



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

한반도 연안해역 해무 관측 및
예측 가이드선스 구축에 관한 연구

제주대학교 대학원

지구해양융합학부 지구해양전공

박 소 희

2021년 2월

한반도 연안해역 해무 관측 및 예측 가이드런스 구축에 관한 연구

지도교수 송 상 근

박 소 희

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2020년 12월

박소희의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	_____	문제홍	_____	
위	원	_____	송상근	_____
위	원	_____	김정현	_____

제주대학교 대학원

2020년 12월

A study on the construction
of sea fog observation and
prediction guidance in the coastal sea areas
of the Korean Peninsula

So-Hee Park

Supervised by professor Sang-Keun Song

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2021. 2.

This thesis has been examined and approved.

Faculty of Earth and Marine Convergence
Earth and Marine science

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	5
2.1. 대상지역 및 방법	5
2.2. 모델 구성 및 입력자료	8
2.2.1. 통계모델	8
2.2.2. 기상모델	14
2.2.3. 기상모델 자료동화	19
제 3 장 결과 및 고찰	21
3.1. 해역별 해무발생시 특성 분석	21
3.1.1. 해역별 주요 해양기상 특성	21
3.1.2. 해역별 해무발생시 기상 특성	25
3.2. 해무발생 가능성 예측	36
3.2.1. Decision tree를 통한 예측	39
3.2.2. Data mining 기법을 통한 예측	43
제 4 장 요약 및 결론	51
참 고 문 헌	55
Abstract	60

List of Figures

Fig. 1.	Occurrence of total maritime accidents and marine accidents according to low visibility over the past seven years (2013—2019).	4
Fig. 2.	The locations of Automated Synoptic Observing System (ASOS), marine meteorological buoys, and Automatic Weather System on lighthouse (LAWS) in the Korean Peninsula.....	7
Fig. 3.	Occurrence of sea fog according to main meteorological variables (WS, RH, T-Td, SST, T-SST) in the coastal sea areas in spring and summer of the study period (HL:Highly Likely, L:Likely, N:Not).	9
Fig. 4.	Flow chart of the WRF modeling system.....	16
Fig. 5.	Model domains for (a) 27km, (b) 9km, (c) and (d) 3km.....	17
Fig. 6.	The fog satellite image around the Korean Peninsula provided by the Korea National Meteorological Satellite Center at (a) 23:45 UTC 2017.07.04., (b) 17:45 UTC 2017.07.11., (c) 21:15 UTC 2017.07.18., (d) 21:15 UTC 2017.07.29.	18
Fig. 7.	WRFDA in the WRF modeling system.	20
Fig. 8.	The flow chart of cycling mode for 3DVAR simulation.....	20
Fig. 9.	Seasonal variations of marine meteorological elements (T, SST and WS) in the coastal sea areas of the Korean Peninsula during 2013—2017.....	23
Fig. 10.	Occurrence of Sea fog by the coastal sea areas of Korean Peninsula during 2013—2017.....	26
Fig. 11.	Monthly frequency of sea fog occurrence in the Korean Peninsula during 2013—2017.....	26
Fig. 12.	Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value of sea fog each marine meteorological elements (T, SST,	

	Td, T-Td, RH, T-SST) in spring by the coastal sea areas:.....	31
Fig. 13.	Same as Fig. 12. but for summer:.....	32
Fig. 14.	Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value of sea fog about wind speed in the coastal sea areas (a) spring (b) summer:.....	33
Fig. 15.	Occurrence on sea fog each advection fog and steam fog by the coastal sea areas (a) spring (b) summer:.....	34
Fig. 16.	Flow chart of decision tree fog the prediction of sea for occurring (a) Southern part of the Yellow Sea in spring (b) Southern part of the Yellow Sea in summer (c) Middle of the East Sea in spring (d)Middle of the East Sea in summer:.....	41
Fig. 17.	Prediction accuracy of sea fog in Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea using Decision tree (a) observated data (2019) (b) weather model (WRF):.....	42
Fig. 18.	Features importance among marine weather factors on sea fog (a) Tree models in Southern part of the Yellow Sea (b) Tree models in Middle of the East Sea (c) Random Forest in Southern part of the Yellow Sea (d) Random Forest in Middle of the East Sea:.....	47
Fig. 19.	Same as Fig. 17 but for Tree models:.....	48
Fig. 20.	Same as Fig. 17 bur for Random Forest:.....	49

List of Tables

Table 1. Input and verification data for three statistical models.....	13
Table 2. Details of the grids and physical options used in the WRF model.	16
Table 3. The dominant wind by the coastal sea areas during 2013—2017.....	24
Table 4. The dominant wind on sea fog in the coastal sea areas.....	33
Table 5. Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value on sea fog each marine meteorological elements (WS, T, SST, Td, T-Td, RH, T-SST) in the coastal sea areas.	35
Table 6. Statistical evaluation of the meteorological elements between the observed and model-predicted values (for the BASE and 3DVAR) at four monitoring sites in the southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea in the Korean Peninsula during July 2017 of the broad sea fog observed.....	38
Table 7. Correlation among marine weather factors on sea fog in the Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea.....	45
Table 8. Comparison of the verification of three statistical models (Decision tree, Tree models, Random Forest) in the Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea.....	50

1. 서론

해무는 바다에서 발생하는 모든 안개를 총칭하며 발생 기작이 매우 다양하고, 때때로 짙은 농도의 안개가 발생하게 되면 시정이 악화되어 항공기 지연 및 결항, 선박 충돌, 좌초 등 심각한 사고를 일으켜 많은 피해를 입힌다(Lee et al., 2010). 최근 해상에서의 교통 및 활동량의 증가에 따라 해양사고 발생은 지속적으로 급증하고 있는 추세이다(Lee et al., 2012). 해양경찰청에서 제공하는 해상 조난사고 통계연보(KCG, 2018; KCG, 2019)에 따르면, 최근 7년(2013~2019년)간 발생한 해상 조난사고 횟수가 2014년 이후로 급증한 뒤 꾸준히 증가하며, 이 중 저시정에 의한 사고 또한 증가하고 있는 추세이다(Fig. 1).

한반도는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며 각 해역마다 매우 복잡한 지형 구조를 띄기 때문에 해무발생 기작이 매우 다양하다(George, 1951; Jhun et al., 1998). 따라서 기상학 및 해양학적 관점을 고려한 계절 변동 특성 분석이 필요하며, 수치실험의 기반이 되는 통계학적 분석 또한 수행되어야 한다(Leiper, 1994; Choi et al., 1998; Kim et al., 2006). 예를 들어, 서해는 복잡한 해안선과 많은 섬으로 이루어진 반폐쇄적 해역이며, 계절풍의 영향과 얕은 수심으로 인해 매우 강한 계절 변동 특성을 보인다(Lee et al., 1998; Moon et al., 2009). 동해의 경우 수심이 서해에 비해 약 10배가량 깊으며(Cho et al., 2000), 대양에 존재하는 거의 모든 해수의 물리적 현상이 나타나는 해역이다. 또한, 쿠로시오 해류의 지류가 대한해협을 거쳐 유입되는 대마난류와 한반도 연안을 따라 남하하는 북한 한류가 만나 형성되는 수온 전선대 및 여름철 강한 남풍계열의 바람으로 발생하는 용승에 의한 냉수대의 영향 등 복잡하고 활발한 해양학적 특성을 지니고 있다(Ahn and Lee., 2000; Cho et al., 2000; Park et al., 2017). 그리고 바다에서 형성되는 기상 현상인 만큼 해수면과 대기경계층, 그리고 기온의 함수를 의미하는 상대습도에 큰 의존도를 보인다. 이 외에도 상대습도가 80%일 때, 해양경계층에 존재하는 해염핵(salt nuclei)과 만나게 되면 물방울이 쉽게 만들어지면서 연안 및 해안가에 안개 발생률이 높아지는 등 발생학적 메커니즘의 복잡성 및 다양성

으로 인해 정확한 해석이 매우 어렵다(Choi et al., 1998).

안개(해무)는 주로 기온(Air temperature, T)과 이슬점 온도(Dew point temperature, Td)가 가까워지며 대기 중 수증기가 포화되어 발생하는 기상 현상이다. 이슬점 온도는 공기덩이에 포함된 실제 수증기 함량을 의미하며, 포화가 발생하는 온도이다. 공기 중의 수증기량과 직접적으로 관련 있고 측정이 용이하며 습도를 추정하는데 가장 유용한 방법 중 하나이기 때문에, 기온과 이슬점 온도 관계를 이해하는 것은 매우 중요하다. 이를 나타내는 하나의 척도로 습수(T-Td)가 있는데, 습수는 기온과 이슬점 온도 간의 차이이며 대기의 포화 정도를 의미한다. 이는 상대습도(Relative humidity, RH)와 매우 근사한 개념이며, 습수가 낮을수록 대기 중 포화도가 높음을 의미하고 이는 즉, 상대습도가 높음을 뜻한다. 또한, 풍계는 대기 안정도 및 수증기 이류에 큰 영향을 미치기 때문에 해무발생 예측에 고려되어야 할 중요한 인자 중 하나이다(Leem et al., 2005; Kim et al., 2006).

해상의 기온이 냉각되는 이유는 더 낮은 온도를 보이는 해수면 냉각에 기인한 것으로, 바다로부터 공기층으로 수분이 이류되면 해상의 공기덩어리가 습해짐과 동시에 냉각되어 상대습도가 높을 때 이류무가 발생하게 된다. 이류무는 차가운 지면 혹은 해수면 위로 따뜻한 공기가 지나갈 때, 이 공기덩어리의 하부에서 냉각 및 포화로 인해 응결되어 형성되는 안개를 의미한다. 보통 연안 및 해상에서 발생하는 안개는 대부분 이류무에 속한다(Cho, 2000; Seo et al., 2003). 반대로 수온이 상대적으로 따뜻할 때 수괴는 잘 혼합되며, 상향 heat flux를 나타내는 난류의 성질을 보인다. 따라서 상대적으로 따뜻한 바다로부터 증발된 수증기가 위로 섞이며 해수면에 바로 접해있는 차가운 공기 하층에 기온과 해수면 온도(Sea surface temperature, SST)의 차이로 포화 및 응결이 일어나 안개가 발생하게 되는데, 이를 증기무라 한다(Seo et al., 2003; Heo et al., 2010). 또한, SST는 연안해역에 저기압 시스템이 흐를 때, 이류무가 형성되고 소산되는 과정에 매우 큰 역할을 한다. 그러므로 SST는 해무 발생과 관련된 가장 중요한 요인 중 하나이다(Cho, 2000).

해상자료가 충분하지 않은 경우, 해무발생을 분석 및 예측하기에 많은 어려움이 존재한다(Won et al., 2000). 안개(해무)를 예측하기 위한 여러 수치모델이 실

힘되고 있고, 안개 예측을 위해 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 및 GMS (Geostationary Meteorological Satellite)에서 제공하는 위성 자료도 증가하고 있지만, 여전히 현업 예보에 활용하기에 많은 어려움이 존재한다. 또한, 기상청에 의하면 현재 수행되고 있는 안개 예측을 위해 국지모델 시정예측, 지역특화 안개 가이드선스(인천 공항 등), 구름 물리변수 기반의 안개 가이드선스 등이 이루어지고 있다. 뿐만이 아니라, 선진예보시스템을 통한 연무를 포함한 안개 종합 감시 시스템이 실시간으로 필요한 지역의 집중 감시를 실시하고 있다. 하지만 다른 기상 현상에 비해 예측 정확도가 현저히 낮고, 특정적인 지역에 한해서 안개 유형(복사무, 이류무 등)별 특성에 초점을 맞추어 분석이 이루어졌기 때문에, 꾸준한 개선은 여전히 필요한 실정이다(Choi and Speer, 2006; Lee et al., 2010).

Kim et al (2013)은 내륙 지역과 해안 지역 특성 및 시정 거리에 따른 안개발생일수 변화 및 지속 시간 경향 분석을 바탕으로 대구 공항 및 강릉 공항에서 발생하는 안개(해무) 예보 가이드선스 알고리즘을 작성하여 현업 예보에서 사용할 수 있도록 기반을 마련하였다. 따라서 본 연구에서는 2013~2017년 동안 해무발생과 연관된 해양기상요소를 각 해역마다 비교·분석하여 한반도 연안해역별 고유의 지형적 특성 및 계절적 변화에 따라 발생하는 해무의 다양한 특징을 연구하고자 하였으며, 다양한 통계학적 방법을 적용하여, 보다 정확하고 개선된 해무 발생을 예측 및 검증하고자 하였다.

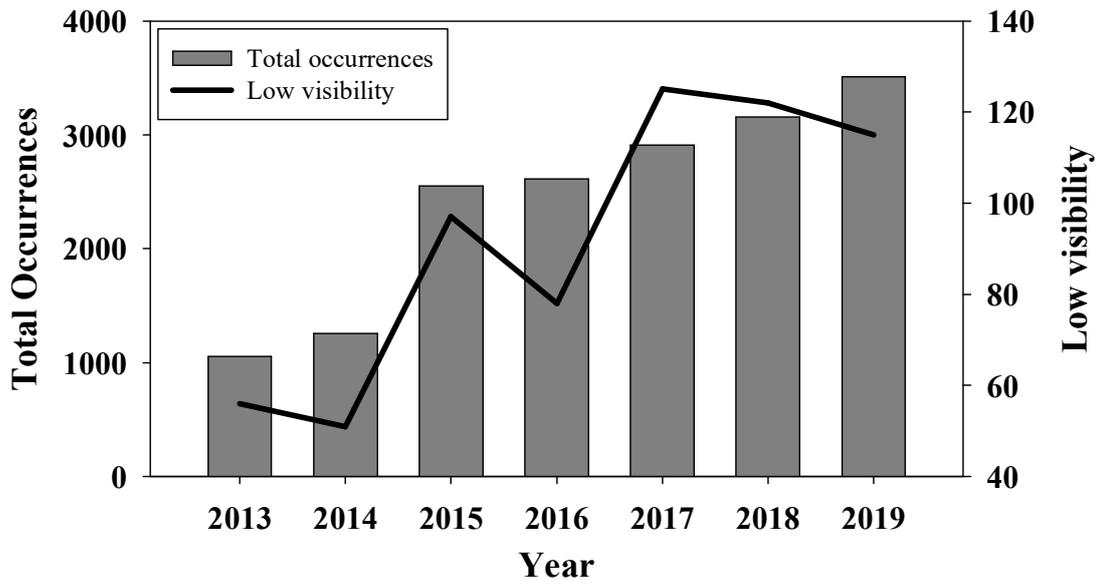


Fig. 1. Occurrence of total maritime accidents and marine accidents according to low visibility over the past seven years (2013—2019).

* 2013 : The number of ships accidents (ships)
 2014—2019 : The number of accidents (cases)

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역 및 방법

본 연구에서는 한반도 해역별 해무발생 가능성 및 예측을 위한 가이드선 기반을 연구하기 위하여 기상청의 예보구역 기준을 참고한 총 7개 해역, 서해중부(Middle of the Yellow Sea, MYS), 서해남부(Southern part of the Yellow Sea, SYS), 남해서부(Western part of the South Sea, WSS), 남해동부(Eastern part of the South Sea, ESS), 동해중부(Middle of the East Sea, MES), 동해남부(Southern part of the East Sea, SES), 제주남부(Southern part of the Jeju Island, SJI)이며, 제주북부는 남해서부와 겹치므로 제외하였다. 본 연구 수행을 위한 기상관측 지점은 서해중부에 인천(ASOS, 112)과 외연도(Buoy, 22108), 서해남부에 흑산도(ASOS, 169)와 칠발도(Buoy, 22102), 남해서부에 여수(ASOS, 168)와 거문도(Buoy, 22103), 남해동부에 부산(ASOS, 159)과 광안(LAWS, 962), 동해중부에 울릉도(ASOS, 115)와 울릉도(Buoy, 21229), 동해남부에 포항(ASOS, 138)과 포항(Buoy, 22106), 제주남부에 서귀포(ASOS, 189)와 지귀도(LAWS, 960)이다(Fig. 2). 또한, 자료의 신뢰성을 높이기 위하여 1개월 중 결측값을 제외하고 80% 이상의 자료가 있는 지점 즉, 유효자료 조건을 만족하는 지점을 선정하여 분석에 사용하였다.

연구 자료는 기상청에서 제공하는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr/>)의 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System, 이하 ASOS), 해양기상부이(Buoy, 이하 부이), 등표기상관측(Automatic Weather System on lighthouse, 이하 LAWS)의 시간별 자료를 사용하였다. ASOS는 태풍, 고기압 등 종관규모의 날씨를 파악하기 위해, 정해진 같은 시각에 모든 관측소에서 실시하는 지상관측을 말하며 시정, 구름, 증발량, 일기현상 등 일부 목측 요소를 제외하고 기온, 강수, 바람, 기압, 습도 등 여러 기상요소를 자동으로 관측하는 종관기상관측장비를 말한다. 자료는 분, 시간, 일, 월, 연 단위로 제공되고 전국적으로

약 102개의 지점이 있다. Buoy는 해수면 위에서 해양기상을 다양한 기상장비로 측정하고, 그 값을 원격통신을 이용해 일정한 물리량으로 변환 및 처리하여 전송하게 된다. 또한, 기온, 바람, 파도 자료 등이 시간 및 일 자료로 제공되고 총 17개 지점이 운영되고 있다. LAWS는 암초 위의 등표, 관측탑 등 해양 구조물에 설치된 기상관측장비로 기온, 바람, 기압 등을 관측하고, 이와 케이블로 연결되어 수중에 설치된 파고계가 파고, 수온 등을 측정한다. Buoy와 마찬가지로 일정한 물리량으로 변환 및 처리한 후 통신장비를 이용하여 자료를 전송하며, 시간 및 일 자료가 제공되고 총 9개 지점이 운영되고 있다(KMA, 2010).

해무발생시 특성을 분석하기 위한 해양기상요소는 ASOS에서 얻어지는 관측자료 중 이슬점 온도(Dewpoint Temperature, Td)와 현상번호를 사용하였고, 해무와 비해무를 구분하기 위해 현상번호 중 안개를 나타내는 “16”에 해당되는 경우를 해무, 이 외의 모든 경우를 비해무로 간주하였다. 연구에 사용된 해양기상요소는 Buoy와 LAWS에서는 기온, SST, 상대습도, 풍속, 풍향이며, 이를 응용하여 해기차(T-SST), 습수(T-Td)를 산출하였고, 위 관측 자료를 이용하여 연구기간(2013~2017년) 및 해무발생시 계절별 즉, 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)의 각각 평균을 계산하여 해역별로 비교·분석하였다. 또한, 해무발생시 해역별 주풍을 파악하기 위하여 해무가 발생했을 때 모든 시간대에 해당하는 풍향을 16방위로 표현한 뒤, 그 중 빈도가 가장 높은 방향을 주풍으로 간주하였다.

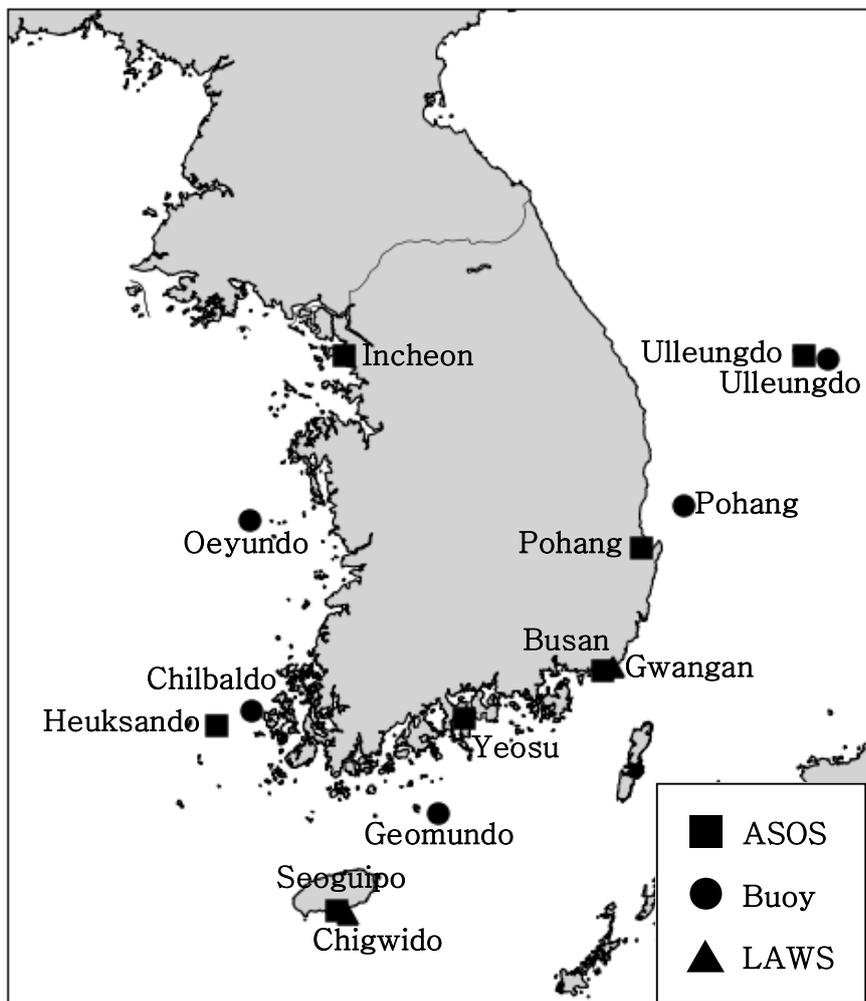


Fig. 2. The locations of Automated Synoptic Observing System (ASOS) (■), marine meteorological buoys (●), and Automatic Weather System on lighthouse (LAWS) (▲) in the Korean Peninsula.

2.2 모델 구성 및 입력자료

2.2.1 통계모델

본 연구에서 해무발생 가능성 예측을 위해 연구기간(2013~2017년)동안 해무가 가장 많이 발생한 서해남부와 동해중부해역의 봄, 여름철을 대상으로 통계학적 방법을 적용한 세 가지 모델인 Decision tree, Tree models, 앙상블 기법인 Random Forest를 사용하였다. 주로 내륙지역에서 안개발생 빈도가 높게 나타나는 계절인 가을, 겨울은 해무발생 가능성 예측에서 제외되었으며, 서해중부와 남해 서·동부와 제주남부는 해무발생빈도가 매우 적어 제외하였다. 먼저, Decision tree란, 데이터를 분류 및 예측하기 위한 통계 기법이다. 분석 과정 및 결과를 추론 규칙(또는 분리 규칙)에 따라 매개변수 간의 관계에 초점을 두어 나무구조로 나타내며, 다른 통계 기법들에 비해 연구자가 쉽게 이해할 수 있다. 분류 및 예측을 필요로 하는 모든 경우에 활용할 수 있으나, 정확한 분석보다는 분석 과정을 필요로 한 경우에 더 유의미하게 사용되는 방법이다(Choi and Seo, 1999; Lindner et al., 2018).

Decision tree 작성을 위해 연구기간(2013~2017년)동안 봄, 여름철 해무가 발생했을 때 해양기상요소(WS, SST, RH, 해기차, 습수)를 사용하여 임계값을 설정하였다. 먼저, 자료의 전처리를 위해 계절별 해무발생 빈도가 5년간 총 발생 빈도에 비해 10% 미만인 값들은 제외되었으며, 예측 정확도를 높이기 위해 해무가 가장 많이 발생하는 범위를 기준으로 임계값을 설정하였다(Fig. 3). 임계값은 총 3가지 범위, 해무발생 가능성 매우 높음(Highly Likely, HL), 해무발생 가능성 있음(Likely, L), 해무발생 가능성 없음(Not, N)이며, 연구기간 동안 봄과 여름철 해무가 발생했을 때의 자료로 계산하였다. 먼저, HL은 해양기상요소별 평균±표준편차(Mean±Standard Deviation, M±SD)이고, (M-SD)~(M+SD)에 해양기상요소들이 순차적으로 해당 될 경우 HL로 예측한다. 다음으로 해무발생 빈도가 10% 미만인 값을 제외한 최솟값~(M-SD) 및 최댓값~(M+SD)을 L로 설정하였으며, HL의 범위 중 하나라도 만족하지 못하거나, L의 범위에 속하는 값들은 모두 L로 예측한다. 마지막으로 HL 및 L 조건을 모두 만족하지 못한 경우 N으로

예측하게 된다. 또한, Decision tree에서 해무발생을 예측하기 위해 배열된 해양 기상요소의 순서는 해무발생에 우선적으로 관련되며, 테스트 결과 가장 높은 정확도를 보인 순서대로 정렬하였다(Lindner et al., 2018).

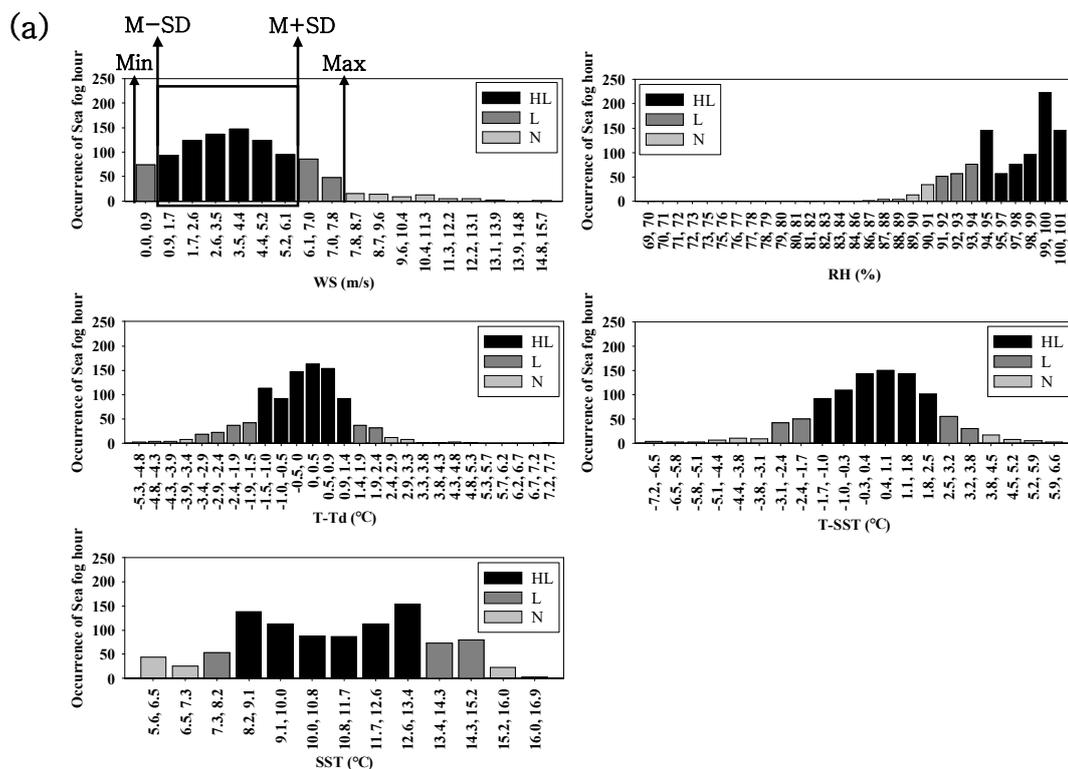


Fig. 3. Occurrence of sea fog according to main meteorological variables (WS, RH, T-Td, SST, T-SST) in the coastal sea areas in spring and summer of the study period (HL:Highly Likely, L:Likely, N:Not) (a) Southern part of the Yellow Sea in Spring (b) Southern part of the Yellow Sea in Summer (c) Middle of the East Sea in Spring (d) Middle of the East Sea in Summer.

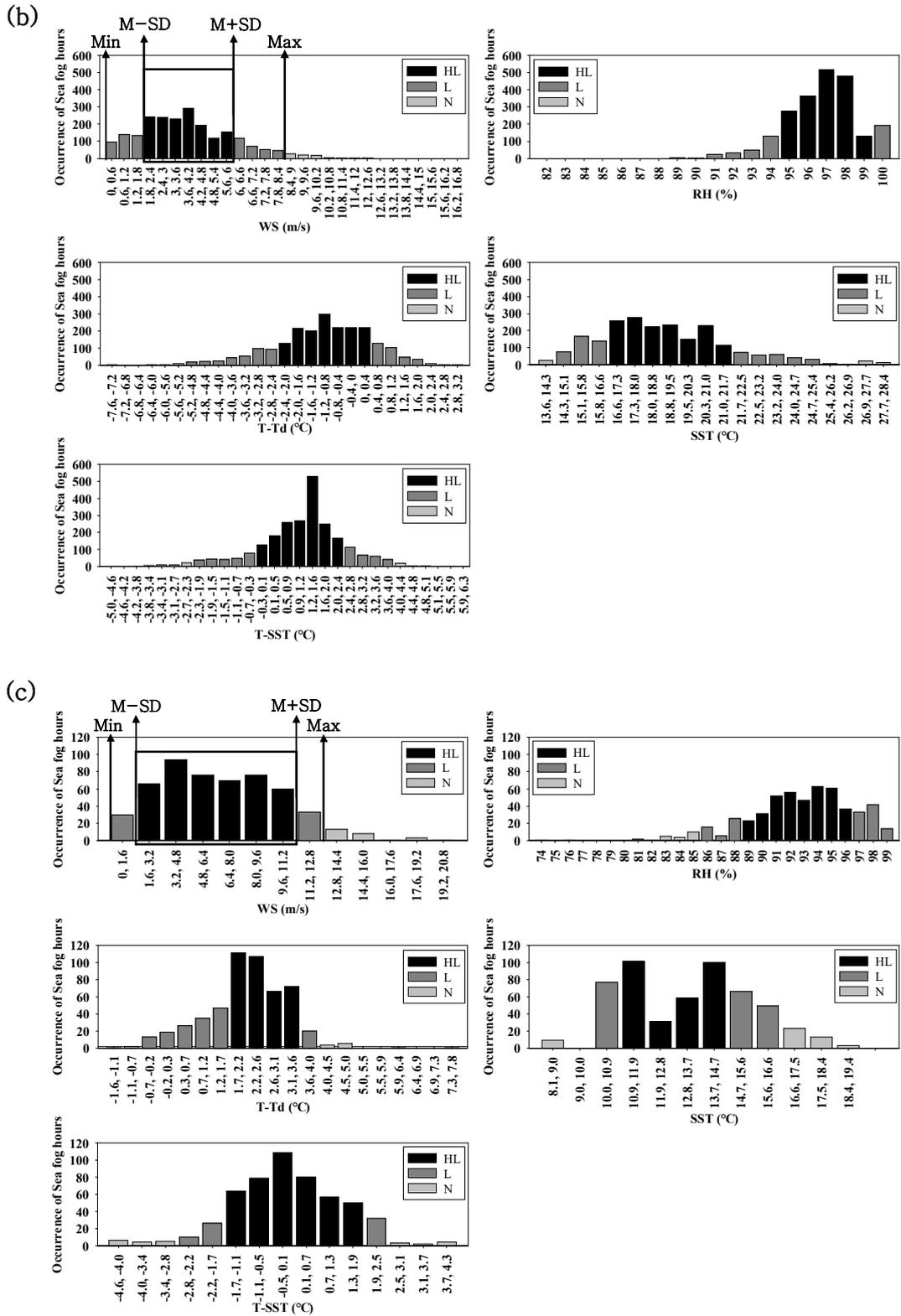


Fig. 3. (continued)

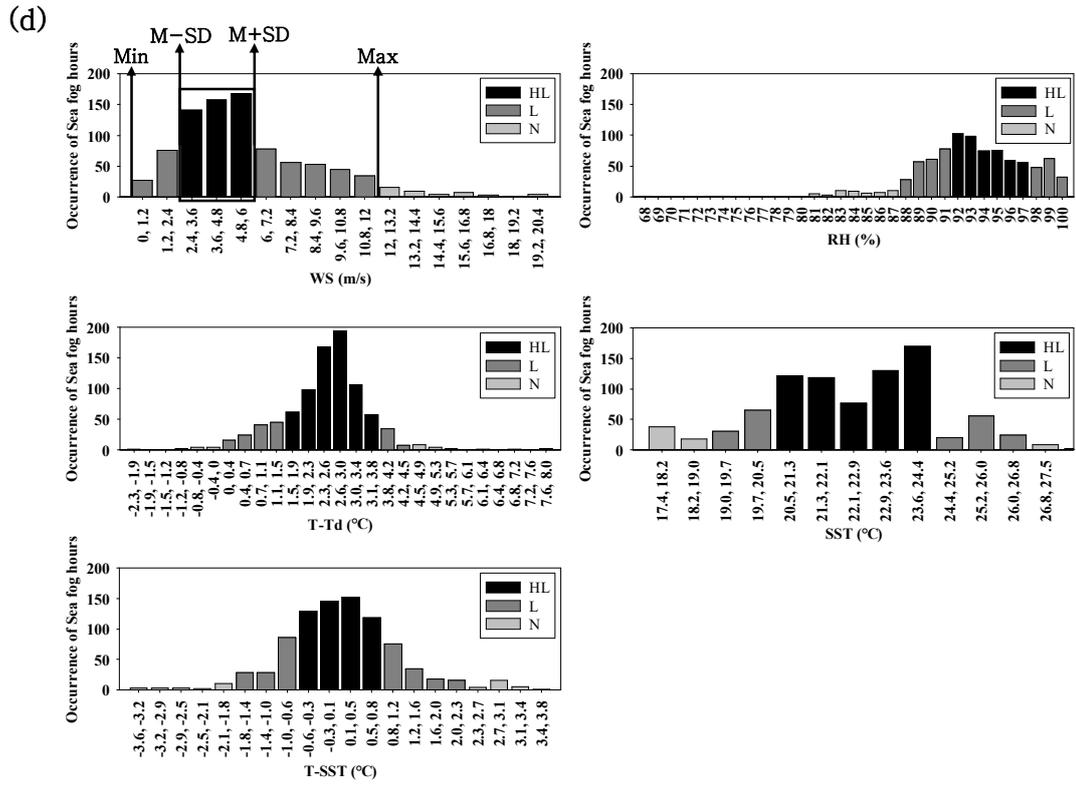


Fig. 3. (continued)

본 연구에서는 다양한 데이터 마이닝(Data mining) 기법 중 Tree models(의사결정나무)와 Random Forest를 사용하였다. Tree models란 어떠한 결과를 도출하기 위한 분류 및 예측에 도달하는 과정을 나무 구조로 도식화하여 분석하는 방법이다. 방대하고 복잡한 데이터를 효율적으로 취급 및 처리가 가능하며, 규칙이 도식화된 나무 구조에 따라 진행되기 때문에 이 방법을 사용하는 연구자가 비교적 쉽게 이해할 수 있다는 것이 장점이다(Choi and Seo, 1999). Random Forest는 Breiman (2001)에 의해 제안되었고, 기계 학습 알고리즘 중 하나이며 Tree models에 기반한 앙상블 학습 기법이다. 입력변수로부터 다수의 모델을 생성하여 학습한 뒤, 예측할 때도 마찬가지로 생성된 여러 모델에서 나온 예측 결과들을 종합시키기 때문에 보다 높은 정확도를 기대할 수 있다(Ramon and Sera, 2006). 따라서 본 연구에서는 해무발생을 예측하기 위해 데이터마이닝 기법 중 Tree models 및 Random Forest를 사용하였으며, 입력자료는 5년(2013~2017년)이고 입력변수인 해양기상요소는 Decision tree와 동일하다.

두 모델에 대해 자료 전처리(preprocessing) 과정인 이상치(outlier)와 결측치(Null)를 제거하는 단계를 거쳤다. 이상치란, 정상적인 범위를 벗어나거나 도달하지 않는 데이터를 일컫는 말로, 본 연구에서는 표본을 표준편차로 변환 후, -2미만 및 2 초과에 해당하는 값을 제거한 표준편차 기반 제거 방법을 사용하였다. 결측치란, 값이 관측되지 않은 자료를 말하며 제거 또는 평균값, 회귀분석을 통한 추정값 등으로 대체하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 한 행에서 하나라도 결측이 존재하는 경우, 그 행을 제거하는 방식을 사용하였다. 자료 전처리 과정 후에 해양기상요소에 대한 상관 관계(correlation) 및 변수 중요도(feature importance)를 계산하여 입력변수 간의 특성을 분석하였다. 또한, 기계학습(machine learning) 과정에서 과하게 학습되어 실제 데이터에 대한 오류가 발생하는 경우가 있는데, 이를 과적합(overfitting)이라 한다. 이를 방지하기 위해 사전에 여러 옵션들을 추가하는 작업인 사전 가지치기(pre-pruning)를 수행하였다. 예를 들어, Tree의 깊이를 제한하거나 마지막 리프 노드(leaf node)의 개수를 제한하는 등의 옵션을 추가하여 모델을 구성하였다. 다음으로 입력자료를 Train set(학습 데이터 세트)와 Test set(검사 데이터 세트)로 무작위로 구분하는 층화 무작위 구분 방법을 사용하였다. Train set 및 Test set의 비율은 모델 정확도에

상당한 영향을 미치기 때문에(Kamila and Borkowski, 2020), 기본 설정값인 75%의 Train set와 25%의 Test set로 구분한 뒤, Train set로 모델을 구축하였으며 모델의 정확도를 Test set로 계산하였다. 또한, 구축된 모델의 신뢰성을 판단하기 위해 교차검증(Cross-validation)을 수행하였으며, 이에 사용한 방법은 K-Fold 교차검증이다. 이는, 데이터 세트를 5개의 subset로 나누어 1개의 test part와 4개의 train part로 구분하여 순서대로 test part를 반복하며 검증하고, 마지막 각 part의 평균값을 비교한다. 마지막으로 2019년 봄, 여름철 및 기상모델 결과를 검증자료로 사용하여 해무발생을 예측하였다. 본 연구에서 사용한 세 가지 통계 모델에 대한 입력자료 및 검증자료를 Table 1에 제시하였다.

Table 1. Input and verification data for three statistical models.

	Input data		Verification data	
	Spring	Summer	Spring	Summer
Decision tree	2013~2017 Spring	2013~2017 Summer		
Tree models		2013~2017	2019 Spring	2019 Summer
Random Forest				

2.2.2 기상모델

본 연구에서는 해무발생 가능성 예측률에 대한 3가지 통계 모델 결과값에 기상모델 결과 값을 활용하여 예측 정확도를 검증하였다. 사용된 기상모델은 WRF (Advanced Research Weather Research and Forecasting) version 3.6이다. WRF 모델은 연구 및 수치 기상 예측을 위해 설계된 대기 모델링 시스템으로 1990년대 후반에 연구와 운영이 공유하는 시스템을 구축하고 차세대 수치 기상 예측 능력을 만드는 것을 목표로 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)와 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)로부터 개발이 시작되었으며, 다양한 분야에 활용되고 있다(Skamarock et al., 2019).

WRF를 수행하기 위해 필요한 기본적인 구성은 전처리 입력자료인 WPS (WRF Preprocessing System) 과정과 모델 수행이다. WPS 과정은 3단계로 구성되어 있는데, 먼저 모델 영역 설정 및 지형 자료 생성을 위해 GEOGRID 단계를 거친다. 그 뒤, grib 형태로 구성된 재분석자료를 WPS에 사용할 수 있도록 변환해주는 UNGRIB를 수행한다. 다음으로 설정된 영역에 맞게 기상자료를 수평 내삽하는 METGRID 단계이다. 이는 UNGRIB된 기상장을 GEOGRID에서 설정한 격자 체계에 내삽하는 과정이며, 지형장 및 기상장을 합성하는 과정이다. WPS 구성이 끝난 후 생성된 METGRID Output 자료를 이용하여 초기장 및 배경장을 생성하기 위한 REAL 단계를 수행한다. 마지막으로 REAL을 통해 생성된 초기장 및 배경장과 WRF에서 생성된 자료를 수치 적분하여 지정한 사례일에 해당하는 기상 상태를 모의하게 된다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2015; NIMR, 2014; Park, 2020). 이러한 WRF 모델링 시스템의 도식화를 Fig. 4.에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 WRF 모델의 초기 및 경계조건은 NCEP에서 제공하는 해상도 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 를 가지는 6시간 간격의 FNL 전지구 재분석 자료를 사용하였다. 지형 자료는 고해상도로 제공되는 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 3 초 자료를 사용하였으며, 토지 피복 자료는 24개의 카테고리로 분류되고 있는

United States Geological Survey (USGS)의 3초 자료를 사용하였다. 또한, 삼면이 바다로 이루어진 우리나라는 조밀하게 구성된 육지 관측망에 비해 해상 관측망은 많은 공백을 가지므로 불확실한 초기 조건의 한계가 여전히 존재한다(Hwang et al., 2011). 따라서, SST 자료는 영국 기상청에서 매일 전 지구를 대상으로 생산되는 관측과 모델 예측자료를 섞은 분석자료인 Operational Sea surface Temperature and sea Ice Analysis (OSTIA)를 사용하였다(<https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/ghrsst/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/>).

본 연구에서는 27km, 9km, 3km, 3km의 수평 해상도를 가지는 총 4개 도메인으로 구성하였고, 연직 해상도는 30층이다. 최종 분석 도메인에 해당하는 D03-1, D03-2는 각각 3km 해상도를 가지며, D03-1은 서해남부, 남해서부, 제주도를 포함하고, D03-2는 동해중부를 포함하는 영역으로 설정하였다(Fig. 5). 사례일 선정 기준은 국가기상위성센터에서 제공하는 천리안위성(Communication, Ocean and Meteorological, COMS) 1호의 위성자료 중 단파적외채널과 적외채널의 휘도온도 차이로 산출되는 안개 탐지 자료를 참고하여(Fig. 6), 연구기간(2013~2017년)동안 가장 최근 연도인 2017년 중 해무가 한반도 전 해역에 걸쳐 가장 많이 발생했던 7월 한 달로 설정하였다.

모델링을 하기 위해 여러 물리 과정을 활용하였는데, 먼저, 모수화 방법으로는 YSU(YonSei University) 경계층 모수화 방안을 사용하였고(Hong and Pan, 1996), 적운을 모사하기 위해 Kain-Fritsch의 적운 대류 모수화 방안을 사용하였다(Kain and Fritsch, 1993). 또한, 지표를 모수하기 위해서는 5-layer thermal diffusion scheme을 사용하였으며, 연구 도메인 격자 크기인 27~3km 격자 규모의 해상도에 따라 구름 및 Meso-scale에 적합한 Single Moment 3-class scheme을 사용하였다(Hong et al., 2004). 이외에 사용된 물리과정 및 도메인 관련 상세정보는 Table 2에 제시하였다.

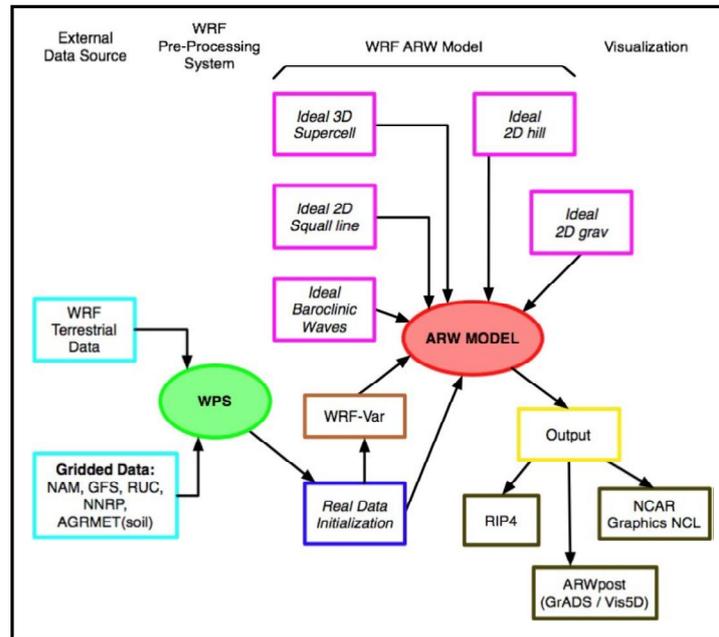


Fig. 4. Flow chart of the WRF modeling system (WRF-ARW V3: User's Guide, 2015).

Table 2. Details of the grids and physical options used in the WRF model.

Domains	D1	D2	D3	D4
Cells in x-direction	153	160	91	100
Cells in y-direction	124	157	100	76
Vertical layers		30		
Horizontal resolution	27	9	3	3
Map projection		Lambert Conformal		
Microphysics	WSM 3-class		WDM 6-class	
Cumulus		Kain-Fritsch scheme for D1, D2		
Radiation (long/short wave)		Dudhia		
Planetary Boundary layer		YSU scheme		
Surface layer		Monin-Obukhov		
Land Surface		5-layer thermal diffusion		

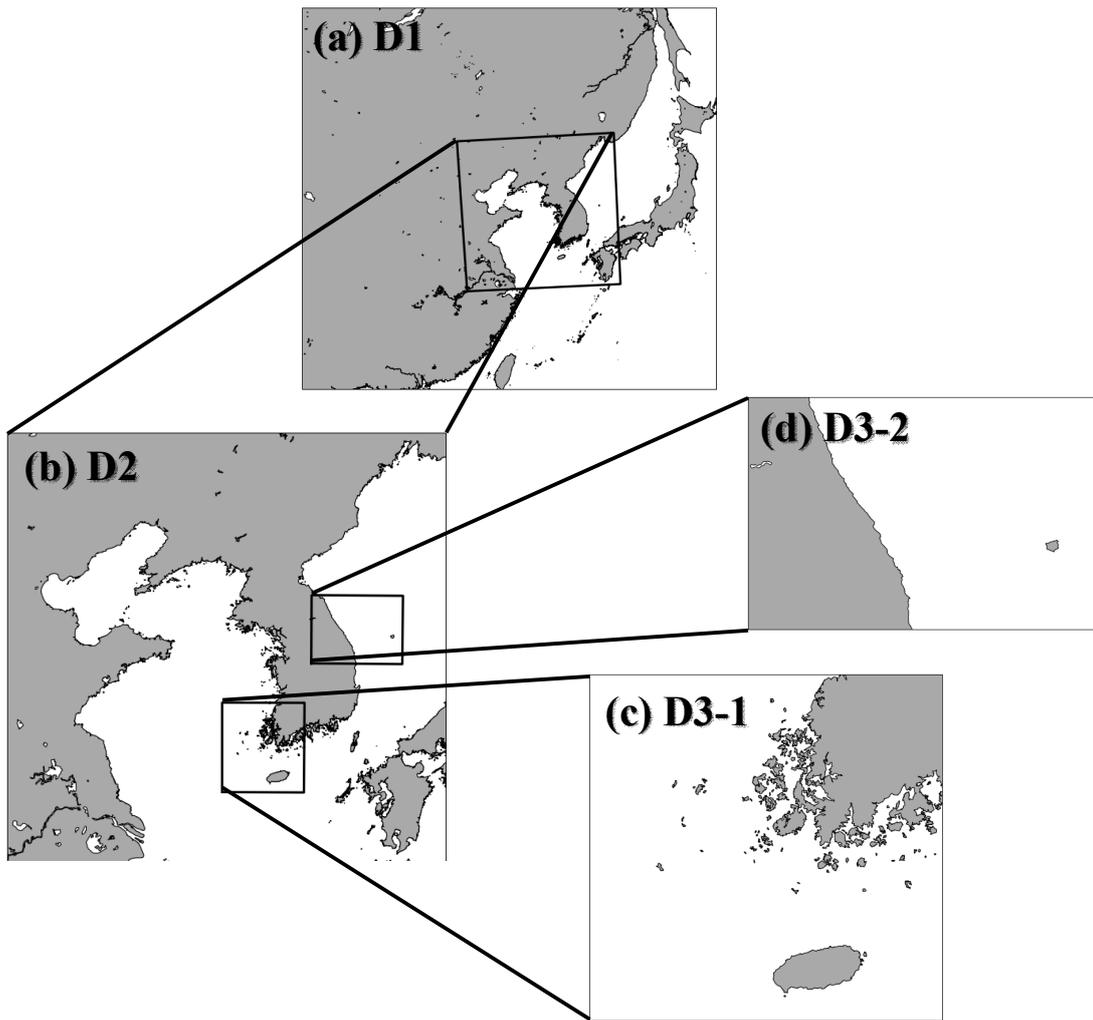


Fig. 5. Model domains for (a) 27km, (b) 9km, (c) and (d) 3km.

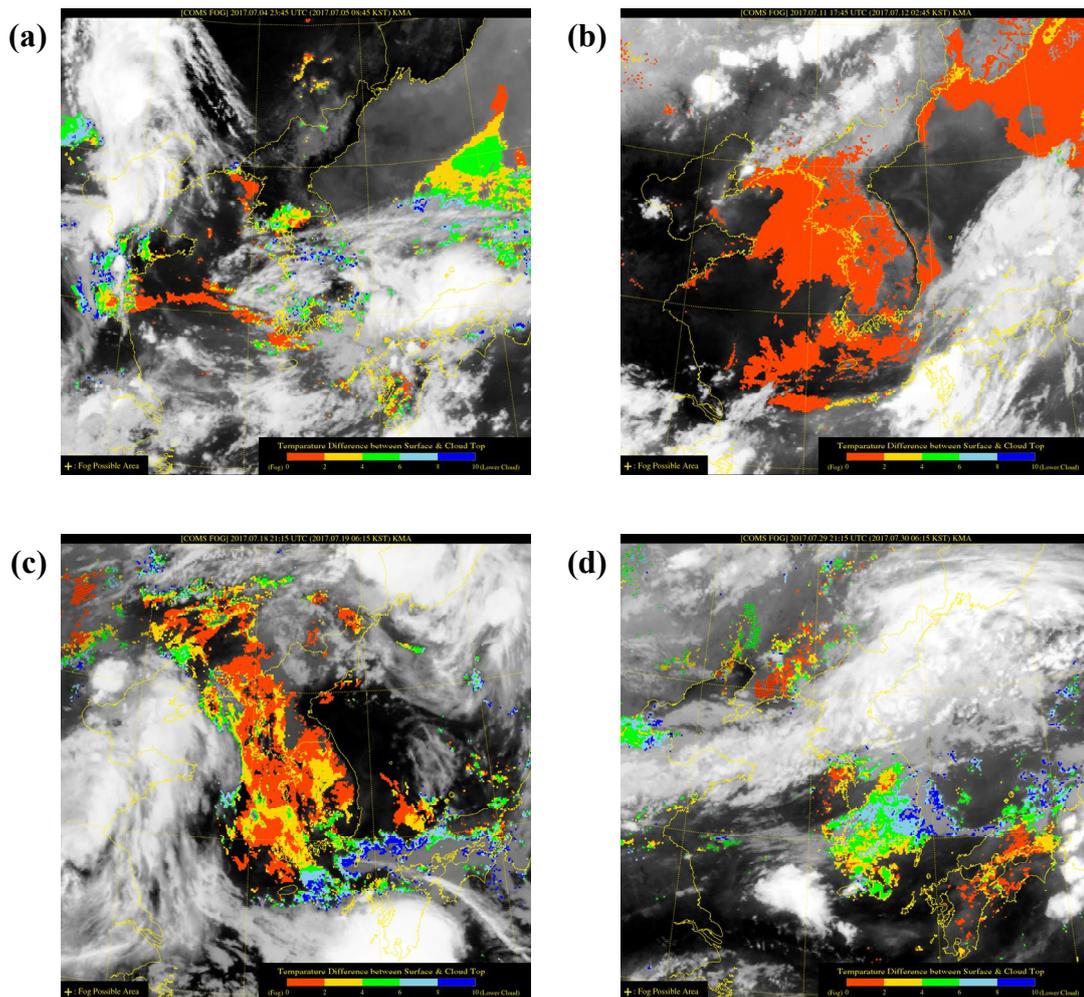


Fig. 6. The fog satellite image around the Korean Peninsula provided by the Korea National Meteorological Satellite Center (<https://nmssc.kma.go.kr/homepage/html/satellite/viewer/selectSatViewer.do?dataType=operSat>) at (a) 23:45 UTC 2017.07.04., (b) 17:45 UTC 2017.07.11., (c) 21:15 UTC 2017.07.18., (d) 21:15 UTC 2017.07.29 (NMSC, 2017).

2.2.3 기상모델 자료동화

수치예보의 정확도 향상을 위해 지속적인 물리 과정 개선, 고해상도 수치모의 등 꾸준히 발전되어 왔다(Seo et al., 2015). 하지만, 여전히 예보 오차가 존재하며 초기 조건의 민감도에 따라 결정되므로, 이는 초기장 및 경계값을 자료동화(Data Assimilation)방법으로 향상된 예보를 얻을 수 있다(Lorenz, 1963; Desroziers and Ivanov, 2011). 따라서 본 연구에서는 3차원 변분자료동화인 3DVAR (Three-Dimensional Variational Analysis)를 적용하여 더 정확한 기상모델 결과를 도출하고자 하였다. 3DVAR는 NCAR/UCAR에서 개발한 자료동화시스템인 WRFDA를 이용하였으며, 과정은 Fig. 7과 같이 이루어진다(WRF-ARW V3: User's Guide, 2015). 자료동화는 REAL 작업으로 만들어진 초기값 및 경계조건을 관측 및 오차자료인 OBSPROC과 배경오차 공분산을 이용하여 진행되었다. 여기서 OBSPROC은 LITTLE_R 포맷의 관측자료를 읽고 지정한 시간과 영역 밖의 관측은 제거하게 된다. 관측에 대한 연직적인 일관성을 확인하고, 기압과 고도는 정역학 가정을 이용하여 추출한다. 또한, 관측 오차를 할당하고 WRFDA에서 사용 가능한 형태로 관측자료를 출력해준다. 모델의 배경장이 가지는 오차를 의미하는 배경오차는 대부분 현업기관에서 NMC (The National Meteorological Center) 방법으로 배경오차 공분산을 생성하게 되는데(Parrish and Derber, 1992), 여기서 NMC 방법은 기후학적 배경오차 공분산을 모델링하기 위해 변분자료동화 시스템에서 자주 사용하는 방법이다(Wang et al., 2013). OBSPROC을 생성하기 위해서 7월 한 달간 PREBUFR 포맷의 NCEP ADP Global Upper Air and Surface Weather Observations 자료를 LITTLE_R 포맷으로 변환 후 사용하였다. 추가적으로 오차를 줄이기 위해 Cycling 방법을 사용하였다. 48시간 동안 24시간 간격으로 분석장 및 예보장을 생산하고, 생산된 분석장을 초기장으로 사용하여 반복적으로 총 한 달간의 예보장을 생산하였다(Fig. 8).

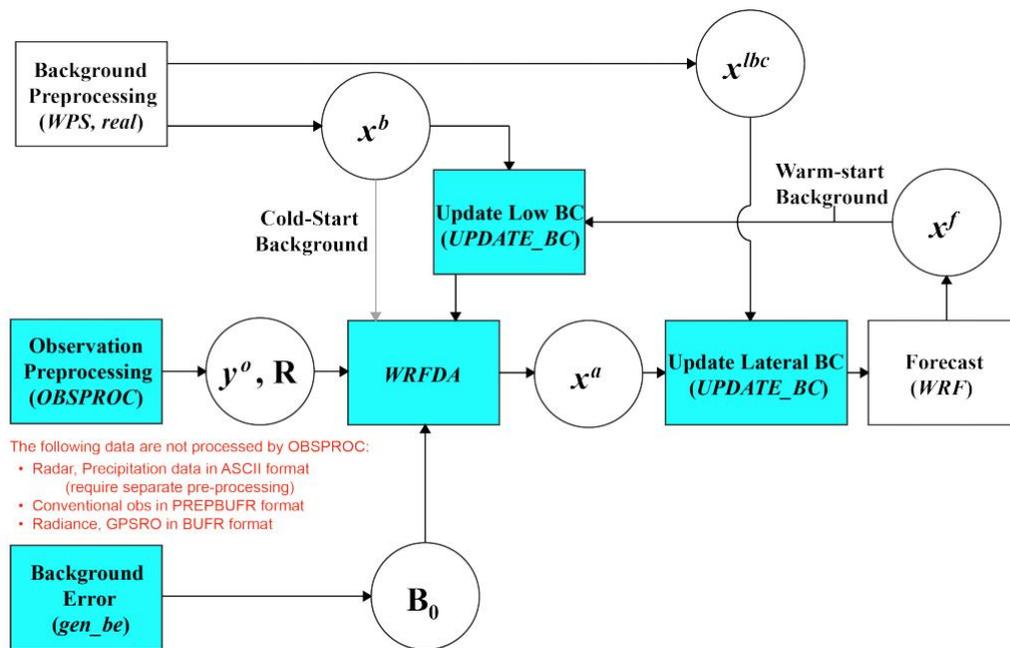


Fig 7. WRFDA in the WRF modeling system.

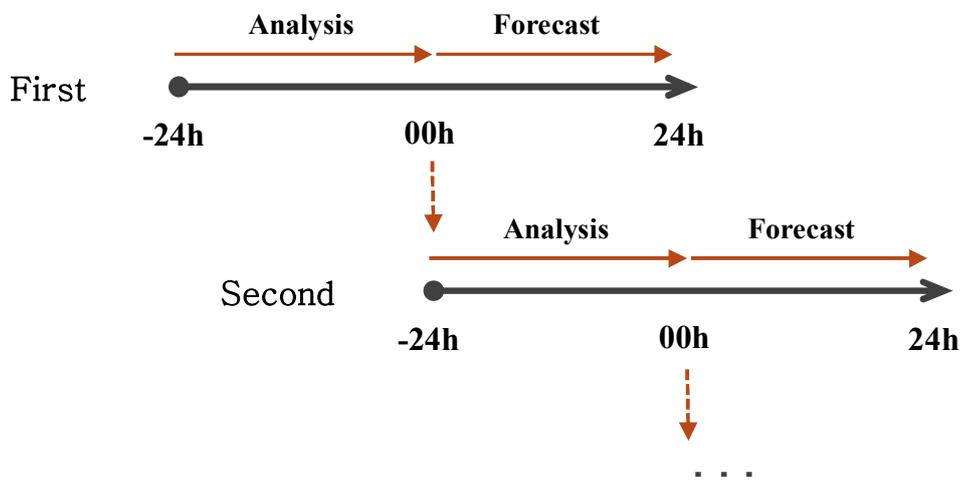


Fig 8. The flow chart of cycling mode for 3DVAR simulation.

3. 결과 및 고찰

3.1 해역별 해무발생시 특성 분석

3.1.1 해역별 주요 해양기상 특성

연구기간(2013~2017년) 동안 한반도 전 해역에 걸쳐 계절별 해양기상요소(T, SST, WS, WD)의 시·공간적 특성을 비교·분석하였다(Fig. 9, Table 3). 대부분 계절에서 기온 및 SST는 서해중부에서 가장 낮았고, 제주남부에서 가장 높았다. 풍속은 남해서부에서 가장 낮았고 계절마다 각기 다른 해역에서 최솟값을 보였으며, 풍향 또한 해역별로 매우 다양한 양상이 나타났다. 각 해양기상요소마다 해역별 계절 변화를 자세히 보면, 먼저 기온의 경우 4계절 동안 제주남부에서 최고, 서해중부에서 최저가 뚜렷하게 나타나고 남해서부와 남해동부, 서해남부와 동해 중·남부의 계절별 온도 범위가 비슷하였다. SST의 경우 최고 온도는 기온과 유사하게 4계절 모두 제주남부에서 가장 높은 값을 보였지만, 최저 온도의 경우 비교적 다양한 해역에서 나타났다. 예를 들면, 봄과 겨울에는 서해중부에서 약 6.7~7.9℃로 가장 낮았으나, 여름과 가을에는 서해남부에서 약 18.5~20.0℃로 가장 낮았다. 이는 여름철 서해남부 해역에 20℃ 이하의 낮은 SST를 띄는 한국 연안수 및 조석에 의한 영향으로 추정된다(Yoon et al., 2007). 계절별로 보면, 봄철에 서해중부와 서해남부는 약 0.6~2.7℃로 비교적 큰 차이를 보이지만, 남해서·동부와 동해 중·남부해역은 약 0.4~0.7℃로 작은 차이를 보였다. 반면 여름철에는 서해 중·남부와 남해동부와 동해남부가 약 20.0~20.5℃로 비슷하였고, 남해서부와 동해중부와 제주남부해역에서 약 22.5~22.8℃로 비슷한 범위를 보였다.

풍속은 전체적으로 여름에 가장 약하고 겨울에 가장 강했다. 4계절 동안 남해서부해역에서 약 2.9~4.2m/s로 풍속이 가장 낮게 나타났으며, 봄에는 동해남부에서 약 4.4m/s, 여름과 가을에는 남해동부에서 약 3.8~4.5m/s, 겨울에는 제주남부에서 약 5.6m/s로 여러 해역에서 최고 풍속이 나타났다. 풍향은 해역 및 계절별 다양한 양상을 보이지만, 봄에 서해 중·남부에서 북~북서풍, 남해서부는 북서

~서풍, 남해동부는 북서풍과 남서풍이 두드러졌으며, 동해중부는 남서풍, 동해남부는 남~남서풍, 제주남부는 북동~동풍과 북서~서풍이 주로 불었다. 여름에는 서해중부에서 남~남서풍, 서해남부에서 남~남동풍, 남해 서·동부에서 북동풍계열과 남서풍이 우세하였고, 동해 중·남부에서는 봄과 유사하게 남서풍, 제주남부는 북서풍이 두드러졌다. 가을엔 봄, 여름에 비해 주풍이 비교적 뚜렷하게 구별되며, 서해 중·남부는 북풍계열, 남해 서·동부는 북~북동풍, 동해중부는 남서풍, 동해남부는 북서풍, 제주남부는 북~북서풍이 불어왔다. 겨울은 4계절 중 유일하게 전 해역의 주풍이 일치하는 계절이었으며, 주로 북~북서풍이 불어왔다.

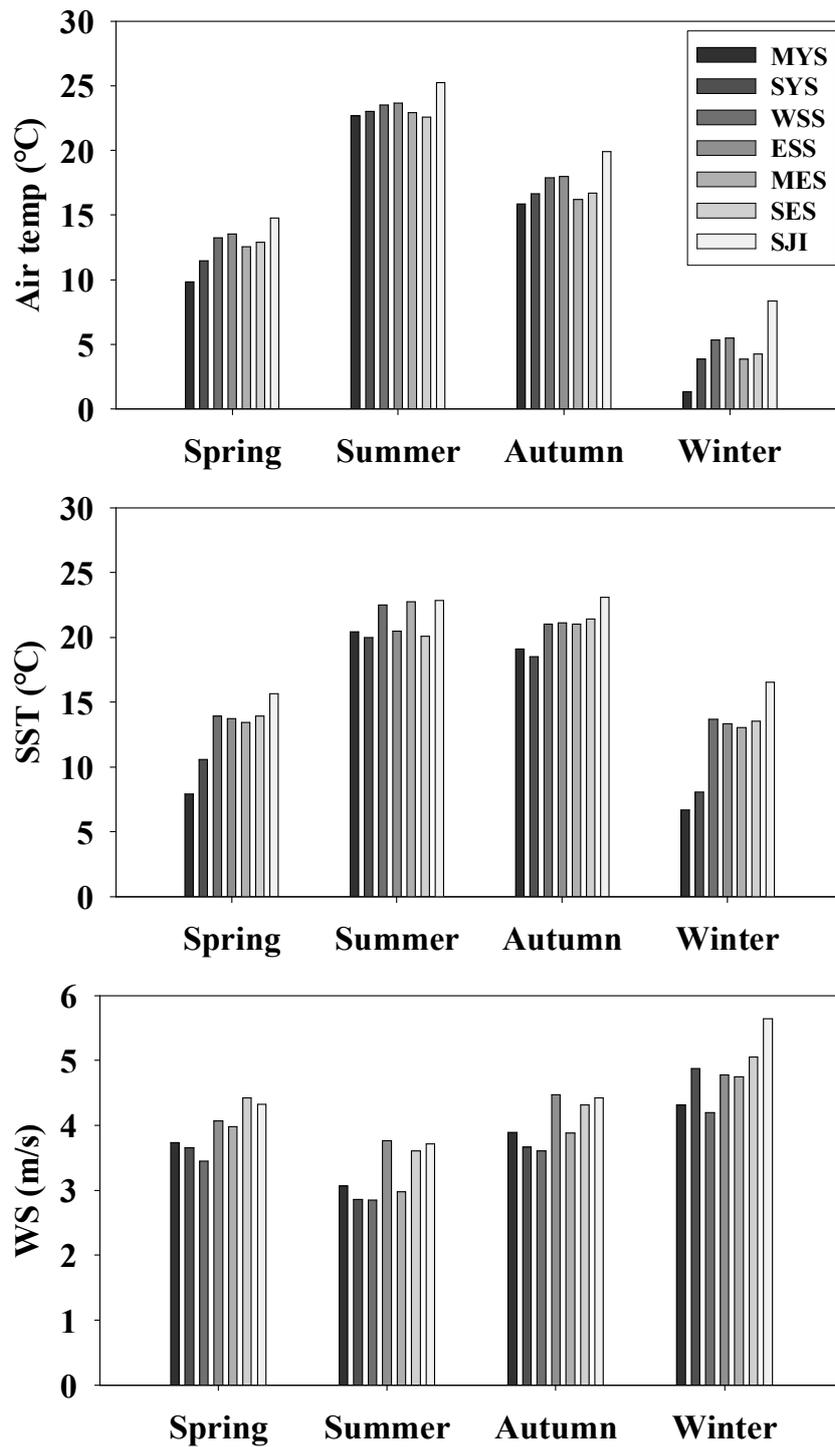


Fig. 9. Seasonal variations of marine meteorological elements (T, SST and WS) in the coastal sea areas of the Korean Peninsula during 2013–2017.

Table. 3. The dominant wind by the coastal sea areas during 2013–2017.

	Spring	Summer	Autumn	Winter
MYS	N	S~SW	NW	NNW
SYS	N~NW	S~SE	N	N
WSS	NW~W	ENE, SW	NE~E	NW
ESS	NW, SW	SW, NE	NE	NW
MES	SW	SW	SW	NW, SW
SES	S~SW	SW	NW	NW
SJI	NE~E, NW~W	NW	NW	N

3.1.2 해역별 해무발생시 기상 특성

본 연구에서는 연구기간(2013~2017년) 동안 우리나라에서 발생하는 해무의 특성을 분석하기 위해 7개 해역(서해 중·남부, 남해 서·동부, 동해 중·남부, 제주남부)에 대한 해양기상요소의 특징을 비교·분석하였다. Figs. 10과 11은 각각 연구기간동안 해역별 해무발생 빈도(시간)와 전체해역에서의 월별 빈도(시간)를 나타낸다. 전체적으로 봤을 때, 7개 해역 중 서해남부에서 총 4059시간으로 가장 높은 빈도를 보였으며, 다음으로 동해중부에서 1927시간, 서해중부에서 1058시간으로 많이 발생하였다. 한편, 동해남부의 경우 총 해무발생 시간이 총 12시간으로 매우 적어 분석에서 제외하였다. 이는 동해연안 중 동해남부해역에서 다른 해역들에 비해 적은 안개 발생 빈도를 보인 Heo and Ha (2004)의 연구 결과와 일치한다. 월별 발생 시간을 보면, 전반적으로 3~8월 즉, 봄(3~5월)과 여름(6~8월)철에 약 70.8~100%로 가장 많이 발생하였고 특히, 전 해역에서 7월에 가장 높은 빈도를 보였는데, 이는 많은 선행연구의 결과와 일치한다(Kim, 1998; Won et al., 2000; Seo et al., 2003; Heo and Ha, 2004; Leem et al., 2005; Lee et al., 2010; Heo et al., 2010; Lee and Ahn, 2013; Park et al., 2020) 반면, 가을(9~11월), 겨울(12~2월)철에는 약 30% 이내로 확연히 낮은 빈도를 보였는데, 이는 Lee et al. (2010)에 의하면 1987~2006년간 연안해역의 안개는 주로 봄, 여름철에 발생하며 가을(9~11월), 겨울(12~2월)철에는 연안해역보다 내륙지역에 더 많이 발생하기 때문이다. 또한, 제주남부의 경우 가을, 겨울철 현상번호 관측 자료의 부재로 해무발생 유무 판단이 불가능하여 분석에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 6개 해역(서해 중·남부, 남해 서·동부, 동해중부, 제주남부)에서 해무가 가장 빈번하게 발생한 계절인 봄~여름철을 대상으로 해무가 발생했을 때 해양기상요소별 특징을 해역별로 비교·분석하였다.

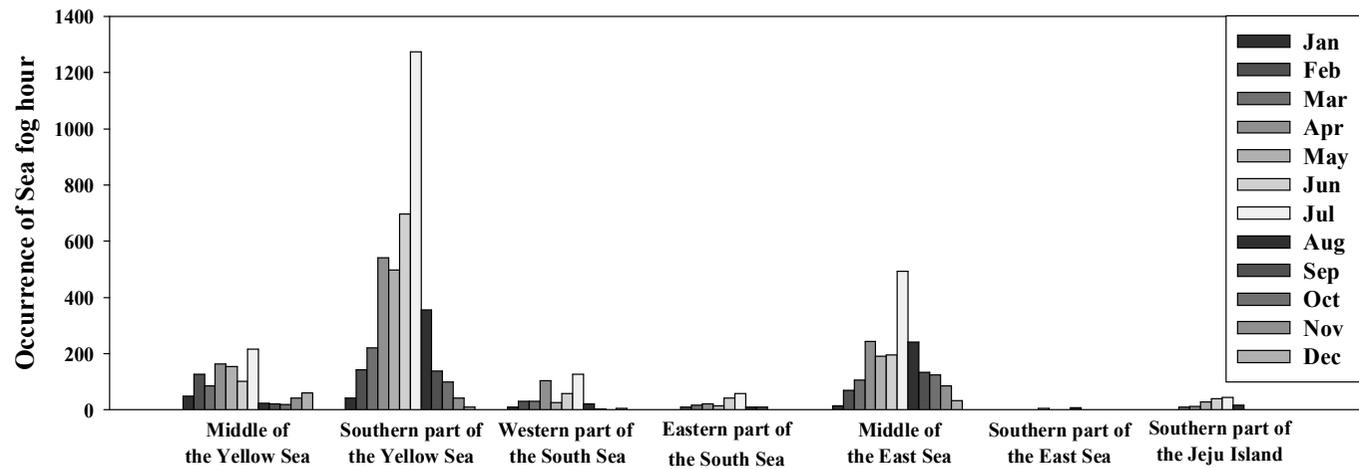


Fig. 10. Occurrence of Sea fog by the coastal sea areas of Korean Peninsula during 2013–2017.

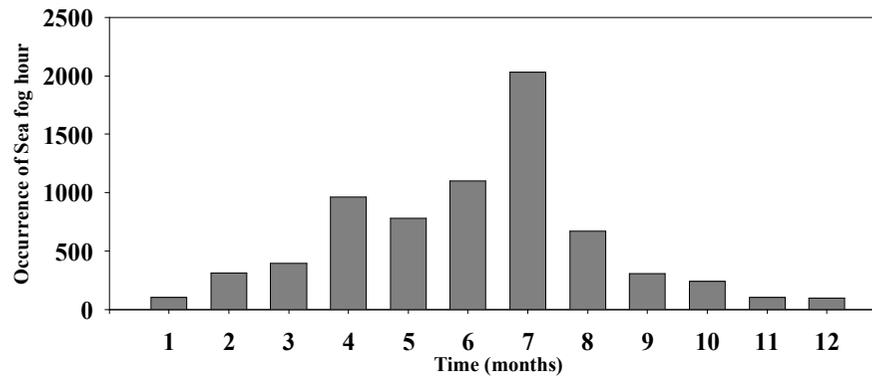


Fig. 11. Monthly frequency of sea fog occurrence in the Korean Peninsula during 2013–2017.

본 연구에서는 연구기간(2013~2017년) 동안 해무가 가장 많이 발생했던 계절인 봄, 여름철에 대해 해양기상요소(WS, T, SST, Td, T-SST, T-Td, RH)의 전체 평균(해무+비해무)과 해무발생시 평균을 해역별로 비교·분석하였다. Figs. 12와 13은 각각 봄과 여름철에 해역별 해양기상요소(T, SST, Td, T-SST, T-Td, RH)의 전체 평균 및 해무발생시 평균을 나타낸다. Fig. 14는 봄과 여름철 해역별 전체 평균 및 해무발생시 평균 풍속을 나타내며, Table 4는 해무발생시 주풍을 나타낸다. 또한, 봄과 여름철에 발생하는 이류무 및 증기무의 비율을 해역별로 비교·분석하였으며(Fig. 15) 이 때, 이류무와 증기무는 각각 해기차가 양(+)과 음(-)의 값이 나타날 때로 정의하였다. 해기차가 양(+)의 값을 보인 것은 기온이 SST보다 높음을 의미하고, 이를 차가운 바다 위로 상대적으로 따뜻한 공기가 지나갈 때 발생하는 이류무로 간주하였다. 해기차가 음(-)의 값을 보인 것은 기온보다 SST가 더 높음을 의미하고, 이를 차가운 공기가 상대적으로 따뜻한 바다 위를 지날 때 발생하는 증기무로 간주하였다(Kim et al., 2017). 또한, 해기차가 “0”일 경우는 분석에서 제외하였다.

봄철 기온의 경우 전반적으로 전체 평균에 비해 해무발생시 평균값이 높았다. 해역별로 보면 서해 중·남부는 해무가 발생했을 때 기온이 약 0.30~0.39℃로 전체 평균과 큰 차이가 나타나지 않았고, 남해 서·동부와 동해중부는 약 1.10~1.32℃정도 차이날 때 해무가 발생하였으며, 제주남부는 약 2.19℃로 가장 큰 차이를 보였다. 해무발생시 기온은 서해중부에서 평균 약 9.04℃로 가장 낮고, 제주남부에서 약 16.8℃로 가장 높았다. SST의 경우 전체 평균과 해무발생시 평균이 기온에 비해 상대적으로 작은 차이를 보였다. 서해 중·남부와 동해중부와 제주남부의 경우 약 0.21~0.43℃로 해무발생시 SST가 더 높았으며, 남해 서·동부는 해무발생시 평균 SST가 약 0.13~0.21℃ 낮을 때 해무가 발생하였다. 해기차(T-SST)는 대부분 전체 평균에 비해 해무발생시 평균값이 더 컸으나, 서해중부 해역은 해기차가 전체 평균보다 더 낮을 때 해무가 주로 발생하였다. 한편 동해중부를 제외한 모든 해역에서 약 0.03~2.02℃로 양(+)의 값 즉, 기온이 SST보다 높을 때 해무가 발생하였으나, 동해중부해역은 해무발생시 해기차가 약 -0.04℃로 음(-)의 값을 보였으며, 이는 대기와 해양의 온도가 매우 비슷하거나 SST가 더 높을 때 해무가 주로 발생하였을 것으로 추정된다.

Td는 온도 분포 양상이 기온과 유사하였으며, 모든 해역에서 전체 평균에 비해 해무발생시 평균이 약 3.87~8.98℃로 매우 클 때 해무가 발생하였다. 전체 평균 및 해무발생시 평균 Td 모두 제주남부에서 최고 온도를 보였는데, 이는 제주도가 기후 분류학상 연중 온난 습윤한 해양성 특징을 강하게 나타내는 아열대 기후에 속하기 때문이다(Choi, 2018). 한 편, 기온과의 차이를 나타내며 대기 중 수증기량을 추측할 수 있는 기상요소인 습수(T-Td)는(Leem et al., 2005), 모든 해역에서 전체 평균보다 해무가 발생했을 때 낮았으며 약 3.61~7.69℃ 차이가 나타났다. 또한, 해무발생시 습수는 약 -0.39~2.14℃의 범위를 보였으며 서해 중·남부, 남해동부와 제주남부는 약 0.39~0.42℃로 매우 작은 차이를 보이고, 남해서부와 동해중부는 약 1.48~2.14℃로 다른 해역에 비해 약 1℃이상의 차이를 보였다. 이 때, 습수가 음(-)의 값이 나타나는 이유는 기온과 Td 관측자료가 얻어지는 ASOS 및 Buoy 관측 지점의 차이에 의한 것으로, 본 연구에서는 이를 과포화가 발생하였을 것으로 간주하였다. 대기 중 수증기 상태를 알 수 있는 요소인 상대습도도 마찬가지로 전체 평균보다 약 10.0~31.9% 차이를 보였으며, 해무발생시 상대습도는 약 91.9~98.4%로 매우 높은 값을 보였다. 해무발생시 평균 상대습도의 최댓값을 보인 해역은 제주남부였는데, 이는 습수 결과와 일치하며, 해양성 기후를 가지는 제주도 지형적 특성 때문일 것으로 사료된다. 반면 남해동부에서 전체 평균 및 해무발생시 평균 상대습도가 가장 낮은 값을 보였다.

여름철 기온과 SST 모두 서해중부를 제외한 모든 해역에서 전체 평균 기온 및 SST가 해무가 발생했을 때 보다 각각 약 0.28~2.70℃, 0.55~3.02℃ 가량 낮게 나타났다. 서해중부는 기온이 약 3.02℃, SST는 약 2.73℃로 전체 평균에 비해 해무발생시 온도가 더 높을 때 해무가 발생하였다. 특히 서해남부와 남해동부에서 매우 낮은 SST를 보였다. 먼저 서해남부의 경우 여름철에 강한 조석 전선의 영향에 의한 것으로, 연직적으로 혼합이 잘 이루어진 수괴와 수온차에 의한 성층화로 인해 안정적인 수괴 사이의 경계면에서 발생하는 현상이다(Bowman et al., 1977). 선행연구에 의하면, 조석 전선이 형성되면 주변수보다 약 3℃ 낮은(약 23℃) 저수온역이 형성된다(Jeong et al., 2009). 이에 대해 추가 분석한 결과, 주변 해역인 서해중부 및 남해서부와 약 2.0~3.9℃ 차이를 보였다. 또한, Cho et al. (2000)에 의하면 Td가 12℃보다 크고, Td-SST가 2℃보다 클 때 안개발생 확

률이 50% 이상이며 추가적으로 분석한 결과 서해남부해역의 해무발생시 Td는 약 21.0°C이고 Td-SST는 약 2.13°C로 선행연구 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 남해동부해역에서 낮은 SST가 보인 것은 여름철마다 거의 매년 형성되는 냉수역에 의한 영향으로, 지속적인 남풍으로 형성된 냉수대로 인해 SST가 주변수보다 약 3~5°C가량 급감하게 되면서, 고온다습한 공기와 만나 해무가 발생하게 된다(Lee et al., 2009; Kim et al., 2015). 따라서 추가적으로 분석한 결과 5년간 여름철 평균 SST가 약 19.1°C이고 해무발생시 평균 SST가 약 16.1°C이며, 남풍이 차지하는 비율이 약 41.5%로 선행연구와 일치하였으며, 해무발생시 지속적으로 불어온 남풍에 의해 용승이 일어나 낮은 SST를 보인 것으로 추정된다.

여름철 Td는 해역별 온도 차이가 컸던 봄철과 달리 전 해역에서 약 20.2~22.6°C로 비슷하게 나타났고, 서해남부를 제외한 모든 해역에서 전체 평균에 비해 해무발생시 평균 Td가 약 0.93~4.39°C로 높았으며, 서해남부의 경우 해무발생시 평균 Td가 전체 평균에 비해 약 0.27°C가량 낮았다. 습수는 봄철과 마찬가지로 모든 해역에서 전체 평균에 비해 해무발생시 값이 약 -1.08~2.47°C로 더 작았다. 상대습도도 마찬가지로 전체 평균값보다 해무발생시 평균 상대습도가 약 3.7~15.5% 높았고, 전 해역에서 약 93.2~98.6%로 높게 나타났다.

풍속은 봄철에 서해 중·남부와 남해 서·동부해역에서 약 3.61~4.25m/s로 약 4m/s 내외였으며, 해무발생시 풍속이 전체 평균보다 약 0.04~1.56m/s가량 낮았다. 반면 동해중부와 제주남부해역에서는 각각 약 6.75m/s, 5.52m/s로 전체 평균에 비해 약 0.46~1.20m/s 가량 높게 불었다. 이는 도서 지역 특성상 일반적으로 강한 바람이 불며, 특히 동해중부(울릉도) 해상에서 발생하는 해무는 다른 해역에 비해 바람이 다소 강하게 불어올 때 발생 확률이 높으며(Seo et al., 2003), 반기성(2003)에 의하면 해상에서 발생하는 안개(해무)의 경우, 약 7~8m/s가 될 때까지는 풍속이 증가함에 따라 짙어짐을 연구하였다. 여름철에는 서해중부, 남해 서·동부와 제주남부에서 약 2.67~3.89m/s의 풍속으로 불 때 해무가 발생하였고, 전체 평균에 비해 해무발생시 풍속이 약 0.18~1.73m/s 낮았다. 서해남부와 동해중부는 각각 약 4.33m/s, 5.71m/s일 때 해무가 발생하였고, 전체 평균에 비해 약 0.68~1.37m/s 높았는데, 이는 봄철과 마찬가지로 관측 지점이 위치한 도서 지역의 영향 및 동해중부 해상에서 발생하는 해무의 특성에 의한 것으로 사료된다.

주풍은 봄철의 경우 서해남부와 남해서부에서 주로 북~북서풍이 불어왔고, 서해중부, 남해동부와 동해중부와 주로 남~남서풍, 제주남부에서는 서풍이 주로 불어왔다. 이는 남해서부에서 계절풍 영향인 북서풍이 불 때 해무발생 빈도가 증가하며(Kim et al., 2006), 제주남부해역의 관측 지점인 서귀포 관측소 및 동해안에서는 주로 남서~서풍 계열의 바람이 불어올 때 해무발생 빈도가 증가하기 때문으로 추정된다(Heo and Ha, 2004; Kim et al., 2015). 여름철의 경우 서해중부, 남해동부, 동해중부와 제주남부에서 주로 남~남서~서풍 계열의 바람이 불어오고, 서해남부와 남해서부에서는 남남동풍이 뚜렷하게 나타났다. 이는 봄철과 마찬가지로 제주남부해역의 주풍이 남서~서풍 계열일 때 해무발생 확률이 증가하기 때문이며(Heo and Ha, 2004), 봄과 여름철 모두 대체로 남풍계열의 바람이 분 것으로 보아 남해상 고온다습한 공기가 바람을 통해 유입되어 대기 중으로 수증기가 공급된 것으로 사료된다(Kim et al., 2013).

봄철 이류무와 증기무의 빈도를 보면, 동해중부를 제외한 모든 해역에서 이류무가 증기무보다 약 16.5~92.4% 더 많이 발생하였다. 특히 남해동부에서 이류무가 약 96.2%로 (증기무 약 3.85%) 매우 높은 비율로 발생하였는데, 이는 봄철 모든 해역 중 해무발생시 평균 해기차가 약 2.02℃로 가장 컸기 때문으로 추정된다. 여름철에는 모든 해역에서 이류무가 증기무에 비해 약 11.1~100% 발생하였으며, 제주남부에서 이류무 발생 비율이 유일하게 100%를 보였다. 남해동부의 경우 봄철과 마찬가지로 해무발생시 평균 해기차가 약 5.13℃로 큰 차이를 보였기 때문으로 추정된다.

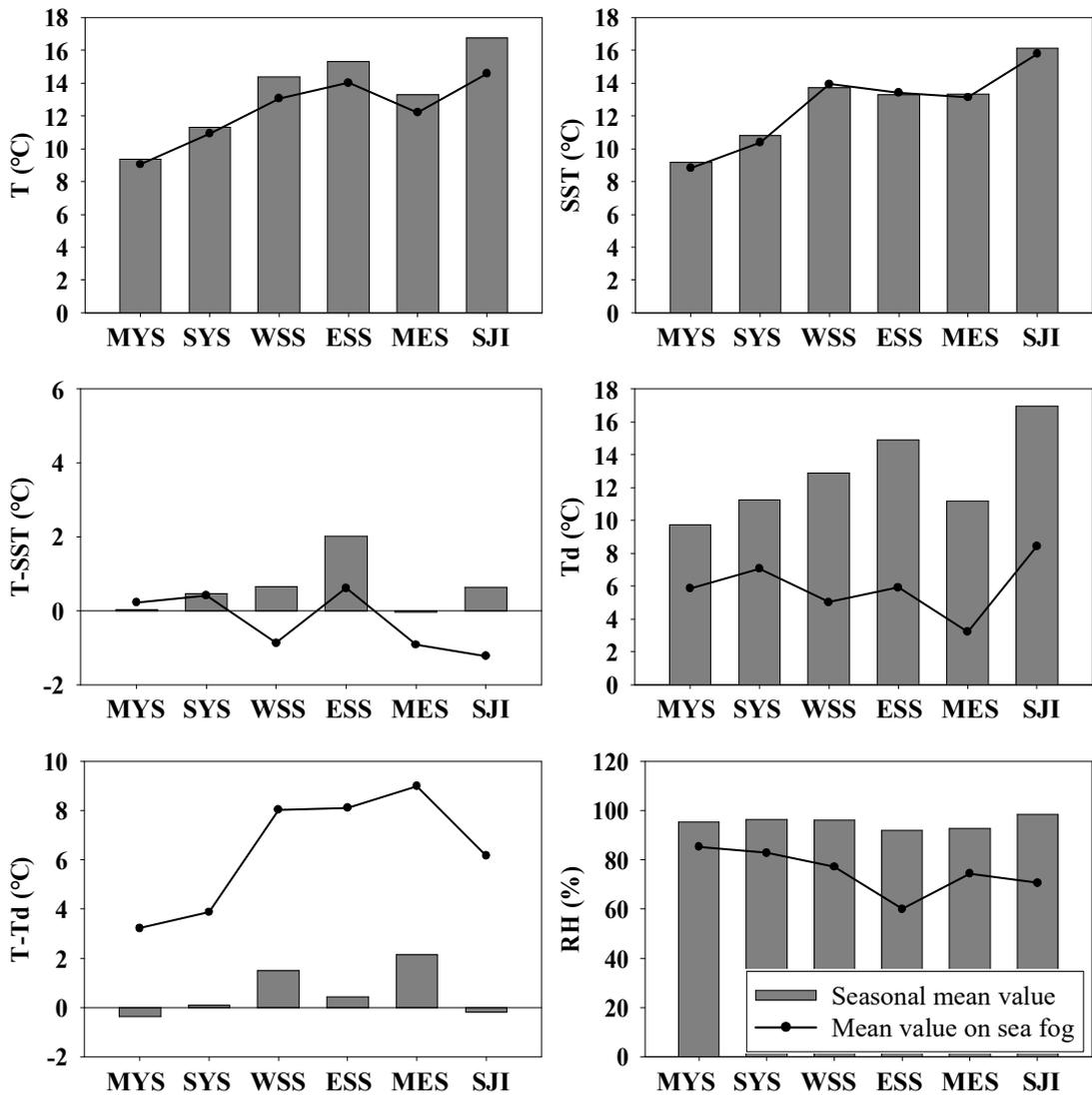


Fig. 12. Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value of sea fog each marine meteorological elements (T, SST, Td, T-Td, RH, T-SST) in spring by the coastal sea areas.

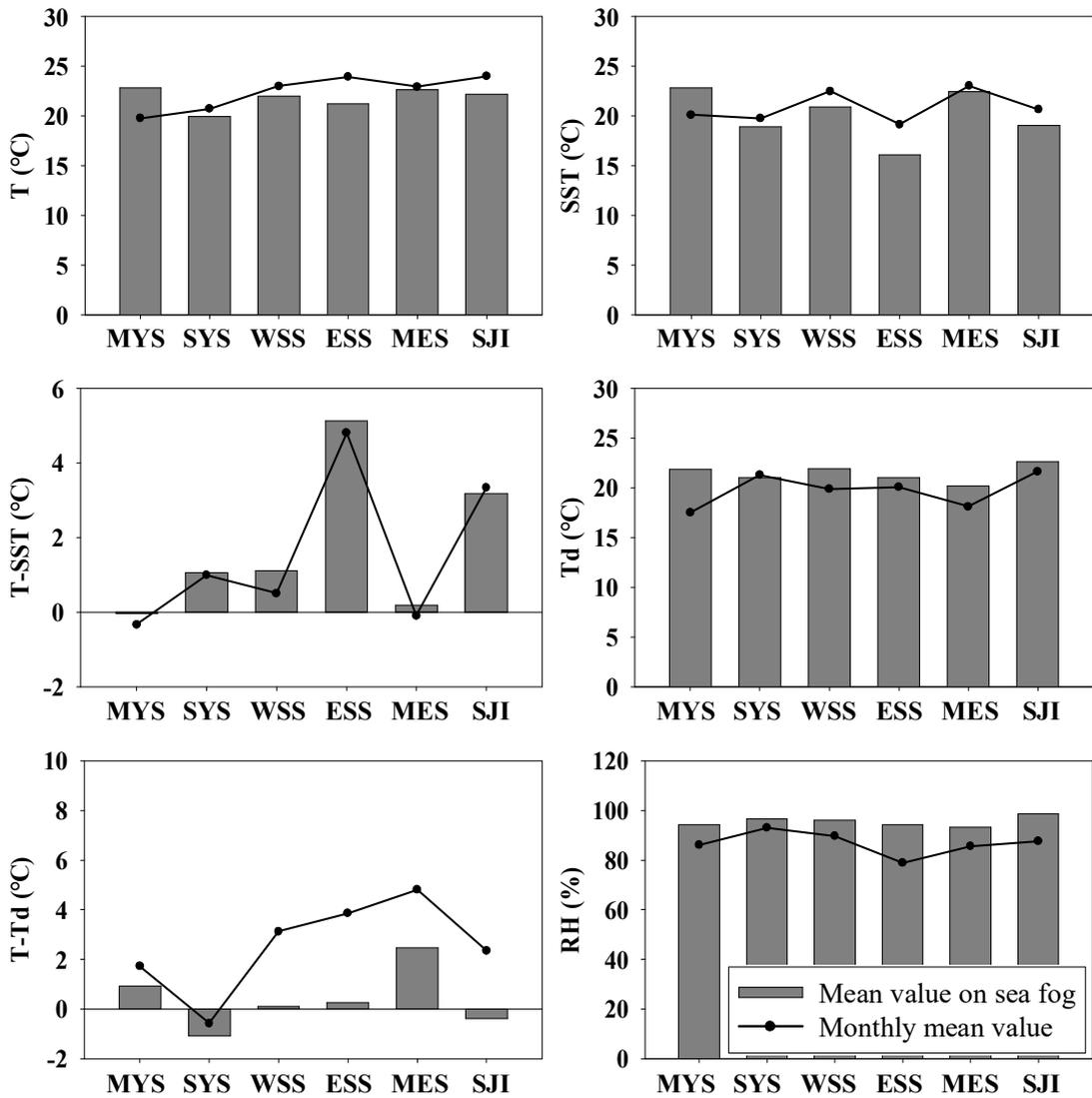


Fig. 13. Same as Fig. 12. but for summer.

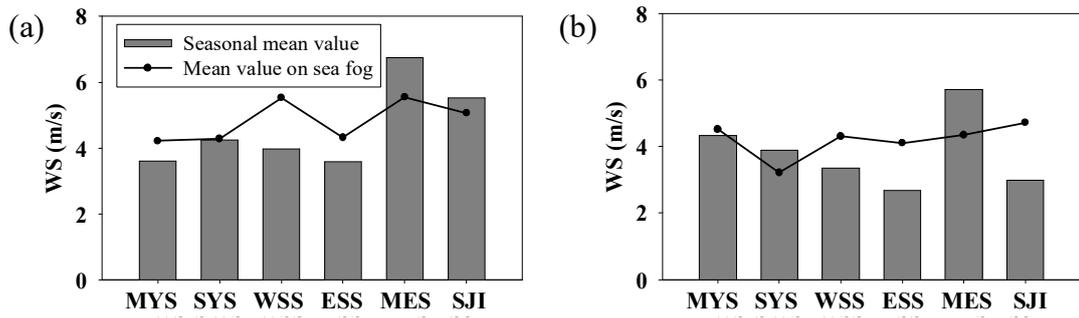


Fig. 14. Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value of sea fog about wind speed in the coastal sea areas (a) spring (b) summer.

Table 4. The dominant wind on sea fog in the coastal sea areas.

	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Spring	Summer
MWS	N	SSW	S	SW	S	S	SSW	SSW
SWS	N	N	SSE	SSE	SSE	SSE	N	SSE
WSS	SSW	NW	SW	SW ~W	SSE	SW, N	NW	SSE
ESS	ENE	S	SSW ~SW	S	E	SW, SE, NNE	S	S
MES	SSW	E	SSW	S	SSW	S	SSW	S
SJI	WNW	W	W	W	WNW	W	W	W

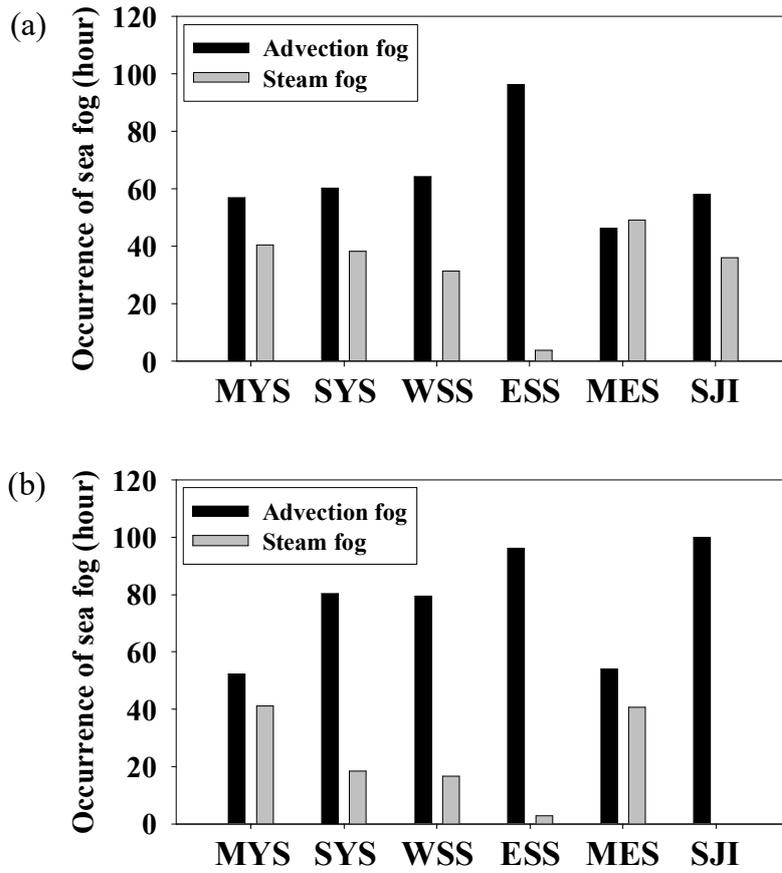


Fig. 15. Occurrence on sea fog each advection fog and steam fog by the coastal sea areas (a) spring (b) summer.

Table 5. Comparison between seasonal mean value (sea fog+non sea fog) and mean value on sea fog each marine meteorological elements (WS, T, SST, T-SST, Td, T-Td, RH) in the coastal sea areas.

		WS		T		SST		T-SST		Td		T-Td		RH	
		a*	b**	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Spring	MYS	4.22	3.61	9.04	9.35	8.82	9.19	0.22	0.03	5.86	9.73	3.22	-0.39	85.3	95.3
	SYS	4.29	4.25	10.9	11.3	10.4	10.8	0.41	0.46	7.06	11.2	3.87	0.09	82.8	96.3
	WSS	5.54	3.98	13.1	14.4	13.9	13.7	-0.87	0.65	5.01	12.9	8.04	1.48	77.2	96.2
	ESS	4.32	3.58	14.0	15.3	13.4	13.3	0.61	2.02	5.91	14.9	8.11	0.42	60.0	91.9
	MES	5.55	6.75	12.2	13.3	13.1	13.3	-0.92	-0.04	3.21	11.2	9.00	2.14	74.4	92.7
	SJI	5.07	5.52	14.6	16.8	15.8	16.1	-1.22	0.64	8.40	16.9	6.17	-0.18	70.6	98.4
Summer	MYS	4.51	4.33	19.8	22.8	20.1	22.8	-0.34	-0.04	17.5	21.9	1.73	0.92	86.1	94.2
	SYS	3.21	3.89	20.7	20.0	19.7	18.9	0.99	1.06	21.3	21.0	-0.58	-1.08	93.0	96.7
	WSS	4.30	3.35	23.0	22.0	22.5	20.9	0.50	1.11	19.9	21.9	3.12	0.09	89.8	96.1
	ESS	4.10	2.67	23.9	21.2	19.1	16.1	4.81	5.13	20.1	21.0	3.86	0.24	78.8	94.3
	MES	4.34	5.71	22.9	22.6	23.0	22.5	-0.10	0.18	18.1	20.2	4.80	2.47	85.6	93.2
	SJI	4.72	2.99	24.0	22.2	20.6	19.0	3.34	3.17	21.6	22.6	2.35	-0.39	87.6	98.6

a* Seasonal mean value (sea fog+non sea fog), b** mean value on sea fog

3.2 해무발생 가능성 예측

해무발생 가능성 예측 정확도 검증을 위해 사용된 기상모델(WRF) 결과값의 신빙성을 판단하기 위해 BASE와 3DVAR간 통계검증 결과를 비교하였다. 통계인자로는 Index of Agreement (IOA), Root Mean Square Error, RMSE), Mean Bias Error (MBE)이다.

IOA는 관측값과 모델 결과값 사이의 일치도를 보여주며, 0과 1사이 값을 가지고 1일 때 완벽한 일치임을 나타낸다.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_1^N (Model - OBS)^2}{\sum_1^N (|Model - AVG(OBS)| + |OBS - AVG(OBS)|)^2} \quad (1)$$

RMSE는 모델 결과값 및 관측값의 평균 제곱근으로 계산되며, 오차의 정도를 측정하기 위한 인자이다.

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (Model - OBS)^2} \quad (2)$$

MBE는 전 기간에 대한 모델 결과값 및 관측값의 차이의 평균을 통해 계산되며, 양(+의 값일 경우 과대평가, 음(-)의 값일 경우 과소평가를 의미한다.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_1^N (Model - OBS) \quad (3)$$

사례일 동안의 기상인자(T, WS, RH)별 BASE와 3DVAR 모델 결과값의 통계검증(IOA, RMSE, MBE)을 Table 6에 제시하였다. 통계검증만을 위해 사용된 관측 자료는 방재기상관측소(Automatic Weather System, AWS)로서, 서해남부 지

점은 월야, 무안이고 동해중부 지점은 윈덕, 금강송이며, 비교하기 위한 격자는 AWS와 가장 가까우며 바다와 산과 겹치지 않게 선정하였다. AWS에서는 Td, SST 자료를 제공하지 않기 때문에 T, WS, RH만을 비교하였다. 그 결과, 지역 및 변수마다 약간의 차이는 존재하지만, 대체로 3DVAR의 결과값이 BASE에 비해 향상된 모의를 보였고, 서해남부에 비해 동해중부에서 높은 결과가 나타났다. IOA는 BASE에 비해 약 0.076까지 향상되었고, RMSE는 약 2.633 가량 낮아졌으며, MBE는 약 6.832까지 낮아졌다. 따라서 통계학적 방법을 통한 해무발생 예측 정확도 평가에서 관측자료 및 모델 결과값을 활용한 검증 결과를 비교·분석하여 단기 해양기상 예측자료의 유효성을 검토하고자 하였다.

Table 6. Statistical evaluation of the meteorological elements between the observed and model-predicted values (for the BASE and 3DVAR) at four monitoring sites in the southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea in the Korean Peninsula during July 2017 of the broad sea fog observed.

Site	Variable	BASE			3DVAR		
		IOA	RMSE	MBE	IOA	RMSE	MBE
Wolya	T	0.787	8.868	-1.256	0.787	8.865	-1.292
	WS	0.764	5.162	5.093	0.840	2.529	1.893
	RH	0.782	31.363	2.230	0.783	31.247	2.258
Muan	T	0.937	1.984	-1.244	0.937	1.968	-1.263
	WS	0.797	4.100	4.049	0.872	2.297	1.899
	RH	0.842	9.35	0.645	0.912	9.571	-6.187
Wonduk	T	0.945	2.806	-1.750	0.946	2.787	-1.948
	WS	0.809	2.466	1.729	0.801	2.552	1.608
	RH	0.942	11.479	-2.549	0.943	11.357	-2.211
Keumkangsong	T	0.936	3.147	-2.544	0.937	3.098	-2.528
	WS	0.778	3.923	3.940	0.776	4.015	3.774
	RH	0.925	13.892	10.353	0.927	13.618	9.767

3.2.1 Decision tree를 통한 예측

본 연구에서는 해무발생 가능성을 예측하기 위해 해무발생 빈도가 높은 해역을 선정하였으며, 서해남부와 동해중부해역에서 각각 총 4059시간, 1927시간 발생하여 두 해역을 중심으로 해무가 주로 발생한 계절인 봄, 여름철에 대해 통계학적 방법을 적용하였다. Fig. 16은 서해남부 해역의 봄철 해무발생 가능성을 예측하기 위해 작성한 Decision tree의 모식도이다. Decision tree의 입력 자료는 연구기간(2013~2017년) 동안 봄, 여름철 해무발생시 각 해양기상요소의 시간별 자료이며, 이를 이용하여 산출된 임계값(Fig. 3)을 기반으로 작성하였다. 먼저 입력 자료 평균(M) \pm 표준편차(SD)가 Highly Likely(HL)로 해무발생 가능성 높음, 해무발생시 최솟값 \sim M-SD, M+SD \sim 최댓값이 Likely(L)로 해무발생 가능성 존재, HL과 L 모두 포함되지 않을 경우 Not(N)으로 포함된다.

‘START’부터 시작해 WS, SST, T-SST, T-Td, RH 순으로 거치며, 차례대로 범위에 포함될 경우 ‘Yes’로, 포함되지 않을 시 ‘No’로 가게 된다. 최종적으로 ‘Highly Likely(해무발생 가능성 매우 높음)’ 및 ‘Likely(해무발생 가능성 있음)’로 예측한 두 가지 경우 모두 해무발생 가능성 예측으로 간주하였다. 또한, 예측 정확도를 산출하기 위해 2019년 봄, 여름철 자료 및 기상모델(WRF)의 결과값을 활용하여 검증하였다.

먼저 서해남부해역에 대해 작성된 Decision tree를 2019년 봄, 여름철 관측값으로 검증한 결과(Fig. 17), 봄에 HL이 약 47.6%, L이 약 39.5%로 총 해무발생 가능성은 약 87.0%이었으며, HL의 비율이 더 높았다. 반면, 여름엔 HL이 약 26.6%, L이 약 57.8%로 총 해무발생 가능성 예측률은 약 84.4%로 L의 비율이 더 높았다. 동해중부해역의 경우, 봄에 HL이 약 23.1%, L이 약 38.5%로 총 예측률은 약 61.6%로 서해남부에 비해 낮은 예측률을 보였으며, 여름에는 HL에 약 0.9%, L에 53.7%로 총 예측률이 54.6%이었으며, 가장 낮은 값을 보였다. 서해남부에 비해 동해중부가 낮은 예측률을 보인 것은 2019년도 해무발생 빈도가 서해남부에 총 560시간, 동해중부에 총 266시간으로 자료수가 약 2.1배 차이 나기 때문인 것으로 볼 수 있다. 즉, 해무발생에 유리한 조건인 임계값을 작성하기 위한 해무발생시 자료의 부족으로 다소 낮은 정확도를 보인 것으로 사료된다. 기상모

델(WRF) 결과값을 활용한 검증은, 서해남부에서 약 60.7%, 동해중부에서 약 82.5%의 예측률을 보였다. 이는 관측값(2013~2017년 봄, 여름철)에 대한 검증을 통해서 서해남부가 더 높은 예측률을 보였던 결과와 반대되는 양상을 보인 것을 알 수 있다. 이유는 WRF 모델링에 대한 통계검증 결과가 서해남부보다 동해중부해역에서 더 향상된 모의를 보였기 때문으로 사료된다.

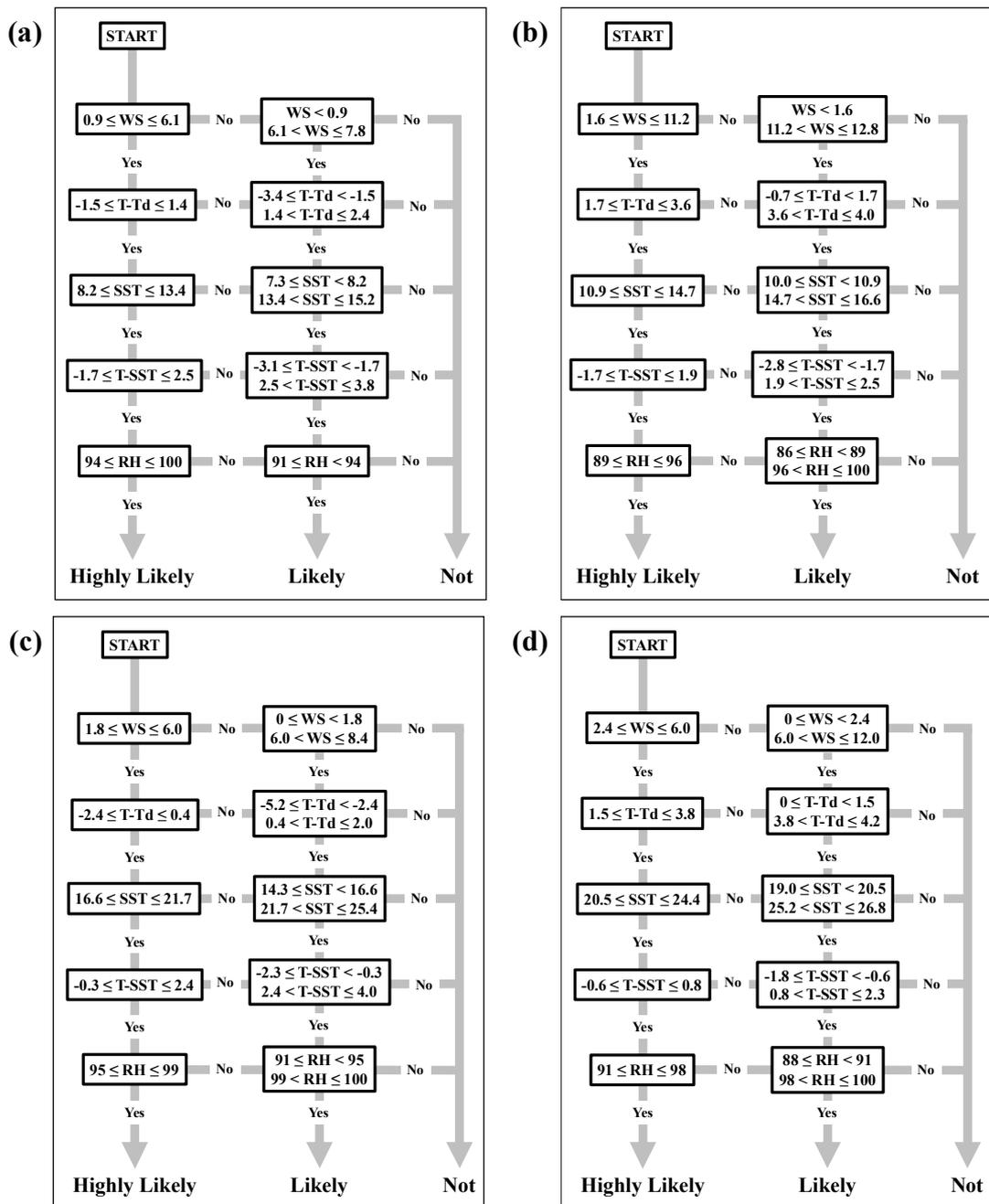


Fig. 16. Flow chart of decision tree fog for the prediction of sea for occurring (a) Southern part of the Yellow Sea in spring (b) Southern part of the Yellow Sea in summer (c) Middle of the East Sea in spring (d) Middle of the East Sea in summer.

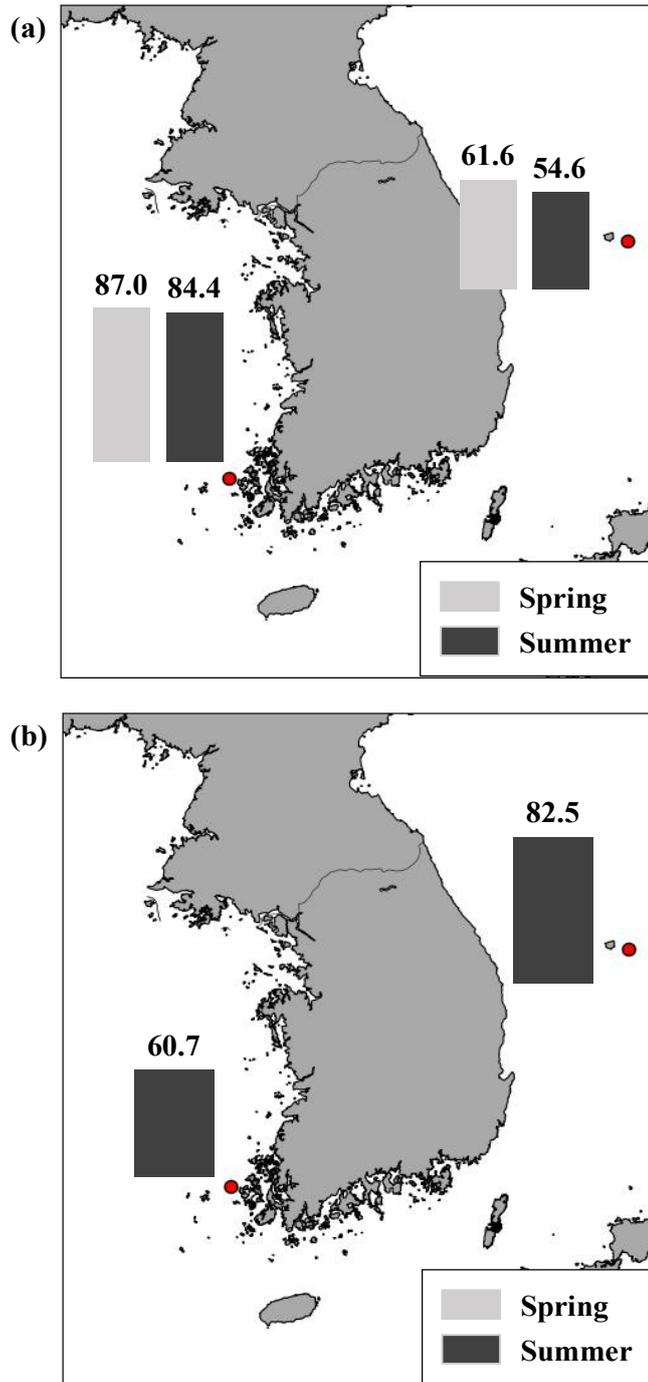


Fig. 17. Prediction accuracy of sea fog in Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea using Decision tree (a) observed data (2019) (b) weather model (WRF).

3.2.2 Data mining 기법을 통한 예측 및 검증

본 연구에서는 해무발생이 가장 빈번하게 나타난 서해남부 및 동해중부해역을 대상으로 해양기상요소간 상관관계 및 중요도를 산출하여 해무발생시 각 요소별 특성을 비교·분석하였으며, 다양한 Data mining 기법 중 Tree models와 Random Forest를 사용하여 해무발생을 예측 및 검증하였다. 먼저, 연구기간(2013~2017년)동안 해무발생시 두 해역의 봄과 여름철 해양기상요소 사이의 상관관계를 분석한 결과를 Table 7에 제시하였다. 전반적으로 서해남부에 비해 동해중부에서 상관계수가 상대적으로 높은 값을 보였으며, 우선 서해남부 봄철에 해기차(T-SST)와 습수(T-Td) 사이에 약 0.2967로, 상대적으로 가장 큰 양(+)의 값을 보였고, SST와 습수 사이에 약 -0.2167로 가장 큰 음(-)의 값을 보였다. 서해남부 여름철에는 해기차와 습수가 가장 큰 양(+)의 상관관계를 보였으며 상대습도와 풍속이 가장 큰 음(-)의 상관관계를 보였다. 동해중부 봄철의 경우 SST와 해기차가 약 -0.4547로 가장 큰 음(-)의 값을 보였고 해기차와 습수가 약 0.4212로 가장 큰 양(+)의 값을 보였다. 여름철에는 상대습도와 습수가 가장 큰 음(-)의 값을 보였고 SST와 습수는 약 0.2217로 양(+)의 값을 보였다.

Tree models 및 Random Forest에 대한 변수들의 특성 중요도를 산출하였다(Fig. 18). 그 결과 서해남부에서는 상대습도가 Tree models와 Random Forest에서 각각 약 0.72, 0.40으로 가장 높았으며, 동해중부에서는 습수가 각각 약 0.53, 0.35로 가장 높은 값이 나타났다. 이는 대기 중 수증기량이 많을수록 해무발생 가능성이 높은 조건임을 알 수 있다(Leem et al., 2005).

Tree models의 경우, 입력자료를 75%의 Train set(학습 데이터 세트) 및 25%의 Test set(검사 데이터 세트)로 무작위로 구분한 뒤, Train set를 이용하여 모델을 구축하였다. 그 후, Test set로 모델의 정확도를 시험한 결과, 서해남부는 약 90.2%, 동해중부는 약 96.1%로 높은 정확도를 보여 모델이 잘 구축되었음을 알 수 있었다. 따라서 구축된 Tree models에 2019년 봄, 여름철 자료로 해무발생 예측률을 검증하였다(Fig. 19). 먼저 서해남부해역에서 해무발생 가능성은 봄철에 약 93.5%, 여름철에 약 61.0%로 매우 큰 차이를 보였다. 반면 동해중부해역은 봄철에 약 98.2%, 여름철에 약 88.5%로 서해남부에 비해 높은 편이긴 하나 봄에

비해 여름철 해무발생 예측률이 약 9.7% 낮았다. 기상모델(WRF) 결과값을 활용한 검증은 서해남부의 경우 약 45.3%로 다소 낮은 정확도를 보였으나, 동해중부의 경우 약 86.7%로 비교적 높은 정확도가 나타났다.

앙상블 기법인 Random Forest의 경우 모델 구축 방법은 Tree models와 동일한 방법을 사용하였으며, Test set에 대한 모델 정확도는 서해남부에서 약 93%, 동해중부에서 약 96.7%로 높은 값을 보였다. 2019년 봄, 여름철에 대한 Random Forest의 해무발생 예측률을 보면(Fig. 20), 서해남부의 경우 봄에 약 93.3%, 여름에 59.8%의 예측률을 보였다. 동해중부의 경우 봄에 약 98.4%, 여름에 89.2%로 서해남부에 비해 높은 예측률을 보였다. Random Forest의 경우 서해남부가 약 48.8%, 동해중부가 약 88.9%로, 서해남부에서는 Decision tree에 비해서 낮지만 Tree models에 비해 높은 값을 보였고, 동해중부에서는 두 모델보다 높은 예측률을 보였다. 기상모델(WRF) 결과값을 활용한 검증은 서해남부의 경우 약 48.8%, 동해중부의 경우 약 88.9%로 Tree models에 비해 약 2.2~3.5%가량 높아지긴 했으나, 서해남부의 정확도는 여전히 낮게 나타났다.

세 가지 통계학적 기법을 이용해 해무발생 가능성을 예측하고 관측자료 및 기상모델(WRF) 결과값을 활용하여 검증하였다(Table 8). 전반적으로 기상모델의 결과값을 활용한 검증 결과가 서해남부 해역이 동해중부 해역보다 낮은 값을 보였다. 이는 각 해역의 지점마다 결과값을 도출하는 격자 개수의 차이 때문이다. 서해남부 해역의 관측 지점인 흑산도 전체 면적은 약 $19.8m^2$ 이고, 동해중부 해역의 관측 지점인 울릉도는 전체 면적이 약 $72.56m^2$ 이다. 따라서 섬을 포함한 그 주위 격자를 추출해내기 때문에 땅 면적의 차이 및 격자 개수의 차이로 인한 것으로 추정된다.

Table 7. Correlation among marine weather factors on sea fog in Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea.

(a)

Elements	WS	RH	SST	T-SST	T-Td
WS	1.0000				
RH	-0.1402	1.0000			
SST	0.0262	0.0340	1.0000		
T-SST	0.2093	0.2130	-0.0437	1.0000	
T-Td	0.1968	-0.0284	-0.2167	0.2967	1.0000

(b)

Elements	WS	RH	SST	T-SST	T-Td
WS	1.0000				
RH	-0.1145	1.0000			
SST	0.0437	-0.0208	1.0000		
T-SST	0.2368	0.1810	-0.1102	1.0000	
T-Td	0.1590	-0.0918	0.0007	0.3032	1.0000

Table 7. (continued)

(c)

Elements	WS	RH	SST	T-SST	T-Td
WS	1.0000				
RH	-0.1605	1.0000			
SST	0.1270	-0.0352	1.0000		
T-SST	0.2100	0.2310	-0.4547	1.0000	
T-Td	0.2116	0.0522	0.0727	0.4212	1.0000

(d)

Elements	WS	RH	SST	T-SST	T-Td
WS	1.0000				
RH	-0.2315	1.0000			
SST	-0.1278	-0.0055	1.0000		
T-SST	0.1967	0.1329	0.0288	1.0000	
T-Td	0.1807	-0.5520	0.2217	-0.2129	1.0000

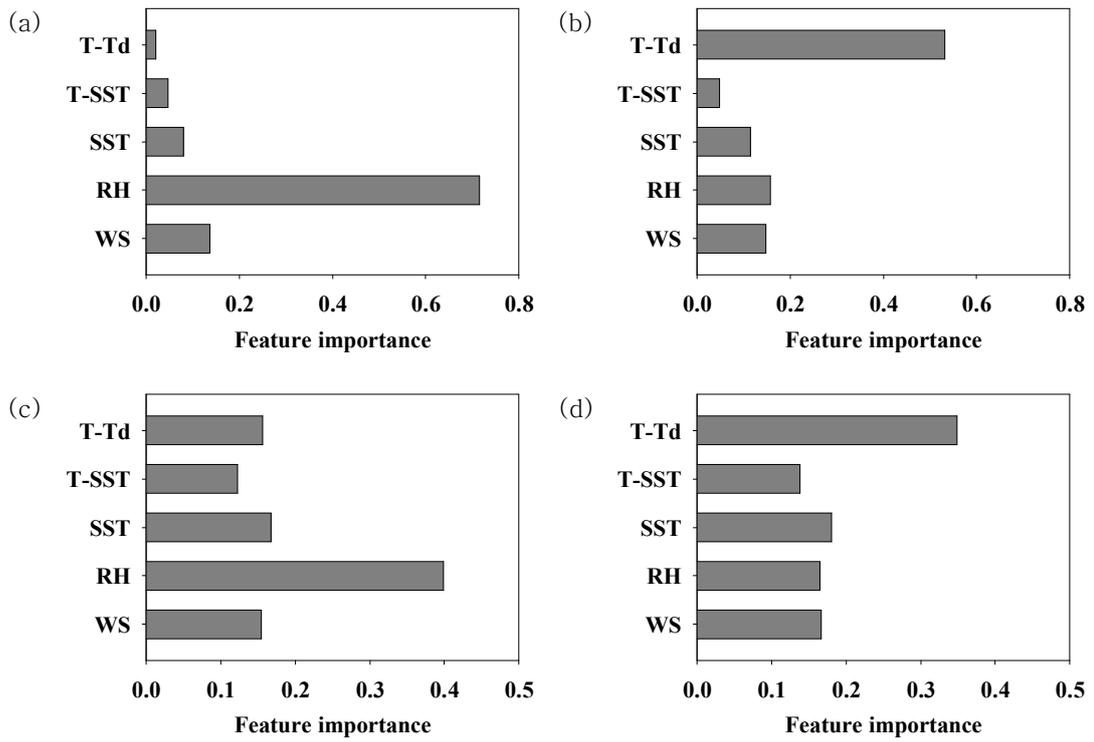


Fig. 18. Features importance among marine weather factors on sea fog (a) Tree models in Southern part of the Yellow Sea (b) Tree models in Middle of the East Sea (c) Random Forest in Southern part of the Yellow Sea (d) Random Forest in Middle of the East Sea.

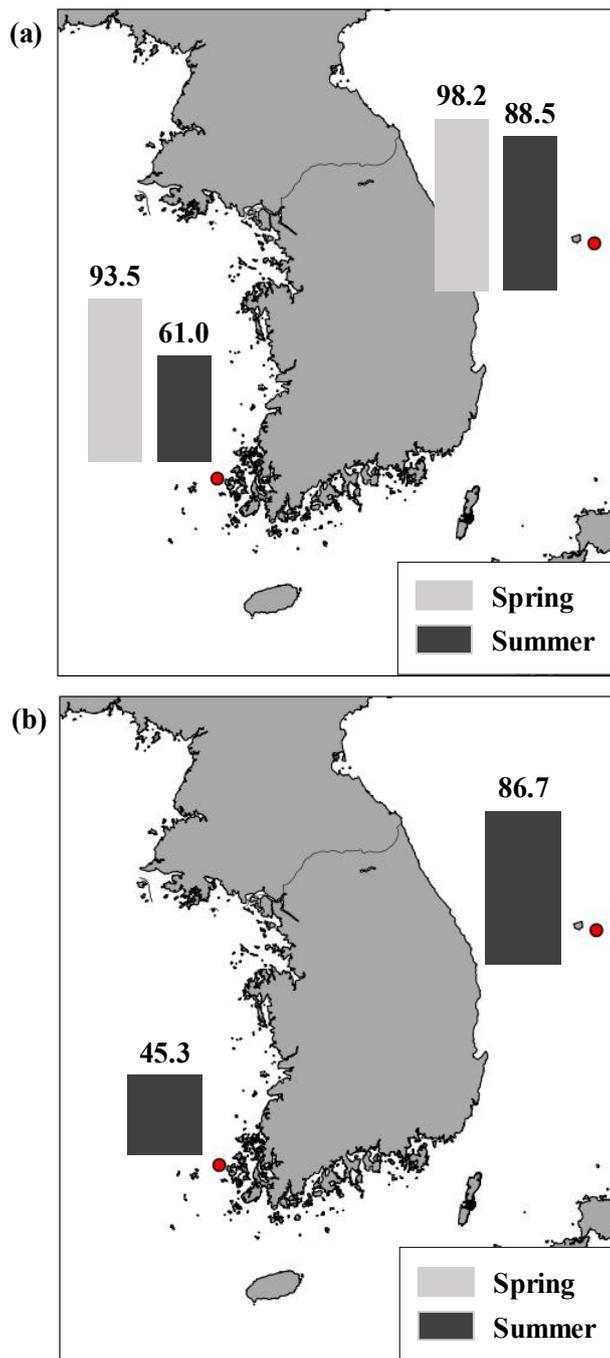


Fig. 19. Same as Fig. 17 but for Tree models.

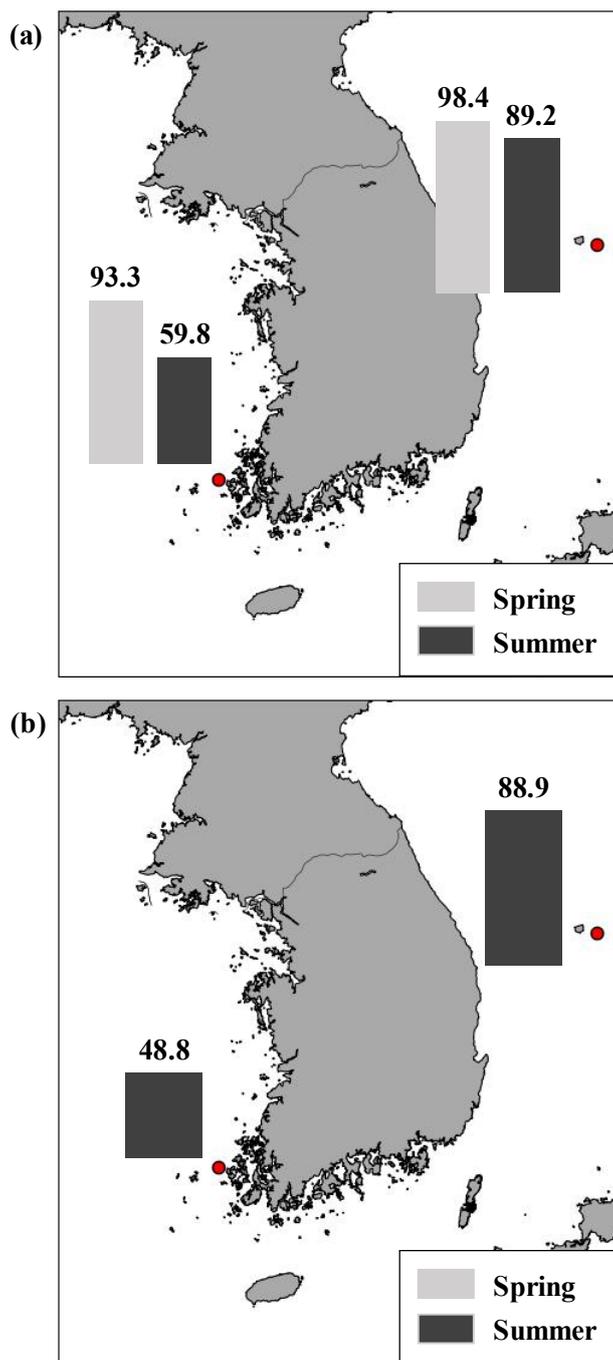


Fig. 20. Same as Fig. 17 bur for Random Forest.

Table 8. Comparison of the verification of three statistical models (Decision tree, Tree models, Random Forest) in the Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea.

statistical models	verification data	SWS	MES
Decision tree	2019 Spring	87.0%	61.6%
		Summer	84.4%
	WRF	60.7%	82.5%
Tree models	2019 Spring	93.5%	98.2%
		Summer	61.0%
	WRF	45.3%	86.7%
Random Forest	2019 Spring	93.3%	98.4%
		Summer	59.8%
	WRF	48.8%	88.9%

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 연구기간(2013~2017년)동안 한반도에서 발생하는 해무의 특성을 분석하기 위해 해양기상요소 특징을 해역별로 비교·분석하였으며, 여러 가지 통계학적 기법을 적용하여 해무발생 가능성을 예측 및 검증하였다.

전반적으로 7개 해역(서해 중·남부, 남해 서·동부, 동해 중·남부, 제주남부)에 대해 해무발생 빈도를 분석한 결과, 서해남부에서 총 4059시간으로 가장 많이 발생하였고, 다음으로 동해중부에서 총 1927시간으로 많이 발생하였으며, 전체 발생 빈도 중 서해남부가 약 52%, 동해중부가 약 24.7%의 비율을 차지하였다. 계절별 발생 빈도를 보면, 봄(3~5월)과 여름철(6~8월)에 가장 많이 발생하였으며, 특히 7월에 모든 해역에서 가장 높은 빈도를 보였다.

해무가 가장 많이 발생한 계절인 봄, 여름에 대해 서해 중·남부, 남해 서·동부, 동해중부, 제주남부해역을 대상으로 해양기상요소(기온, SST, 해기차, Td, 습수, 바람)에 대해 해무발생시 해역별 특성 및 전체 평균과 비교하여 분석하였다. 봄철 해무는 모든 해역에서 대체로 기온이 전체 평균에 비해 높고, SST는 전체 평균과 비슷할 때 발생하였으며, 해기차는 기온이 SST보다 약 $-0.04\sim 2.02^{\circ}\text{C}$ 차이날 때 발생하였다. 여름철에는 기온이 전체 평균과 비슷하였으나 SST가 전체 평균보다 낮았고, 해기차가 $-0.04\sim 5.13^{\circ}\text{C}$ 차이날 때 해무가 발생하였다. 특히 서해남부에서는 여름철 강하게 형성되는 조석 전선에 의해 낮은 SST를 보이고, 남해동부에서는 지속적으로 불어오는 고온다습한 성질의 남풍에 의해 주변수에 비해 약 3°C 낮은 SST를 보였다. 그러므로 두 해역에서는 SST가 낮을수록 해무발생 가능성이 높을 것으로 추정된다.

Td는 기온과 유사한 패턴이 나타났으며, 봄과 여름철에 전체 평균에 비해 해무발생시 온도가 더 높았으며, 습수는 두 계절 모두 약 2°C 내로 낮은 차이를 보였다. 이는 대기 중 수증기 상태를 나타내는 상대습도가 약 91.9~98.6%로 매우 높은 것으로 보아 해무발생시 수증기량이 충분히 존재하였음을 알 수 있다.

풍속은 전반적으로 해무발생시 전체 평균보다 낮게 나타났고 약 4m/s 내외로

불었다. 한 편, 봄철에는 동해중부와 제주남부에서 각각 약 6.75m/s, 5.52m/s가, 여름철에는 서해남부와 동해중부가 각각 약 4.33m/s, 5.71m/s로 전체 평균보다 강하게 불었는데 이는 관측 지점의 지형적 특성상 도서 지역은 일반적으로 풍속이 강하며, 동해중부의 경우 다른 해역에 비해 바람이 다소 강하게 불 때 해무발생 확률이 높게 나타나기 때문이다. 주풍은 봄철에 서해남부와 남해서부에서 북풍 계열, 서해중부, 남해동부 및 동해중부에서는 남풍계열, 제주남부는 서풍이 불어왔다. 또한, 여름철에는 서해중부, 남해동부, 동해중부, 제주남부에서 주로 남~남서풍 계열, 서해남부와 남해서부에서는 남동풍 계열이 불어왔다. 이로 미루어 볼 때 전 해역에서 주로 남풍계열의 바람이 불어온 것을 알 수 있으며, 남해상 고온다습한 공기가 바람을 통해 각 해역으로 유입되어 수증기가 공급 되었으므로 추정된다.

이류무 및 증기무 발생 빈도를 보면, 봄과 여름철 모두 주로 이류무가 증기무에 비해 더 많은 발생률을 보였다. 반면 봄철 남해동부의 경우 이류무와 증기무가 각각 약 46.1%, 49.2%로 증기무 발생률이 더 높게 나타났고, 여름철 제주남부의 경우 유일하게 이류무가 100% 비율로 발생하였다. 따라서 한반도 전 해역적으로 주로 이류무가 발생함을 알 수 있었다.

해무발생 가능성을 예측하기 위해 전 해역중 해무가 가장 많이 발생한 해역인 서해남부 및 동해중부해역을 대상으로 통계학적 방법(Decision tree, Tree models, Random Forest)을 적용하였다.

데이터 마이닝 기법 중 Tree models 및 Random Forest를 사용하여 해무발생을 예측하고자 하였다. 모델을 구축하기 전, 자료의 전처리 과정인 이상치(outlier) 제거 및 결측값 제거, 모델의 과적합(overfitting) 방지를 위한 사전 가지치기(pre-pruning) 단계를 거쳤다. 그 후, 입력자료(2013~2017년)를 75%의 Train set(학습 데이터 세트)와 25%의 Test set(검사 데이터 세트)로 구분하는 층화 무작위 추출을 통하여 Tree models 및 Random Forest를 구축하였다. 구축된 모델에 대해 Test set 및 2019년 봄·여름철 관측값 자료를 이용하여 검증하였으며, 모델링을 통한 예측 및 검증을 위해 기상모델(WRF)의 결과값을 활용하여 검증을 수행하였다. WRF는 보다 정확한 결과값 도출을 위해 초기장을 개선하는 3차원 변분자료동화인 3DVAR를 수행하였으며, 오차를 줄이기 위해 Cycling 방

법을 적용하였다. 그 결과, 자료동화를 적용하지 않은 BASE에 비해 3DVAR를 적용하였을 때 향상된 모의 결과를 보였다.

먼저 입력자료(2013~2017년)의 해무와 관련된 해양기상요소(WS, SST, T-SST, T-Td, RH)간 상관관계(correlation)에서 서해남부 및 동해중부에서 해기차(T-SST)와 상대습도(RH)가 약 0.612와 0.643, 습수(T-Td)와 RH가 약 -0.791과 -0.781로 높은 상관관계를 보였다. 이는, 해기차 값이 클수록, 습수가 낮을수록 해무발생 조건에 적합함을 의미한다. 또한, 해양기상요소의 중요도(feature importance)를 보면, 서해남부해역은 상대습도가, 동해중부해역은 습수가 해무발생에 중요한 변수임을 알 수 있다.

Decision tree의 경우 관측값을 통한 검증은 서해남부가 봄, 여름철에 각각 약 84.4%, 87.0%로 동해중부에 비해 더 높은 예측률을 보였으며, WRF 결과값을 통한 검증은 동해중부가 약 82.5%로 더 높은 예측률을 보였다. Tree models 및 Random Forest 모두 관측값을 통한 검증은 각각 약 88.5~98.2%, 약 89.2~98.4%로 높게 나타났다(서해남부 여름철 제외). 모델값을 통한 검증은 50% 미만의 예측률을 보인 서해남부에 비해 Tree models가 약 86.7%, Random Forest가 약 88.9%로 동해중부에서 더 정확한 예측률을 보였다. 따라서 검증 결과는 전반적으로 Decision tree를 제외한 동해중부해역에서 발생하는 해무에 대해 높은 예측률을 보였다. 서해남부에서는 봄철에 대한 예측률은 비교적 높은 값을 보인 반면, 가장 많은 해무발생 빈도가 나타난 여름철에 가장 낮은 예측률을 보인 것을 알 수 있다. 또한, 기상모델 결과값을 활용한 검증에서 동해중부해역의 정확도가 높게 나온 것은 기상모델 통계검증 결과에서 서해남부에 비해 동해중부 해역에 대한 수치모의가 더 향상되었기 때문으로 사료된다.

우리나라는 삼면이 바다로 이루어져 있어 대기 중 수증기 수송에 유리하므로, 안개가 잦게 형성되는 지형적 특성을 가지고 있으며, 4계절 다양한 형태의 안개가 발생한다. 또한, 해무는 대기의 중규모 흐름이 고려된 기상 현상이기 때문에 대기-해양 상호작용 및 기압계(고·저기압) 위치, 지상일기도 분석, SST의 시·공간적 분포 및 흐름 등에 대한 이해도 매우 중요하다. 본 연구는 한반도 연안해역에서 발생하는 해무에 대한 해역별 특성 이해를 도울 수 있을 것으로 사료된다. 뿐만 아니라, 대기 및 해양에 걸쳐 복잡한 형성 요인으로 형성되는 해

무에 대한 예측을 시도했다는 점에서 의미가 있다. 향후 해무와 관련된 다양한 기상인자에 대한 기압계, 일기도 등을 활용한 분석 및 예측이 필요하며 개선된 데이터 마이닝 기법인 신경망을 이용하여 향상된 해무 예측모델의 개발과, 기상 모델의 향상된 예측 기술을 적용하여 보다 정확한 자료를 활용한 검증이 필수적이다.

참 고 문 헌

- 국립기상과학원, 2014, WRF-LES 구축 및 평가
- 김문옥, 1998, 한반도 주변 해역의 해무분포 특성, 전남대학교 석사학위 논문, 63pp
- 반기성, 2003, 겨울철 항공기 운항에 영향을 주는 기상요소(청주, 강릉, 김해, 예천, 군산 공항 기상특성), 한국항공협회, 항공진흥(4), 148-174.
- 박형식, 2020, 한반도 서해안 안개예측을 위한 3차원 변분자료동화 및 분석넷징 효과 분석, 제주대학교 지구해양학과 석사학위 논문, 11pp
- 안중배, 이해진, 2000, 중규모 해양모형을 이용한 한반도 주변 해역 해양순환 재현, 한국해양학회지 바다, 5, 186-194.
- 최종후, 서두성, 1999, 데이터마이닝 의사결정나무의 응용, 통계분석연구, 4(1), 61-86
- 허기영, 하경자, 2004, 한반도 연안 안개의 발생과 연관된 종관 기압계 분류, 한국기상학회지, 40, 541-556.
- 해양경찰청, 2018: 2018년 해상조난사고 통계연보
- 해양경찰청, 2019: 2019년 해상조난사고 통계연보
- Bowman, M. J., W. E. Esaias, 1997, Oceanic fronts in coastal process, Springer-Verlag, 114.
- Breiman, L., 2001, Random forests, Machine Learning, 45, 5-32.
- Cho, Y. K., Kim, M. O., Kim, B. C., 2000, Sea Fog around the Korean Peninsula, J. Appl. Meteor. Soc., 39, 2473-2479.
- Choi, G. Y., 2018, Spatio-temporal Patterns and Long-term Trends of Apparent Temperature in Jeju Island, Korea, Journal of the Association of Korean Geographers, 7(1), 29-41
- Choi, H., Kim, J. W., Takahashi, S., 1998, Three-dimensional numerical prediction of fog formation over coastal complex terrain, J. Korean

- Meteorol. Soc., 34, 319-335.
- Choi, H., Speer, M. S., 2006, The influence of synoptic-mesoscale winds and sea surface temperature distribution on fog formation near the Korean western peninsula, *Meteorol. Appl.*, 13(4), 347-360.
- Desroziers, G., Ivanov, S., 2001, Diagnosis and adaptive tuning of observation error parameters in a variational assimilation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(574), 1433-1452.
- George, Joseph, J., 1951, *Fog, Compendium of meteorology.*, American Meteorological Society, Boston, MA, 1179-1189.
- Heo, K. Y., Ha, K. J., Mahrt, L., Shim, J. S., 2010, Comparison of advection and steam fogs: From direct observation over the sea, *Atmospheric research*, 98(2-4), 426-437.
- Hong, Song-You, Hua-Lu Pan., 1996, Nonlocal Boundary Layer Vertical Diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Hong, Song - You, Jimy Dudhia, and Shu - Hua Chen., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103 - 120.
- Hwang, Y. J., Ha, J. C., Kim, Y. H., Kim, K. H., Jeon, E. H., Chang, D. E., 2011, Observing System Experiments Using KLAPS and 3DVAR for the Upper-Air Observations over the South and West sea during Probex-2009, *J. Korean Meteorol. Soc.*, 21(1), 1-16.
- Jeong, H. D., Kwoun, C. H., Kim, S. W., Cho, K. D., 2009, Fluctuation of Tidal Front and Expansion of Cold Water Region in the Southwestern Sea of Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 15(4), 289-296.
- 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, *J. Korean Meteorol. Soc.*, 34, 486-496.

- Kain, J. S. and J. M. Fritsch., 1993, Convective parameterization for mesoscale models; The kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models, Meteor Monogr, American Meteorological Society, 24, 165-170.
- Kamila. Pawlusezek-Filipiak and Andrzej Borkowski, 2020, On the Importance of Train-Test Split Ratio of Datasets in Automatic Landslide Detection by Supervised Classification, Remote sensing, 12(18), 3054.
- Kim, D. Y., Lee, S. D., Kim, J. Y., Woo, J. T., Oh, J. H., 2006, Study on Characteristics of Fog in the Coastal Area of Mokpo, Journal of Environmental Sciences, 15(7), 623-634.
- Kim, J. S., Kim, J. H., Park, S. H., Kim, Y. C., 2013, The Study of Characteristics of Korea Fog and Forecast Guidance, Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 21(1), 68-73.
- Kim, K. J., Park, S. Y., Ko, J. M., Kim, Y. T., Kim, M. H., 2015, Cause of Rapid Decline in Sea Surface Temperature Near the Southeast Coast of Korea in Summer 2014, Korean Journal of Hydrography, 4(1), 45-52.
- Kim, Y. T., Han, C. K., Kim, K. J., Kim, H. K., Kim, Y. N., 2017, Preliminary Investigation of Oceanographic and Meteorological Conditions before and after Sea Fog Formation around Busan Harbor, Korean Journal of Hydrography, 6(2), 43-50.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2010, <http://www.kma.go.kr/aboutkma/biz/observation07.jsp>
- Lee, E. B., Yun, J. H., Chung, S. T., 2012, A study on the development of the response resource model of hazardous and noxious substances based on the risks of marine accidents in Korea, Journal of Navigation and Port Research, 36(10), 857-864.
- Lee, H. D., Ahn, J. B., 2013, Study on Classification of Fog Type based on Its Generation Mechanism and Fog Predictability Using Empirical

- Method, Atmospheric. Korean Meteorological Society, 23(1), 103-112.
- Lee, H. W., Lee, D. G., Lee, T. Y., Kim, Y. K., Won, G. M., Han, H. W., 1998, A Numerical Simulation for Flow Current in Coastal Urban Area, Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 34(1), 75-86.
- Lee, H. W., Ji, H. E., Lee, S. H., 2009, A Study of Interrelationships between the Effect of the Upwelling Cold Water and Sea Breeze in the Southeastern Coast of the Korean Peninsula, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(6), 481-492.
- 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, Journal of Geophysical Research. Atmospheres, 115(D14).
- Leem, H. H., Lee, H. W., Lee, S. H., 2005, The Analysis of the Characteristics of the Fog Generated at the Incheon Intl Airport, Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 41(6), 1111-1123.
- Leipper, D. F., 1994, Fog on the U.S. west coast: A review, Bulletin of the Amer. Meteor. Soc., 75(2), 229-240.
- Lindner, B. L., Mohlin, P. J., Caulder, A. C., Neuhauser, A., 2018, Development and Testing of a Decision Tree for the Forecasting of Sea Fog Along the Georgia and South Carolina Coast, J. Operational Meteor., 6(5), 47-58.
- Lorenz, E. N., 1963, Deterministic nonperiodic flow, Journal of the atmospheric sciences, 20(2), 130-141.
- Moon, J. H., Hirose, N., Yoon, J. H., 2009, Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea, Journal of Geophysical Research: Oceans, 114(C8).
- Park, M. O., Lee, Y. W., Ahn, J. B., Kim, S. S., Lee, S. M., 2017, Spatiotemporal Distribution Characteristics of Temperature and Salinity in the Coastal Area of Korea in 2015, Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy, 20(4), 226-239.

- Park, S. H., Song, S. K., Park, H. S., 2020, Temporal and Spatial Variations of Marine Meteorological Elements and Characteristics of Sea Fog Occurrence in Korean Coastal Waters during 2013–2017, *Journal of Environmental Science International*, 29(3), 257–272.
- Parrish, D. F., Derber, J. C., 1992, The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review*, 120(8), 1747–1763.
- Ramon, D. U., Sara, A. A., 2006, Gene selection and classification of microarray data using random forest, *BMC Bioinformatics*, 7(1), 3.
- Seo, B. K., Byon, J. Y., Lim, Y. J., Choi, B. C., 2015, Evaluation of Surface Wind Forecast over the Gangwon Province using the Mesoscale WRF Model, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36(2), 158–170.
- Seo, J. W., Oh, H. J., Ahn, J. B., Youn, Y. H., 2003, A study on Prediction System of Sea Fogs in the East Sea, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8(2), 121–131.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhla, J. Y., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X. Y., 2019, A Description of the Advanced Research WRF Model version 4, National Center for Atmospheric Research, www.ucar.edu.
- Wang, H., Huang, X. Y., Sun, J., Xu, D., Fan, S., Zhong, J., Zhang, M., 2013, Background Error Modeling for WRF-Var using the NMC method, *Journal of Applied Mathematics and Computing*.
- Won, D. J., Kim, S. Y., Kim, K. E., Min, K. D., 2000, Analysis of Meteorological and Oceanographic Characteristics on the Sea Fog over the Yellow Sea, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 36(6), 631–642.
- WRF-ARW V3: User's Guide, 2015
- Yoon, Y. H., Park, J. S., Park, Y. G., Noh, I. H., 2007, Marine environment and the distribution of phytoplankton community in the southwestern sea of Korea in summer 2005, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 10(3), 155–166.

A study on the construction of sea fog observation and
prediction guidance in the coastal sea areas of the
Korean Peninsula

So-Hee Park

*Faculty of Earth and Marine Convergence, Earth and
Marine science, Graduate School, Jeju National University,
Jeju, Korea*

Abstract

This study compared the characteristics of marine meteorological elements(T, SST, T-SST, Td, T-Td, WS, WD) by the coastal sea areas of South Korea when the sea fog occurred using hourly data observed at Automated Synoptic Observing System (ASOS) (7 sites), marine meteorological buoys (4 sites), Automatic Weather System on lighthouse (lighthouse AWS) (2 sites) during 2013~2017.

It occurred generally the most in the southern part of the Yellow Sea, secondly Middle of the East Sea. It also occurred the most in summer out of

all seasons (spring~winter), especially in July. The Southern part of the East Sea was excluded because there was very little time sea fog (14 hours). In the event of a sea fog, the spring temperature and SST showed the highest and lowest temperatures, and most sea fog events showed a value of positive (+) (excluding the Middle of the Yellow Sea), and there were mostly advection fog (excluding the Middle of the East Sea). Td, T-Td, RH were higher than the seasonal average in all the coastal sea areas, because sufficient water vapor was supplied in the atmosphere. In the summer, T and SST showed various changes and T-SST was similar or larger than the seasonal average. In the summer, air temperature and SST showed various changes, and the thawing car was similar to or larger than the seasonal average. Thus there has been an advection fog in all the coastal sea areas. Most of the dominant wind direction was south~south west series in the event of a sea fog, and the wind speed was weak in Middle and Southern part of the Yellow Sea, western and eastern part of the South Sea, whereas strong in the Middle of the East Sea and Southern part of the Jeju Island.

This study predicted the possibility of the sea fog by applying statistical techniques such as Decision tree, Tree models, and Random Forest to the Southern part of the Yellow Sea and Middle of the East Sea, where the sea fog most frequently occurred. And it was verified using the 2019 year observation data and WRF (weather research and forecasting) model. As a result, the prediction accuracy of the observation data (2019) was higher than in Southern part of the Yellow sea in the case of Decision tree. In the case of Tree models and Random Forest, it was generally high except for the summer in the Southern part of the Yellow Sea. Verification using WRF.