

ORIGINAL ARTICLE

## 서해 연안 해역에서의 조석현상이 안개에 미치는 영향

안혜연 · 정주희\* · 김유근

부산대학교 환경연구원

### Impact of Tidal Effects on Fog Events in the Western Coast of Korea

Hye Yeon An, Ju-Hee Jeong\*, Yoo-Keun Kim

*The Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

#### Abstract

The study was aimed to investigate the correlation between tidal effects and fog occurrence in Incheon and Mokpo, which are located in the middle and southern coasts of the West Sea of Korea, respectively. The investigation used meteorological data obtained from the automated synoptic observing systems and automatic weather stations and ocean data from tide stations from 2010 to 2019. Fog occurrence frequency was highest at high tide (Incheon, 41%; Mokpo, 45%). During fog event days at high tide, the dew-point depression was low (Incheon, 0.5°C; Mokpo, 0.4°C) and the relative humidity was high (Incheon, 97%; Mokpo, 98%). The wind speed was 2.4 m/s in Incheon and 2.0 m/s in Mokpo, and the main wind directions were west-southwesterly from Incheon and southwesterly from Mokpo. In the fog case study, tidal flats were covered with water before and after the fog started. During the fog period, both stations experienced negative air-sea temperature differences, low dew-point depression, and high relative humidity were maintained, with weak winds forming from the tidal flats to the shore.

**Key words** : Tidal effect, Fog, West Sea, Coastal area, Tidal flat

#### 1. 서론

안개란 매우 작은 물방울이 대기 중에 떠다니며 지표면과 접촉하여 가시거리를 감소시켜 수평시정 1 km 미만으로 나타나는 현상으로 정의한다(WMO, 2021). 한반도 연안지역에서 발생하는 안개는 서해, 남해, 동해 각각의 지형특성에 따라 다른 발생양상을 띄게 된다. 서해 연안지역은 같은 위도상에 위치한 동해보다 2배 정도 높은 안개 일수를 보이고(Cho et al., 2000), 이는 서해 연안의 경우 한반도가 편서풍 지대에 위치하여 서해에서

발생해 밀려오는 해무에 의한 것과 활발한 조석운동으로 인한 표층수의 저온현상으로 상대적으로 큰 해기차가 발생하기 때문인 것으로 원인이 알려져 있다(Lee and Ahn, 2013; Lee and Suh, 2019).

서해안은 조석의 영향으로 인하여 간만조의 변화가 매우 큰 곳으로, 조간대의 지표면은 대기와 해수에 간만의 변화에 따라 다르게 접하게 된다. 이러한 조간대의 지표면 변화는 알베도와 태양 열용량과 같은 물리적인 환경변화를 가져오게 되고, 이는 지표면 열 플럭스에 직접적인 영향을 미치게 된다. 지표면 열 플럭스의 변화는

Received 24 September, 2021; Revised 2 November, 2021;  
Accepted 15 November, 2021

\*Corresponding author: Ju-Hee Jeong, The Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea  
Phone: +82-51-583-2652  
E-mail: jeongjuhee@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.

하층 대기 내에서의 기온, 수증기량 등의 기상요소 변화를 유도하게 되어 국지규모에서 발생하는 안개현상의 발달 및 지속에 영향을 미치게 된다(Charneys et al., 1977; Sud and Fennessy, 1982; Laval and Picon, 1986; Lam et al., 2006). 서해안에서 가장 큰 규모의 조간대가 분포하는 경기만 연안에서는 안개가 발생한 후 만조에 의해 지상의 기온보다 높은 온도의 해수가 연안으로 유입되면서 내륙의 증기안개 현상과 유사하게 수증기를 지속적으로 공급받아 안개가 강화되고 지속된 바 있다. 이로 인해 2015년 영종대교에서 극심한 안개로 인한 저시정으로 차량 106대가 연쇄 추돌하는 사고가 발생하였다.

국내에서의 안개 관련한 연구는 한반도의 안개를 분류하고 지역 및 계절별 안개발달 양상을 살펴본 연구가 이루어져 왔다(Kim and Lee, 1970; Heo and Lee, 1998; Jhun et al., 1998; Lee and Kim, 2006; Lee et al., 2010; Lee and Ahn, 2013). 연안에서 발생하는 안개에 초점을 맞춘 연구로 Oh et al.(2003)은 해양기상 관측자료를 이용하여 서해 중부해역에서 발생한 해무사례를 분석하였고, Cho et al.(2000)은 한반도 주변의 해무 발생 특성에 대해 조사한 바 있다. 조석현상으로 인한 기상영향을 연구한 선행연구의 대부분은 미기상학적 연구로 관측연구가 주로 이루어져왔고, 조간대에서의 토양온도 관측과 알베도나 토양의 열적특성과 같은 지표면 특성에 관한 연구가 존재하였다(Harrison and Phizacklea, 1985a, Harrison and Phizacklea, 1985b, Harrison and Phizacklea, 1987a, Harrison and Phizacklea, 1987b, Piccolo et al., 1993; Kim et al., 2007; Onken et al., 2007; Ahrens, 2009). Harrison and Phizacklea(1987a, 1987b)는 스코틀랜드의 Forth Estuary 갯벌에서 지면온도를 관측하여 만조와 갯벌의 지면온도와의 상관성을 연구하였고, 여름철 낮 동안 만조로 인해 갯벌에서의 지면온도가 급격히 떨어짐(약 10°C)을 확인하였다. Kim et al.(2007)은 조간대에서의 토양 깊이에 따른 토양온도를 관측하였고, 여름철 2 cm 토양깊이에서 간만조에 따라 일 최대 약 15°C 차이의 토양온도를 관측하였다. 또한, Ahrens(2009)는 밀물과 썰물기간 사이의 지표면 플럭스의 변화가 대류폭풍의 발생과 성장에 영향을 줄 수 있음을 보여주었고, Harrison and Phizacklea(1985b)는 강한 조석현상이 안개발생에 영향을 줄 수 있는 가능성을 확인하였다. 최근에는 An(2020)에서 수치모델을 이용

하여 조석현상에 따른 조간대의 지표면 상태 변화가 안개발달에 미치는 영향을 모의하였고, 겨울철 만조시 상대적으로 높은 해수온도와 수증기의 공급으로 안개의 발생 및 지속을 확인하였다. 과거에는 한반도에서 발생한 안개 관련 연구가 많이 이루어진 반면 최근에는 한반도 연안 주변에서의 안개 관련 연구가 미흡한 상황이고, 특히 서해안 지역에서의 조석현상으로 인한 안개 발달 영향에 대한 연구는 거의 이루어진 바 없다. 본 연구에서는 서해 중부와 남부 연안에서 관측된 조석주기와 안개발생일을 바탕으로 조석운동과 안개발달의 상관관계를 파악하고, 안개발생일의 조석주기별 기상요소들의 변동경향과 사-공간적 분포특성에 대해서 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

한반도의 서남해 연안은 만과 섬으로 인해 해안선이 복잡하며 해안의 경사가 완만하고 밀물과 썰물의 차이가 크게 나타나 갯벌이 형성되기 좋은 자연조건을 갖추고 있다. 조석간만의 차이는 남해안에서 약 2.5~4 m이고, 서해 남부 연안에서 최대 약 4 m, 서해 중부 연안에서 약 9 m에 이른다. 서해안과 남해안에 있는 갯벌의 면적은 2018년 기준으로 한반도 전체 면적의 약 2.5%에 해당하고, 그 중 서해안에는 전체 갯벌면적의 약 83.8%인 2,079.9 km<sup>2</sup>가 분포하고 있다. 지역별로는 경기도와 인천이 36.1%, 충남 13.7%, 전북 4.4%, 전남 42.5%, 경남과 부산이 3.3%로 경기와 인천, 전남지방이 한반도 갯벌의 약 80%를 차지하고 있다(국가통계포털, 2018년 갯벌 면적조사결과).

본 연구의 대상지역은 서해 중부에 위치한 인천과 서해 남부에 위치한 목포이며 Fig. 1은 한반도의 갯벌 분포도를 포함한 대상지역 내 종관기상관측소 및 조위관측소의 위치를 제시한 것이다. 인천과 경기도의 갯벌면적은 896.0 km<sup>2</sup>이며 낮은 해저지형으로 인해 해상에 넓은 갯벌이 분포하고 있고, 동쪽 연안에는 인천이 위치하고 있다. 전라남도의 갯벌은 전국에서 가장 넓은 갯벌을 가지고 있고, 그 면적은 1,053.7 km<sup>2</sup>이다. 복잡한 해안선과 육지, 섬들에 의해 만들어진 갯벌이 많고, 갯벌에 인접한 기상관측소에는 목포가 위치하고 있다.

본 연구에서 자료는 시정관측을 실시하는 인천과 목포의 종관기상관측소 기상자료와 조위관측소 해양자료를

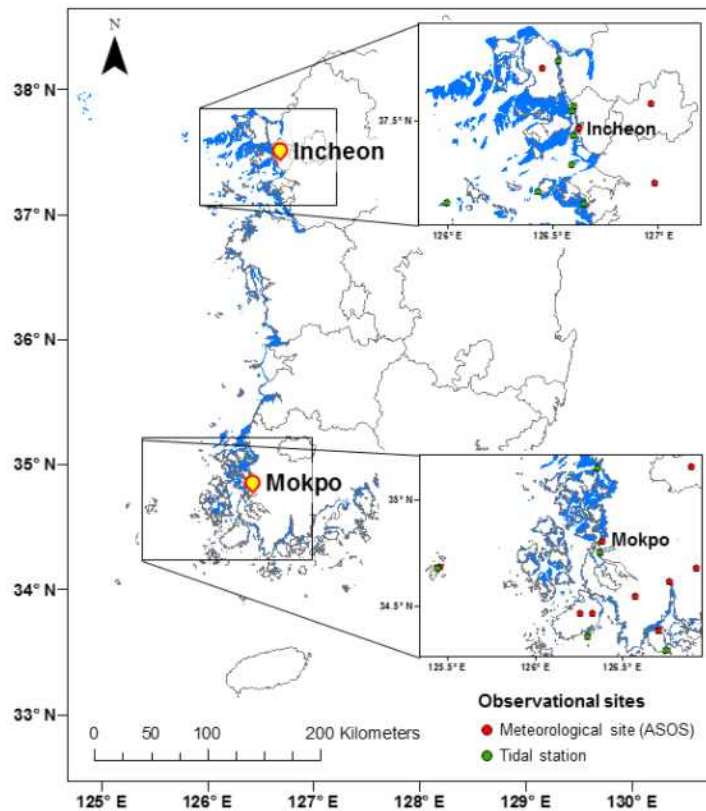


Fig. 1. Area distribution of tidal flats on the Korean Peninsula and meteorological and tidal monitoring sites around Incheon and Mokpo. The blue areas indicate the tidal flats.

이용하였고, 인근 지역 기상분석을 위하여 방재기상관측 자료를 추가적으로 이용하였다. 분석기간은 2010~2019년까지 최근 10년 자료를 이용하였다. 서해 안개 특성을 파악하기 위하여 각 지점별 월별 안개 일수 및 조위 범위별 안개 일수를 분석하였고, 조석운동에 따른 안개 발생 특성을 분석하기 위하여 만조에 의한 안개 발생시 기상 조건을 조사하였다. 이러한 분석방법을 통하여 서해 중부 및 남부 연안에서의 조석변화에 따른 안개 발생 특성을 비교 및 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 서해 연안 안개의 특성과 조석주기와의 관계

서해 중부(인천)와 남부(목포)의 지리적 위치에 따른 월별 안개일수의 발생빈도는 Fig. 2와 같다. 인천과 목포

기상관측소에서의 안개일수는 각각 연평균 38.8일, 22.0일로 나타났으며, 인천지점에서의 안개일수가 목포지점보다 높게 나타나 지역별 차이가 존재함을 확인하였다. 인천과 목포 모두 봄과 여름철인 3월에서 7월 사이에 안개 발생빈도가 높으며 이는 바다에서 발생하는 해무의 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 인천의 경우 7월에 안개일수가 월평균 9.4일로 뚜렷하게 가장 높았고, 목포의 경우 4월에 월평균 4.8일로 가장 높았다. 안개가 가장 적게 발생한 시기는 인천과 목포 모두 8~10월로, 두 지점 모두 월평균 1.2일로 거의 발생하지 않았다. 이러한 서해 연안에서의 계절별 안개일수 변화의 첫 번째 원인은 봄철의 경우 한반도는 편서풍대에 위치하여 서해로부터 다량의 수증기가 공급되며 봄철 이동성 고기압의 영향으로 습하고 안정된 공기의 이류로 인하여 안개 발생일수가 높고, 여름철의 경우 초여름 장마전선의 영향과

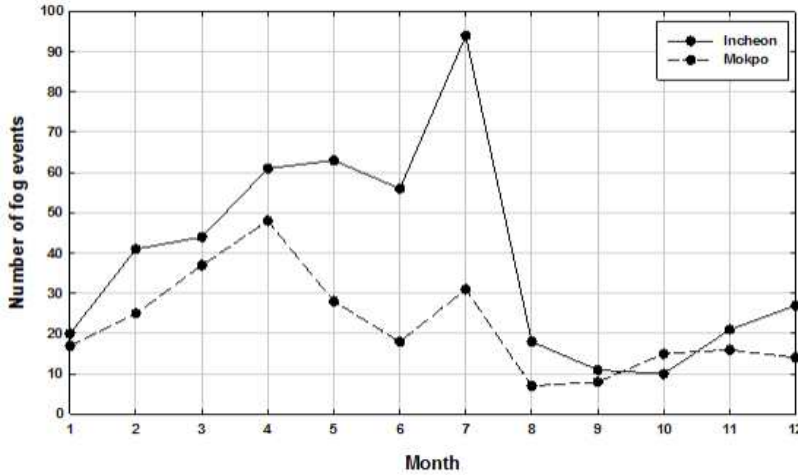


Fig. 2. Seasonal variation of the frequency of fog occurrence in the Incheon and Mokpo during 2010-2019.

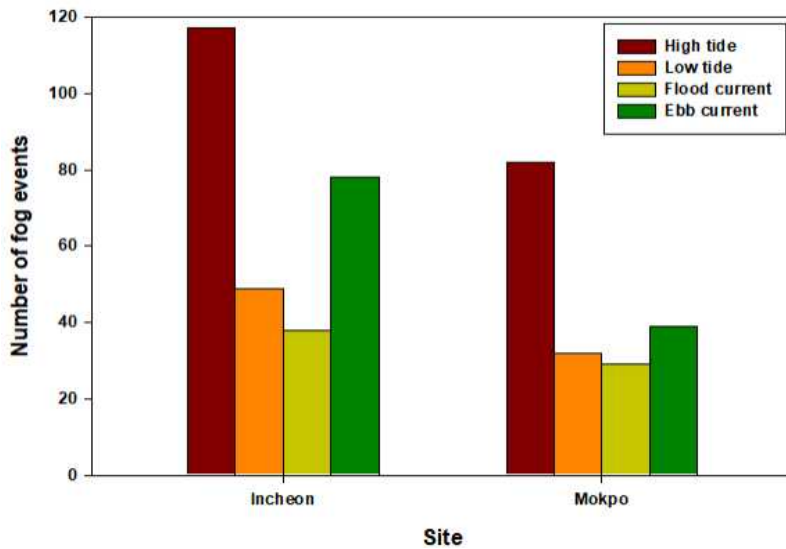


Fig. 3. Frequency of occurrence of fog events from 2010 to 2019 for high tide, low tide, flood current, and ebb current.

함께 북태평양 기단의 영향을 받는 시기로 이류무가 빈번히 발생하기 때문이다(Lee and Ahn, 2013). 두 번째 원인은 서해에서는 초여름에 조석운동이 활발해져 연안 표층수와 저층수의 혼합이 발생해 표층수의 수온상승이 억제되는 반면, 여름에는 강한 수온약층으로 인해 해수의 수직혼합이 약화되어 강한 일사에 의한 해수면온도가 상승하기 때문에 8월이 되면 해기차가 줄어들거나 역전

되면서 해무의 발생빈도가 줄어들기 때문인 것으로 사료된다(NIMR, 1986).

서해 연안에서 발생하는 안개와 조석주기와 상관성을 살펴보기 위하여 조위 범위별 안개 발생 분포를 분석하였다(Fig. 3). 본 연구에서 조위범위는 저조시의 전후 1시간을 포함한 시간대를 간조로, 고조시의 전후 1시간을 포함한 시간대를 만조로 구분하였다. 또한 이외의

**Table 1.** Seasonal average meteorological variables observed at the Incheon ASOS site on a foggy days at high tide

|        | Dew-point depression | Relative humidity | Wind speed | Main wind direction | Air-Sea temperature difference |
|--------|----------------------|-------------------|------------|---------------------|--------------------------------|
| Spring | 0.5                  | 97                | 2.8        | WSW                 | -1.6                           |
| Summer | 0.3                  | 98                | 2.2        | WSW                 | -2.0                           |
| Autumn | 0.6                  | 97                | 2.1        | ESE                 | -4.1                           |
| Winter | 0.5                  | 96                | 2.6        | WSW                 | -3.3                           |

수위가 높아지는 경우는 창조류로, 수위가 낮아지는 경우는 낙조류로 구분하였다. 안개 사례는 조석현상이 안개발생에 미치는 영향을 파악하기 위하여 전선으로 인하여 발생하는 안개를 제외하기 위해 강수가 없는 안개 사례를 선정하였다. 또한, 서해의 경우 간조와 만조가 약 6시간 주기로 바뀜에 따라 조석주기를 고려하여 안개 지속시간이 1~6시간인 안개 사례만 선정하였다. 조석주기별 안개발생 비율을 살펴보면, 인천의 경우 만조시 41%로 발생 빈도가 가장 높았고, 다음으로 낙조류 28%, 간조 17%, 창조류 13% 순이었다. 목포의 경우 인천과 같이 만조시 45%로 발생 빈도가 가장 높았고, 다음으로 낙조류 21%, 간조 18%, 창조류 16% 순이었다. 인천과 목포 모두 만조시 안개 발생 비율이 높게 나타나 해수로 덮인 조간대와 안개 발생의 상관성이 있는 것으로 유추되었고, 이러한 결과를 통하여 3.2장과 3.3장에서는 만조시 인천과 목포에서의 기상 변화에 의한 안개 형성 과정을 살펴보았다.

### 3.2. 조석현상이 안개 발달 과정에 미치는 영향: 인천 사례

인천에서 발생하는 안개와 기상 및 해상 요소의 관련성을 살펴보기 위해 만조시 안개 발생시간동안의 계절별 기상 및 해상 요소의 평균값을 분석하였다(Table 1). 기온노점차와 상대습도는 연평균 각각 0.5°C와 97%이고, 여름에 가장 낮은 기온노점차와 가장 높은 상대습도가 나타났다. 풍속은 연평균 2.4 m/s이며 가을에 가장 약한 풍속이 나타났고, 풍향은 가을을 제외한 모든 계절에서 남서풍이 우세한 경향을 보이며 가을에는 동남동풍이 주풍으로 나타났다. 이는 서해 중부 연안에서 발생하는 안개는 인천항 입구에서 육지방향으로 유입되고 있음을 나타낸다. Heo and Ha(2004)에서 서해 중부 연안에서의 안개 발생시 풍향은 남-서 계절의 바람이 나타나고 풍속

은 4.0 m/s 미만일 때 대부분의 안개가 형성된다는 결과와 본 연구결과는 유사함을 확인하였다. 해기차는 연평균 -2.8°C이며 가을에 가장 큰 해기차가 나타났고, 모든 계절에 평균적으로 해수온도가 기온보다 높게 나타났다.

본 연구에서는 연구 기간 중 만조로 인한 안개발달의 영향이 뚜렷하게 나타난 대표사례일을 선정하여 상세 기상분석을 수행하였다. 선정된 대표 안개사례일은 2015년 3월 22일 07~10 LST로, 서쪽 해안 일부 지역에서 안개가 발생한 날이다. Fig. 4는 안개사례일을 포함한 2015년 3월 21일 00 LST~3월 22일 23 LST의 조석주기 및 기상요소별 시간 변화를 제시한 것이다. 사례일의 경우 평균 조차는 918.0 cm이며 만조시 조위는 평균 898.5 cm, 최대 915.0 cm로 조차가 크고 해수면이 높아지는 대조기였다. 안개가 발생한 3월 22일 07 LST~10 LST는 만조 직후 물이 빠지는 낙조류 시기였고, 안개 발생 전에는 조위 915.0 cm로 만조가 나타나 서해 중부 연안의 갯벌이 물로 덮인 것으로 추정되었다. 해기차의 경우 3월 22일이 되면서 음의 값이 나타났고, 특히 안개가 발생한 시간 동안 평균 -3.1°C로 뚜렷하게 낮은 해기차가 나타났다. 이후 안개가 소멸한 후에는 낮이 되면서 양의 해기차가 나타났다. 이는 안개 발생 전(야간)부터 안개 발생 기간(오전)까지 해수온도가 대기온도보다 높았음을 의미하고, 이로 인하여 만조시 갯벌이 물로 덮임에 따라 해수면에서 대기로의 열 공급이 발생하여 안개가 발달하기 좋은 조건이 형성된 것으로 사료된다. 기온노점차와 상대습도의 경우 안개 발생 6시간 전인 3월 22일 01 LST부터 안개 발생 시간까지 1°C 미만의 매우 낮은 기온노점차(평균 0.3°C)와 90% 이상의 매우 높은 상대습도(평균 99%)가 유지되었다. 상대적으로 따뜻한 해수가 창조류가 되면서 갯벌을 덮게 되었고, 이로 인한 해수면에서의 수증기량 증가로 낮은 기온노점차와 높은 상대습도를 유발하여 안개 형성에 유리한 조건이 만들어진 것으로

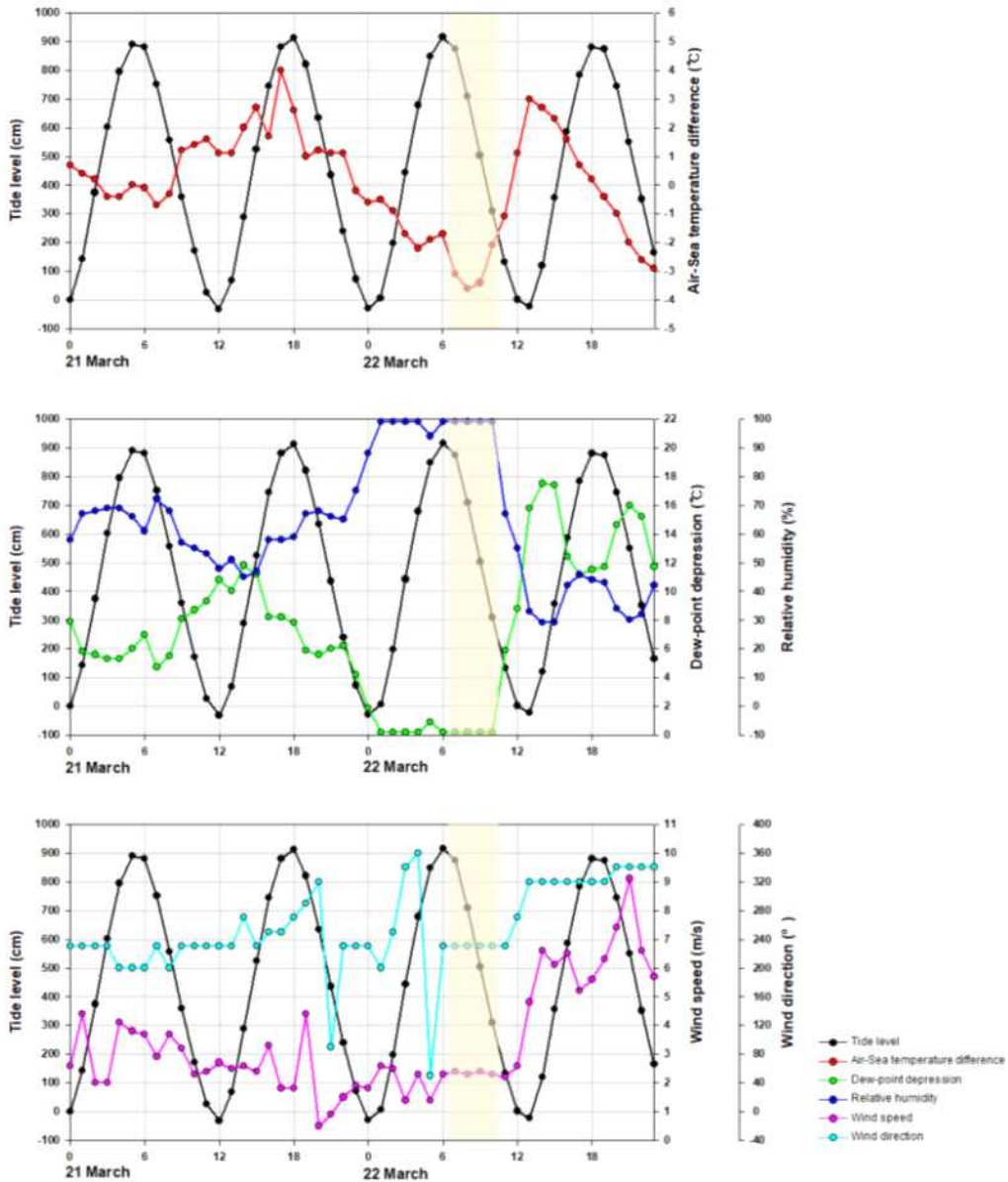


Fig. 4. Time-series plots of observed tide level and air-sea temperature difference at the Incheon tidal station and dew-point depression, relative humidity, wind speed, and wind direction at the Incheon meteorological site during March 21–22, 2015. Yellow bars indicate fog periods.

판단된다. 풍향은 안개 발생 전부터 지속 중까지 남서풍이 우세한 경향을 보였고, 이는 안개가 인천항 입구에서 육지 방향으로 유입되고 있음을 나타낸다. 안개 소멸 직

후에는 남서풍 계열이 약해지고 북서풍 계열이 강하게 나타났다. 풍속의 평균값은 발생 전 1.9 m/s, 지속 중 2.4 m/s, 소멸 후 4.1 m/s로, 안개가 발생 전과 지속 중에는



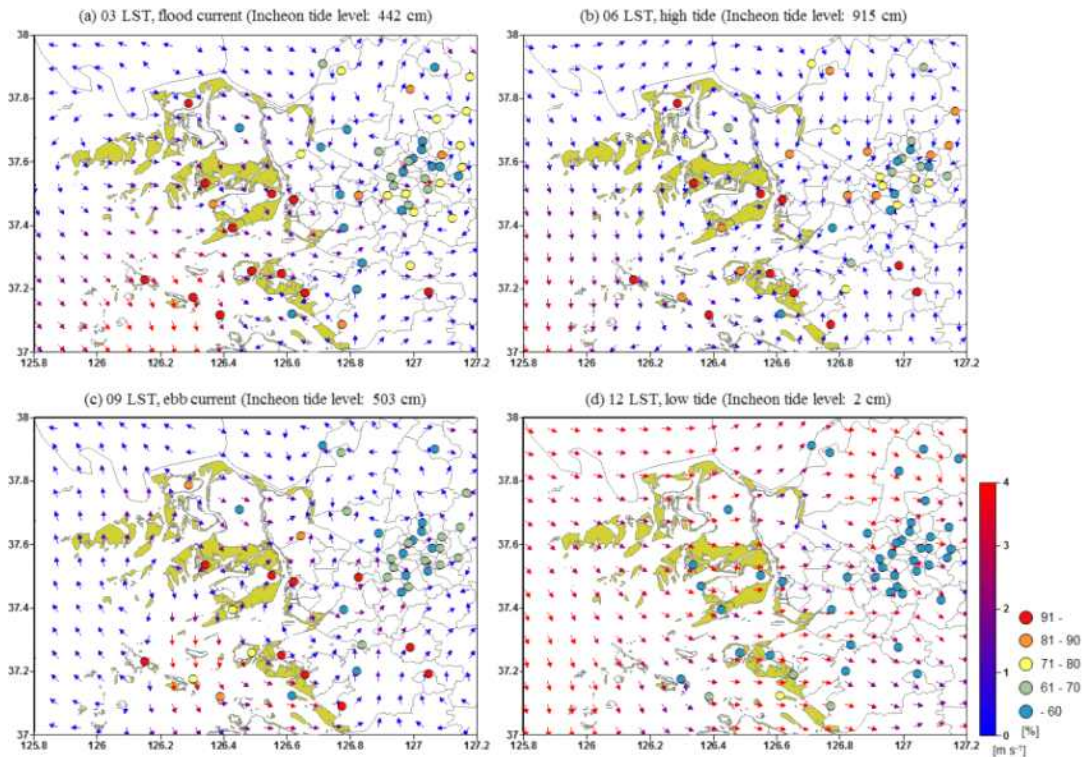


Fig. 5. Spatial distribution of wind vectors and relative humidity for March 22, 2015.

약하고 소멸 후에 다시 증가하는 경향을 보였다. 영중-영유-무의도 갯벌이 만조시 물로 덮인 상태에서 이러한 약한 풍속 조건의 남서풍이 우세함에 따라 안개 형성에 유리한 조건이 조성된 것으로 보인다.

안개가 발달한 과정을 공간적으로 살펴보기 위하여 안개발생일(2015년 3월 22일)의 03, 06, 09, 12 LST의 인천을 중심으로 경기만을 포함한 영역에서의 바람벡터와 상대습도의 공간분포를 Fig. 5에 제시하였다. 안개가 발생할 가능성이 있는 기상조건은 85~100%의 상대습도와 2~4 m/s 미만의 풍속인 경우로, 이는 국지적 안개를 예측할 때 사용된다(Zhou and Du, 2010). 안개 발생 4시간 전인 03 LST에는 인천 조위관측소 기준 조위값이 422 cm로 창조류가 나타난 시기이고, 인천 부근에서는 북서~북풍 계열의 바람이 나타났다. 해상을 포함한 연안 부근에서는 90% 이상의 높은 상대습도와 4 m/s 미만의 풍속이 나타났다. 안개 발생 1시간 전인 06 LST에는 조위값이 915 cm로 만조가 나타난 시기이고, 인천 부근에

서는 남서~서풍 계열의 바람이 나타나 물로 덮인 조건에서의 지표면 변화로 인한 환경변화가 기상에 영향을 미쳤을 것으로 예상된다. 강화, 김포, 안산, 화성 부근의 기상관측지점의 상대습도는 03 LST보다 평균 10% 증가하였고, 이는 만조로 인하여 조건대가 물로 덮인 상태에서 연안에서 발생한 서풍계열의 바람으로 습한 공기가 내륙으로 이동한 것을 알 수 있다. 또한 조건대가 분포하는 해상영역의 풍속은 03 LST보다 감소하였으며 이로 인하여 인천을 포함한 조건대 부근에서 안개가 발생하기 적절한 조건이 형성되었음을 알 수 있다. 안개가 발생한 09 LST에는 조위값이 503 cm로 낙조류가 나타난 시기이고, 인천 부근에서는 06 LST와 유사하게 남서풍이 유지되었다. 인천 부근 내륙지역에서는 서풍이 지속됨에 따라 부천지역까지 상대습도가 증가(5%)하였고, 인천을 포함한 영중도 및 화성 인근 지역에서 90% 이상의 높은 상대습도가 유지되었다. 또한 상대습도가 높게 나타난 영역에서 풍속이 약하게 나타나 안개가 발생한 것으로

**Table 2.** Seasonal average meteorological variables observed at the Mokpo ASOS site on a foggy days at high tide

|        | Dew-point depression | Relative humidity | Wind speed | Main wind direction | Air-Sea temperature difference |
|--------|----------------------|-------------------|------------|---------------------|--------------------------------|
| Spring | 0.3                  | 99                | 2.5        | SW                  | -0.2                           |
| Summer | 0.4                  | 98                | 2.1        | WSW                 | 0.6                            |
| Autumn | 0.4                  | 98                | 0.9        | ESE                 | -3.6                           |
| Winter | 0.3                  | 98                | 2.7        | SSW                 | 1.0                            |

판단된다. 안개가 소멸한 12 LST에는 조위값이 2 cm로 간조가 나타난 시기이고, 서해 중부 연안지역에서는 서풍계열의 바람이 지배적으로 나타나 해풍이 뚜렷하게 발달하여 전반적으로 풍속이 증가하였다. 풍속의 증가와 일사량의 증가, 간조로 인한 갯벌면적의 증가가 복합적으로 나타나 상대습도 또한 크게 감소하였다. 이로 인하여 인천 부근에서 발달한 안개는 소멸된 것으로 사료된다.

### 3.3. 조석현상이 안개 발달 과정에 미치는 영향: 목포 사례

목포에서의 만조시 안개발과 기상요소와의 관련성을 파악하기 위하여 만조시 안개 발생시간동안의 계절별 기상 및 해양 요소의 평균값을 분석하여 Table 2에 제시하였다. 기온노점차와 상대습도는 연평균 각각 0.4°C와 98%로 인천과 유사한 값이 나타났다. 풍속은 연평균 2.0 m/s이며 가을에 평균 0.9 m/s로 가장 약한 풍속이 나타났고, 전반적으로 인천보다 약한 풍속(연평균 0.4 m/s)이 기록되었다. 풍향은 가을을 제외한 모든 계절에 남서풍 계열의 바람이 우세하였고, 가을에는 동남동풍이 주풍으로 나타났다. 목포 기상관측소에서 남서쪽으로는 신안군의 안좌도 및 장산도 등의 많은 섬이 존재하고, 섬 주변에는 간조시 갯벌이 형성된다. Kim et al.(2006)과 Heo and Ha(2004)에서 서해 남부 연안에서의 안개 발생시 풍향은 남~남서 계열의 바람이 나타나고 풍속은 2.0 m/s 미만일 때 안개가 가장 많이 형성된다는 결과와 본 연구 결과는 유사함을 확인하였다. 해기차는 연평균 -0.6°C이며 가을에 가장 큰 해기차가 나타났고, 모든 계절에 음의 해기차가 나타난 인천과 달리 목포에서는 봄과 가을에는 평균적으로 해수온도가 기온보다 높게 나타났고 여름과 겨울에는 해수온도가 기온보다 낮게 나타났다.

인천 안개사례와 마찬가지로 목포에서의 만조로 인한

안개발달의 영향이 뚜렷하게 나타난 대표사례일을 선정하였고, 상세한 기상분석을 수행하였다. 선정된 대표 안개사례일은 2019년 2월 25일 07~11 LST로, 오전에 전국이 일교차가 크게 나타나며 짙은 안개가 끼는 곳이 나타났다. Fig. 6은 안개사례일을 포함한 2019년 2월 24일 00 LST~2월 25일 23 LST의 조석주기 및 기상요소별 시간변화를 제시한 것이다. 사례일의 경우 평균 조차는 366.3 cm이며 만조시 조위는 평균 401.5 cm, 최대 425 cm로 인천보다 조차가 뚜렷하게 작았다. 안개가 발생한 2월 25일 07 LST~11 LST는 조위 397 cm의 만조와 조위 45 cm의 간조가 포함된 시기로, 안개가 시작된 시각에 만조가 나타나 서해 남부 연안의 갯벌이 물로 덮였고 이후 안개가 지속되는 동안 낙조류가 나타나 물이 점차 빠진 것으로 추정된다. 이러한 조위변화와 안개발달과정은 인천사례와 유사한 패턴이 나타났다. 해기차의 경우 안개 발생 4시간 전인 2월 25일 03 LST부터 음의 값이 나타났고 안개가 발생하기 3시간 전부터 안개가 발달한 시각까지 -2~-1°C의 해기차가 나타났다(평균 -1.6°C). 이후 안개가 소멸하기 시작한 시각부터는 양의 해기차가 뚜렷하게 나타났다. 이는 목포 인근의 해상에서는 만조시 대기온도보다 높은 해수온도가 갯벌을 덮으면서 해수면에서 대기로의 열 공급이 발생하여 안개가 발달하기 좋은 조건이 형성된 것으로 사료된다. 기온노점차와 상대습도의 경우 안개 발생 5시간 전인 2월 25일 02 LST부터 안개가 발달한 시각까지 1.2°C 미만의 매우 낮은 기온노점차(평균 0.6°C)와 90% 이상의 매우 높은 상대습도(평균 96%)가 유지되었다. 이러한 결과는 안개 발생 전 상대적으로 따뜻한 해수가 만조가 되면서 갯벌을 덮게 되었고, 이로 인해 해수면에서의 수증기량 증가로 낮은 기온노점차와 높은 상대습도를 유발하여 안개 형성에 유리한 조건이 만들어진 것으로 판단된다. 풍향은 안개 발생 전부터 지속적으로 북풍이 우세한 경향을 보였다.



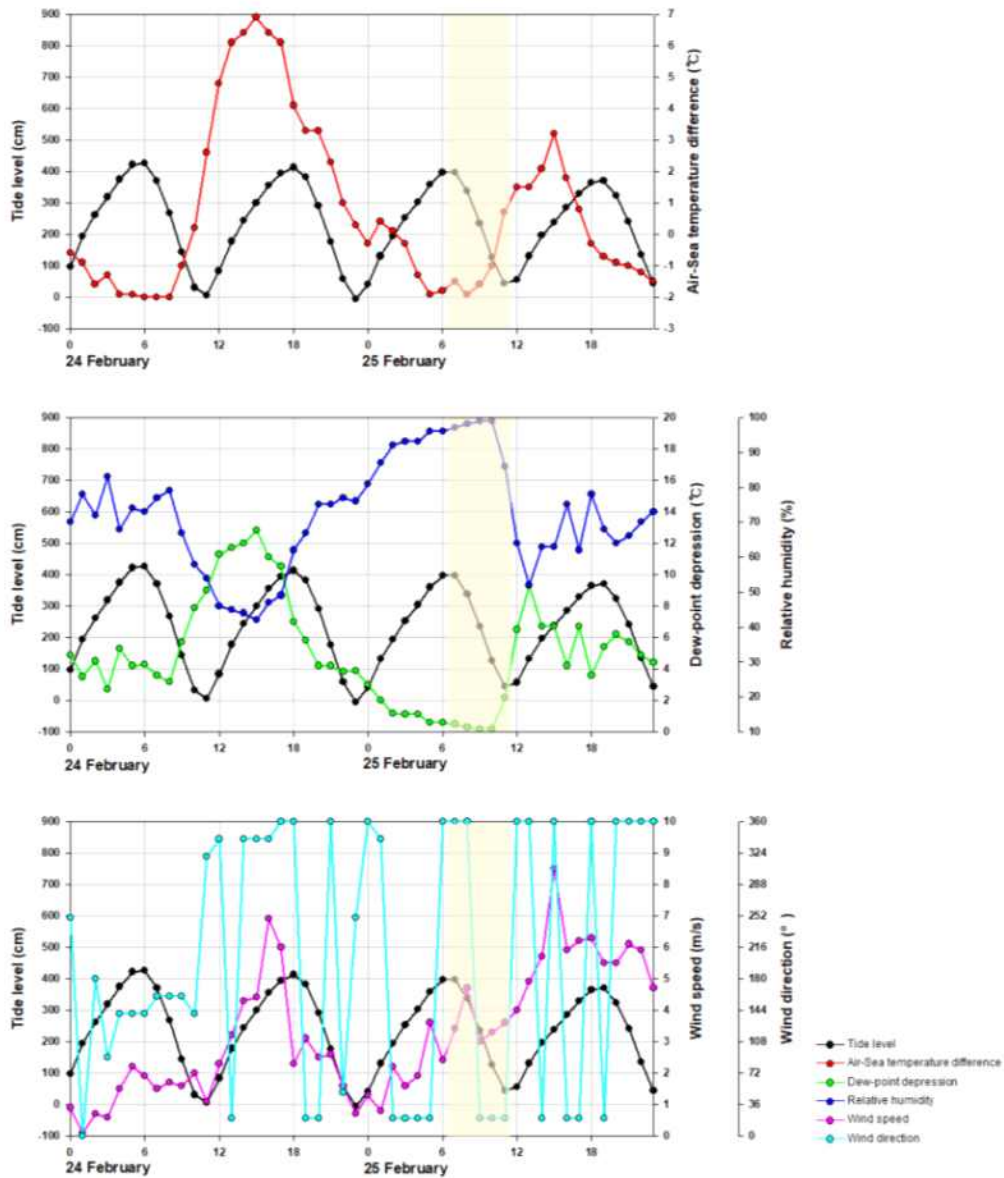


Fig. 6. Time-series plots of observed tide level and air-sea temperature difference at the Mokpo tidal station and dew-point depression, relative humidity, wind speed, and wind direction at the Mokpo meteorological site during February 24-25, 2019. Yellow bars indicate fog periods.

이는 넓은 갯벌이 분포하고 있는 목포에서 북쪽에 위치한 섬 지역들에서 육지 방향으로 안개가 유입되고 있음을 나타낸다. 풍속의 평균값은 발생 전 2.3 m/s, 지속 중 3.6 m/s, 소멸 후 5.8 m/s로, 안개 발생 전에는 약하고 점

차 풍속이 증가하는 경향을 보였다. 압해도 갯벌 및 무안 반도 갯벌 등 목포에서 북쪽에 위치한 넓은 갯벌이 만조 시 물로 덮인 상태에서 이러한 약한 풍속 조건의 북풍이 우세함에 따라 안개 형성에 유의한 조건이 조성된 것으로

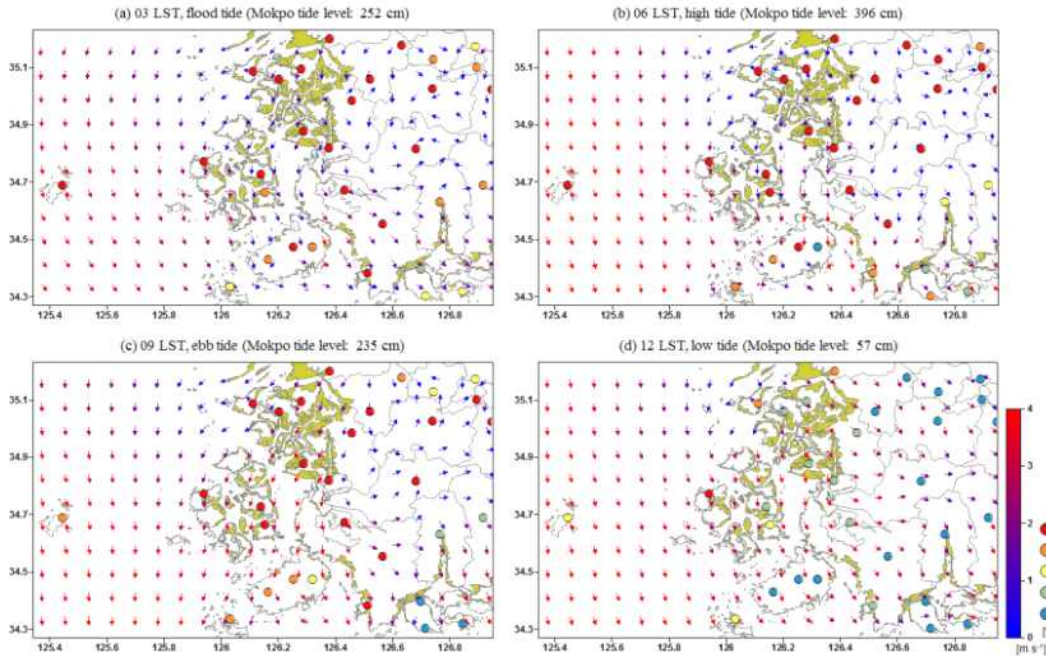


Fig. 7. Spatial distribution of wind vectors and relative humidity for February 25, 2019.

보인다.

안개발생일(2019년 2월 25일)의 03, 06, 09, 12 LST의 목포를 중심으로 북쪽과 서쪽에 위치하는 신안군에 속하는 다도해의 여러 섬들을 포함한 영역에서의 바람벡터와 상대습도의 공간분포를 Fig. 7에 제시하였다. 안개 발생 4시간 전인 03 LST에는 목포 조위관측소 기준 조위값이 252 cm로 창조류가 나타난 시기이고, 목포 인근에서는 북서~북풍 계열의 바람이 나타났다. 해상을 제외한 연안 및 내륙지역에서는 전반적으로 약한 풍속(평균 2.1 m/s)이 나타났고, 목포를 포함한 연안 지역에서는 90% 이상의 높은 상대습도가 나타났다. 안개 발생 1시간 전인 06 LST에는 목포 조위관측소 기준 조위값이 396 cm로 만조로 인하여 대부분의 갯벌이 물로 덮인 시기이고, 목포 인근에서는 북풍이 유지되었다. 목포를 포함한 갯벌이 분포하는 신안군의 섬들에서는 03 LST보다 최대 10%(장산도 기상관측소)의 상대습도 증가가 나타났다. 이는 목포에서 북쪽에 위치한 신안군의 섬들에서 만조로 인하여 물이 덮인 면적이 증가하였고, 북풍이 유지됨에 따라 습한 공기가 목포 인근으로 이동하여 안

개가 발생하기 적절한 조건이 형성된 것으로 사료된다. 안개가 발생한 09 LST에는 조위값이 235 cm로 낙조류가 나타난 시기이고, 목포 인근에서는 북~북동풍이 나타났다. 목포를 포함한 인근 섬들과 연안 지역에서는 북풍이 지속됨에 따라 90% 이상의 높은 상대습도가 유지되었고, 목포 인근의 연안 지역에서는 해상에 비해 상대적으로 약한 풍속이 나타남에 따라 안개가 발생한 것으로 판단된다. 안개가 소멸한 12 LST에는 조위값이 57 cm로 간조가 나타났으며 서해 남부 연안 지역에서는 북서~북풍 계열의 바람이 지배적으로 나타났고, 내륙지역에서도 전반적으로 풍속이 증가하였다. 목포에서 북쪽에 위치한 신안군에 분포하는 갯벌 면적이 간조로 인하여 증가한 환경에서 신안군의 섬들에서의 상대습도가 크게 감소하였고(평균 28%), 목포 인근에서는 북풍 계열의 풍속이 증가하여 신안군의 기상 영향을 받아 목포에서의 상대습도 또한 감소하였다(35%). 이러한 강한 풍속과 낮은 상대습도로 인하여 목포 부근에서 발달한 안개는 소멸된 것으로 사료된다. 전반적으로 사례일의 목포에서 발생한 안개의 경우 북풍 계열의 바람이 지배적으로

나타났고, 이에 목포에서 북쪽에 위치한 신안군의 지형 및 기상환경 변화에 영향을 받게 되었다. 이로 인해 조석 주기 변화에 의한 신안군 갯벌에서의 지표면 변화에 의한 기상변화가 목포지역으로 영향을 미친 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 서해 중부 연안에 위치한 인천과 남부 연안에 위치한 목포에서 각각 관측된 조석주기와 안개발생일을 바탕으로 조석운동과 안개발달의 상관관계를 파악하였다. 또한 안개발생일의 조석주기별 기상요소들의 변동경향과 사공간적 분포특성에 대하여 분석하였다. 인천과 목포에서의 안개 발생빈도를 조사한 결과, 인천과 목포 모두 봄과 여름철인 3~7월에 안개 발생빈도가 높았고, 인천의 경우 7월(월평균 9.4일), 목포의 경우 4월(월평균 4.8일)에 안개일수가 가장 높았다. 조석현상으로 인한 갯벌의 물리적인 환경변화가 안개발생에 미치는 영향을 파악하기 위하여 조석주기별 안개발생 비율을 살펴보고, 인천과 목포 모두 만조시 안개발생 비율이 높게 나타났다(인천 41%, 목포 45%). 만조시 안개발생 시간동안의 계절별 기상 및 해양 요소의 평균값을 분석한 결과, 기온노점차는 인천에서 연평균 0.5°C, 목포에서 0.4°C이고, 상대습도는 각각 97%, 98%로 인천과 목포에서 유사한 값이 나타났다. 풍속은 인천에서 연평균 2.4 m/s, 목포에서 2.0 m/s이며 풍향은 인천에서 서남서풍(가을에는 동남동풍), 목포에서 남서풍(가을에는 동남동풍)이 우세한 경향을 보였다. 해기차는 인천에서 연평균 -2.8°C이고 목포에서 -0.6°C로 전반적으로 해수온도가 기온보다 높게 나타났다. 만조로 인한 안개발달의 영향이 뚜렷하게 나타난 대표사례일을 각각 선정하여 상세 기상분석을 수행하였다. 전반적으로 서해 중부 지역에서 남부 지역보다 큰 조차가 나타나 조석주기 변화로 인한 기상변화의 정도의 차이가 있었으나, 두 지점 모두 매우 유사한 조위변화와 안개발달 과정의 패턴이 나타났다. 안개가 발생하기 직전 또는 발생하기 시작한 때에는 만조가 나타나 서해 연안의 갯벌이 물로 덮인 상태였다. 안개가 발달한 시간동안 음의 해기차가 나타났고, 1.2°C 미만의 매우 낮은 기온노점차와 90% 이상의 매우 높은 상대습도가 유지되었다. 풍향은 두 지점 모두 갯벌에서 연안으로의 약한 바람이 형성되었다. 이는 만조시 갯벌이 상대적으로

로 따뜻한 해수로 덮임에 따라 해수면에서 대기로의 열 공급과 수증기량 증가가 발생하였고, 풍향의 영향으로 갯벌에서의 이러한 환경변화가 연안지역에 영향을 미쳐 연안지역에서의 안개가 발달하기 좋은 조건이 형성된 것으로 사료된다.

본 연구는 조석효과가 크게 나타나는 서해안에서의 조석변화로 인한 물리적인 환경변화가 연안지역의 복합적인 기상변화를 유발하여 안개현상에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 특히, 만조에 의해 지상의 기온과 다른 온도의 해수가 연안으로 유입되면서 안개가 강화되거나 지속되는 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 조석운동과 안개발달의 패턴은 안개로 인한 2015년 영종대교 106중 추돌사고 사례와 매우 유사하였다. 이에 서해 연안에서 안개 발생시 대조기 시기에 만조로 인해 지상의 기온보다 높은 온도의 해수가 연안으로 유입될 경우 안개의 강화 및 지속을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 갯벌이 넓게 분포하는 서해안지역은 해수와 갯벌이 변갈아 나타나는 독특한 지형이므로 안개의 발달 상태와 과정을 이해하기 위해서는 조석주기 변화를 고려한 국지적인 영향을 파악해야 한다. 현재 국내에서는 갯벌에서의 기상관측이 이루어지지 않아 조석변화에 따른 갯벌에서의 직접적인 기상변화를 확인하기 어려운 점이 존재하였다. 하지만 본 연구에서는 수집 가능한 기상 및 해양 관측자료를 다양한 방법으로 분석하였고, 만조에 의한 갯벌에서의 기상변화가 연안지역 안개현상에 미치는 영향을 정량적으로 평가한 연구로써 큰 의미가 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 향후 갯벌에서의 기상관측 연구가 추가적으로 수행된다면 조석효과로 인한 갯벌에서의 기상변화가 연안지역의 기상에 미치는 영향을 보다 상세하고 정확하게 이해할 수 있을 것이라 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임니다(NRF-2020R1A6A3A01099892, NRF-2020R111A1A01070891, NRF-2020R111A3071515).

#### REFERENCES

Ahrens, C. D., 2009, *Meteorology today*, 9th edn. Brok/Col,

- Belmont, 527.
- An, H. Y., 2020, Analysis of the meteorological impacts of the time-and space-varying physical environment in the intertidal zone due to the tidal effects in west sea of Korea, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Busan, Korea.
- Charneys, J., William, J. O., Chow, S., Kornfield, J., 1977, A Comparative study of the effects of albedo change on drought on semi-regions, *J. Atmos. Sci.*, 34, 1366-1385.
- Cho, Y. K., Kim, M. O., Kim, B. C., 2000, Sea fog around the Korean Peninsula, *J. Appl. Meteor.*, 39, 2473-2479.
- Harrison, S. J., Phizacklea, A. P., 1985a, Tide and the climatology of fog occurrence in the Forth Estuary, *Scot. Geogr. J.*, 101, 28-36.
- Harison, S. J., Phizacklea, A. P., 1985b, Seasonal changes in heat flux and heat storage in the intertidal mudflats of the forth estuary, Scotland, *Int. J. Climatol.*, 5, 473-485.
- Harison, S. J., Phizacklea, A. P., 1987a, Temperature fluctuation in muddy intertidal sediments, Forth Estuary, Scotland, *Estuar. Coast. Shelf. S.*, 24, 279-28.
- Harison, S. J., Phizacklea, A. P., 1987b, Vertical temperature gradients in muddy intertidal sediments in the Forth Estuary, *Limnol. Oceanogr.*, 32, 954-963.
- Heo, I. H., Lee, S. H., 1998, The spatial distribution and characteristics of fog in Korea, *J. Kor. Soc. Geo. Environ. Edu.*, 6, 71-85.
- Heo, K. Y., Ha, K. J., 2004, Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the Kroean Peninsula, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 40, 541-556.
- Jhun, J. G., Lee, E. J., Ryu, S. A., Yoo, S. H., 1998, Characteristics of regional fog occurrence and its relation to concentration of air pollutants in South Korea, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 34, 486-496.
- Kim, S. S., Lee, N. Y., 1970, On the classification of the fog regions of Korea, *J. of Korean Met. Society*, 6, 1-15.
- Kim, T. W., Cho, Y. K., Dever, E. P., 2007, An evaluation of the thermal properties and albedo of a macrotidal flat, *J. Geophys. Res-Oceans.*, 12, C1209.
- Laval, K., Picon, I., 1986, Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on climate, *J. Atmos. Sci.*, 43, 2418-2429.
- Lam, J. S. L., Lau, A. K. H., Fung, J. C. H., 2006, Application of refined land-use categories fog high resolution mesoscale atmospheric modeling, *Bound.-Layer Meteor.*, 119, 263-288.
- Lee, Y. S., Kim, S. Y., 2006, Distribution characteristics and changing trends of visibility in Korea, *J. Clim. Res.*, 1, 23-38.
- Lee, Y. H., Lee, J. S., Park, S. K., Chang, D. E., Lee, H. S., 2010, Temporal and spatial characteristics of fog occurrence over the Korean Peninsula, *J. Geophys. Res.*, 115, D14117.
- Lee, H. D., Ahn, J. B., 2013, Study on classification of fog type based on its generation mechanism and fog predictability using empirical method, *Atmosphere*, 23, 103-112.
- Lee, H. K., Suh, M. S., 2019, Objective classification of fog type and analysis of fog characteristics using visibility meter and satellite observation data over South Korea, *Atmosphere*, 29, 639-658.
- National Institute of Meteorological Research, 1986, Fog characteristics of the west coastal region in South Korea, National Institute of Meteorological Sciences, 6, 83.
- Oh, H. J., Kim, T. H., Lee, H. M., Seo, T. G., Youn, Y. H., 2003, Analysis of a sea fog using ocean-air observation data in the mid-yellow sea of Korea, *J. Korean Eath Sci. Soc.*, 24, 303-314.
- Onken, R., Calies, U., Vaesen, B., Riethmuler, R., 2007, Indirect determination of the heat budget of tidal flats, *Cont. Shelf. Res.*, 27, 1656-1676.
- Picolo, M. C., Perilo, G. M. E., Daborn, G. R., 1993, Soil temperature variations on a tidal flat in Minas Basin, Bay of Fundy, Canada, *Estuar. Coast. Shelf. S.*, 35, 345-357.
- Sud, Y. C., Fennessy, M., 1982, A Study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid using the glas GCM, *Int. J. Climatol.*, 2, 105-125.
- Zhou, B. B., Du, J., 2010, Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system, *Weather Forecast.*, 25, 303-322.

- 
- Postdoctoral researcher. Hye-Yeon An  
The Institute of Environmental Studies, Pusan National University  
ahy0221@pusan.ac.kr
  - Research Professor. Ju-Hee Jeong  
The Institute of Environmental Studies, Pusan National University  
jeongjuhee@pusan.ac.kr
  - Researcher. Yoo-Keun Kim  
The Institute of Environmental Studies, Pusan National University  
kimyk@pusan.ac.kr