Navigation and Port Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 93-108.

---

Received 01 December 2021

Revised 24 December 2021

Accepted 29 April 2022