

## 드론을 활용한 한반도 서해 연안의 해무 연직구조 분석

전혜림<sup>1)\*</sup> · 박미은<sup>1)</sup> · 이승협<sup>1)</sup> · 박미르<sup>1)</sup> · 이용희<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 예보연구부, <sup>2)</sup>국립기상과학원 기상응용연구부

(접수일: 2022년 7월 25일, 수정일: 2022년 9월 27일, 게재확정일: 2022년 10월 28일)

## Analysis on Vertical Structure of Sea Fog in the West Coast of the Korean Peninsula by Using Drone

Hye-Rim Jeon<sup>1)\*</sup>, Mi Eun Park<sup>1)</sup>, Seung Hyeop Lee<sup>1)</sup>, Mir Park<sup>1)</sup>, and Yong Hee Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>High Impact Weather Research Laboratory, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Korea

<sup>2)</sup>Meteorological Applied Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea

(Manuscript received 25 July 2022; revised 27 September 2022; accepted 28 October 2022)

**Abstract** A drone has recently got attention as an instrument for weather observation in lower atmosphere because it can produce the high spatiotemporal resolution weather data even though the weather phenomenon is inaccessible. Sea fog is a weather phenomenon occurred in lower atmosphere, and has observational limitations because it occurs on the sea. Therefore, goal of this study is to analyze the vertical structures about inflow, development and dispersion of sea fog using the high-resolution weather data with the meteorological sensor-equipped drone. This study observed sea fogs in the west coast of the Korean peninsula from March to October 2021 and investigated one sea fog inflowed into the coast on June 8th 2021.  $\theta_e - q_v$  diagrams ( $\theta_e$ : equivalent potential temperature,  $q_v$ : water vapor ratio) and vertical wind structures were analyzed. At inflow of sea fog, moist adiabatically stable layer was formed in 0–300 m and prevailing wind was switched from south-southwesterly to west-southwesterly under 120 m. Both changes are favorable for sea fog on the location.  $\theta_e$  and  $q_v$  plummeted in a layer 0–183 m. The inflowed sea fog developed from 183 m to 327 m by mixing with ambient atmosphere on top of sea fog. Also, strong mechanical turbulence near ground drove a vertical mixing under stable layer. At dispersion of sea fog, as  $\theta_e$  on ground gradually increased, air condition was changed to neutral. Evaporation occurred on both bottom and top in sea fog. These results induced dissipation of sea fog.

**Keywords:** Drone, Sea fog, Vertical structure, Lower atmosphere, High spatiotemporal resolution

### 1. 서 론

드론은 이동이 용이하여 맵핑, 점검, 감시, 측정 등 다

양한 방법으로 연구에 활용되고 있는 장비이다. 최근 기상 분야에서는 드론에 기상 센서를 부착하여 대기하층의 연직 기상 관측을 목적으로 적극 활용하고 있다. Hemingway et al. (2017)은 소형 드론의 암(Arm)에 기상 센서를 부착하여 대기하층의 기온과 습도에 대한 연직 관측 공간 해상도를 결정짓는 실험을 수행하였고, Brody et al. (2017)은 드론의 암에 기온과 습도 센서를 부착하고 바람에 의해 기울어진 드론의 자세자료를 통해 150 m 이하의 연직 대기에 대한 풍향, 풍속을 추정하여 라

\*Corresponding Author: Hye-Rim Jeon, High Impact Weather Research Laboratory, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, N10-707, 7, Jukheon-gil, Gangneung 25457, Korea.  
Phone: +82-33-913-1065, Fax: +82-33-644-2657  
E-mail: rimmy123@korea.kr

이다와 비교하였다. 또한 Chong et al. (2019; 2020)은 드론 위에 통합기상센서를 탑재하여 안개와 해륙풍에 대한 기상인자를 관측하여 대기하층을 분석하였고, Kwak et al. (2020)은 드론 하부에 센서를 탑재하여 기상 타워와 비교 관측을 수행하여 낮 동안의 대기경계층 발달에 대해 연구하였다. 기상 분야에서의 이러한 시도는 대기하층에 대한 연직 고해상도(1~3 m)의 기상 관측이 가능하고, 또한 기존 연직 기상 관측 장비(타워, 레윈존데, 윈드프로파일러 등)가 갖는 단점을 보완할 수 있다. 타워는 연속적인 자료를 생산할 수 있는 장점이 있는 반면, 한 장소에 고정되어 있고 센서가 띄엄띄엄 있으며, 타워의 높이로 연직 자료가 제한되는 단점이 있다. 레윈존데는 관측 장소가 유연하고 고층대기까지 관측할 수 있는 장점이 있으나, 바람에 따라 수평으로 이동하며 상승하기 때문에 한 지점을 대표하는 연직자료로 보기 어렵다. 윈드프로파일러는 지상에 고정된 고층 관측 장비로 약 고도 100 m에서부터 자료가 생산되어 지면과 인접한 최하층대기의 자료공백이 있고, 주변 지형의 영향을 받아 대기하층에서의 자료가 부정확하다(Kim et al., 2015). 반면 드론은 이동이 용이하여 목표지점에 대한 관측이 가능하고 목적에 따라 정지비행 또는 연직비행 등 비행 방법을 설정하여 관측할 수 있다. 또한 드론사양 내에서 원하는 고도와 해상도로 연직관측 가능하며, 도입 및 유지관리 비용이 상대적으로 다른 장비에 비해 저렴하여 경제적이란 장점이 있다.

안개는 대기하층 기상현상 중 하나로 발생 메커니즘이 다양하고 복잡하여 예측이 어렵다. 2020년 한국교통연구원은 5년간(2015~2019년) 기상에 의한 항공기 지연을 시정, 눈, 태풍, 바람 등 원인 별 세부 분석한 결과, 안개로 인한 시정 악화가 가장 큰 비중을 차지함을 밝혔고, 2020년 안개로 인한 교통사고의 치사율이 눈, 비 등 다른 기상현상보다 높은 4.8(눈 2.0, 비 2.0)임을 밝혔다(Kim et al., 2020; KoROAD, 2021). 특히 해상에서 발생하는 안개인 해무는 해상은 물론 연안의 도로와 항공 교통 등에 상당한 불편을 끼친다. 2018년 기상청은 기상요인에 의한 여객선 사고의 원인 중 해무가 가장 큰 부분을 차지함을 밝혔다(KMA, 2018). 해무로 인한 피해를 최소화하기 위해 해무를 정확히 예측하는 것이 중요하나, 예측 정확도를 높이기 위해서는 해무의 발생 또는 유입, 발달, 소산에 대한 메커니즘의 파악이 필요하다. 해무는 해상에서 발생하는 특성상 지상 관측 장비로부터의 자료 생산은 공간적 제약이 따른다. 이로 인해 해무 관측자료의 수평 또는 연직해상도가 떨어져 해무 메커니즘에 대한 이해가 부족하고, 수치 모의를 통한 해무 예측 성능 또한 떨어진다. 따라서 모델의 해무 메커니즘 및 초기 입력자료 개선을 위해 해무 발생시 고해상도의 연직관측자료 생산은 매우 중요하다.

일반적으로 해무는 공기가 다른 온도를 가지는 해면 위로 이동하여 발생하는 이류 안개이다. 따뜻한 공기가 차가운 해면 위로 이동하여 발생한 해무를 차가운 해무 또는 따뜻한 이류 안개, 차가운 공기가 따뜻한 해면 위로 이동하여 발생한 해무를 따뜻한 해무 또는 차가운 이류 안개라고 부른다(Taylor, 1917; Lee et al., 2021). 따뜻한 이류 안개는 따뜻하고 습윤한 공기가 차가운 해면 위로 이동하여 안정한 층을 형성하고, 해면과 인접한 대기가 냉각되어 포화에 이르러 발생한다. 반면, 차가운 이류 안개는 따뜻한 대기에 갑작스러운 풍향의 변화로 차가운 공기가 이류되어 대기를 냉각시키고, 상대적으로 따뜻해진 해수로부터 증발이 활발히 일어나 형성된다(Heo et al., 2010). 즉, 해무 메커니즘의 이해를 위해 공기의 유입에 따른 혼합과정을 파악하는 것이 중요하다.

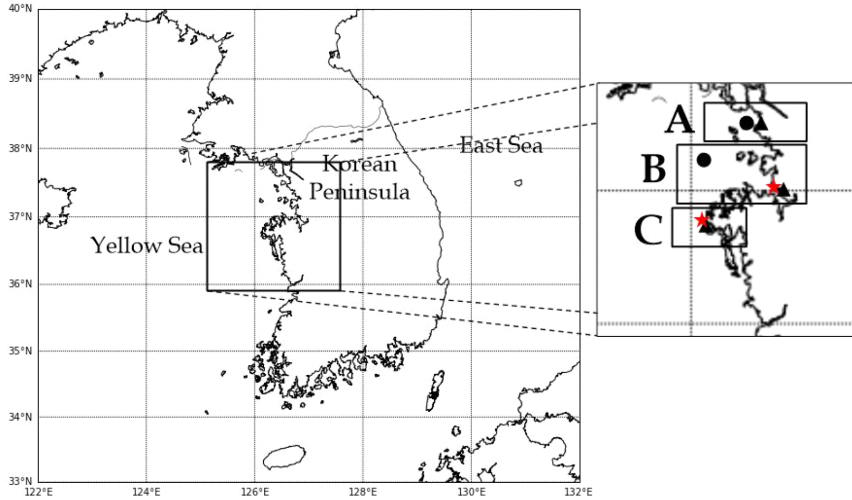
따라서 본 연구는 우리나라 서해 연안으로 유입된 해무를 드론으로 연직 대기 관측을 고해상도로 수행하고, 서해 연안의 해무 유입, 발달, 소산 시 나타나는 물리적 혼합과정과 바람에 대한 연직구조를 분석하고자 한다. 이를 통해 드론 연직 고해상도 기상관측자료의 활용도를 높일 뿐만 아니라, 해무 일대기에 대한 메커니즘을 이해하고자 한다. 2장에서는 관측지점 및 사례 선정 방법과 관측에 사용된 장비 그리고 관측 방법에 대해 기술하였고, 3장에서는 분석 방법을 설명하였다. 4장에서는 결과를 분석하였고 이에 대해 고찰하였으며, 마지막으로 5장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

## 2. 관 측

### 2.1 관측지점 및 분석사례 선정

한반도 서해의 해무는 6~7월 집중적으로 발생하는데 특히 7월에 해무 발생 빈도가 가장 크게 나타난다. 이는 해무 발생의 가장 중요한 요소 중 하나인 해수면 온도와 대기 온도의 차이(해기차: Air Sea Temperature difference,  $T_{SST-Air}$ )가 가장 큰 시기와 일치하다(Won et al., 2000). 또한 서해는 동일 위도인 동해에 비해 해무 발생 빈도가 2배 이상 높게 나타나는데, 이는 서해가 동해보다 수심이 얕아 강한 조석 혼합으로 인해 더 차가운 해수면을 갖기 때문이다(Choi, 2001). 따라서 본 연구는 해무가 잘 발생하는 지점과 기간을 선정하기 위해 해무 관측 장소를 서해 중부 연안으로 한하여 3개 지역(A, B, C)의 후보군을 뽑아 안개 발생 빈도를 조사하였으며, 조사지역을 Fig. 1에 나타냈다.

A 지역은 경기 중부 지역인 영종도(●)와 인천(▲), B 지역은 경기 남부지역인 덕적도(●)와 운평(▲), C 지역은 충남 북부지역인 만리포(▲)이다. 각 지역에 위치한 방재기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)와 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observing Sys-

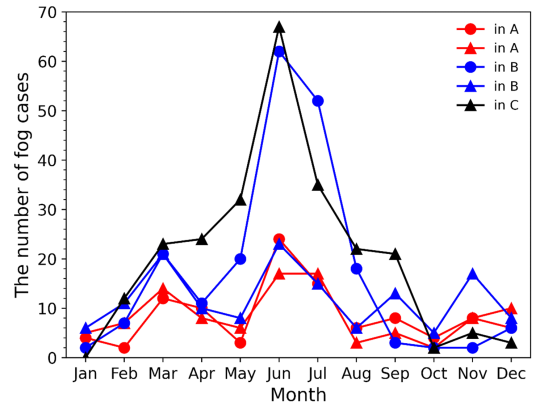


**Fig. 1.** The locations of the investigation sites for observation of sea fog. The A, B, and C are 3 areas in the middle of the west coast of the Korean peninsula. Circles indicate Yeongjong Iland in A and Dukjeok Iland in B. Triangles indicate Incheon in A, Unpyeong in B and Manripo in C. And asterisks indicate the selected sites for observation of sea fog (in B: Baekmi-port, in C: Hagampo).

tem, ASOS)의 2017~2020년 기간에 대한 1시간 간격의 시정자료와 강수자료를 활용하였다. 안개는 지표면 부근에서 응결된 수적이 대기 중에 부유하여 수평 시정이 1 km 미만인 경우를 의미하기 때문에(Roach, 1994), 1 km 미만의 시정이 1시간 이상 관측된 경우 안개 발생 횟수에 포함하였다. 단, 강수가 관측된 경우 강수로 인한 시정 저하 또는 강수 안개로 판단하여 횟수에서 제외하였다. 또한 하루 중 불연속적으로 안개가 발생한 경우 각각의 안개 횟수로 조사하였다.

Figure 2는 조사 기간에 대한 관측 후보 지역의 월별 안개 발생 횟수를 보여준다. 모든 지역에서 해기차가 큰 시기인 여름철 발생 빈도가 가장 높았으며, 그 중 C 지역에서의 6월 발생 빈도가 가장 높았다. C 지역은 바다로 돌출된 육지에 위치하고 있어 서쪽 해상에서 형성된 해무가 유입되기 쉽다. 다음 B 지역의 덕적도가 6, 7월 높은 발생 빈도를 보였고, A 지역의 영종도, B 지역의 운평 순으로 많았다. 따라서 관측 지점은 B와 C 지역으로 정하였으며, 현장답사를 통해 해안에 인접하며 인적이 드물고 드론의 이착륙이 용이한 곳으로 B 지역의 백미항(★)과 C 지역의 학암포(★)를 관측 장소로 최종 결정하였다.

선정된 B, C 지역의 월별 안개 발생 빈도는 5월부터 증가하여 6월 최대로 나타나고 8월 급격히 감소하였다(Fig. 2). 특히 6~7월의 발생 빈도는 전체 안개 발생 횟수에 각각 41.5%와 43.6%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 6~7월을 포함하고 봄과 가을철 복사무 형태의



**Fig. 2.** Monthly occurrence frequencies of fog cases at the investigation sites. Red, blue and black lines indicate A, B, and C respectively. Circles and triangles mean the same as Fig. 1.

해무를 고려하여 3~10월 기간 동안 관측을 수행하였다. 본 연구는 그 중 실제 육안으로 해무의 유입이 관측된 학암포 지점에서의 2021년 6월 8일 사례를 분석하였다.

## 2.2 관측장비

### 2.2.1 드론과 기상센서

해무 관측에 사용된 드론은 Matrice 600 pro (DJI,

Shenzhen, China) 기체로 1,668 mm (가로) × 1,518 mm (세로) × 727 mm (높이)의 크기를 가지며, 배터리를 모두 장착하였을 때 자체중량 10 kg의 프로펠러가 6개 달린 헬리콥터이다(Fig. 3). 이 드론의 최대 유효 적재량은 5.5 kg이고, 적재량에 따라 18~38분의 비행이 가능하며, 최대저항풍속은  $8 \text{ ms}^{-1}$ 이다. 드론 위에 탑재된 통합기상 센서는 WXT536 (Vaisala, Finland)이며, 기압, 기온, 습도, 풍향, 풍속을 측정할 수 있다. WXT536의 사양은 Table 1과 같다. 드론에 기상센서 탑재 시 프로펠러의 회전으로 인해 발생하는 드론 후류의 유동을 고려하여야 하는데, 본 연구는 드론에 탑재되는 기상 센서의 최적 높이에 대한 선행연구를 참조하여 풍속에 대한 실외 기상측기 검정기준( $1 \text{ ms}^{-1}$ )을 만족하는 높이인 0.2 m보다 높은 0.4 m에 바람센서가 위치하도록 통합기상센서를 탑재하였다(Kim et al., 2018). 또한 드론의 머리 방향에 따른 기상 센서의 풍향자료를 보정하기 위해 드론 본체 아래의 기관에 지자기센서를 장착하였으며, 이를 사용하여 보정된 풍향자료와 함께 관측된 기상자료는 지상 수신부의 노트북에 무선통신케이블을 통해 전송되어

1 Hz의 단위로 기록된다(Figs. 3a, b). Chong et al. (2019)에서 사용한 관측장비와 같은 것으로 종합기상탑과 비교 관측을 통해 기상관측 정확도가 입증된 바 있다.

### 2.2.2 지상시정계

해무 발생 여부를 판단하기 위해 시정관측장비를 현장에 설치하여 지상시정을 관측하였다(Fig. 4). 사용한 시정관측장비는 PWD20 (Vaisala)으로 전방 산란을 이용하여 관측하며, 관측가능한 시정 범위는 10~20,000 m 이고, 정확도는 10~10,000 m의 시정에서  $\pm 10\%$ 이다. 본 연구에서는 1 Hz 단위의 시정자료를 10분 평균하여 해무발생 여부와 유입 및 소산 등 과정을 판단하는데 사용하였다. 시정이 1 km 미만인 경우 해무가 발생 또는 유입되었다고 판단하였다.

### 2.3 관측방법

드론은 낮 동안 비행이 가능하기 때문에 일출 직후부터 해무 소산까지 연직관측을 수행하였다. 비행방법은  $1.5 \text{ ms}^{-1}$ 의 상승속도로 최대 500 m 고도 연직 비행하였



**Fig. 3.** A drone (Matrice 600 pro) equipped with a meteorological sensor (WXT536). 'a' is compass to calibrate wind direction and 'b' is wireless serial cable to transmit data.

**Table 1.** The specification of the meteorological sensor (WXT536) equipped on the drone.

Variables	Range	Accuracy	Measurement resolution
Pressure	600-1,100 hPa	$\pm 1 \text{ hPa}$ at $-52^{\circ}\text{C} - +60^{\circ}\text{C}$	0.1 hPa
Temperature	$-52^{\circ}\text{C} - +60^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ at $+20^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$
Relative humidity	0%-100%	$\pm 3\%$ at 0%-90% $\pm 5\%$ at 90%-100%	0.1%
Wind direction	$0^{\circ} - 360^{\circ}$	$\pm 3.0^{\circ}$ at $10 \text{ ms}^{-1}$	$1^{\circ}$
Wind speed	$0 - 60 \text{ ms}^{-1}$	$\pm 3\%$ at $10 \text{ ms}^{-1}$	$0.1 \text{ ms}^{-1}$





**Fig. 4.** The installed visibility measurement instrument (PWD20) in the observation site (Hagampo).

다. 다만, 비행고도에서의 풍속이 드론의 최대저항풍속인  $8 \text{ ms}^{-1}$ 를 초과하거나 관측자료 수신 상태가 불량인 경우 바로 착륙하였다. 본 연구에서 선택한 분석사례는 2021년 6월 8일 서해 전역에 해무가 발생한 사례로 일출 직후인 0522 LST부터 해무가 소산된 후 0832 LST까지 10~40분 간격으로 총 8회 연직관측을 수행하였으며, 드론 비행정보는 Table 2와 같다. 본 연구에서 사용된 드론 기상 관측 자료는 프로펠러의 회전으로 인해 드론의 후류에서 발생하는 유동을 고려하여 상승 비행시 관측된 기상자료만 사용하였으며, 품질검사를 위해 기상청에서 개발한 레인존데 품질검사 알고리즘을 적용하여 최종적으로 양호 플래그를 받은 자료만 사용하였다. 지상시정관측은 0500 LST부터 0840 LST까지 수행하였다.

**Table 2.** Overview of drone flights for observation sea fog occurred on June 8th 2021.

Run no.	Flight time (hh:mm:ss)	Maximum altitude	Vertical moving speed
1	05:22:43-05:30:52	300 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
2	05:39:40-05:52:14	400 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
3	06:09:00-06:23:06	500 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
4	06:53:26-07:04:27	470 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
5	07:27:58-07:33:42	500 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
6	07:47:26-07:55:51	266 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
7	08:02:45-08:15:10	350 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$
8	08:24:11-08:32:14	250 m	$1.5 \text{ ms}^{-1}$

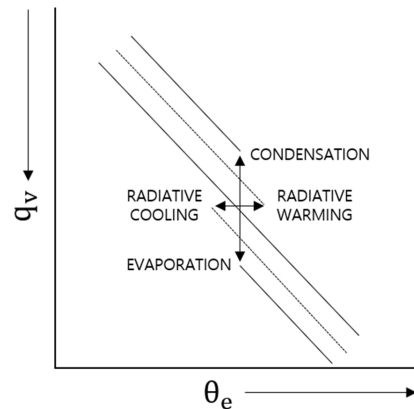
### 3. 분석방법

본 연구는 먼저 드론 기상관측 자료를 활용하여 상당온위( $\theta_e$ )와 습도의 연직구조를 통해 대기 안정도와 습윤영역을 분석하였다. 그리고  $\theta_e$ 와 수증기 혼합비( $q_v$ )로 나타낸 선도( $\theta_e - q_v$  선도)를 활용하여 해무 일대기에 대한 물리적 혼합과정을 분석한 후, 바람의 연직구조를 살펴보기 위해 바람의 직교성(wind orthogonality,  $\Omega$ )과 연직시어(Wind Shear, SH)를 분석하였다.

#### 3.1 $\theta_e - q_v$ 선도

Betts and Albrecht (1987)은 연직 대기자료에  $\theta_e$ 와 총수분 혼합비( $q_t$ )를 활용한 선도( $\theta_e - q_t$  선도)를 도입하여 증발, 강수, 복사 현상 시 나타나는 대기 연직 구조를 설명한 바 있다. 보존변수를 활용한 다이어그램은 다양한 물리적 과정에서의 혼합을 설명하는 데 유용하다. Betts and Albrecht (1987)에 따르면  $\theta_e$  또는  $q_t$ 는 변하지 않는 경우, 응결 과정,  $\theta_e$ 가 일정한 상태에서  $q_t$ 가 감소하는 경우 강수 과정이라 한다. 이와 반대로 강수에 의한 증발은  $\theta_e$ 가 일정한 상태에서  $q_t$ 가 증가한다. 반면, 복사과정에서 가열은  $q_t$ 가 일정한 상태에서  $\theta_e$ 가 증가하고 냉각은 감소한다.

해무 형성 및 소산 시 공기의 유입 및 혼합에 의해 나타나는 물리적 과정을 살펴보기 위해 드론 연직기상관측자료에  $\theta_e - q_v$  선도 분석을 적용하였다(Fig. 5). 드론 관측자료에서 액체에 대한 자료를 산출하는데 어려움이 있어  $q_t$  대신  $q_v$ 를 활용하였다. 불포화 대기 상태에서  $q_v$



**Fig. 5.** Schematic  $\theta_e - q_v$  diagram showing the modification of mixing line under the influence of different physical processes. Dashed lines indicate the influence of radiative cooling/warming and thick lines indicate the influence of condensation/evaporation.

는  $q_v$ 와 같으나, 포화 대기 상태의 경우 강수가 없다면  $q_v$ 의 변화는 없지만  $q_v$ 는 감소한다는 차이가 있다. 그러나 습윤한 공기가 계속 유입되는 경우 수증기가 응결하여 액화되더라도  $q_v$ 의 증가 또는 일정한 상태가 나타날 수 있다. 본 연구에서의  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 산출 과정은 다음과 같다.

$$\theta_e = T_e \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R_d}{C_{pd}}} \approx \left( T_k + \frac{L_v}{C_{pd}} q_v \right) \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R_d}{C_{pd}}} \quad (1)$$

식(1)에서  $T_e$ 는 상당온도[K],  $P$ 는 기압[hPa],  $P_0$ 는 표준기준기압으로 1,000 hPa,  $R_d$ 는 건조기체상수로 287.04 Jkg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>,  $C_{pd}$ 는 정압 비열로 1,005.7 Jkg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>이다.  $T_k$ 는  $P$ 에서의 온도이고, 단위는 켈빈 [K]이다.  $L_v$ 는 증발 잠열로 식(2)를 이용하여 산출하였다.

$$L_v(T_c) \approx (2500.8 - 2.36T_c + 0.0016T_c^2 - 0.00006T_c^3) \quad (2)$$

식(2)에서  $T_c$ 의 단위는 섭씨 [°C]이다.

$q_v$ 는 Vaisala의 Humidity conversion formulas에 제시된 식을 활용하여 산출하였다(Oyj, 2013).

$$q_v = B \cdot P_w / (P - P_w) \quad (3)$$

식(3)에서  $B$ 는 상수로 621.9907 [g kg<sup>-1</sup>]이고,  $P_w$ 는 수증기압[식(4)]이다.

$$P_w = P_{ws} \cdot RH / 100 \quad (4)$$

식(5)에서  $RH$ 는 상대습도이고,  $P_{ws}$ 는 포화수증기압이다.  $P_{ws}$ 는  $q_v$ 와 마찬가지로 Vaisala Oyj(2013)에서 제시한 식(5)을 사용하여 계산하였다.

$$P_{ws} = A \cdot 10^{\left( \frac{m - T_c}{T_c + T_n} \right)} \text{ [hPa]} \quad (5)$$

여기서  $A$ ,  $m$ ,  $T_n$ 는 상수로 온도 범위에 따라 다른 값을 가지며, -20~+50°C 범위에서 각각  $A = 6.116441$ ,  $m = 7.591386$ ,  $T_n = 240.7263$ 이다.

일반적으로  $\theta_e$ 와  $q_v$ 는 맑은 대기에서 고도에 따라 감소하는 특징을 갖는다(Betts and Albrecht, 1987; Paluch and Lenschow, 1991). 따라서  $\theta_e - q_v$  선도의  $y$ 축인  $q_v$ 를 역으로 나타냈고, 실선에  $m$  단위의 고도를 표기하였다. 고도는 측고방정식을 활용하여 산출하였으며, 측고방정식에서 온도는 습윤한 대기를 고려하여 가온도를 사용

하였다.

### 3.2 바람의 직교성과 연직시어

$\Omega$ 는 기준고도 대비 임의고도에서 풍향의 변화 정도를 나타내는 값으로 -1에서 1 사이의 값을 가진다.  $\Omega$ 가 1인 경우는 기준 고도와 임의 고도에서의 풍향이 같음을 의미하고,  $\Omega$ 가 -1인 경우에는 반대를 의미하며,  $\Omega$ 가 0인 경우에는 기준 고도와 임의 고도의 풍향이 서로 수직임을 의미한다.  $\Omega$ 는 식(6)과 같으며, 여기서 기준 고도는 지면과 인접하여 발생하는 해무의 바람영향을 잘 반영하는 지상 바람의 대표 고도인 10 m로 하였다.

$$\Omega(z) = \frac{\overrightarrow{v(z)} \cdot \overrightarrow{v_r}}{|\overrightarrow{v(z)}| \cdot |\overrightarrow{v_r}|} \quad (6)$$

여기서  $\overrightarrow{v(z)}$ 는 임의 고도에서,  $\overrightarrow{v_r}$ 은 기준 고도에서의 바람 벡터이다.

SH는 고도별로 다음 식(7)과 같이 계산하여 분석하였다.

$$SH = \frac{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}}{\Delta z} \quad (7)$$

여기서  $u$ 는 경도 방향의 바람요소,  $v$ 는 위도 방향의 바람요소를 뜻하며,  $\Delta$ 는 지상과 고도  $z$ 에서의 요소 차이를 의미한다.

## 4. 분석 결과 및 고찰

### 4.1 사례 일 기상 개요

Figure 6은 2021년 6월 8일 0600 KST 동아시아 영역에 대한 지상기압과 한반도 영역에 대한 2 m 기온 및 10 m 바람을 보여준다. 만주와 북태평양에 위치한 고기압이 한반도 서해까지 확장하여 능이 남-북으로 놓여 있어 남쪽의 따뜻하고 습한 바람이 서해(안)로 불어오기 유리한 환경임을 알 수 있다(Fig. 6a). 한반도의 2 m 기온과 10 m 바람에서 동해와 남해는 20°C~24°C의 기온이 분포하는 반면, 서해상에는 상대적으로 차가운 16°C~20°C의 기온이 분포하고 남서기류가 지배적이다. 서해 중부해역의 관측지 근해는 남기류가 지배적이며, 풍속은 약 2.5 ms<sup>-1</sup>로 매우 약하다(Fig. 6b). 이러한 종관 상태는 해무의 대표적인 안개종인 이류 안개를 형성하기 좋다. 실제 한반도 서해상에서 해무가 가장 많이 발생하는 종관유형이다(Won et al., 2000).

Figure 7은 관측지인 학암포의 10분 평균 시정과 관측지로부터 14 km 떨어진 만리포 AWS 지점의 10분 단

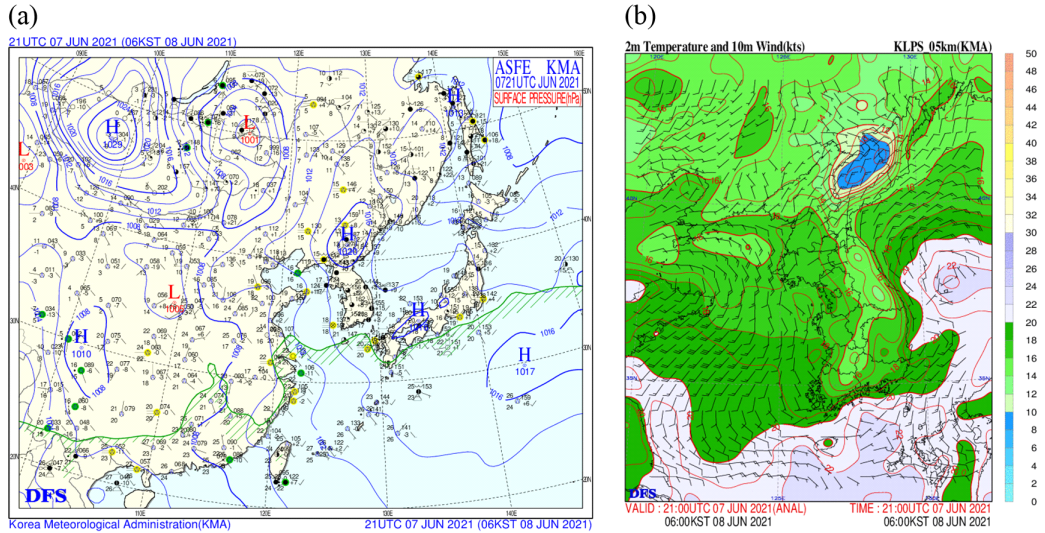


Fig. 6. Synoptic weather charts for surface pressure (a) and spatial distribution of 2 m temperature (°C) and 10 m wind (kts) (b) on 0600 KST 8 June 2021.

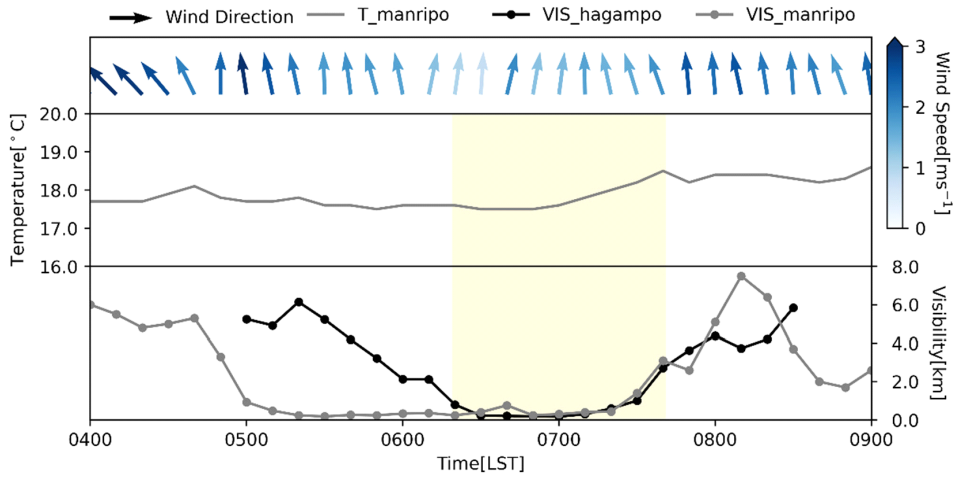


Fig. 7. Time series for surface wind (arrows), temperature (grey line), and visibility (grey line) at Manripo and visibility (black line) at Hagampo during sea fog event. The yellow shade shows the period of sea fog and the dashed line represents 1 km of visibility.

위의 기온과 시정 그리고 바람자료를 나타냈다. 0620 LST부터 0730 LST까지의 노란 채색은 학암포에서 시정이 1 km 미만으로 감소하여 해무 현상으로 판단된 시간영역이다. 학암포에서 시정의 감소는 0520 LST 이후로 나타났으며 0620 LST부터 1 km 미만의 시정이 관측되었다. 0700 LST에 최저시정 167.31 m를 기점으로 시

정이 개선되어 0730 LST에 1,014.48 m로 안개의 임계 값인 1 km와 근접한 시정이 관측되고, 이후 0800 LST에 4,391.07 m까지 시정이 개선되었다. 만리포의 경우 0440 LST부터 시정의 급격한 감소가 나타났으며, 0500 LST부터 0720 LST까지 1 km 미만의 시정이 관측되었다. 이후 학암포 관측지점과 동일하게 0730 LST부터 1

km 이상으로 시정이 개선되었다. 학암포보다 태안 반도 끝 지점에 위치한 만리포에서의 해무 유입이 약 1시간 20분 이른 시간인 0440 LST에 나타났으나, 소산된 시간은 0730 LST로 유사하게 나타났다.

따라서 학암포에서의 해무의 유입 및 소산과 관련하여 지상기온과 바람의 변화를 만리포 AWS 자료를 통해 살펴보았다. 화살표의 방향은 풍향을 의미하고, 채색은 풍속을 의미한다. 0500 LST부터 0830 LST까지 전체적으로 남풍이 지배적이거나, 자세히 살펴보면 학암포에서의 시정이 악화되는 시기에 풍향이 약하게 서풍계열로 변하고, 풍속이 약  $2 \text{ ms}^{-1}$  이하로 약해지는 특징을 보인 반면, 시정이 회복되는 시기에는 반대로 풍향이 약하게 동풍계열로 변하며 풍속이 점차 강해지는 특징을 확인하였다. 기온의 경우 만리포와 학암포에서 시정의 감소가 시작되는 시간인 0440 LST와 0520 LST에 약간의 기온 하강(각각  $0.3^\circ\text{C}$ ,  $0.2^\circ\text{C}$ )이 관측되었으며, 시정이 개선되기 시작하는 시간인 0700 LST를 기점으로 기온이 상승하였다.

해무 현상에 있어  $T_{\text{SST-Air}}$ 는 중요한 요소 중 하나로 대기와 해양의 상호작용을 살펴볼 수 있다. 이를 위해 학암포에서 남남서 방향으로 73 km 떨어져 위치하는 외연도 부이 자료를 통해 0400~0900 LST 동안의  $T_{\text{SST-Air}}$ 를 살펴보았다(Table 3). 해당시간 동안 해수면 온도는  $17.4^\circ\text{C}$ ~ $17.6^\circ\text{C}$ 로 거의 변화가 없었으며, 2 m 기온은  $17.8^\circ\text{C}$ ~ $18.8^\circ\text{C}$ 의 범위로 관측되었다. 또한 2 m 기온은 시정의 감소가 나타나기 전 0430 LST에  $18.5^\circ\text{C}$ 까지 일시적으로 상승한 후 하강하면서 0530 LST에  $18.0^\circ\text{C}$ 로 관측되었으며, 이후 점차 상승하였다.  $T_{\text{SST-Air}}$ 는 해당시간 동안 음의 값으로 나타났으며, 이를 통해 본 해무 사례는 따뜻한 공기가 차가운 해면 위로 이동하여 발생한 차가운 해무 또는 따뜻한 이류 안개임을 알 수 있다.  $T_{\text{SST-Air}}$ 의 변화를 살펴보면 0400~0600 LST까지 절대치로  $1^\circ\text{C}$  미만의 값을 보이다 0630 LST부터  $1^\circ\text{C}$  이상의

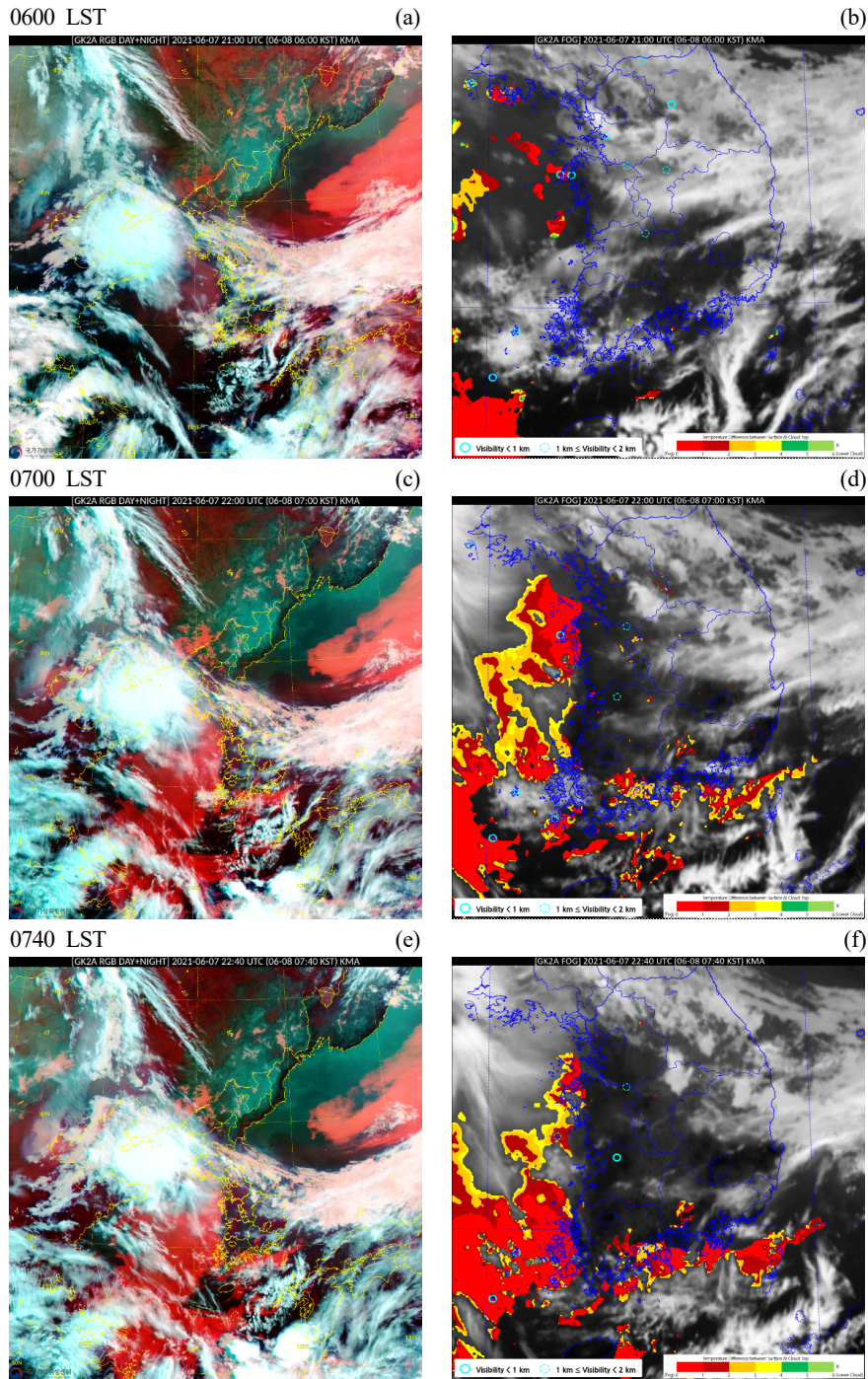
값을 보였다. 바람은 0400부터 0530 LST까지 풍속  $5 \text{ ms}^{-1}$  이상을 가지는 남서류가 관측되었고, 이후 풍속이 점차 감소하여 0700 LST  $1.7 \text{ ms}^{-1}$ 로 관측되었으며, 풍향은 0730 LST까지 남류가 지배적으로 나타났다. 0800 LST부터는 남동류의 바람이 관측되었다. 관측지의 시정의 변화와 직접적으로 대조하여 살펴보기에 무리가 있는 위치의 부이 자료지만, 2 m 기온이 하강하는 시점과 시정의 감소가 나타나는 시점, 그리고  $T_{\text{SST-Air}}$ 가 절대치로  $1^\circ\text{C}$  이상의 값을 가지며, 풍속  $5 \text{ ms}^{-1}$  이하의 남류가 관측된 시점과 1 km 미만의 시정이 나타난 시점이 유사하다. 남동류의 바람이 관측된 시점과 해무 소산 시점 또한 유사하게 관측되었다.

Figure 8은 2021년 6월 8일 0600, 0700와 0740 LST 천리안 위성-2A호의 한반도 지역 RGB (Red-Green-Blue) 합성 이미지(Figs. 8a, c, and e)와 지상 시정자료를 중첩한 안개탐지 이미지(Figs. 8b, d, and f)이다. RGB 합성 이미지에서 하층운 또는 안개의 분포는 붉은색으로 표현되고, 상층운은 흰색, 중층운은 얼은 회색이나 밝은 회색으로 표현된다. 지상 시정자료를 중첩한 안개탐지 이미지는 붉은색에 가까울수록 안개일 가능성이 높음을 의미하고, 지상 시정자료는 시정이 1 km 이상 2 km 미만인 경우 점선, 1 km 미만인 경우 실선으로 그려진 하늘색 원으로 표현된다. 0600 LST의 RGB 합성 이미지에서 상층운 아래로 서해상의 동쪽 전역에 해무가 형성된 것을 알 수 있다(Fig. 8a). 0700 LST에 붉은 영역은 더 넓어지고 서해상의 남쪽까지 확장되었다(Fig. 8c). 한편, 안개탐지 이미지에서는 0600 LST에 서해상에 부분적으로 안개가 탐지되고, 관측지 부근의 연안에서 지상 시정 또한 1 km 미만으로 관측되었다. 0700 LST에 관측지 근해상으로 해무 영역이 확장되었고, 0740 LST에 해무 영역이 작아지면서 지상 시정이 2 km 이상으로 관측지 부근의 해무가 소산된 것을 확인할 수 있다.

**Table 3.** Air sea temperature differences for sea fog event using Oeyundo buyo observational data.

Oeyundo Buyo	LST										
	0400	0430	0500	0530	0600	0630	0700	0730	0800	0830	0900
Sea surface temperature ( $^\circ\text{C}$ )	17.6	17.6	17.4	17.5	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.5	17.6
2 m air temperature ( $^\circ\text{C}$ )	17.8	18.5	18.3	18.0	18.2	18.6	18.7	18.6	18.8	18.6	18.7
$T_{\text{SST-Air}}$ ( $^\circ\text{C}$ )	-0.2	-0.9	-0.9	-0.5	-0.6	-1.0	-1.1	-1.0	-1.2	-1.1	-1.1
Wind direction	SW	SSW	SSW	SSW	S	S	S	S	SE	ESE	SE
Wind speed ( $\text{ms}^{-1}$ )	5.6	5.5	5.9	5.1	4.1	3.5	1.7	2.3	1.7	3.0	3.1





**Fig. 8.** RGB images [(a), (c), (e)] and fog images overlapped ground visibility data [(b), (d), (f)] of GK2A (GEO-KOMPSAT-2A) at 0600, 0700, and 0740 LST. In RGB image, low-layer cloud and fog are indicated red. In fog images overlapped ground visibility data, the closer it is to red, the more likely it is to be fog, and if the visibility on the ground is less than 1 km, it is indicated by a solid light source in sky blue. RGB, Red-Green-Blue.

## 4.2 연직프로파일

드론으로 관측한 기상요소에 대한 연직 분포를 먼저 살펴보고자 한다. Figure 9에  $\theta_e$ , 상대습도, 풍향, 그리고 풍속의 연직 분포를 제시하였다. 대기의 열역학적 연직 구조를 살펴보기 위해 기온 대신  $\theta_e$ 를 분석하였다. 시정이 악화되기 시작한 시점인 0522 LST (Fig. 9, black line), 시정이 1 km 미만으로 감소하기 직전의 시간인 0609 LST (Fig. 9, red line), 시정이 1 km 이상으로 회복되는 시간인 0727 LST (Fig. 9, blue line), 그리고 시정이 3 km 이상으로 회복된 시간인 0802 LST (Fig. 9, green line)에 대해 각각 해무 유입 전, 해무 유입 시작, 해무 소산과정, 해무 소산 시점으로 판단하여 분석하였다.  $\theta_e$ 의 경우, 해무 유입 전, 지상에서부터 고도 300 m 까지 변화량이 1K 이내(290.78~291.02K)로 습윤단열적으로 중립적인 대기 상태였으나, 해무 유입 시작 시점에 지상 부근에서 289K까지 하강하면서 약 300 m 고도까지 안정적인 대기가 형성되었다. 이후 지상 부근에서 상위 고도 대비 큰 폭으로 상승하면서 해무가 완전히 소산된 시점에 중립적인 대기 상태가 형성되었다. 해무 유입 시 지상 부근의  $\theta_e$  감소는 따뜻하고 습윤한 공기가 차가운 해면으로 이류해 냉각, 포화되고 약한 바람에 의해 그 위층의 공기와 난류 혼합하여 냉각층을 형성하는데, 바로 이 냉각층이 바람에 따라 유입되어 나타나는 특징으로 판단된다. 습도의 경우 해무 유입 전, 지상에서 91%로 나타났으며,  $\theta_e$ 와 마찬가지로 큰 변화없이 고도 300 m까지 90%~92%의 범위를 가졌다. 해무 유입 시작 시점에는 고도 약 300 m까지 최대 95.3%를 가지며 증가

하는 구조를 보였다. 바람은 해무 유입 전 지상부터 고도 40 m까지  $1 \text{ ms}^{-1}$  미만의 풍속을 가지며 남남서풍이 나타났고, 그 이상 고도에서 풍속이  $2 \text{ ms}^{-1}$  이상으로 빠르게 증가하였다. 해무 유입 시점에는 풍향이 고도 약 120 m까지 서남서로 바뀌면서 한반도 서해 연안의 해무에 유리한 조건이 형성되었으며, 상위 고도에서는 풍향이 반시계 방향으로 바뀌며 고도 약 200 m에서부터 남풍이 유입되었다. 해무 소산 과정에는 지상에 약  $1 \text{ ms}^{-1}$ 의 속도를 가지는 서풍이 유입되고, 남서풍의 유입고도 구간은 고도 30 m에서 약 110 m 이하로 나타났으며, 남풍 유입고도는 이전 시간보다 낮아진 고도 110 m에서부터 나타났다. 이는 대기하층 상부에 상대적으로 강한 영향을 주고 있던 남풍이 점차 대기하층 하부까지 확장한 것으로 판단된다.

## 4.3 $\theta_e - q_v$ 선도

해무 유입 전부터 유입 후 소산까지의 연직 관측자료에서 지상에서부터 일정 고도까지  $\theta_e$ 의 증가와 함께  $q_v$ 가 증가하는 구조가 나타났으며, 이후 상부 고도에서는 두 변수 모두 감소하는 구조를 보였다. 해무 유입 전 (Figs. 10a, b)  $\theta_e$ 와  $q_v$ 가 고도에 따라 증가에서 감소로 변하는 고도는 각각 181 m, 183 m로 약 20분 동안 거의 변화가 없었으나, 경향이 변하는 고도(181 m, 183 m)에서의  $\theta_e$ 는 약간 감소하고  $q_v$ 는 증가하였다(Fig. 10, yellow box). 이는 앞서 Fig. 7에서 해무 유입 전 시간인 0520 LST에 지상 기온이 약간 감소하고, 시정의 감소가 시작된 것과 함께 고려하였을 때, 차고 습한 공기가 유

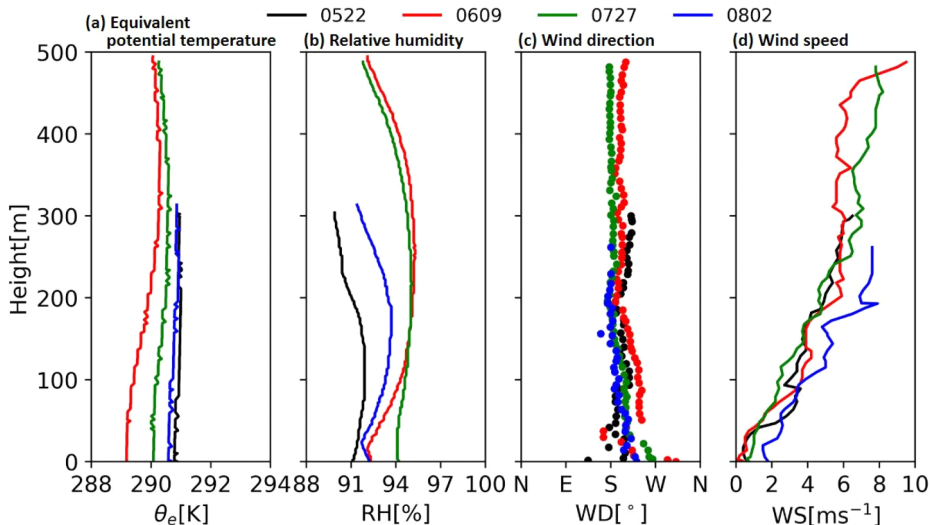
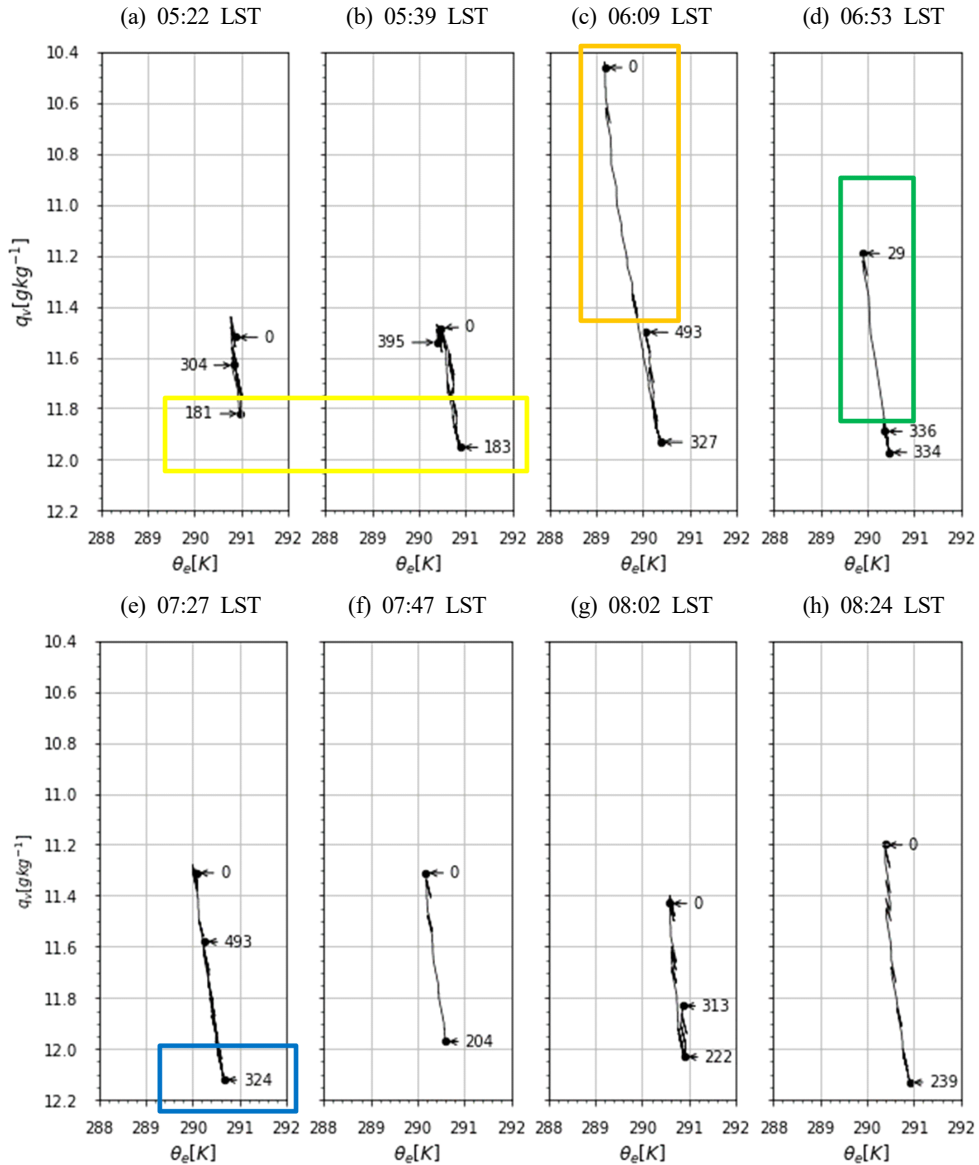


Fig. 9. Vertical profiles of equivalent potential temperature (a), relative humidity (b), wind direction (c) and wind speed (d) obtained by the meteorological sensor installed on the drone.



입되어 나타난 현상으로 생각된다. 또한  $\theta_e$  감소와 함께 약한 냉각 현상이 일어나,  $q_v$ 가 감소하지 않고 증가한 것으로 보아 대기 중의 수증기량이 포화에 이르러 응결 현상이 발생하기에 충분하지 않은 것으로 보인다. 0609 LST, Fig. 10c에는 지면과 인접한 대기 최하층(0~183 m)에서 이전 시간 관측자료 대비  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 뚜렷한 감소

를 보였다(Fig. 10, orange box). 이는 기존 대기에 비해 습하고 차가운 공기가 이류 하여 공기를 냉각시켜 포화 및 응결현상이 나타난 것으로 생각된다. 실제 0609 LST 관측을 마치고 착륙한 드론의 표면에 많은 물방울들이 맺혀있었다(Fig. 11). 이후 고도 183~327 m 구간에서 이전 시간 대비  $\theta_e$ 의 감소와 함께  $q_v$ 가 증가하였다. 이는



**Fig. 10.**  $\theta_e - q_v$  diagrams for sea fog event. The altitudes are indicated beside lines. (a) and (b) show the condition before sea fog inflow. (c) shows the condition of sea fog inflow. After (f), the diagrams show the dispersion process of the sea fog. Yellow box indicates the changes ( $\theta_e$  increase and  $q_v$  decrease) before inflow of sea fog. Orange box and green box indicate the sea fog area. And blue box indicates the changes (increase of  $\theta_e$  and  $q_v$ ) at the dispersion process.

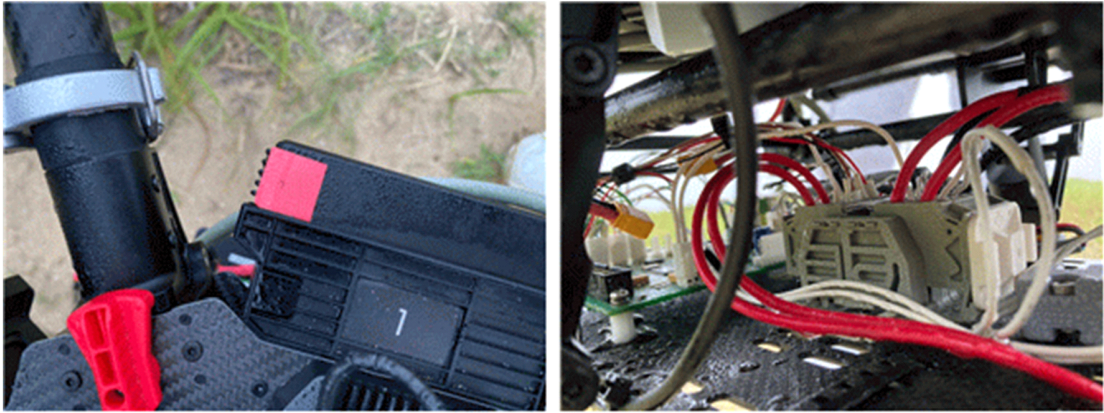


Fig. 11. Water droplets on the surface of drone after 0609 LST observation.

고도 327 m까지 차갑고 습한 공기가 유입되었음을 추정할 수 있으나, 183 m 이하 고도 구간에서  $q_v$ 의 감소로 응결 현상이 나타남을 고려하였을 때, 유입된 해무의 꼭대기는 183 m로 추정할 수 있다. 다음 0653 LST 관측 (Fig. 10d)에서 이전 시간(0609 LST) 대비 지상부근에서  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 증가가 나타났다. 이는 태양복사에 의한 지면 가열로 인한 증발 현상으로 보이나, 지상시정이 1 km 미만인 것을 고려하였을 때 응결된 안개 물방울이 아직 대기 중에 존재함을 알 수 있다. 그리고 고도 327 m에서는 이전시간 대비  $\theta_e$ 는 일정한 상태에서  $q_v$ 가 감소하였다. 이는 앞의 근거와 같이 해무의 꼭대기가 183 m에서 327 m로 발달하였음을 알 수 있다(Fig. 10, green box). 해무 소산과정(0727 LST, Fig. 10e)에서 또한 지상부근에서의  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 증가가 나타나 가열과 증발 현상이 계속 나타나고 있음을 알 수 있고, 지상시정계에서 시정이 1 km 내외로 개선되는 현상이 동시 관측되었다. 그리고  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 경향 변화가 나타나는 고도가 324 m로 이전시간 대비 10 m 낮아짐과 동시에 324 m에서의  $\theta_e$ 와  $q_v$ 가 증가하였다(Fig. 10, blue box). 이 때 바람에 대한 연직프로파일(Fig. 10c)을 살펴보면 풍속  $6 \text{ ms}^{-1}$  이상의 강한 남풍류가 유입되는 것을 알 수 있다. 따라서 고도 324 m 부근에서의  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 증가는 강한 남풍류에 의한 것이며, 강한 바람에 의한 증발로 유입된 해무가 점차 소산된 것으로 생각된다. 시정이 4 km 이상으로 개선된 0802 LST 관측에서는  $\theta_e$ 의 약한 증가와 함께 지상부근의  $q_v$ 가 해무 유입 전(0522 LST와 0539 LST)의  $q_v$ 와 유사한 값까지 증가하였다. 그리고  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 경향 변화가 나타나는 고도는 또한 222 m로 낮아졌는데, 이는 Fig. 9d에서 대기하층 상부에서의 풍속이 강한 건조한 공기의 유입 고도가 점차 하강하는 것과 일치한 결과이다.

$\theta_e$ 와  $q_v$ 의 시간에 따른 연직 변화를 시각적으로 살펴보기 위해 근사값을 사용하여 고도 5 m 간격으로 자료를 재정렬한 후, 10분 간격으로 내삽하여 시간에 따른 연직 분포도를 나타냈다(Fig. 12). 가장 두드러진 특징은 해무 유입 시점(0609 LST)에는 이전시간 대비  $\theta_e$ 와  $q_v$ 가

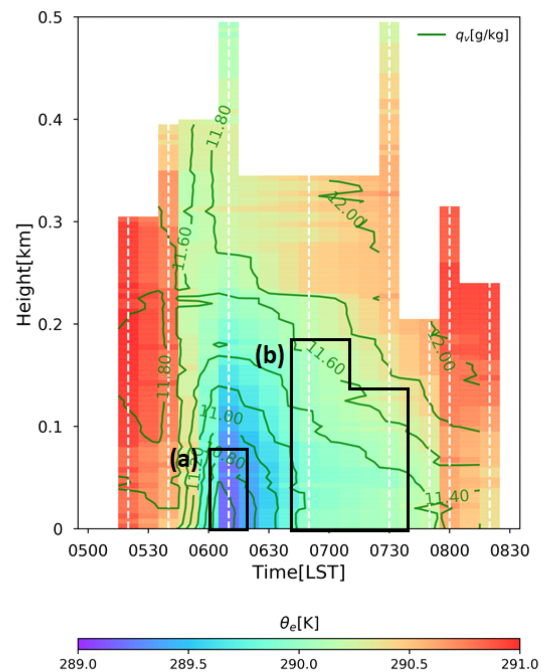


Fig. 12.  $\theta_e - q_v$  vertical  $\theta_e$  (shaded, unit: K) and  $q_v$  (green contours, unit:  $\text{g kg}^{-1}$ ) timeseries for sea fog event. The white dotted lines mean drone observation times. (a) represents plummet area and (b) represents little change area.

특히 200 m 이하 고도 구간에서 급격히 감소하였다 (Fig. 12a). 지표층에서  $\theta_e$ 의 감소는 공기가 차가운 지면 또는 해수면 위로 이류할 때 나타나는 특징이다(Betts, 1982). 이로 인해 응결하여  $q_v$ 가 감소한 것으로 추정된다. 또한 동일 시점에서 연직변화를 살펴보면 고도 60 m 이하 구간에서 고도에 따라  $\theta_e$ 의 변화는 거의 없으나,  $q_v$ 는 급격히 증가하였다(Fig. 12a). 이는 강수에 의한 증발 현상으로 보인다(Betts and Albrecht, 1987). 이후 0653~0727 LST 동안 지상에서부터 고도 150~180 m 이하 구간에서  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다 (Fig. 12b). 이는 해무 내부로 혼합이 잘 되어 고도 및 시간에 따른 변화 없이 균질한 대기의 특성을 가진 것으로 사료된다. 또한 0653 LST에는 고도 200 m 이상, 0727 LST에는 고도 100 m 이상에서  $\theta_e$ 의 상승이 두드러지게 나타났다. 일반적으로 해무 꼭대기에서는 응결된 안개 물방울로 인해 증발 냉각(Lilly, 1968)과 복사 냉각(Moeng, 1987)이 일어나 하향부력을 유발하는데, 해무 꼭대기 위에서  $\theta_e$ 의 증가와 함께 나타날 경우 이 하향 부력이 강화된다(Betts, 1982). 이로 인해 해무 내부의 혼합이 더 잘 발생할 뿐만 아니라, 해무 꼭대기에서의 주변 대기 유입을 초래(Nicholls and Turton, 1986; Moeng, 2000)하여 상층에서부터 해무의 소산이 발생한다. Figure 13에서 0653 LST 이후 가 고도에 따라 상승하기 시작하는 고도가 점차 낮아지는 모습을 통해 해무가 상층에서부터 소산되는 것을 확인할 수 있다. 정리하

자면, 0609 LST 해무가 유입되었고 0653 LST 이후 해무 꼭대기에서부터 점차 소산됨을 확인하였다.

#### 4.4 바람의 직교성과 연직시어

바람의 직교성은 기준고도 대비 풍향의 연직변화를 살펴볼 수 있어 해무의 유입층과 소산고도를 추정할 수 있다. 해무 유입과 소산과정에 대한 풍향의 연직구조 변화를 살펴보기 위한 바람의 직교성( $\Omega$ ) 분석결과(Fig. 13), 해무 유입 시점(Fig. 13a)에는 전 고도(0~500 m)에서  $\Omega$ 가 0.8 이상으로 나타났다. 특히 0~171 m 구간에서  $\Omega$ 가 0.95 이상으로 풍향의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다는데, 이는 앞서 4.3절에서 추정된 해무 유입 고도 구간(0~183 m)과 약 12 m 차이로 유사하다. 해무 소산과정의 시점(Fig. 13b)에는 고도 0~22 m 구간에서  $\Omega$ 가 0.98 이상으로 풍향의 변화가 거의 없으나, 그 이상의 고도구간에서  $\Omega$ 가 고도에 따라 0에 가까운 값으로 나타났다. 이는 상층으로 갈수록 지상(고도 10 m) 풍향에 직교한 바람이 부는 것을 의미한다. 이후 지상 시점이 4 km 이상으로 해무가 완전히 소산된 시점(Fig. 13c)에는 전 고도에서의  $\Omega$ 가 0.8 이상으로 연직 풍향 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 해무 유입 시 연직적으로 동일한 성질의 공기가 유입되고, 소산 시 상층에서부터 지상 풍향에 직교한 바람이 유입하여 소산됨을 확인하였다. SH의 경우 해무 유입 및 소산 시까지 지면 근처에서 강한 기계적 난류가 존재하는 것으로 나타났다

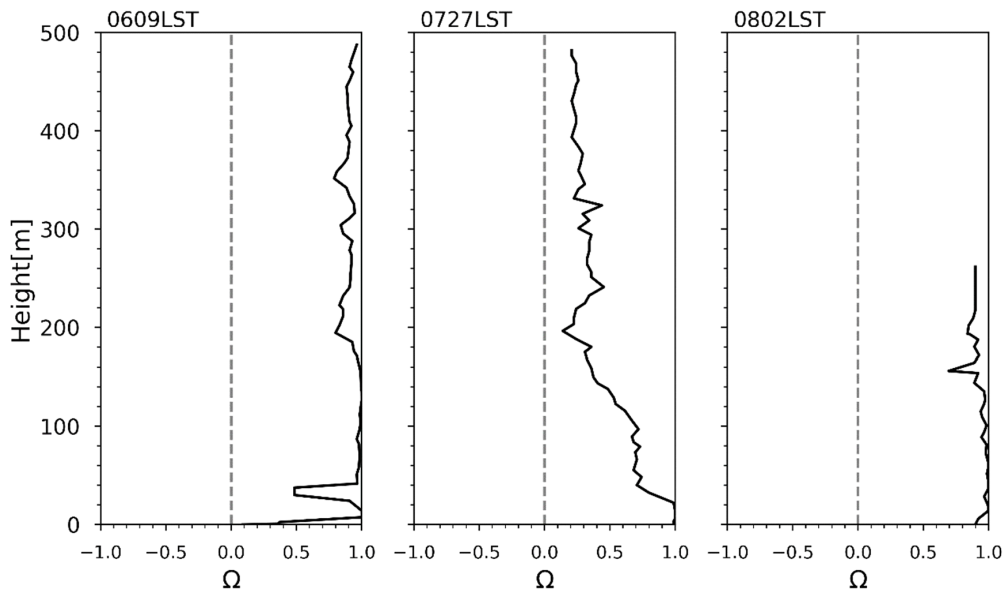


Fig. 13. The orthogonality ( $\Omega$ ) of wind for 0609, 0727, and 0802 LST.

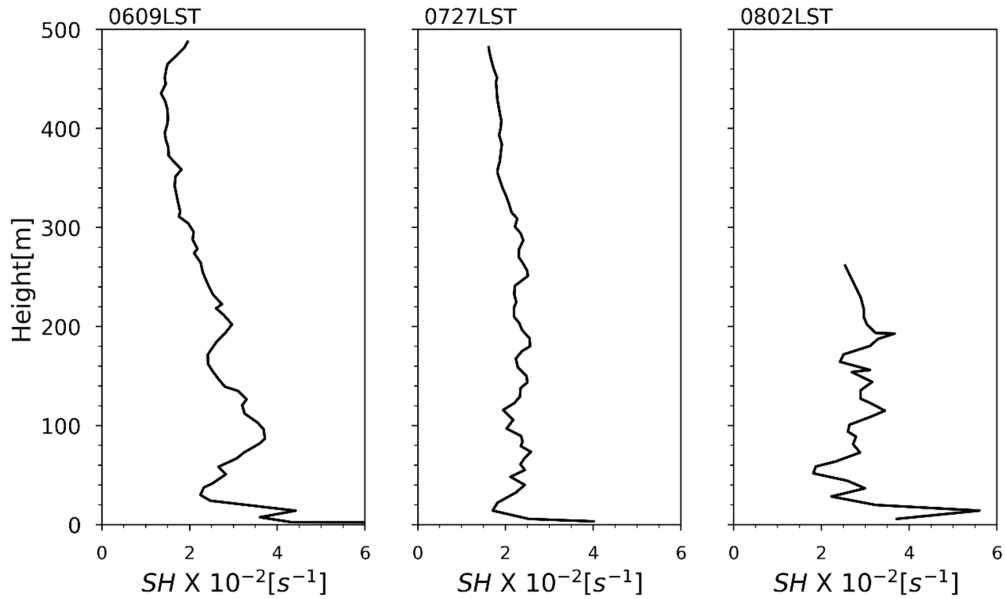


Fig. 14. The vertical wind shear (SH) for 0609, 0727, and 0802 LST.

(Figs. 14a, b). 즉, 해무 유입 시 지면 근처에서 강한 기계적 난류가 대기 경계층이 안정한 상태에서 연직 혼합을 주도하고 있는 것으로 보인다. 또한 해무 유입 꼭대기 고도로 추정되는 부근(181 m)에서 풍속의 증가에 따른 SH의 증가는 기계적 난류를 강화하여 top down mixing을 일으키고, 이는 주변공기를 유입하여 해무 꼭대기의 발달을 유도한다(Gao et al., 2007; Yang and Gao, 2020). 이는 4.3절에서 추정된 해무 꼭대기 고도가 해무 유입 시 183 m에서 이후 관측인 0653 LST 에 327 m로 발달한 것과 연관된 분석결과이다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 드론을 활용하여 서해 연안으로 유입되는 해무 연직구조를 분석하였다. 드론을 활용한 해무 연직 대기관측자료를 생산하기 위해 서해 중부 연안을 중심으로 한 안개 발생 빈도 조사와 현장답사를 통해 해무가 잘 발생하는 기간과 지점 그리고 드론 이착륙이 용이한 장소로 관측지를 선정하여 해무 관측을 수행하였다. 관측 사례 중 학암포에서 관측된 2021년 6월 8일 사례에 대해 드론으로 관측한 기상요소의 연직프로파일과  $\theta_e - q_v$  선도, 그리고 바람의 직교성과 연직시어를 분석하였다.

연직프로파일 분석을 통해 확인된 것은 해무 유입 시  $\theta_e$ 가 감소하며, 습윤단열적으로 안정적인 대기 상태가

형성되어 해무 소산 시 증립적인 대기 상태로 바뀌는 것과 서남서류의 바람이 불며 해무가 유입되고 대기하층 상부의 강한 남풍이 하부까지 확장되며 해무 소산이 나타난다는 것이다.

$\theta_e - q_v$  선도 분석을 통해 확인된 것은  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 뚜렷한 감소를 통해 해무 유입 시점을 알 수 있다는 것과 해무 유지 시점 지면 가열과 증발 현상으로 인해 지상부근에서 일정 고도까지  $\theta_e$ 의 증가와 함께  $q_v$ 가 증가하는 구조를 갖는다는 것이다. 이 구조가 나타나는 고도 구간의 시간에 따른 변화와  $\theta_e$ 와  $q_v$ 의 증감을 통해 해무 꼭대기를 추정하였다. 유입된 해무의 꼭대기는 183 m이며, 이후 327 m까지 발달한 후 점차 낮아진 것으로 나타났다. 해무의 소산을 유도하는 현상은 지상부근과 해무 꼭대기에서 동시에 나타났는데, 지상부근에서는 태양복사에 의한 지면가열로 인해 발생하는 증발과 해무 꼭대기 바로 위에 남쪽에서 불어오는 강한 바람으로 인한 증발로 파악됐다.

바람의 직교성과 연직시어 분석을 통해 확인된 것은 앞서 연직프로파일과  $\theta_e - q_v$  선도 분석에서 확인한 바와 같이 해무 유입 시 연직적으로 동일한 성질의 공기가 유입되고, 소산 시 상층에서부터 지상 풍향에 직교한 바람이 유입하여 소산된다는 것이다. 또한 해무 유입 시 지면 근처의 강한 기계적 난류가 대기 경계층이 안정한 상태에서 연직 혼합을 주도하고 있음을 확인하였고, 해무 꼭대기 부근에서의 풍속의 증가로 인한 연직시어의

증가로 해무 꼭대기가 발달한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구는 기상 센서를 탑재한 드론을 활용하여 한반도 서해 연안에 유입된 해무를 관측하고, 그 관측자료로부터 추정된 해무 유입 및 소산 과정에서의 물리적, 열역학적 분석을 시도하였으나, 이 분석 결과는 본 연구를 통해 얻을 수 있는 관측적 결과에 대한 해석이며, 단 하나의 사례에 대한 결과이므로 일반화하기엔 무리가 있다. 해무 유입, 성장 및 소산 시 대기 경계층내에서 발생하는 메커니즘에 대한 분석은 더 정교하고 입체적인 관측망 구축 및 다양한 사례에 대한 고해상도 수치실험 등을 통해 입증될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이 연구 결과는 드론을 활용한 기상 관측이 향후 대기 하층에서 발생하는 기상현상에 대한 감시 및 예측 개선과 원격관측장비의 보완자료로서 활용 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “관측기술 지원 및 활용연구(KMA2018-00123)”의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Betts, A. K., 1982: Cloud thermodynamic models in saturation point coordinates. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2182-2191.
- \_\_\_\_\_, and B. A. Albrecht, 1987: Conserved variable analysis of the convective boundary layer thermodynamic structure over the tropical oceans. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 83-99.
- Brody, C., K. Krampf, M. Zeeman, B. Wolf, W. Junkermann, K. Schäfer, S. Emeis, and H. Kuntmann, 2017: Simultaneous multicopter-based air sampling and sensing of meteorological variables. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 2773-2784, doi:10.5194/amt-10-2773-2017.
- Choi, H., 2001: Numerical prediction on fog formation affected by the Yellow Sea and mountain. *J. Korean Meteorol. Soc.*, **37**, 261-282.
- Chong, J., S. Lee, S. Shin, S. E. Hwang, Y. Lee, J. Kim, and S. Kim, 2019: Research on the meteorological technology development using drones in the fourth industrial revolution. *J. Korea Content. Assoc.*, **19**, 12-21, doi:10.5392/JKCA.2019.19.11.012 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, S. Shin, S. E. Hwang, S. Lee, S. H. Lee, B. J. Kim, and S. Kim, 2020: Vertical measurement and analysis of meteorological factors over Boseong region using meteorological drones. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **41**, 575-587, doi:10.5467/JKESS.2020.41.6.575 (in Korean with English abstract).
- Gao, S., H. Lin, B. Shen, and G. Fu, 2007: A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: Analysis and numerical modeling. *Adv. Atmos. Sci.*, **24**, 65-81.
- Hemingway, B. L., A. E. Frazier, B. R. Elbing, and J. D. Jacob, 2017: Vertical sampling scales for atmospheric boundary layer measurements from small unmanned aircraft systems (sUAS). *Atmosphere*, **8**, 176, doi:10.3390/atmos8090176.
- Heo, K. Y., K. J. Ha, L. Mahrt, and J. S. Shim, 2010: Comparison of advection and steam fogs: From direct observation over the sea. *Atmos. Res.*, **98**, 426-437, doi:10.1016/j.atmosres.2010.08.004.
- Kim, K. H., M. S. Kim, S. W. Seo, P. S. Kim, D. H. Kang, and B. H. Kwon, 2015: Quality evaluation of wind vectors from UHF wind profiler using radiosonde measurements. *J. Environ. Sci. Int.*, **24**, 133-150, doi:10.5322/JESI.2015.24.1.133 (in Korean with English abstract).
- Kim, M. H., S. W. Park, and J. H. Bae, 2020: *Flight delay and cancellation analysis and management strategies*. Korea Transport Institute (in Korean).
- Kim, Y., S. Ku, and C. Park, 2018: Flow analysis and flight experiment for optimum height of weather data sensor. *J. Adv. Navig. Technol.*, **22**, 551-556, doi:10.12673/jant.2018.22.6.551 (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administratio [KMA], 2018: *Study on the Improvement of the Advancement of Met Ocean Service and Disaster Management Capacity*. KMA (in Korean).
- Kwak, K. H., S. H. Lee, A. Y. Kim, K. C. Park, S. E. Lee, B. S. Han, J. Lee, and Y. S. Park, 2020: Daytime evolution of lower atmospheric boundary layer structure: Comparative observations between a 307-m meteorological tower and a rotary-wing UAV. *Atmosphere*, **11**, 1142, doi:10.3390/atmos1111142.
- Lee, E., J. H. Kim, K. Y. Heo, and Y. K. Cho, 2021: Advection fog over the eastern Yellow Sea: WRF simulation and its verification by satellite and *in situ* observations. *Remote Sens.*, **13**, 1480, doi:10.3390/rs13081480.
- Lilly, D. K., 1968: Models of cloud-topped mixed layers

- under a strong inversion. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **94**, 292-309.
- Moeng, C. H., 1987: Large-Eddy simulation of a stratus-topped boundary layer. Part II: Implications for mixed-layer modeling. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1605-1614.
- \_\_\_\_\_, 2000: Entrainment rate, cloud fraction, and liquid water path of PBL stratocumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3627-3643.
- Nicholls, S., and J. D. Turton, 1986: An observational study of the structure of stratiform cloud sheets: Part II. Entrainment. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **112**, 461-480.
- Oyj, V., 2013: *Humidity Conversion Formulas: Calculation Formulas for Humidity*. Vaisala.
- Paluch, I. R., and D. H. Lenschow, 1991: Stratiform cloud formation in the marine boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2141-2158.
- Roach, W. T., 1994: Back to basics: Fog: Part 1—Definitions and basic physics. *Weather*, **49**, 411-415.
- Taylor, M. G. I., 1917: The formation of fog and mist. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **43**, 241-268.
- The Korea Road Traffic Authority [KoROAD], 2021: *Traffic Accident Statistics Analysis*. 2021 ed. KoROAD.
- Won, D. J., S. Y. Kim, K. E. Kim, and K. D. Min, 2000: Analysis of meteorological and oceanographic characteristics on the sea fog over the Yellow Sea. *J. Atmos. Sci.*, **36**, 631-642.
- Yang, Y., and S. Gao, 2020: The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea fog development. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031562, doi:10.1029/2019JD031562.