

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/330039380>

Oceanographic and Meteorological Factors for Sea Fog Formation around Busan Harbor and Haeundae Beach

Preprint · December 2018

CITATIONS

0

READS

76

3 authors, including:



Young Taeg Kim

Korea Hydrographic and Oceanographic Agency

20 PUBLICATIONS 26 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Sea fog prediction around harbor limit [View project](#)

부산항과 해운대 인근해역의 해무 발생에 미치는 해양·기상 요소

Oceanographic and Meteorological Factors for Sea Fog Formation around Busan Harbor and Haeundae Beach

김국진* · 한진현** · 김영택*** · 한정식**** · 권석재***** · 김영남***** · 한인성*****

Kuk Jin Kim · Jin Hyun Han · Young Taek Kim · Jung Sik Kim · Seok Jae Kwon ·
Young Nam Kim · In-Seong Han

요약 부산항 및 해운대 인근 해역의 해무 특성을 파악하기 위해 2012년~2017년 9월 동안 관측된 시정 자료 및 해무 관련 해양·기상 자료를 통계분석 하였다. 분석결과 부산항 인근의 해무는 이류무와 전선무가 우세 하였으며, 최근에는 이류무가 전선무보다 조금 더 발생하는 것으로 파악되었다. 복사무 및 증기무의 발생 빈도는 매우 낮은 것으로 나타났다. 이류무는 1~2일의 지속시간을 갖기 때문에, 지금까지 이류무의 주요 원인으로 지목된 용승에 의한 냉수대 출현과 함께 최근 기온상승에 의한 이류무 발생 및 예측 연구가 중요함을 알 수 있었다. 한편, 해무의 응결핵 역할을 하는 미세먼지는 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 되면 더 이상 해무의 응결핵 역할을 하지 않는 것으로 파악되었다.

키워드 항계안전 해양정보 제공시스템, 부산항, 해운대, 해기차, 이류무, 냉수대, 기온상승

Abstract Sea fog data and their related oceanographic and meteorological data during 2012~September 2017 around Busan Harbor and Haeundae Beach were statistically analysed and showed that advection sea fog and frontal sea fog were dominant, where the advection sea fog has recently occurred more frequently than the frontal sea fog. However, the occurrence of radiation fog and steam fog were relatively low. Because of the advection sea fog's long duration of 1~2 days, not only the cold water occurrence partially due to the well-known upwelling, but also the recent rapid increase in air temperature should be carefully investigated to better understand the mechanism of advection sea fog and to predict its formation in advance. On the other hand, the airborne fine dust concentration more than $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ was proven not to play an important role in the condensation nuclei of the sea fog.

Key words POIS(Port Oceanographic Information System), Busan Harbor, Haeundae Beach, Air-Sea Temperature Difference(ASTD), Advection Sea Fog, Cold Water Mass, Air Temperature Increase

1. 서론

해양에서 발생하는 모든 안개를 지칭하는 해무(海霧, Sea fog)는 항만업 및 해운업 종사자에게 가장 필요한 정보임이 설문조사(국립해양조사원, 2016)에서 나타났고, 실제로 중앙안전해양심판원의 10년간

(2007~2016년) 재결서에서도 전체 해양사고 1540건 가운데 해무에 의한 사고가 131건으로 8.5%를 차지하는 것으로 조사되었다(국립해양조사원, 2017).

국립해양조사원(이하 해조원)은 전국 주요 10개 항만과 인근해역을 운항하는 선박의 안전과 항만의 효율적 운영을 지원하기 위해 2016년 4개항(부산항, 부

Received: 2018.00.00, Revised: 2018.00.00, Accepted: 2018.00.00

* (주)유에스티21, 인천시 연수구 갯벌로 129, 503(송도동, 산업기술연구집적센터), kjkim@ust21.co.kr,

** (주)유에스티21, 인천시 연수구 갯벌로 129, 503(송도동, 산업기술연구집적센터), hanj617@ust21.co.kr

*** 국립해양조사원 해양예보과, 부산광역시 영도구 해양로 351, kyt5824@korea.kr (교신저자)

**** 국립해양조사원 해양예보과, 부산광역시 영도구 해양로 351, hanjs@korea.kr

***** 국립해양조사원 해양예보과, 부산광역시 영도구 해양로 351, sj79kwon@korea.kr

***** 부산지방기상청 기후서비스과, 부산광역시 동래구 충렬대로 237번길 117, rladudska@korea.kr

***** 국립수산물과학원 기후변화연구과, 부산광역시 기장군 기장읍 기장해안로 216, hisjamstec@korea.kr

산항신항, 평택·당진항, 인천항)에 해무관측소를 구축한 데 이어, 2017년 7개 해무관측소(대산항, 군산항, 목포항, 여수·광양항, 울산항, 포항항, 해운대)를 확대 구축하고, 실시간으로 관측한 시정거리, 기온, 수온, 풍향/풍속, 습도, 해면기압, 강수량, CCTV 동영상 및 10분 단위 사진을 항계안전 해양정보 제공시스템(POIS, Port Oceanographic Information System) 홈페이지(<http://www.khoa.go.kr/pois>)를 통해서 서비스하고 있다. 특히, 인천항과 해운대에서는 2018년 4월부터 딥러닝(Deep learning) 기반 해무예측 서비스를 시범적으로 수행하고 있다.

부산의 광안대교 인근의 해무는 유명하지만, 2015년 인천 영종대교 106중 추돌사고(동아일보, 2015.2.11.)에서 알 수 있듯이 대형재난의 원인이 될 수 있다. 특히 해운대와 광안대교 일대에서 발생하는 짙은 해무는 대교를 지나는 차량뿐만 아니라 교각을 통행하는 선박에게도 커다란 위험요소이다.

부산 일대의 해무는 각종 사고뿐만 아니라 시민의 일상생활에도 많은 불편을 주고 있다. 일례로 2017년 4월 16일 부산앞바다에서 나타난 차가운 바닷물이 상층의 더운 공기와 만나서 발생한 짙은 이류무가 2일간 지속되면서 어선 2척이 실종되었을 뿐만 아니라 김해공항에서는 항공기 2편이 결항되고 60편이 지연되기도 하였다(KNN뉴스, 2017.4.17.).

본 연구에서는 부산항 인근의 해무발생 전후의 해양 및 기상 요소에 대한 고찰(김 등, 2017)을 좀 더 살펴보고, 나아가 부산항~해운대 일대의 해무예측용 해양·기상 학습자료 분석(김 등, 2018)을 심화하여 해무 발생 및 소산 메커니즘을 살펴보고자 한다.

2. 관측 자료 취득 및 분석 방법

2.1 자료 품질처리 및 해무상태 분류

관측 자료는 2012년~2017년(6년) 동안 부산항 일대(Fig. 1)에서 취득 가능한 해양·기상 관측 자료를 모두 수집하고 품질처리 하였다. 시정거리(m)는 해조원이 운영하는 부산항 해무관측소와 기상청이 운영하는 부산 종관기상관측소(ASOS) 및 동래 자동기상관측소(AWS) 자료를 이용하였다. 수온(℃)은 부산조위관측소(해조원)와 광안등표(기상청)로부터 얻었다. 기온(℃), 습도(%), 풍향(°)/풍속(%)은 부산항 해무관측소, 부산ASOS, 영도AWS, 북항AWS, 남항AWS, 광안등표 자료이다. 기압(hPa)은 부산항 해무관측소, 부산ASOS, 북항 및 남항에 있는 AWS, 광안등표 자료이다. 강수량(mm)은 부산ASOS, 영도AWS, 북항 및 남항의 AWS으로부터 얻었다. 일사량은 부산ASOS의 자

료이고, 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 자료는 에어코리아가 운영하는 광복동, 광안동, 태종대 관측소 자료이며, 조위(cm)는 해조원의 부산조위관측소 자료이다. 수집한 자료는 모두 5단계의 품질처리과정을 밟는다. 1단계는 각 관측항목별로 관측범위를 벗어나는 값을 제거하는 단계이다. 시정의 관측범위는 0~20,000 m, 수온 $-10\sim 35^\circ\text{C}$, 기온 $-20\sim 40^\circ\text{C}$, 습도 1~100%, 풍속 0~50 %, 풍향 0~360°, 기압 950~1040 hPa 이다. 2단계는 관측범위를 벗어나지 않더라도 사람이 판단하여 이상값을 제거하는 과정이다. 3단계는 각 관측값 별로 이동평균하여 이동평균값과 관측값과의 편차가 표준편차의 3배 이상인 값을 제거하는 과정이다. 이때 이동평균 시간은 각 관측값 별로 특성에 맞게 조절하였다. 4단계에서는 선형보간법을 통해 각 관측소별 자료의 시간적 공백을 채우는 과정으로 본 연구에서는 1시간 이내의 자료만을 선형보간 하였다. 마지막 5단계는 공간적으로 흩어진 각 관측항목별 자료를 해무관측소(Fig. 1의 별표 지점)를 기준으로 모으는 단계이다. 해무관측소를 기준으로 각 관측소별 거리에 반비례하여 가중치를 주는 역거리 가중치(Inverse Distance Weight) 방법을 적용하여, 최종적으로 완벽한 하나의 자료 세트(data set)를 구성하였다.

본 연구에서는 ‘해기차 = 기온 - 수온’ 으로 정의하였으며, 이슬점온도(t_d)는 기온(t_{air})과 상대습도(RH)를 이용하여 아래 식(Lawrence, 2005)으로부터 계산하였다.

$$t_d = t_{air} - \left(\frac{100 - RH}{5} \right) \left(\frac{t_{air} + 273.15}{300} \right)^2 - 0.00135(RH - 84)^2 + 0.35 \quad (1)$$

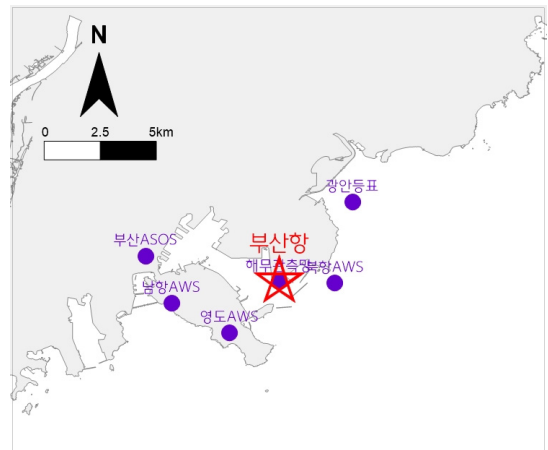


Figure 1. Locations of observed data

시정계로 관측된 시정자료는 해무 상황뿐만 아니라 강우 혹은 강설 시, 기기 오작동 등에도 측정값이 나타날 수 있기 때문에 AWS의 강우 및 강설 정보를 우선 적용하여 해무상태(해무, 비해무)를 분류하였다. 해무는 시정거리가 1 km 미만이고, 강수량이 5 mm/hr 미만이며, 습도가 70% 이상이면 해무(T)로 정의하였다. 시정거리가 1 km 이상이면 비해무(F)으로 구분하였다. 시정거리가 1 km 미만이어도 강수량이 5 mm/hr 이상이면 강수로 분류하여 비해무로 처리하였고, 시정거리가 1 km 미만이고 강수가 5 mm/hr 미만이어도 습도가 70% 미만이면 비해무로 처리하였다.

일단, 해무로 분류가 되면 해무의 종류에 상관없이 해무 현황분석을 수행하였다. 해무 발생일수는 해무가 하루에 여러 번 발생하더라도 한번으로 기록하였다. 해무가 주로 언제 발생하고 소멸하는지를 알아보기 위해 해무가 발생한 시간과 소멸한 시간을 시간대별로 누적한 횟수를 계산하여 해무 발생 횟수 및 해무 소멸 횟수로 정의하였다. 시간대별 해무의 출현 횟수는 1시간 동안 해무가 여러 번 나타나고 사라져도 1회로 기록하여 해무의 빈출 시간대를 파악하였다. 해무의 지속시간은 해무가 처음 발생하여 소멸할 때까지 시간을 월별로 통계 처리하였으며, 이를 통해 주로 어느 시기에 발생한 해무가 지속시간이 길었는지를 파악하였다.

2.2 해무의 발생학적 분류

본 연구에서는 해무의 발생학적 분류법(이와 안, 2013; 한국기상학회, 1999)에 따라 해무를 4개 유형(전선무, 복사무, 이류무, 증기무)으로 구분하였다. 단, 구체적 분류 기준은 이전의 김 등(2016)과는 조금 달리 해무 조건을 만족시킨 경우 해무 발생전후에 강수가 있으면 전선무로 구분하였다. 만일 해무발생 전후에 강수가 없고 풍향이 바다에서 육지로 불 경우 해기차 값이 양(+)이거나 기온변화가 음(-)이면 이류무, 해기차가 음(-)이거나 기온변화가 양(+)이면 증기무로 분류하였다. 풍향이 바다에서 육지로 불지 않는 조건에서 해무 발생시간이 3~9시간이 경과하고 풍속이 2m/s 미만이면 복사무로 분류하였고 그 외는 기타로 분류하였다. 또한 지상 일기도 및 CCTV 영상도 활용하여 종합적으로 판단하였다. 한편, 본 연구에서는 계절을 동계(1~3월), 춘계(4~6월), 하계(7~9월), 추계(10~12월)로 구분하였다.

3. 분석 결과

먼저 각 관측 항목별 기초통계분석 결과는 3-1, 해무와의 상관관계는 3-2, 해무의 발생학적 분류는 3-3에서 기술하였다. 해무의 종류별로 발생 및 소멸 전(해무발생 3시간 전부터 발생까지)·중(해무 지속 중)·후(해무소멸부터 3시간까지)의 자료 특성을 3-4에서

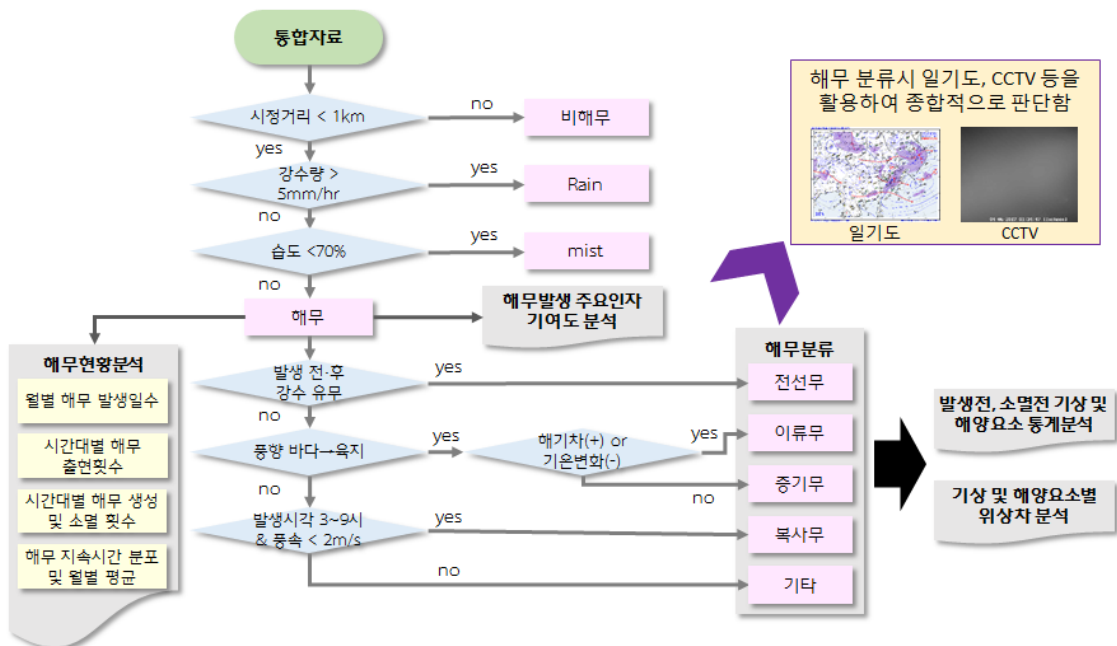


Figure 2. Data processes for classifying sea fog by generation mechanism

설명하고, 해무 이외의 저시정 발생일수는 3-5에서 살펴보았다.

3.1 관측항목별 기초통계 분석

3.1.1 시정 및 일사량

부산항 시정 1 km 미만 자료 가운데 강수와 강설 자료를 제외한 시정자료를 해무라 정의하면, 해무 지속시간은 7월이 평균 13.7 시간으로 가장 길었고, 11월은 0.1 시간미만으로 가장 짧았다. 월별 평균은 2.6 시간이다. 계절별로는 동계때 해무지속시간은 최소 0.0 시간~최대 8.2 시간이고 평균지속시간은 0.9 시간이었다. 춘계는 최소 0.0~최대 7.0 시간으로 평균은 2.4 시간, 하계는 최소 0.0~최대 49.6 시간(평균 6.6시간), 추계는 최소 0.0~최대 4.6 시간(평균 0.4시간)으로 나타났다(Fig. 3).

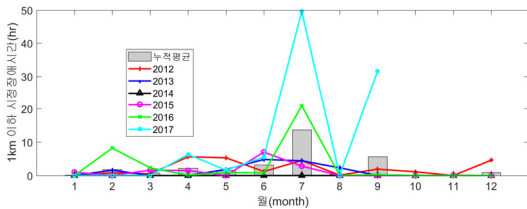


Figure 3. Monthly duration time of sea fog

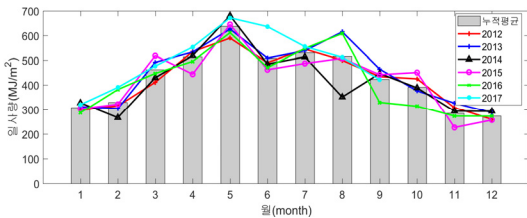


Figure 4. Monthly mean insolation amount

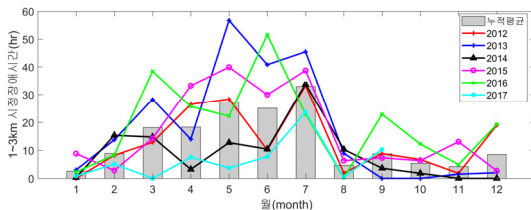


Figure 5. Monthly duration time of low visibility

일사량은 평면 1 cm² 넓이에 1분 동안의 복사량으로 해무 또는 저시정을 소멸시키는 역할을 한다. 실제 Fig. 3과 4에서 볼 수 있듯이 일사량이 가장 높은 5월에 해무지속시간이 매우 낮게 나타나고 있다. 하지만

해무지속시간이 가장 높았던 7월에 일사량은 하계 평균(490.2 MJ/m²)보다 약간 높게 나오고 있어, 하계 때 태양복사가 해무를 소산시키는 역할보다는 춘계 때 태양복사가 해무를 소산시키는데 더 큰 역할을 할 것으로 생각된다. 월별 누적일사량은 동계 266.1~518.8 MJ/m²(평균 366.5 MJ/m²), 춘계 444.1~680.8 MJ/m²(평균 553.4 MJ/m²), 하계 329.2~615.3 MJ/m²(평균 490.2 MJ/m²), 추계 226.3~450.8 MJ/m²(평균 316.5 MJ/m²)로 나타났다.

시정거리가 1~3 km인 저시정이 시정거리 1 km 미만인 해무보다 더욱 빈번하게 발생하였는데 5월, 6월, 7월의 저시정 발생시간은 27.3 시간, 25.1 시간, 33.0 시간으로 역시 7월에 해무와 함께 저시정 지속시간도 가장 길게 나타났다(Fig. 5).

3.1.2 기온, 수온, 해기차

계절별 부산항의 기온은 동계 2.4~9.8℃(평균 6.0℃), 춘계 12.1~21.3℃(평균 17.5℃), 하계 21.4~27.4℃(평균 24.3℃), 추계 3.3~18.6℃(평균 11.7℃)로 나타났다. 수온은 동계 11.4~14.9℃(평균 12.7℃), 춘계 13.0~21.2℃(평균 16.2℃), 하계 19.0~27.9℃(평균 22.6℃), 추계 12.4~23.1℃(평균 17.7℃)로 나타났다.

해기차(기온-수온)를 보면, 동계에 -12.4~2.7℃(평균 -6.7℃), 춘계는 -3.1~3.4℃(평균 1.4℃), 하계는 -2.8~5.7℃(평균 1.7℃), 추계는 -10.2~1.9℃(평균 -5.9℃)로 나타났다. 기온, 수온 및 해기차는 해무 발생과 직접적인 상관성을 보여주는데 이류무가 주로 발생하는 5~7월 동안 해기차가 양(+)의 값을 보여주고 있다(Fig. 6).

3.1.3 이슬점 온도 및 상대습도

이슬점 온도는 수분의 증거나 감소 없이 냉각에 의해 공기가 포화되어 응결이 시작되는 온도이며, 일반적으로 기온과 같거나 낮다. 식(1)을 이용한 부산항 월별 이슬점온도 평균은 동계에 -10.7~1.8℃(평균 -5.1℃), 춘계는 2.3~17.9℃(평균 11.3℃), 하계는 15.7~22.6℃(평균 20.2℃), 추계는 -8.7~13.4℃(평균 2.6℃)로 나타났다.

부산항의 월별 상대습도는 동계에 41.8~64.4%(평균 51.2%), 춘계는 56.2~83.2%(평균 70.0%), 하계는 67.2~87.6%(평균 78.7%), 추계는 48.1~74.1%(평균 58.1%)로 나타났다. 우리나라는 온도가 높은 여름철에 상대습도가 높고 겨울철에는 한랭 건조한 기단의 영향으로 상대습도가 낮다.

3.1.4 강수 및 해면기압

강수는 시정거리를 제한하여 시정계에서 해무로 오

인될 수 있으므로 해무 또는 비해무를 판별하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 또한 강수 전후로 전선무가 나타날 수 있으며, 실제 5 mm/hr 강수 후에 동반되는 해무는 본 연구에서 전선무로 분류하였다.

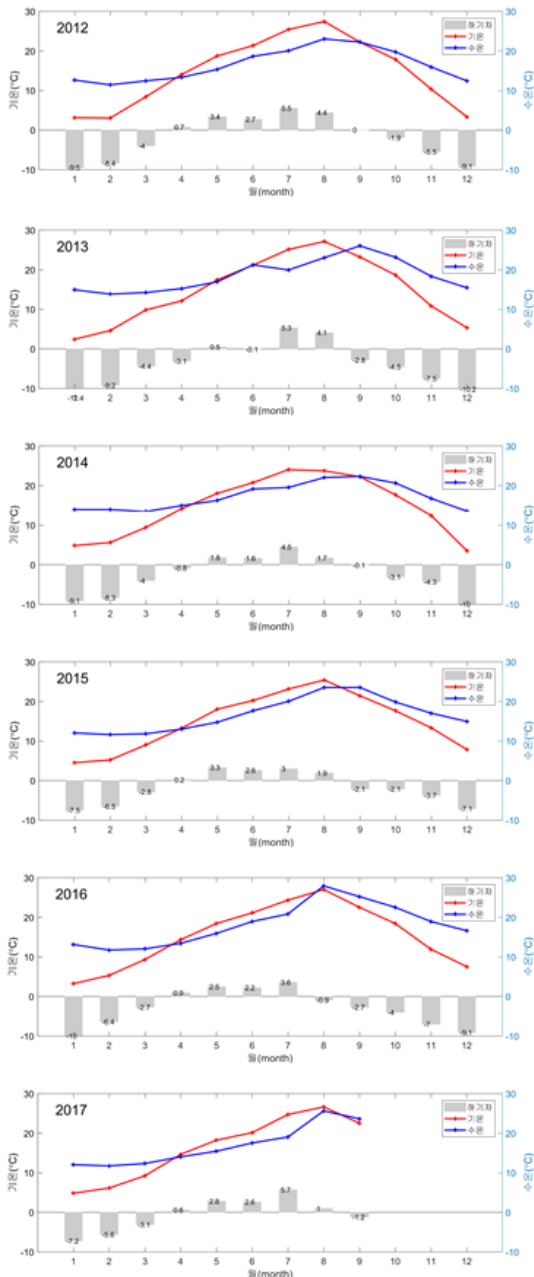


Figure 6. Monthly mean air temperature, sea temperature, and air-sea temperature difference

2012~2016년까지의 누적강수량은 연평균 106.0 mm 이고 2012~2017년까지의 부산항 월별 누적강수량은 2014년 1월에 8.8 mm로 최소, 2012년 7월에 501.5 mm로 최대로 나타났다. 이는 계절 평균에서도 알 수 있듯이 하계에 173.2 mm의 평균으로 가장 많은 누적강수량을 보였으며, 최솟값은 동계로 48.7 mm의 평균을 보였다.

평균해수면에서 대기압인 해면기압은 바람과 강수를 유발하는 요소이다. 부산항의 월별 해면기압이 가장 낮은 7월과 8월에 강수량이 가장 높게 나타난다. 해면기압이 가장 높은 1월에는 강수량이 최솟값을 보인다(Fig. 7과 8). 동계 평균 해면기압은 1016.5~1024.1 hPa(평균 1021.1 hPa), 춘계 1006.6~1016.7 hPa(평균 1011.1 hPa), 하계 1005.6~1014.6 hPa(평균 1009.3 hPa), 추계 1017.6~1023.7 hPa(평균 1020.3 hPa)로 나타났다.

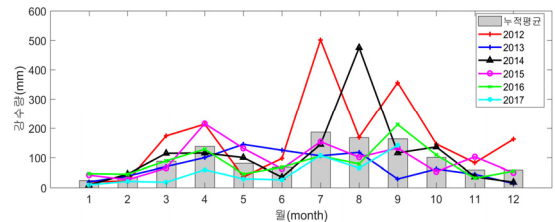


Figure 7. Monthly cumulative rainfall

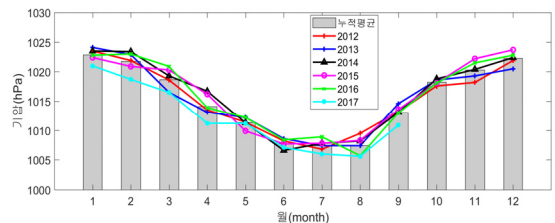


Figure 8. Monthly sea surface pressure

3.1.5 풍향·풍속 및 미세먼지

부산항의 풍향은 계절별로 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 동계 때 북서풍이 우세하고, 춘계 때 북서풍이 감소하면서 북동풍과 남서풍이 증가하는 경향을 보인다. 하계에는 북동풍과 남서풍이 우세하고, 추계에는 북서풍이 증가하는 추세를 보인다(Fig. 9). 반면, 부산항의 월평균 풍속은 2.3~4.1 m/s 이고, 연평균 풍속은 3.2 m/s 이다. 계절별 평균 풍속은 3.1~3.2 m/s 으로 나타나고 있어, 풍속은 계절별로 뚜렷한 변동을 보이지 않는다(Fig. 10).

미세먼지는 입자의 크기가 지름 $10\mu\text{m}^1$ 이하인 대기 중 부유 물질을 말한다. 중국 대륙에서 발생한 오염물

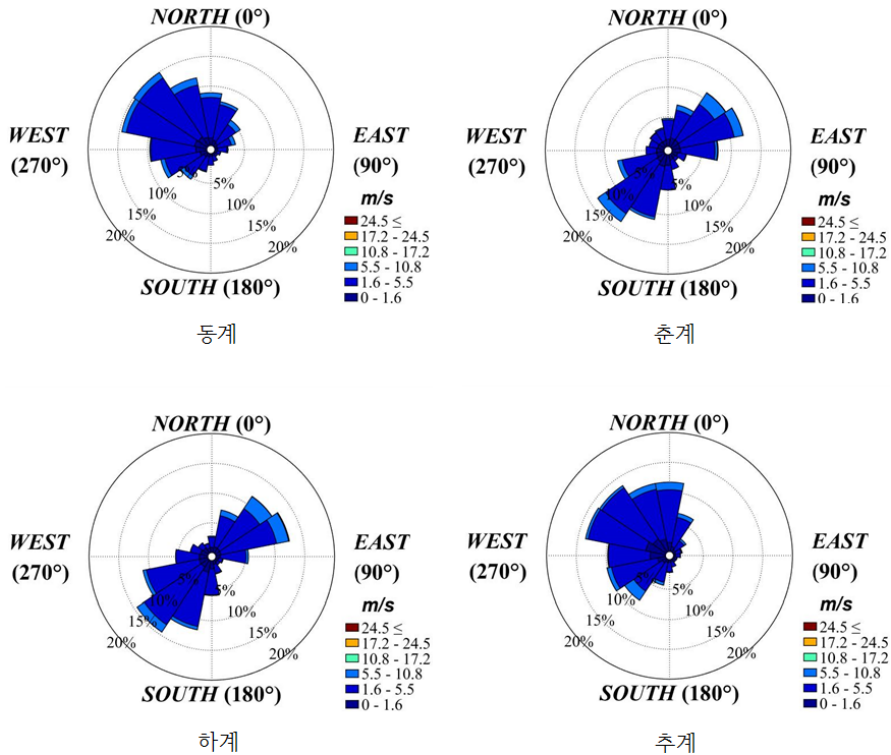


Figure 9. Seasonal wind directions

질이 대기 중 광화학 반응을 일으켜 만들어지며 북서풍 계열의 바람을 타고 우리나라로 넘어온다. 미세먼지는 시정 자체를 낮추기도 하지만, 해염(海鹽)과 함

께 해무의 응결핵 역할을 할 수 있다.

부산항 월별 미세먼지농도 평균은 동계에 35.1~71.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 51.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 춘계는 34.7~79.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 54.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 하계는 23.9~65.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 41.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 추계는 28.0~56.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 42.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타나고 있어 풍속과 같이 연중 거의 변화가 없는 것으로 나타났다(Fig. 11).

3.1.6 조위

부산항 월 평균 조위의 최솟값은 2월에 62.8 cm이고 최댓값은 8월 86.2 cm로, 겨울철(평균 64.0 cm)에서 여름철(평균 83.4 cm)로 갈수록 조위가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 7월과 8월의 최저 해면기압에 의한 역수은주 현상과 함께 8월 최대 수온에 따른 열팽창 효과가 증첩되었기 때문이다.

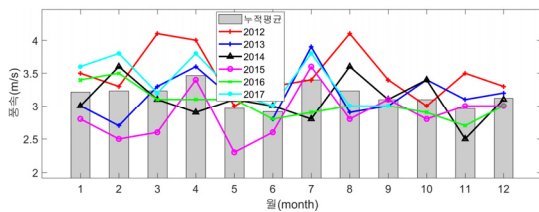


Figure 10. Monthly mean wind speed

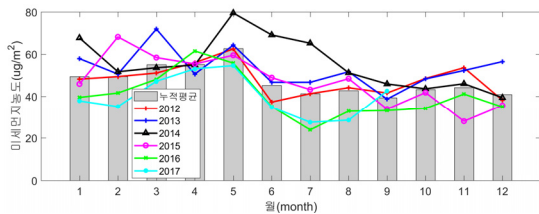


Figure 11. Monthly mean concentration of fine dust

- 1) 최근 환경부에서 10 μm 이하의 미세먼지 → 부유먼지, 2.5 μm 이하의 초미세먼지 → 미세먼지로 변경, 발표하였으나, 본 연구에서는 10 μm 이하를 미세먼지로 정의함

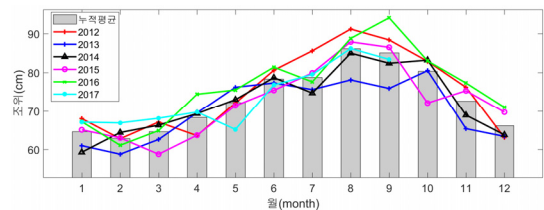


Figure 12. Monthly averaged tide height

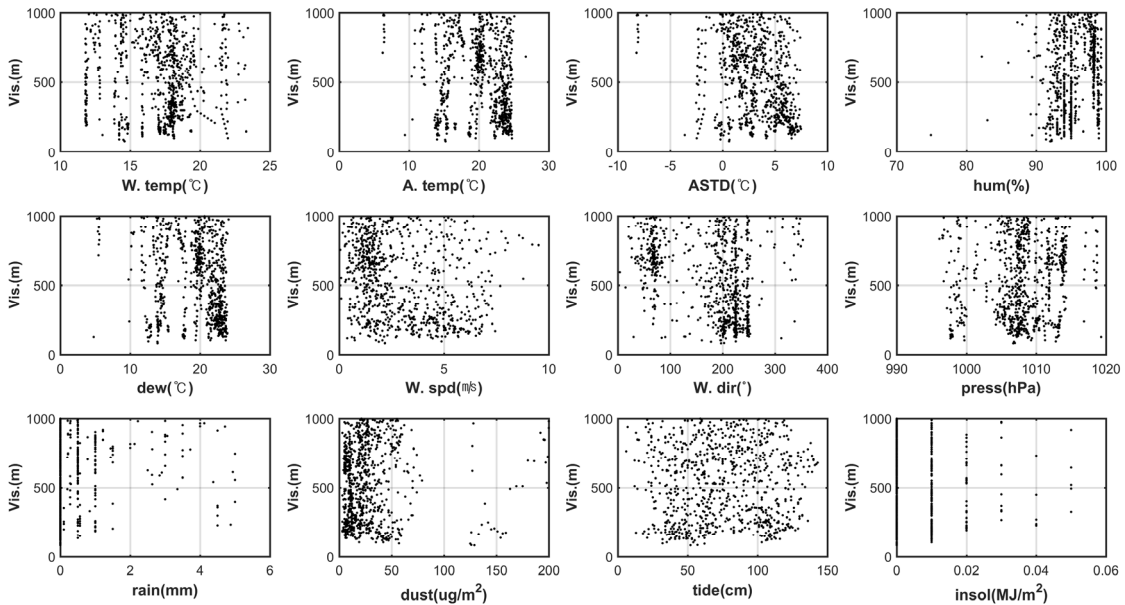


Figure 13. Correlation of visibility with the observed air-sea parameters

3.2 해무와 인자간의 상관관계

부산항 해무 발생에 영향을 미치는 해양·기상 인자를 살펴보면(Fig. 13), 수온은 15~20℃에서, 기온은 12~25℃에서 주로 해무가 발생하였으나 수온과 기온의 분포보다는 해기차(ASTD)가 0℃ 이상일 때 해무(이류무)가 주로 발생하였고, 해기차가 -2.5℃일 때도 해무(중기무)가 소량 발생하였다. 습도는 90% 이상일 때 해무가 발생하였다. 이슬점 온도(dew point temp.)의 범위는 12~22℃를 보이는데 주로 20℃전후로 해무가 집중되었다. 풍속은 5 ㎧ 이하에서, 풍향은 60°(동북동) 및 200~250°(남남서~서남서) 계열일 때 해무가 보였는데, 시정이 500 m 이하의 해무는 200~250°(남남서~서남서) 계열일 때 주로 나타났다. 미세먼지 농도는 약 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에서 해무가 발생하였는데 이는 미세먼지의 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 되면 더 이상 해무가 응결핵 역할을 하지 않는 것으로 보인다. 해면기압이 997~1000 hPa 에서 소량 해무가 보이고, 대부분은 1005~1014 hPa에서 해무가 보였다. 일사량이 0.01~0.02 MJ/m^2 일 때 해무가 가장 많이 발생하였고, 그 이상의 일사량은 해무를 소산시키는 것으로 보인다. 강수는 1.7 mm/hr 이하에서 해무가 발생하고 그 이상의 강수에서는 해무가 상대적으로 적게 발생하였다. 통계적 관점에서 보면, 부산항의 조위와 해무와는 상관성이 없는 것으로 보인다.

3.3 해무의 종류별 발생빈도

해무의 발생학적 분류를 위해 시정거리 1 km 미만의 시정자료에서 강우 및 강설에 의한 1 km 미만 시정 자료는 제거하고, 기온변화, 해기차 및 풍향 자료를 이용하여 해무를 분류하였으며, 분류가 되지 않는 경우는 기타로 분류하였다(Fig. 14). 해무별 발생빈도를 보면 이류무(49.58%)가 전선무(44.44%) 보다 약간 더 많이 발생하였다. 특이한 점은 전선무의 경우 2012년, 2015년, 2016년의 발생빈도가 약 74%로 비슷하게 나타났으나, 2017년에는 이류무의 발생빈도(77%)가 전선무의 발생빈도(22%)를 크게 압도하고 있다.

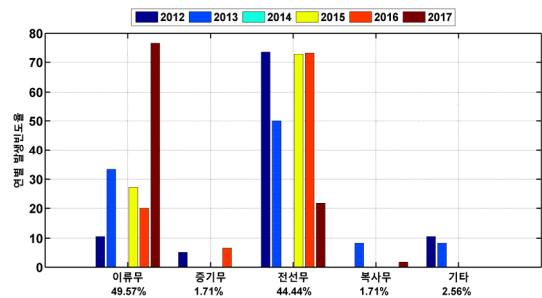


Figure 14. Occurrence of each sea fog type during 2012~2017

이류무는 7월에 7회 이상 발생하였으며 전선무는 3회 미만을 보이고 있는 반면, 9월과 10월, 그리고 1

월~6월까지의 전선무의 발생빈도가 이류무 발생빈도에 비해 약 2배 정도 크게 나타나고 있다(Fig. 15).

해무를 시간대별로 연 평균 발생횟수를 살펴보면, 일출 직전인 05시 경에 이류무, 전선무, 복사무 순서로 평균 2.5회로 가장 많이 나타났다. 이류무가 주로 나타나는 시간은 21시~06시까지 9시간동안 발생한 반면, 증기무는 09~11시까지(2시간)만 발생하였다(Fig. 16).

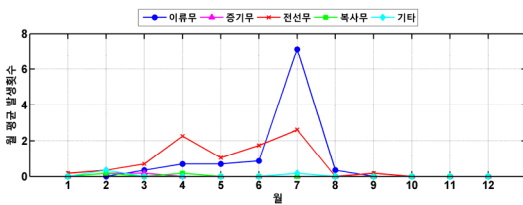


Figure 15. Monthly occurrence of sea fog

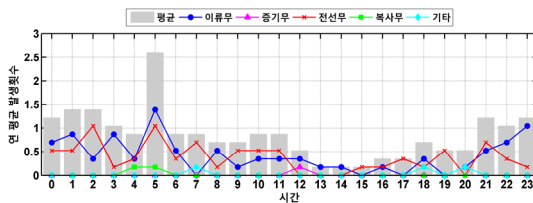


Figure 16. Yearly-averaged sea fog occurrence during 2012~2017

3.4 해무 종류별 발생 전중후 특성

부산항 인근 해역에서 해무 종류별 해양기상 인자별 특성과 변화율을 파악하기 위해 해무 발생 전(해무 발생시점부터 3시간 전까지), 지속 중, 소멸 후(해무 소멸시점부터 3시간 후까지)로 구분하여 각 인자의 평균 및 시간당 변화율을 살펴보았다(Fig. 17).

모든 해무에서 시정의 변화가 해무 발생 전-중-후로 구분되어 명확하게 나타났다. 특히, 기타로 분류되는 해무가 지속 중일 때 강한 증가 추세를 보이는데, 이는 기타 해무가 진행되는 동안 시정이 급격히 증가하여 소멸되었기 때문인 것으로 보인다.

기온과 수온의 경우 각 해무별로 명확하게 범위가 나눠져 있는 것을 알 수 있다. 이류무 발생 시, 수온 및 기온이 가장 높았으며 이들의 차인 해기차 역시 큰 값을 보였다. 반면 찬 공기가 따뜻한 해수면 위로 지날 때 발생하는 증기무는 기온이 수온보다 낮은 것을 알 수 있다. 기온의 변화율에서도 확인할 수 있듯이 증기무 발생 전에 강한 양(+)의 변화율을 보이다가 해무가 지속 중으로 갈수록 음(-)의 변화율로 감소 추세를 갖는다.

풍속은 복사무일 때 가장 작은 세기로 진행되었으며 이류무일 때 강한 풍속대에서 진행됨을 알 수 있다. 복사무의 경우 지표면의 공기가 복사냉각 되면서 발생하기 때문에 해당 지역의 풍속이 작을수록 해무가 발생하기에 유리하다. 풍향의 변화는 U, V 바람으로 분리하여 각각의 평균을 통해 분석하였다. 해무 발생 전에는 남서(SW) 계열의 바람(200~250 °)이 빈번하게 나타났으며 그 변화율은 매우 작게 나타났다. 해무가 지속 중에는 풍향이 음의 방향으로 바뀌는 추세를 알 수 있으며(-100~0 °), 소멸 후에는 그 변화율이 다시 작아지는 추세를 갖는다.

해면기압은 증기무의 경우 상대적으로 높은 기압대에서 생성이 되었으며, 이류무 및 전선무는 낮은 기압대에서 형성됨을 알 수 있다. 또한 그 변화율은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 각 해무별로 생성 전-중-후의 기압 변화는 부산항의 해무 발생 및 지속 기간에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

강수의 경우 전선무가 발생하기 전부터 평균 0.04 mm/min의 강수가 지속되었으며 지속 중으로 갈수록 강수량이 증가하다가 소멸 후 급격히 감소하는 추세를 갖는다. 복사무의 경우에는 진행 중에 약한 강수가 시작되어 소멸 후로 갈수록 급격히 증가하는 경향성을 보이고 있다.

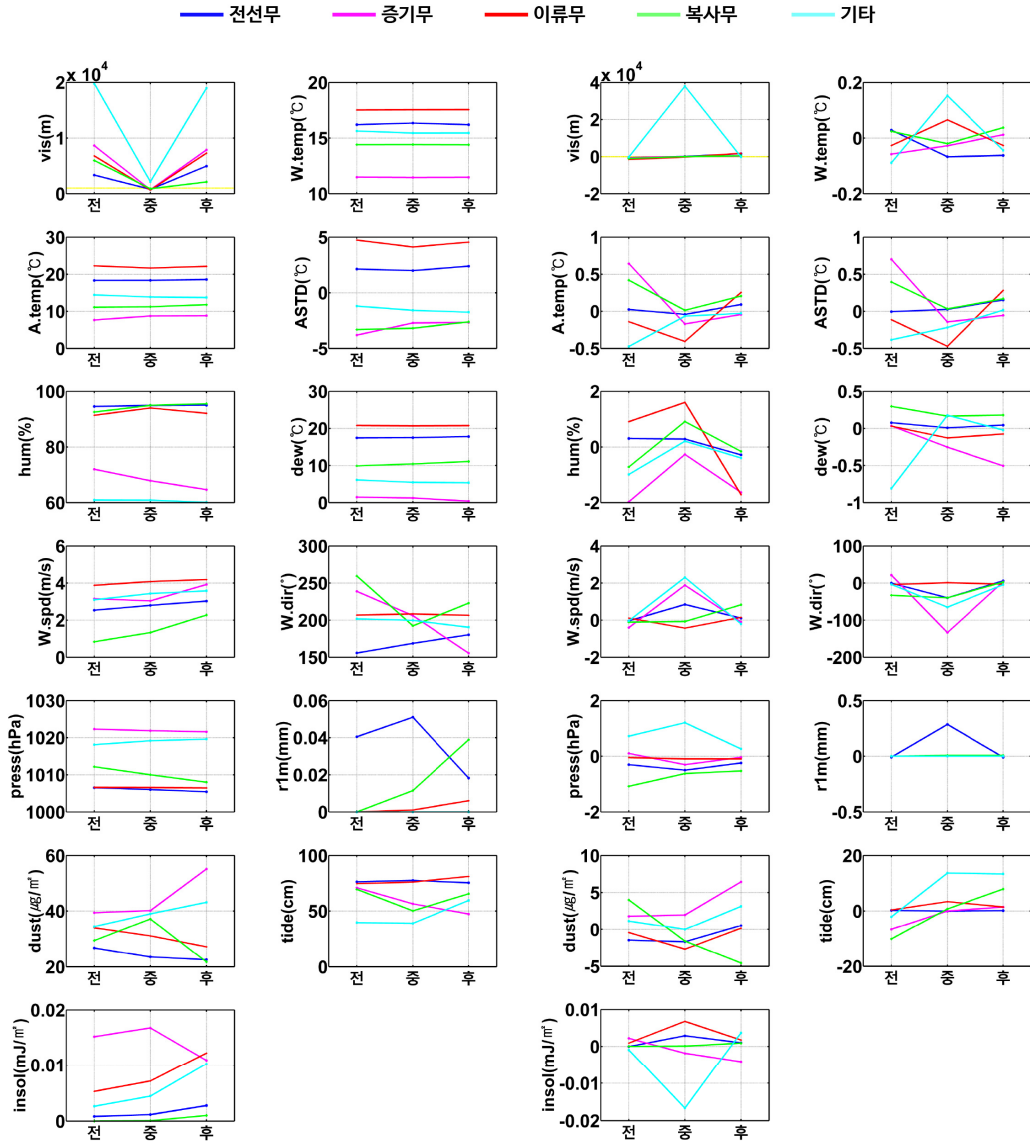
미세먼지의 농도는 증기무 소멸 후에 급격히 증가하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 증기무의 경우, 하층 대기가 가열되면서 대기층이 불안정해지며 상승 기류가 발달하게 되는데, 증기무 소멸 이후에는 상승 기류가 약해지면서 상층의 미세먼지가 누적되기 때문에 그 농도가 급격히 증가하게 된 것으로 예상된다. 소멸 후 미세먼지 농도의 변화율 역시 크게 증가하는 것으로 보아 대기층의 안정도 변화에 따른 결과로 사료된다. 또한 응결에 의해 발생하는 이류무와 복사무는 소멸 후에 미세먼지 농도가 감소하는 추세를 보여 미세먼지가 응결핵 역할을 한 것으로 판단되며, 전선무 소멸 후의 미세먼지 농도 감소 현상은 강수에 의해 씻겨 나간 것으로 보인다.

부산항의 경우 조석과 해무와는 특별한 관계가 없는 것으로 보인다.

평균 일사량은 증기무를 제외한 해무들의 소멸 직후에 증가하는 경향을 보이고 있다. 증기무의 경우, 생성 전에 일사량이 증가하는 경향을 보였지만 지속 중으로 갈수록 점차 감소하였으며 소멸 후에 감소추세가 더욱 강해진 것으로 나타났다.

3.5 해무 외 저시정 발생일수

앞서 해무의 시정거리 기준을 만족하지만 강수 조



(a) Averaged values of air-sea parameters before-at-after the sea fog formation

(b) Variations of air-sea parameters before-at-after the sea fog formation

Figure 17. (a) Averaged values of air-sea parameter before-at-after the sea fog formation, (b) Variations of air-sea parameter before-at-after the sea fog formation

건이 5 mm/hr 이상인 경우를 비해무라고 정의하였다. 또한 시정거리가 1~10 km 이고 강수가 5 mm/hr 이하일 때, 상대습도가 70% 이상이면 박무(mist), 70% 이하이면 연무(haze)로 정의하고 연도 및 월별 빈도수를 살펴보고, 시정거리가 1~10 km 이고 강수가 5 mm/hr 이상일 때는 강수에 의한 저시정으로 분류하고 그 발생빈도를 살펴보고.

상대습도가 비교적 낮은 연무는 7월에 평균 19.0일로 가장 빈번하게 발생하였다. 계절로 구분하여 비교했을 때에는 춘계에 평균 16.1일로 하계보다 높은 발생빈도를 보였다. 춘계의 상대습도는 하계보다 비교적 낮게 관측되기 때문에 연무 발생에 유리하다. 따라서 연무는 춘계에 가장 높은 발생빈도를 보인 것으로 판단되며 그 다음에 하계에 빈번하게 발생하는 것으

로 사료된다. 상대습도가 70%보다 높은 경우인 박무는 6월에 평균 5.5일로 가장 높은 발생빈도를 보였다. 계절로 구분하였을 때, 이 역시 6월을 포함하고 있는 춘계에 그 빈도가 가장 높게 나타나며, 하계, 추계, 동계 순서로 빈도율을 기록하고 있다. 강수에 의한 저시정은 강수량이 최대로 기록되는 하계에 평균 3.7일로 가장 빈번하게 일어났으며 추계 및 동계에는 평균 발생일수가 1일 이상 기록되지 않았다.

4. 결론 및 고찰

부산항 및 해운대 인근해역의 해무 특성을 파악하기 위해 2012년 1월에서 2017년 9월까지의 시정자료를 분석하였다. 부산항의 해무 발생일수는 총 68일(연평균 11.3일)으로 나타났다. 부산항의 해무는 7월에 평균 4.2일로 가장 많이 발생하였으며, 10~12월 사이에는 발생하지 않았다. 최근 5년간(2012~2016년) 계절별 해무 발생현황은 춘계(4~6월) 16.7%로 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 하계(7~9월) 9.1%, 동계(1~3월) 7.6% 순으로 발생했다. 2017년 7월에 해무 발생일 수가 특히 많은 이유는 올해부터 시정이 관측되는 해양기상(해무) 관측소에 강수량계가 없어서 인근 기상청 AWS의 강수량자료를 사용하였는데, 해양기상(해무) 관측소와 AWS의 관측 위치가 달라 해당 지역의 강수에 의한 저시정과 해무에 의한 저시정이 완벽하게 구분되기 어려웠기 때문으로 사료된다.

해무의 시간대별 생성 시간은 05시 경(일출 전)에 발생빈도가 12.8%로 가장 높게 나타났다. 해무의 주요 소멸시간은 06시 경으로 일출 직후 해무가 소멸되는 것으로 판단되며, 00시에도 10.3%의 빈도로 소멸이 활발히 일어났다.

부산항 해무의 연별 및 시간대별 출현횟수는 평균 05~06시 경에 발생빈도가 평균 4.7회로 가장 높게 나타났으며, 오전 11시를 기점으로 점차 감소하는 추세를 보였다. 2017년에는 17~19시를 제외한 모든 시간대에서 가장 높은 출현횟수를 보였으며, 그 중에서도 일출시간대인 06시 경에 총 15회로 가장 많이 발생한 것으로 관측되었다.

해무의 지속시간은 해무가 처음 발생한 시점부터 소멸한 시점까지의 시간으로 계산하였다. 부산항 항계에서의 지속시간은 0~1시간 사이가 73회로 62.4%의 가장 높은 출현율을 보였으며, 7시간 이상 장시간의 해무도 4회 발생하였다. 분석기간 중 가장 높은 발생빈도를 보였던 2017년에는 0~1시간대에 높은 출현횟수를 보였다. 월별 평균 지속시간은 2월에 1.9시간으로 가장 긴 지속시간을 보였으며 7월 1.5시간, 6

월 1.4시간 순으로 지속시간이 기록되었다.

부산지역의 기온은 냉수대의 영향(박 등, 2014)을 받고 있기 때문에, 김 등(2015)이 예상한 대로 해무 역시 냉수대에 의한 이류무가 주류인 것으로 나타났다. 김 등(2017) 연구에서는 저기압이나 장마전선에 의한 전선무의 비중이 이류무보다 5% 높은 것으로 나타났으나, 본 연구에서는 이류무가 약 5% 높은 것으로 나타났다. 이류무의 원인은 이 해역에서 빈출하는 냉수대, 특히 남서풍에 의한 저층 냉수의 용승(김 등, 2015)이 주된 원인일 것으로 생각된다. 한편, 이류무는 기온 상승률이 수온 상승률보다 우세할 경우에도 발생할 수 있기 때문에, 최근 기후변화에 의한 기온 및 수온 상승률 차이에 의한 이류무 발생 가능성도 생각해 볼 수 있다. 최소한 기후변화에 의한 기온과 수온의 상승률 간에 큰 차이가 없거나 같더라도 용승에 의한 냉수대 출현이나 기타 미지의 요인에 의한 냉수대 출현은 부산해역 인근에 지속적으로 이류무를 발생시킬 것으로 생각된다.

한편, 부산지방기상청에서 수행한 부산을 포함한 남동해안의 2006년~2014년 1차 자료분석 결과(2016)와 2006년~2016년 2차 자료분석 결과(2017)를 살펴보면, 남동해안의 해무는 4월부터 증가하면서 7월에 가장 많이 발생하고, 8월부터 감소하여 9월~3월까지 최소 발생빈도를 보였다. 특히, 겨울철에는 증기무가 우세한 것으로 조사되었으나, 5월~7월 동안은 전선무와 이류무가 우세한 것으로 나타났다. 특히 2015년과 2016년 5월과 7월에 이류무의 발생빈도가 높아졌는데 4월부터 따뜻해진 공기가 7월까지 지속적으로 유입됨과 동시에 장마전선 전면에서 지속적인 남서풍에 의한 용승이 표층수온을 하강시키면서 해기차에 의한 이류무가 더 자주 발생하는 것으로 보았다(부산지방기상청, 2017). 2016년 분석결과와 2017년자료분석 결과를 좀 더 정량적으로 살펴보면, 전선무는 41%에서 40%, 이류무는 28%에서 33%로 증가하였고, 증기무는 14%로 변하지 않았다. 부산지방기상청(2017)은 이 같은 현상의 원인을 2015년과 2016년 동안 봄철 기온이 예년에 비해 크게 상승하면서 만들어낸 큰 폭의 해기차에서 찾고 있다.

하지만, 본 연구에서는 2015년과 2016년에는 전선무가 이류무보다 2배 이상 발생하는 것으로 조사되었고, 2017년에 비로서 이류무가 전선무에 비해 2.5배 이상 크게 나타난 것으로 조사되었다. 이 같은 차이는 본 연구에서 사용한 관측자료와 부산지방기상청에서 사용한 관측자료와의 차이와 더불어 해무의 발생학적 분류 기준에서 오는 차이 때문인 것으로 보인다. 하지만 이류무의 발생빈도가 점차적으로 높아지고 있다는

공통적인 경향을 보이고 있다.

이류무는 여타의 해무와 달리 한번 발생하면 장시간 유지되는 특성이 있어 항해 선박을 포함한 모든 해양활동에 커다란 영향을 끼치므로, 향후 냉수대 예측 연구(국립수산과학원, 2016)와 함께 기온 상승에 따른 이류무 발생 및 예측 연구가 적극적으로 필요한 시점으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립해양조사원 2017년 “항계안전을 위한 해무정보 생산기반 구축” 과업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국립수산과학원 (2016). 냉수대 발생해역의 생태 환경 변동 연구, 최종보고서, pp. 87.
2. 국립해양조사원.(2016). 항계안전 해양정보 제공 기반 확대 운영, 최종보고서.
3. 국립해양조사원.(2017). 항계안전을 위한 해무정보 생산 기반 구축, 최종보고서
4. 김영택, 한충근, 김국진, 김호균, 김영남 (2017), 부산항 인근 해무 전후의 해양 및 기상에 대한 예비 고찰, 한국수로학회지 6권 제2호, pp. 43-50.
5. 김영택, 허룡, 한정식, 김국진, 한진현, 김현승, 2017년 항계안전을 위한 해무정보 생산 기반 구축 사업 소개: 해무관측소 및 예측 시스템을 중심으로, 2018년 한국수로학회 춘계학술대회
6. 한국기상학회 (1999) 대기과학개론, 시그마프레스, pp. 405.
7. 김국진, 박세영, 고지민, 김영택, 김민하 (2015), 2014년 한국 남동해안 부근의 표층수온의 급랭원인, 한국수로학회지, 4권 제1호, pp. 45-52.
8. 박명희, 이준수, 안지숙, 서영상, 한인성, 김해동, 배현균 (2014), 부산지역 기온에 미치는 냉수대의 영향에 대한 연구, Journal of Korean Association of Geographical Information Studies, 17(3), pp. 132-146.
9. 부산지방기상청 기후서비스과 (2016), 부산·울산·경남 지역 해무유입과 소산 특징 연구, 최종보고서, pp. 137.
10. 부산지방기상청 기후서비스과 (2017), 부산·울산·경남 지역 해무유입과 소산 특징 연구 II, 최종보고서, pp. 101.

11. Lawrence, Mark G (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dew Point Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications, Bulletin of the American Meteorological Society, 86(2), pp. 225-233.



김 국 진

2002년 인하대학교 해양학과 이학박사
2002년~2005년 큐슈대학교
학술연구원
2016년~현재 (주)유에스티21 상무이사

관심분야는 자료 분석, 해수순환역학, 수치모델



한 진 현

2010년 숭실대학교 정보통신
(수중음향통신) 공학석사
2017년~현재 (주)유에스티21 과장

관심분야는 신호처리, 수중음향, 인공지능



김 영 택

2001년 FIT 해양환경학과 이학박사
2006년~현재 국립해양조사원
해양예보과 해양수산연구사

관심분야는 해무, 열·염확산, 이안류, 퇴적역학



한 정 식

2004년 공주대학교 지질학과
이학석사
2003년~현재 국립해양조사원
해양예보과 사무관

관심분야는 해저지형, 해무, 이안류



권 석 재

2005년 서울대학교 지구환경시스템
공학부 공학박사
2006년~현재 국립해양조사원
해양예보과 해양수산주사

관심분야는 해양예측모델

**김 영 남**

2015년 부산대학교 환경과학과
이학석사

2007년~현재 부산지방기상청
기후서비스과 주무관

관심분야는 해양안개, 해양기상학

**한 인 성**

2001년 일본 나가사키대학 해양생산
과학연구과 이학박사

2002년~현재 국립수산물과학원
후변화연구과 연구관

관심분야는 기후변화, 해황변동