

시정계와 위성 관측 자료를 활용한 남한 안개의 객관적인 유형 분류와 특성 분석

이현경¹⁾ · 서명석^{2)*}

¹⁾국립기상과학원, ²⁾공주대학교 대기과학과

(접수일: 2019년 10월 18일, 수정일: 2019년 11월 30일, 게재확정일: 2019년 12월 6일)

Objective Classification of Fog Type and Analysis of Fog Characteristics Using Visibility Meter and Satellite Observation Data over South Korea

Hyun-Kyoung Lee¹⁾ and Myoung-Seok Suh^{2)*}

¹⁾National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

(Manuscript received 18 October 2019; revised 30 November 2019; accepted 6 December 2019)

Abstract The classification of fog type and the characteristics of fog based on fog events over South Korea were investigated using a 3-year (2015~2017) visibility meter data. One-minute visibility meter data were used to identify fog with present weather codes and surface observation data. The concept of fog events was adopted for the better definition of fog properties and more objective classification through the detailed investigation of life cycle of fog. Decision tree method was used to classify the fog types and the final fog types were radiation fog, advection fog, precipitation fog, cloud base lowering fog and morning evaporation fog. We enhanced objectivity in classifying the types of fog by adding the satellite and the buoy observations to the conventional usage of AWS and ceilometer data. Radiation fog, the most common type in South Korea, frequently occurs in inland during autumn. A considerable number of advection fogs occur in island area in summer, especially in July. Precipitation fog accounts for more than a quarter of the total fog events and frequently occurs in islands and coastal areas. Cloud base lowering fog, classified using ceilometer, occurs occasionally for all areas but the occurrence rate is relatively high in east and west coastal area. Morning evaporation fog type is rarely observed in inland. The occurrence rate of thick fog with visibility less than 100 meters is amount to 21% of total fog events. Although advection fog develops into thick fog frequently, radiation fog shows the minimum visibility, in some cases.

Key words: Visibility, fog, fog type, classification

1. 서 론

안개는 호우나 태풍 등과 같이 그 자체로 우리 생활에 직접적인 영향을 주는 위험 기상은 아니지만, 안

개가 미치는 사회적 영향은 상당하다(Haeffelin et al., 2010). 도로, 철도, 해상, 항공 등 이동수단의 발달 및 대중화에 따라 안개로 인한 항공기 출발 지연, 교통 사고 등 인명과 재산 피해가 발생하고 있다. 또한 안개는 농업, 임업 등의 산업에도 영향을 줄 뿐만 아니라(Gultepe et al., 2007), 호흡기 문제 등 사람들의 건강에도 좋지 않은 영향을 주기도 한다(Niu et al., 2010).

안개 현상의 이해와 예측을 위한 기초 연구로서 많은 기상학자들이 한 지역이나 나라에서의 기후학적

*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongju-deahak-ro, Gongju-si, Chungcheongnam-do 32588, Korea
Phone: +82-41-850-8533, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: sms416@kongju.ac.kr

연 평균 또는 월 평균 안개 일수를 분석하였다(e.g., Jhun et al., 1998; Tardif and Rasmussen, 2007; Akimoto and Kusaka, 2015). 우리나라에서도 목측 안개 자료로 연 평균, 계절 평균 또는 월 평균 안개 일수 등을 분석하여 지역별 안개의 특징, 공간 분포, 장기 변동 특성 등의 연구가 수행되었다(Kim and Lee, 1970; Heo and Lee, 1998; Jhun et al., 1998; Lee and Kim, 2006; Lee et al., 2010; Son, 2010; Lee and Ahn, 2013). 최근에는, 안개의 빈도, 지속시간, 강도를 고려하여 정의한 안개사례(fog event)가 안개 빈도의 새로운 기후학적인 지표로 사용되고 있다(Meyer and Lala, 1990; Tardif and Rasmussen, 2007; Haeffelin et al., 2010, Akimoto and Kusaka, 2015).

일본 기상청에서는 목측과 시정계 관측자료를 이용하여 안개를 관측하고 있으며, 시정계로 안개를 관측할 때는 시정계와 강우량, 눈, 상대습도 등의 관측 자료를 이용하여 안개와 눈이나 비로 인한 저시정을 구분한다(Akimoto and Kusaka, 2015). 우리나라 기상청에서도 22개 지점에서의 목측이 갖는 한계를 극복하고 국지적으로 발생하는 안개의 연속적 탐지 등을 위해 2009년부터 시정계를 도입하여 운용 중에 있으며 2017년 말 현재 남한 지역 291개 지점에서 자동으로 시정을 관측하고 있다(KMA, 2018). 따라서 주야 연속적으로 일관되게 관측이 가능한 시정계의 시정 값과 현천코드를 이용하여 안개를 판별하고, 안개 유형 분류 및 유형별 특성을 분석한다면 과거 22개의 목측 자료를 이용한 연구들보다 더 상세한 안개의 국지적 특성을 감안할 수 있을 것이다.

Tardif and Rasmussen (2007)는 미국 뉴욕 주에서 발생한 안개를 지형과 지표특성에 따라 도심, 도심주변부, 시골, 그리고 해안 평지 지역으로 나누어 분석하였다. 안개 유형 분류에 대한 신뢰도를 높이기 위해 5시간 연속 시정자료를 이용한 안개사례 개념을 적용하였고, 안개의 생성, 발달, 이동 그리고 소산에 영향을 주는 강수, 풍속, 온도, 기온변화(복사냉각), 일출시간 등의 안개 관련 인자들을 이용하여 안개 유형을 복사안개, 이류안개, 강수안개, 운저하강안개(Cloud base lowering fog), 그리고 아침증발안개(Morning evaporation fog) 등 5가지 유형으로 구분하였다. 운저하강안개는 주로 야간 시간대에 구름의 운저가 낮아지면서 발생하는 안개이다(Anderson, 1931; Pilie et al., 1979).

우리나라에서 발생하는 안개에 대한 유형 분류와 분석은 안개 발생지역의 지리적 특징, 발생과 소산 시각, 지속시간 등을 이용하거나(Heo and Lee, 1998), 안개 발생 전후의 기상요소 또는 기압계를 이용하는 등(Son, 2010; Lee and Ahn, 2013) 대부분 정성적으로 수행되었다. 주성분 분석과 과엽(Wavelet) 기법을 이용하여 남한지역에서의 안개 특성을 분석한 결과

우리나라에서 안개는 1일, 1~2주, 1~2개월의 다양한 시간규모로 발생할 뿐만 아니라 복사안개, 강수(전선)안개, 이류안개(해무) 등의 다양한 안개 유형이 동시에 서로 다른 지역에서 나타남을 보였다(Lee et al., 2010). 내륙, 해상, 연안, 그리고 인천공항과 같은 특정지역이나 지점의 안개 유형을 안개형성과 관련된 주요 기상 요소들을 이용하여 객관적으로 분류하거나 안개 유형별 사례 연구가 진행되기도 하였다(Jhun, 1998; Cho et al., 2000; Won et al., 2000; Seo et al., 2003; Huh and Ha, 2004; Kim and Yum, 2010).

Lee and Ahn (2013)은 기온, 강수, 풍속, 운량, 해기차(대기온도와 해수면온도의 차이), 지리적 위치 등의 요소를 기반으로 한 경험적인 방법을 통해 우리나라에서의 안개 유형 분류를 시도하였다. 내륙 지역에서는 복사안개의 발생빈도가 높았고, 섬지역을 포함한 서해안과 남해안 지역에서는 이류안개의 발생빈도가 높았다. 동해안지역은 다른 해역에 비해 안개 발생빈도가 적었으며 전선안개의 발생빈도가 높은 편이었고 제주 지역에서는 전선안개와 이류안개가 자주 발생함을 제시하였다. Lee and Ahn (2013)의 연구는 내륙이나 해안 등 특정 영역이나 지점이 아닌 남한 지역 전체에 대해 안개 생성에 영향을 주는 기상요소들을 이용하여 안개 유형을 객관적, 정량적으로 분류한 첫 연구였다. 하지만, 주요 판별 인자들의 선정방법이나 관측자료의 추가적 사용의 필요성이 제시되었고(Heo et al., 2016), 해안지역에서의 안개판별 시 해수면온도가 대기온도보다 높거나 같으면 이류안개로, 아니면 복사안개로 분류하는 등 분류 기법의 개선이 요구되었다. 또한 안개 발생빈도가 월등히 높은 섬 지역과 안개발생빈도수가 상대적으로 적은 해안지역을 분리해서 분석해야 함이 제시되었다.

본 연구에서는 시정계 관측자료와 위성 및 해양 부이 자료 등을 이용하여 남한지역에서 발생하는 안개의 유형을 객관적으로 분류하고 각 유형별 발생 특성을 상세하게 분석하고자 하였다. 안개 분류 방법의 기본은 Tardif and Rasmussen(2007) 분류 방법이며 새롭게 활용이 가능한 위성, 해양 부이 등의 관측자료를 이용하여 기존의 안개 유형 분류 알고리즘을 남한지역의 안개 특성을 반영할 수 있도록 개선하였다. 제2절에서는 본 연구에 사용된 자료와 분류방법을 소개하였으며, 제3절에서는 안개 발생 특성, 유형 분류 등 본 연구에서 분석한 결과들을 소개하였다. 제4절에서는 본 연구에서 도출된 연구 결과를 요약하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 관측 자료

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 시정계, 자동

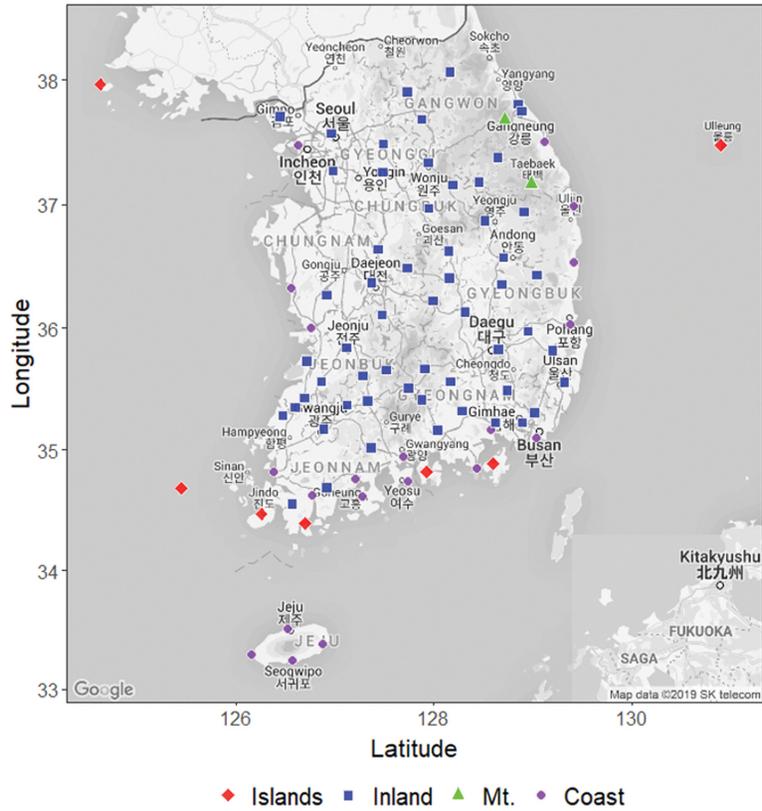


Fig. 1. Spatial distribution selected 86 visibility meters matched with ceilometers operated by KMA over South Korea (57 inland stations, 2 mountain stations, 20 coastal stations, and 7 island stations).

기상관측(AWS: Automated Weather Station) 자료, 운고계, 천리안 위성 1호(COMS: Communication, Oceanic and Meteorological Satellite-1)의 안개탐지자료 및 해상 부이 자료를 이용하였다. 전체 시정계 자료 중 2015년 1월부터 2017년 12월까지 최근 3년간 자료 수집율이 90% 이상이고, 운고계 자료가 같이 있는 86개 지점을 안개분석지점으로 선정하였다(Fig. 1).

시정계의 1분 간격 시정과 현천 자료(Present weather codes)를 이용하여 안개와 저시정을 구분한 후 안개 자료를 도출하였고, 이를 이용하여 1시간 간격의 정시 안개 자료를 만들었다. 안개 유형 분류를 위해 1시간 간격의 AWS 자료의 기온, 상대습도, 풍속, 강수 자료와 운고계의 운저 고도와 전운량 자료, 지점별 일출시간 등을 이용하였다. 우리나라 해상에서 자주 발생하는 이류안개(해무)의 분류 정확도를 향상시키기 위해 국가기상위성센터에서 제공하는 천리안 위성 1호의 한반도 영역 안개분석 이진 자료와 해상 부이의 상대습도자료도 이용하였다. 천리안 위성의 안개분석 이진 자료는 약 15분 간격으로 일 84회 제공되며 1024 × 1024 화소 크기로, 화소당 1.7208 km 해상도를 갖는

다(NMSC, 2019). 각 화소는 0~3의 숫자를 가지며, 각각 청천, 주간 안개, 야간 안개, 여명기/황혼기 안개를 의미한다. 안개분석 이진자료는 정시자료를 사용하였으며, 정시자료가 없는 경우는 15분 이전의 자료를 사용하였다. 해상 부이에서 측정되는 1시간 간격 상대습도 자료로 흑산도(169)는 칠발도 부이(22102) 자료를, 울릉도(105)는 울릉도 부이(21229) 자료를 각각 사용하였다. 백령도(102)는 인천 부이(22185) 자료를 사용하였으나, 인천 부이(22185)의 관측 자료가 없는 2015년 1월1일부터 12월 21일까지 당시 백령도와 가장 거리가 가까웠던 덕적도 부이(22101)의 자료를 대체하여 사용하였다.

2.2 연구방법

2.2.1 시정계 자료를 이용한 안개 판별

안개의 지역적 특성 비교를 위해 시정계 설치 지점의 지리적 위치에 따라 내륙, 산간(해발고도 600 m 이상), 섬, 해안(해안선에서 3.5 km 이내) 지역으로 구분하였으며, 각지역마다 57개소, 2개소, 7개소, 그리고 20개소가 위치하였다(Fig. 1).

시정계를 이용한 안개의 판별, 안개의 시작과 소산 시점, 안개 일 구분 등은 Lee and Suh (2018)와 동일한 방식을 적용하였다. 안개 자료 생성을 위해 시정계의 시정은 10분 이동평균을 적용하여 1분 간격의 시정으로 재계산하였으며, 10분 범위 내 적어도 6번 이상 관측자료가 있는 경우만 사용하였다. 또한, 이번 연구에서는 시정계 자료 품질을 높이기 위해 1분 간격의 시정계 관측자료에 (식1)을 적용하여 비정상적으로 높게 나타나는 값들(spike/dip)을 제거하고(NMI, 2002), 10분 이동평균 시정을 계산하였다.

$$\left| \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| + \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \right| > 2\delta \quad (1)$$

$$\text{and } \min \left(\left| \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right|, \left| \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \right| \right) > \delta$$

여기서 δ 값은 1 km 미만의 1분 시정관측 자료에 대해 이전 시간 관측과의 시정거리 차이 분포에서 97.5 백분위수(percentile)에 해당하는 값을 고려하여 1 km로 정하였다. 관측자료 $x_i = x(t_i)$ 이며, 시간 t 는 1분 간격으로 관측시간 전후로 결측자료가 있는 경우 최대 5분 범위의 시정자료를 이용하였다.

안개로 인한 저시정과 강수현상, 연무, 황사 등으로 인한 저시정을 구분하기 위해 시정자료와 시정계의 현천코드, 1분 간격 AWS의 상대습도 자료를 이용하였다. 자료품질관리를 거쳐 안개로 판별된 1분 간격의 시정 자료에서 1시간 간격의 정시 안개(시정) 자료를 산출하였다. 비로 인한 저시정과 안개의 구분이 목측 안개와 시정계 계측 안개의 정확도 차이에 기여하는 점을 고려하여(Lee and Suh, 2018), AWS의 시간당 강수량이 3 mm 이상인 경우 시정이 1 km 미만이어도 강수에 의한 저시정으로 판단하여 안개자료에서 제외하였다(Yoo et al., 2016). 안개 일(fog day)은 안개 판결과정을 거친 1분 간격의 시정이 한번이라도 1 km 이하를 기록한 날로 정의하였다.

2.2.2 안개 유형 분류

Tardif and Rasmussen (2007)은 지속시간이 짧은 안개의 경우 발생 원인을 분석하기가 쉽지 않지만, 안개가 수 시간 이상 지속되었을 때의 안개 현상을 의미하는 “안개사례(fog event)” 개념을 도입하면, 안개의 일생주기에 영향을 주는 인자들의 특성에 대해 유의미한 분석을 할 수가 있다고 하였다. 프랑스 파리 근교에서 발생한 안개의 유형 분석과 일본의 안개유형 분석에도 Tardif and Rasmussen (2007)의 안개사례 선별 방식과 안개 유형 분류 방식을 적용하였다(Haefelin et al., 2010; Akimoto and Kusaka, 2015). 본 연구에서도 객관적이고 신뢰도가 있는 안개 유형

분류를 위해 안개사례를 선별하여 사용하였다. 안개 사례의 선정은 신경망이나 의사결정트리방법과 유사한 분류 정확도를 가지는 “M-of-N construct” 방법(Setiono et al., 2005)에 기초하였으며, 하나의 안개사례란 1시간 간격의 5시간 연속 시정 자료(N)에서 1.6 km 미만의 수평 시정(M)이 적어도 3번 이상 관측되고, 안개의 기준인 1 km 미만의 수평 시정이 적어도 1번 이상 관측된 경우를 의미한다. 여기서 시정 기준으로 1.6 km를 사용한 것은 항공기 운항을 고려한 시정이며, 짙은 안개사례는 안개사례와 동일하나 1 km 미만의 시정 대신 100 m 미만의 수평 시정이 적어도 1번 이상 관측된 경우로 하였다. 안개 유형 분류시 운고계 관측자료가 없는 안개사례는 전체 안개사례의 약 7%에 해당되는데 안개 유형 분류의 정확도 향상을 위해 안개분석에서 제외하였다. 최종적으로 안개 유형 분류와 안개의 시종, 지속시간 등의 특징 분석에 사용된 안개사례는 총 4003건이었으며, 그중 짙은 안개사례는 828건이었다.

Figure 2는 본 연구에서 사용한 안개유형 분류 순서도를 나타낸 것으로 본 분류기법에서는 안개유형별 발생 특성에 영향을 주는 강수, 풍속, 운량, 운고, 기온, 노점온도, 기온변화(복사냉각) 등의 주요 기상 요소들(Tardif and Rasmussen, 2007)과 위성 안개탐지여부, 인접한 해상 부이 습도 등을 안개 판별 보조요소들로 사용한다. 의사결정나무(Decision tree) 방식의 안개유형 분류 알고리즘은 복사안개, 이류안개, 강수안개, 운저하강안개, 그리고 아침증발안개 등 5개 유형으로 분류하는데, 안개 발생시나 이전 시간에 강수현상이 있을 수 있는 점을 고려하여 가장 먼저 강수유무를 기준으로 강수(전선)안개를 분류한다. 복사안개는 맑은 날 야간에 복사냉각에 의해 안개가 발생하는 경우, 복사냉각에 의해 안개가 발생하는 과정에 기온이 약간 증가한 경우 등으로 하였다. 예를 들어 안개 발생 시각과 이전 시간대에 강수현상이 없었고, 풍속이 2.5 m s^{-1} 미만으로 약하며, 하늘상태(운량)가 맑고, 복사냉각(기온하강)이 있으면 복사안개로 분류된다. 이류안개는 해상과 같이 인근 지역에서 이미 형성된 안개가 관측지점으로 이류해 오는 과정을 고려한다. 강수안개가 아닌 안개사례들 중 풍속이 2.5 m s^{-1} 이상인데 시정이 1 km 이하로 갑자기 낮아지는 안개사례와 하늘상태가 맑았다가 갑자기 200 m 이하의 운저고도가 관측되는 안개사례들은 이류안개로 분류된다. 우리나라 주변 해상에서의 이류안개 즉, 해무 발생시의 기상조건에 대한 연구에 의하면, 해무가 잦은 서해안 섬 지역의 경우 평균 풍속은 3.5 m s^{-1} 이었으며, 지역별로 2 m s^{-1} 에서 6.5 m s^{-1} 이상의 평균 풍속 분포를 보였다(Won et al., 2000). 서해 남부 먼바다에 위치한 흑산도의 경우 평균 풍속이 가장 강한 지점이

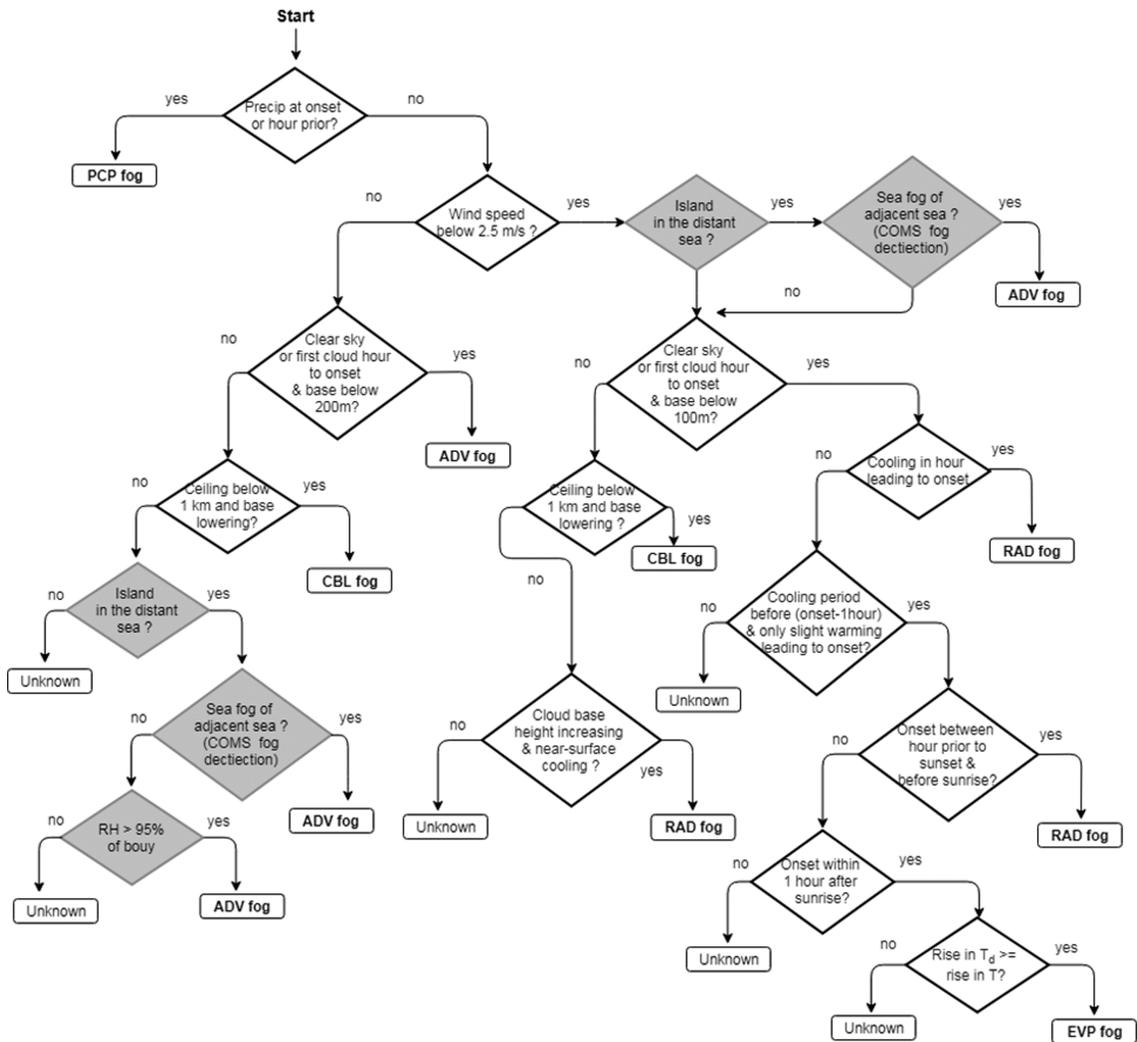


Fig. 2. Flowchart diagram illustrating the fog-type classification (grey conditional statements are added to classify for advection fog using COMS fog detection data and relative humidity of the adjacent buoy).

지만, 개별 사례에서는 풍속이 2.5 m s^{-1} 일 때도 해무가 관측되었다(Yoo and Kim, 2002). 또한, 해무가 가장 자주 발생하는 6월과 7월의 경우 하늘상태가 맑은 날보다 구름이 끼거나 흐린 날이 월등히 많았다(Won et al., 2000). 안개 유형 분류 알고리즘(Fig. 2)에서는 이러한 해무의 특성을 반영하여 백령도(102), 울릉도(115), 흑산도(169) 지점의 안개사례는 관측지점부근에 위성 안개탐지 자료가 있는 경우 이류안개로 분류하였다. 또한 Kim and Yum (2010)의 이류안개 분류 기준을 반영하여, 섬 지역과 가까운 해상 부이에서 관측한 상대습도가 95%를 초과하는 경우도 이류안개로 판단하였다. 안개사례 발생시 풍속이 2.5

m s^{-1} 이상인 경우에도 일반적인 조건의 이류안개와 운저하강안개 유형을 순차적으로 구분한 후, 섬 지역의 경우 위성 안개탐지 자료와 인근 해상 부이의 상대습도 자료를 이용하여 이류안개(해무)로 재차 선별하였다. 운저하강안개는 바람이 약하고 구름이 있으며, 5시간 전의 운저가 1 km 미만이었다가 점차 운저가 낮아지는 조건을 만족하는 안개사례이다. 기상청의 운고계 자료 활용이 가능해지면서 판별이 가능해진 안개 유형이다. 아침증발안개는 일출 후 한시간 이내에 기온이 상승되는 것보다 노점온도가 더 크게 상승됨에 따라 대기가 포화되면서 일시적으로 안개가 형성되는 과정을 고려하여 분류하였다.

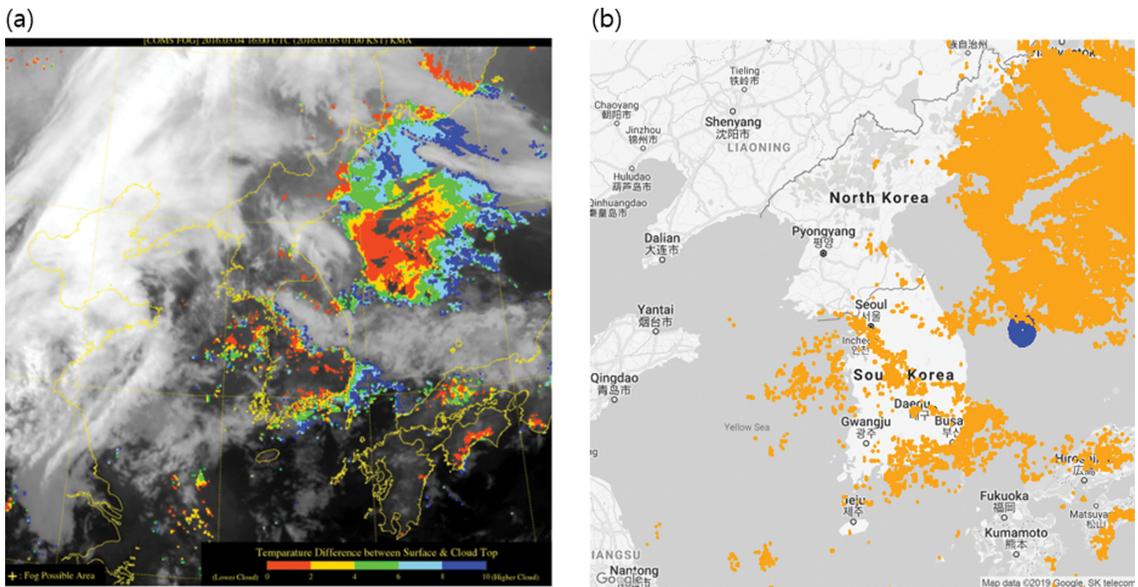


Fig. 3. COMS (a) fog retrieval image and (b) image with fog binary data at 15:00 KST on March 5, 2016. The orange areas indicate fog and a blue circle shows an adjacent fog detection area of Ulleungdo.

안개유형 분류 알고리즘에서 강수유무의 기준은 안개사례 발생 시각을 기준으로 5시간 누적 강수량이 0.1 mm 이상인 경우 강수가 있다고 판단하였으며, 전운량은 5시간 평균이 2할 이하인 경우에 하늘상태가 맑은 것으로 구분하였다. 풍속은 안개사례 발생시각을 기준으로 2.5 m s^{-1} 이상과 미만, 운고는 200 m 미만과 100 m 미만으로 나누었으며 해상 부이의 상대습도는 95% 이상과 미만으로 나누어 구분하였다. 기온의 변화와 노점온도의 변화는 5시간 전을 기준으로 하였다. Figure 3은 COMS-1호 위성 안개탐지영상과 이진자료의 예시이며, 안개탐지 이진자료를 이용하여 시정계 관측소를 기준으로 반경 0.5도(약 55 km) 부근에 안개 화소가 6×6 (약 100 km^2) 이상일 때와 미만일 때로 나누어 안개유형 판별에 사용하였다.

내륙의 복사안개나 해상의 이류안개처럼 안개 발생 원인이 분명한 안개 이벤트도 있지만, 여러 가지 발생 원인이 혼합된 형태로 안개이벤트가 나타날 수도 있다. Ahn et al. (2001)은 해무의 특성에 따른 발생 메커니즘을 수치모델로 모사하는 연구를 하면서, 전선의 활동과 관련해 발생하는 안개는 한기의 유입이나 습윤한 공기의 유입에 따른 이류 안개 그리고 비가 낙하하거나 낙하 후 증발에 의해 발생하는 안개의 성질을 복합적으로 가지고 있음은 언급하였다. 본 연구에서는 이러한 안개에 대해 지상에서 강수가 관측된 경우에는 강수안개로, 그렇지 않은 경우에는 풍속 등을 고려하여 이류안개 등으로 유형을 구분하였다.

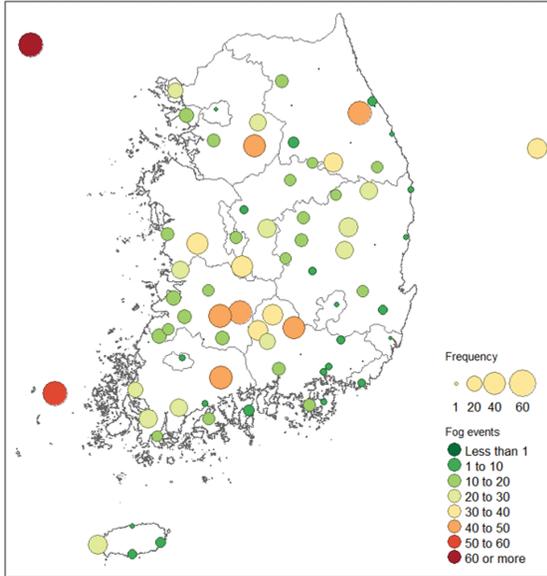
3. 결 과

3.1 안개사례의 발생빈도

3.1.1 안개일 수와 안개사례 수

86개 지점에 대한 시정계 계측 안개일 수와 안개사례 수의 연 평균은 각각 26.5일과 15.5건으로 안개사례 수가 전체 안개일 수의 약 59%에 해당하였다. 지역별로는 섬지역에서 73%로 안개일 수 대비 안개사례 수의 비율이 가장 높았으며, 내륙, 산간, 해안지역에서는 각각 59%, 64%, 그리고 47%이다. 1분자료 대신 1시간 간격의 정시 시정계 관측자료를 이용하여 안개일 수를 계산하면, 안개사례 수는 안개일 수 대비 81%에 해당하였다. 안개일 수와 안개사례 수에서 차이가 발생하는 이유는 안개가 야간에 생성되어 다음날까지 지속되거나, 안개가 단시간에 국지적으로 발생하여 안개사례 조건을 만족하지 못하는 경우, 그리고 안개의 지속시간이 24시간을 넘는 경우 등 안개일 수가 안개사례 수보다 많게 나올 수 있기 때문이다. 안개일 수와 안개사례 수의 비율은 지리적 환경과 계절에 따라 차이가 있었으나 두 자료 모두 유사한 계절적인 변동 패턴을 보여주었다(Akimoto and Kusaka, 2015). 전체 86개소 모두에서 안개가 탐지되었으나, 앞에서 언급한 안개일과 안개사례 수 차이로 인해 안개사례가 없는 지점, 안개사례는 있었으나 운고계 관측자료가 없어 제외된 지점을 제외한 총 71개 지점의 자료를 최종 분석하였다.

(a) Fog



(b) Thick fog

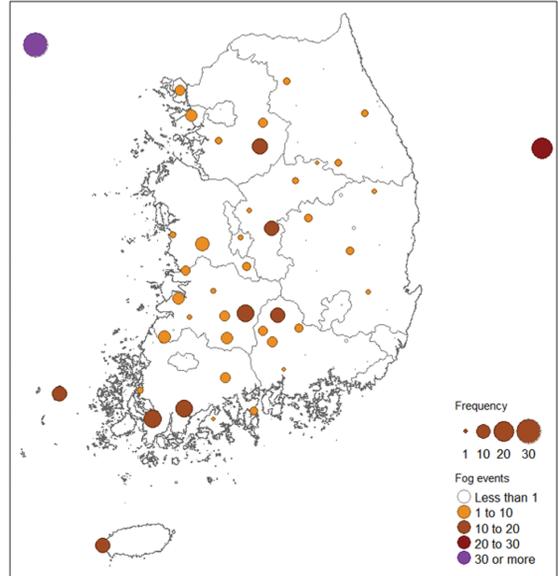


Fig. 4. Distribution map of the annual mean number of a) fog events with visibility less than 1 kilometers and b) thick fog events with visibility less than 100 meters, averaged over the three-year study period from 2015 to 2017.

3.1.2 연 평균 발생빈도

Figure 4는 지점별 연 평균 안개사례의 발생빈도에 대한 공간분포를 보여준다. 서해에 위치한 섬 지역인 백령도와 흑산도에서는 각각 연 70건, 연 50건 이상의 안개사례가 발생하였고, 동해상의 울릉도에서도 연 30건 이상 안개사례가 나타났다. 또한 경기남서부 내륙지역, 전남·전북 동부 내륙지역, 경남 서북부 내륙지역, 강원산간지역 등의 지점에서는 연 40건 이상 안개사례가 발생하였다. 하지만, 안개사례 다발 지역내 인접한 지점 간에도 안개 발생빈도 차가 크게 나타나는 특징을 보였다. 선행 연구에서 밝힌 바와 같이 관측지점이 바다, 강이나 댐에 가까이 있어 수증기 공급이 풍부하거나, 주변이 산으로 둘러싸인 분지에 위치하여 복사냉각이 잘 발생하는 지점 등에서는 안개가 자주 발생하고, 지표면이 포장되어 수증기 공급이 제한되고 도시열섬 현상이 강한 도심에 위치한 지점의 경우 안개가 적게 관측되고 있다(Jhun et al., 1998; Akimoto and Kusaka, 2015).

질은 안개사례 발생건수는 백령도가 연 30건 이상으로 가장 많았으며, 울릉도에서도 연 20건 이상 질은 안개사례가 나타났다. 울릉도의 경우 서해의 섬들에 비해 안개사례 발생빈도는 상대적으로 낮지만, 발생 안개의 대부분이 질은 안개사례로 발달하는 특징을 보인다. 내륙지역인 경기 남서부, 충북 중부, 전북 동부와 경남 북 서부지역, 그리고 전남 남서부 지역

에 위치한 지점들에서는 연 10건 이상 질은 안개가 나타났다. 안개사례와 질은 안개사례 모두에서 지리적 위치에 따라 발생빈도의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다.

Kim and Lee (1970)은 한반도를 17개의 안개기후구로 분류하였으며, 그 중 남한지역은 10개의 안개기후구로 분류하였다. 안개 다발 기후구는 월 평균 안개일 수가 3일 이상인 곳으로, 경기도 근해 및 태안반도, 중부서안, 호남 내륙, 영남 내륙 등이 해당되었다. Jhun et al. (1998)은 서울과 5대 광역시, 대관령, 제주 등 22개 관측지점의 자료의 공간분석에서 대관령을 중심으로 한 동부 산악권, 순천과 진주 일대의 남해안 중부권, 양평 중심의 중부 내륙권을 3대 안개 다발권으로 분석하였다. 기존의 연구와 본 연구에서 사용한 관측지점 수의 차이에도 불구하고, 안개 다발 지점들의 공간분포가 유사하게 나타났다. 본 연구에서 연 평균 안개사례 건수가 30건 이상인 지점은 경기 이천과 백령도, 강원 영월, 대관령, 충남 부여와 금산, 전북 임실, 장수, 순천, 경남 함양, 거창, 합천, 전남 흑산도, 경북 울릉도 등 총 14개 지점이었다.

3.1.3 계절별 발생빈도

Figure 5는 계절별 안개사례의 발생빈도를 보여준다. 봄철에는 섬지역과 제주 서부해안지역에서 안개

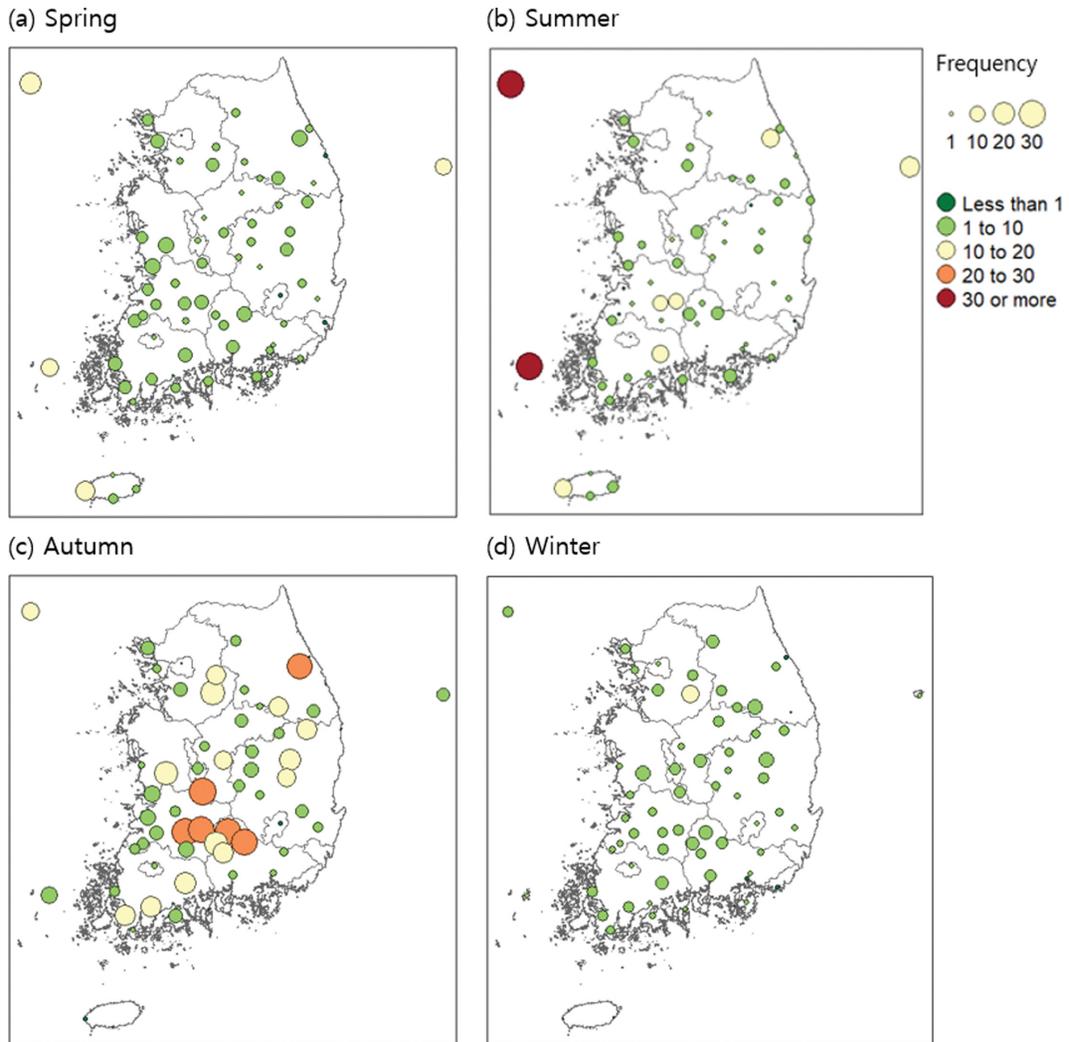


Fig. 5. Distribution of seasonal mean fog events in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter.

사례가 자주 나타나며 내륙과 서해안지역으로는 가을철보다는 발생빈도는 적지만, 대다수의 지점에서 안개사례가 나타난다. 여름철에는 섬지역에서 안개사례가 월등히 자주 발생하는 특징을 보인다. 내륙에서는 전체적으로 안개발생빈도가 적고 지점별 안개사례일수의 차가 크다. 가을철에는 내륙 전체지역에서 발생빈도가 높고, 특히 전북 동부 내륙지역, 경남 북서부 내륙지역, 충남 남부 내륙지역, 강원 산간지역의 지점들에서 안개사례의 발생이 잦다. 하지만 겨울철에는 섬지역에서 안개사례 빈도가 눈에 띄게 줄어들고, 내륙에서도 안개발생이 적다. 짙은 안개사례는 봄철과 여름철에 섬지역과 제주 서부해안지역에서 발생빈도가 높고, 가을철에는 내륙지역 중 경기 남부지역, 충

북 중부지역, 전북 동부지역, 전남 남동부지역, 경남 북서부지역에 위치하는 지점들에서 발생빈도가 높다. 또한 여름철에는 내륙에서 짙은 안개 사례가 발생하는 지점수가 다른 계절에 비해 매우 적은 특징이 있다(Fig. 6).

3.1.4 지리적위치 및 강도별 발생빈도

지리적 위치에 따른 월 평균 안개사례 발생빈도와 강도(시정거리)별 발생 비율은 Fig. 7과 같다. 내륙지역은 가을철인 9월에서 11월 사이에 안개사례 발생빈도가 높으며, 특히, 10월에 안개사례가 자주 발생하고, 짙은 안개사례의 발생 비율도 다른 달에 비해 높다. 맑은 날이 많고, 기온이 상승하는 5월과 6월에는 다

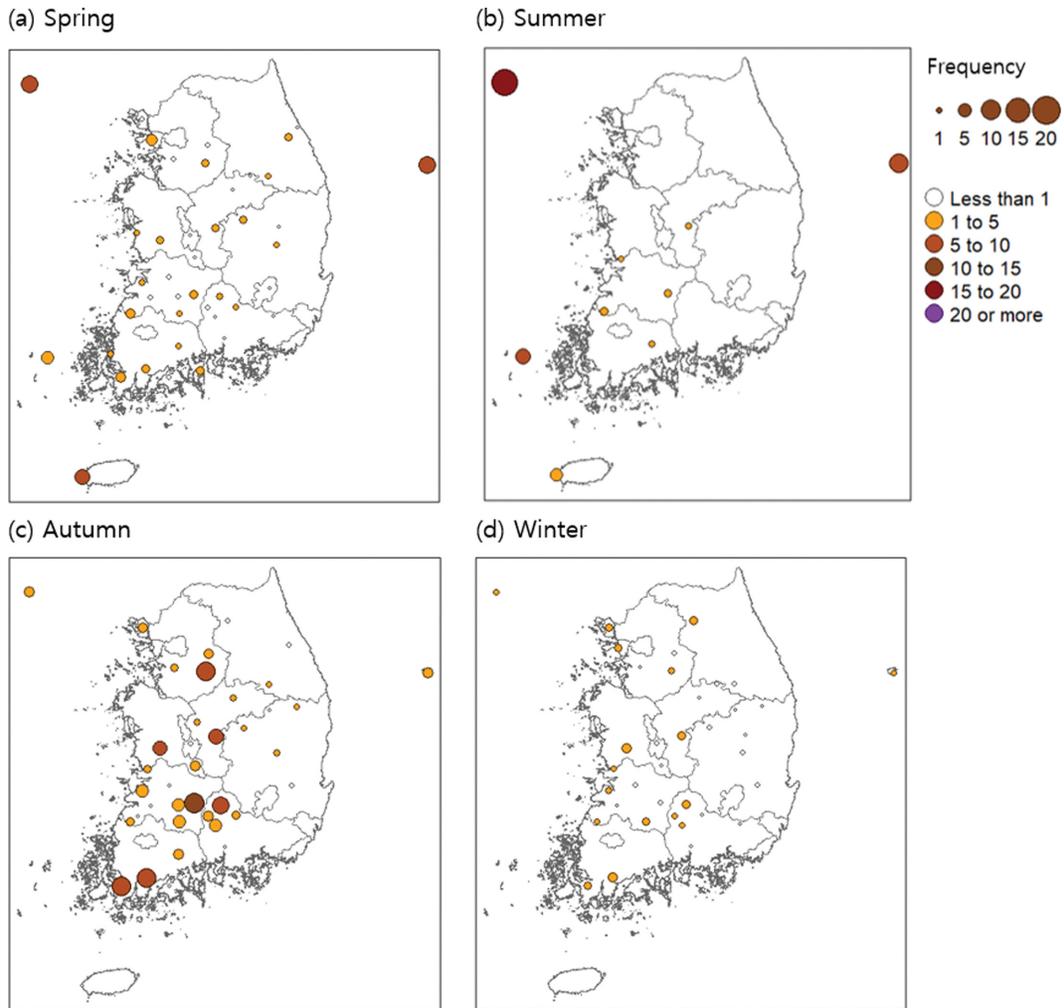


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for thick fog events with visibility less than 100 meters.

른 달에 비해 내륙지역에서 안개사례의 발생이 적다. 산간에서는 4~10월(5월 제외)에 안개사례가 자주 발생하고 있으며 특히 9월과 10월의 발생빈도가 높다. 산간지역에서는 100 m 미만의 짙은 안개사례의 발생 빈도는 타지역에 비해 낮은 편이다. 해안지역에서는 4월과 7월에 안개사례의 발생빈도가 높고, 늦여름부터 겨울까지 다른 지역에 비해 안개사례 발생빈도가 낮다. 섬지역의 경우 해기차가 큰 6월과 7월에 안개 사례가 자주 발생하였으며, 짙은 안개사례로 발달하는 비율이 다른 지역보다 높다.

서해, 남해, 그리고 동해상에 위치하는 섬지역과 해안지역에서의 안개사례 수는 해역별로 차이가 크게 나타난다(Fig. 8). 서해상의 섬지역(백령도, 흑산도)에서는 6월과 7월에 월 평균 안개사례 수가 15건 이상

으로 월등히 많으나, 서해안지역에서는 단지 4월과 7월에만 월 평균 약 4회 수준으로 발생하고 있을 뿐이다. 또한 서해 섬에서는 12, 1, 2, 3월에서 그리고 서해안지역에서는 1, 2, 5, 8월에 안개사례 수가 매우 적다. 이것은 3~4월에는 남서해상에 고기압이 위치하게 됨에 따라 상대적으로 따뜻한 기류가 서해상으로 유입되면서 양의 해기차가 발생하다가, 5월부터는 음의 해기차를 보인다는 Yoon et al. (2008)의 분석과 일치한다. 또한 서해는 초여름에 조석 운동이 활발해져 연안 표층수와 저층수의 혼합이 일어나 표층수의 수온 상승이 억제되지만, 여름에는 강한 수온 약층으로 인하여 해수의 수직 혼합이 약화되어 강한 일사에 의한 해수면의 온도가 상승하기 때문에, 8월이 되면 해기차가 줄어들거나 역전되면서 해무의 발생빈도가 줄어

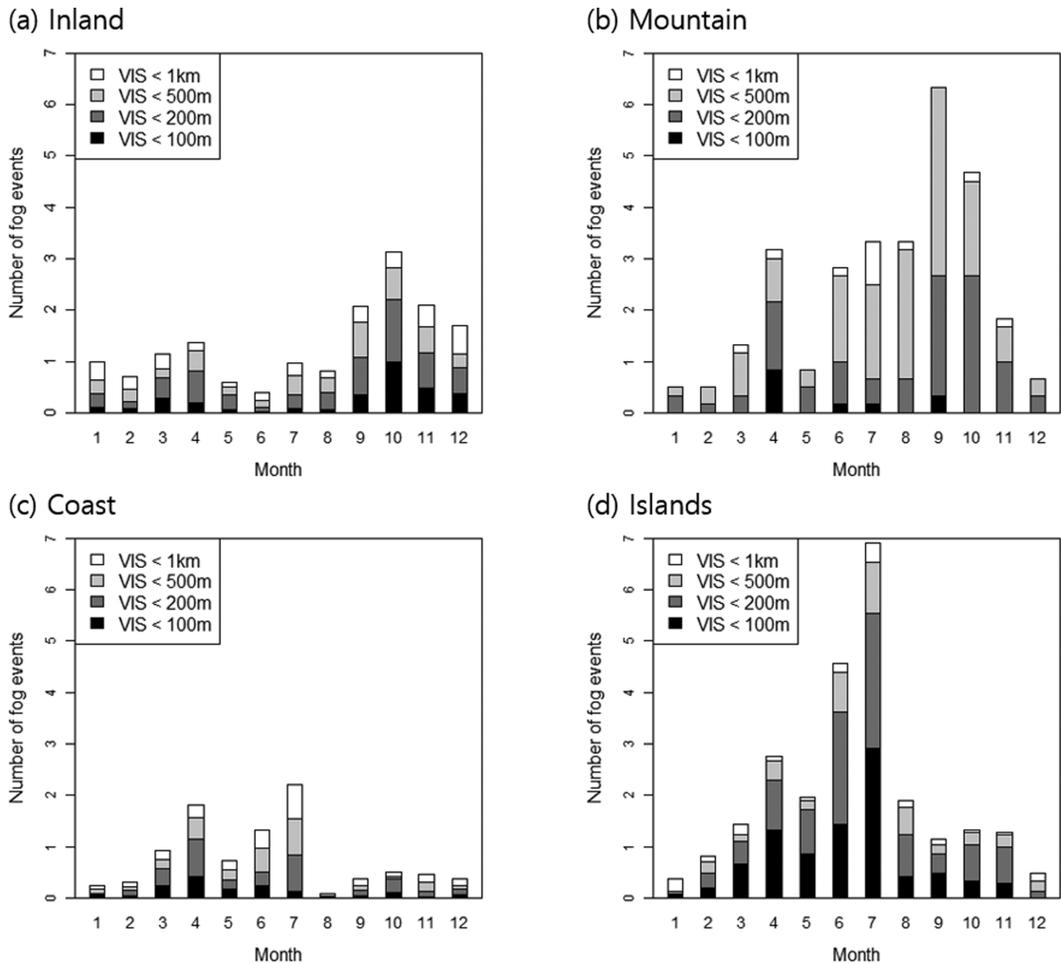


Fig. 7. Monthly variation of occurrence of fog events and fog intensity averaged for the 3 years (2015~2017) for the sub-regions.

든다는 NIMR (1986)의 연구 결과와도 부합한다. 남해의 경우 안개사례 수가 해안가 및 섬 모두에서 월별로 1~2회 이내일 뿐만 아니라 안개사례가 없는 월도 있다. 남해안 가까이 위치한 섬들은 연육교가 연결되어 있을 정도로 내륙과 가깝기 때문에 다른 해역과 달리 섬지역과 해안지역의 차이가 적은 것으로 판단된다. Sohn (2010)은 남해안의 경우 서해안보다 안개일 수가 적고, 상대적으로 여름철에 자주 발생하며, 동해안과 달리 이류안개 뿐만 아니라 지역에 따라 가을에는 복사안개도 발생하며, 저기압이나 장마전선이지날 때는 강수안개도 발생함을 보였다. 동해안은 서해안보다 해기차가 상대적으로 크지 않기 때문에 안개사례 발생 횟수가 적지만(Cho et al., 2000), 동해(울릉도)와 동해안지역은 모두 7월에 안개사례 수가 12회와 2회 내외로 다른 달에 비해 현저히 많았다. 또

한, 10월에서 다음해 3월까지의 안개사례가 발생하지 않고 있다. 동해안에서 해무는 주로 5월에서 8월에 집중되어 있고, 9월에서 4월까지는 거의 발생하지 않는데, 이는 5월에서 8월까지는 높은 해기차를 보이다가 9월에는 표층해수가 따뜻해지면서 해기차가 감소하고, 지리적 특성으로 가을철과 겨울철에 복사안개 발생이 억제되기 때문이라고 분석한 Suh et al. (2003)의 연구결과와 잘 일치한다. Byun et al. (1997)은 동해와 그 주변에서 발생하는 해무나 이류안개는 여름 몬순의 남서풍에 동반된 온난 습윤한 공기가 한랭한 해수면상으로 이루어져 발생함을 밝혔다.

지역별 안개사례에서 시정 구간별 발생빈도수 분포를 Fig. 9에 제시하였다. 전체적으로 가장 빈도수가 높은 최소 시정거리는 100 m~200 m 미만이었으며, 총 안개사례의 79.3%에서 최소 시정이 100 m 이상으로

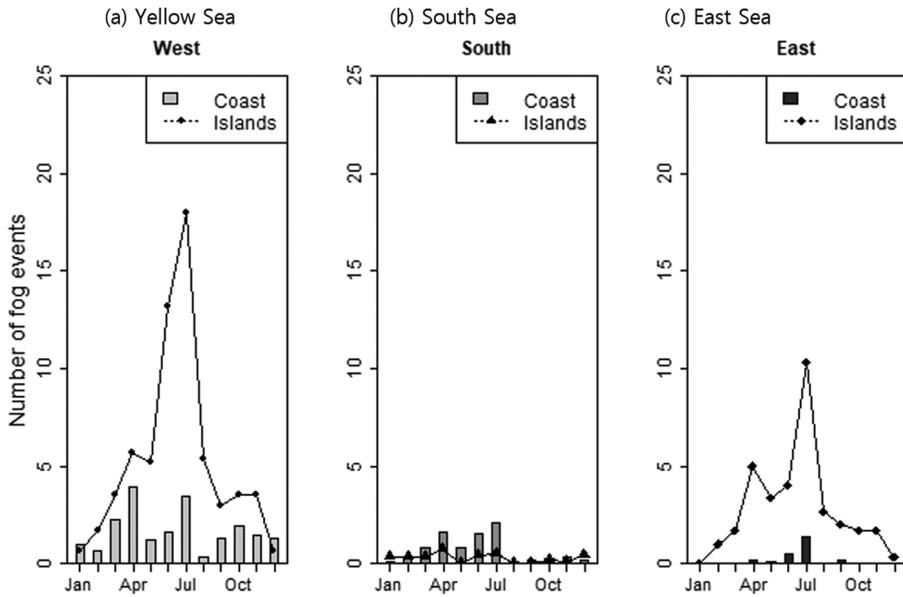


Fig. 8. Monthly mean frequency of occurrence of fog events from 2015 to 2017 for (a) Yellow sea, (b) South sea, and (c) East sea.

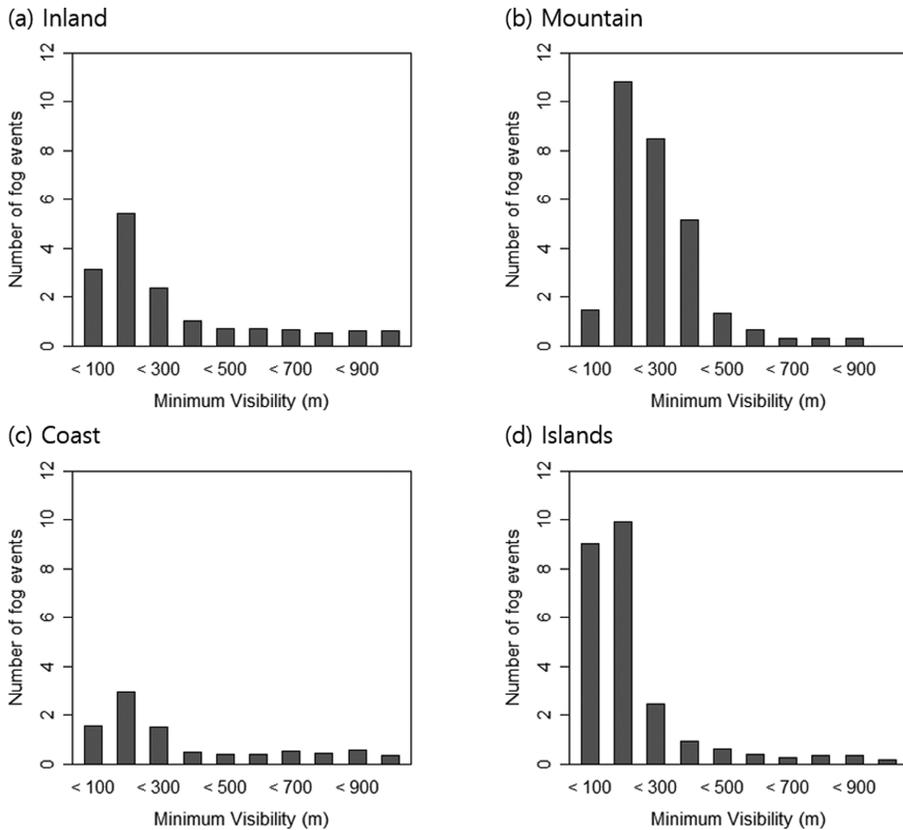


Fig. 9. Frequency distribution of minimum atmospheric visibility for annual fog events from 2015 to 2017 at (a) inland stations, (b) mountain stations, (c) coastal stations and (d) island stations.

Table 1. Percentages of fog types for fog events with visibility less than 1 kilometer. The predominant fog type is radiation fog, which accounts for more than half of all fog events in South Korea. Precipitation fog, advection fog, and cloud base lowering fog follow up.

	Radiation fog	Advection fog	Precipitation fog	Cloud base lowering fog	Morning evaporation fog	Unknown
All stations	58.5%	6.7%	28.2%	2.1%	0.1%	4.4%
Inland	71.3%	0.2%	24.2%	2.0%	0.1%	2.1%
Mountain	60.8%	2.3%	22.7%	2.8%	0.0%	11.4%
Islands	6.9%	45.2%	38.7%	1.0%	0.0%	8.2%
Coast	42.9%	3.9%	39.4%	3.7%	0.0%	10.1%

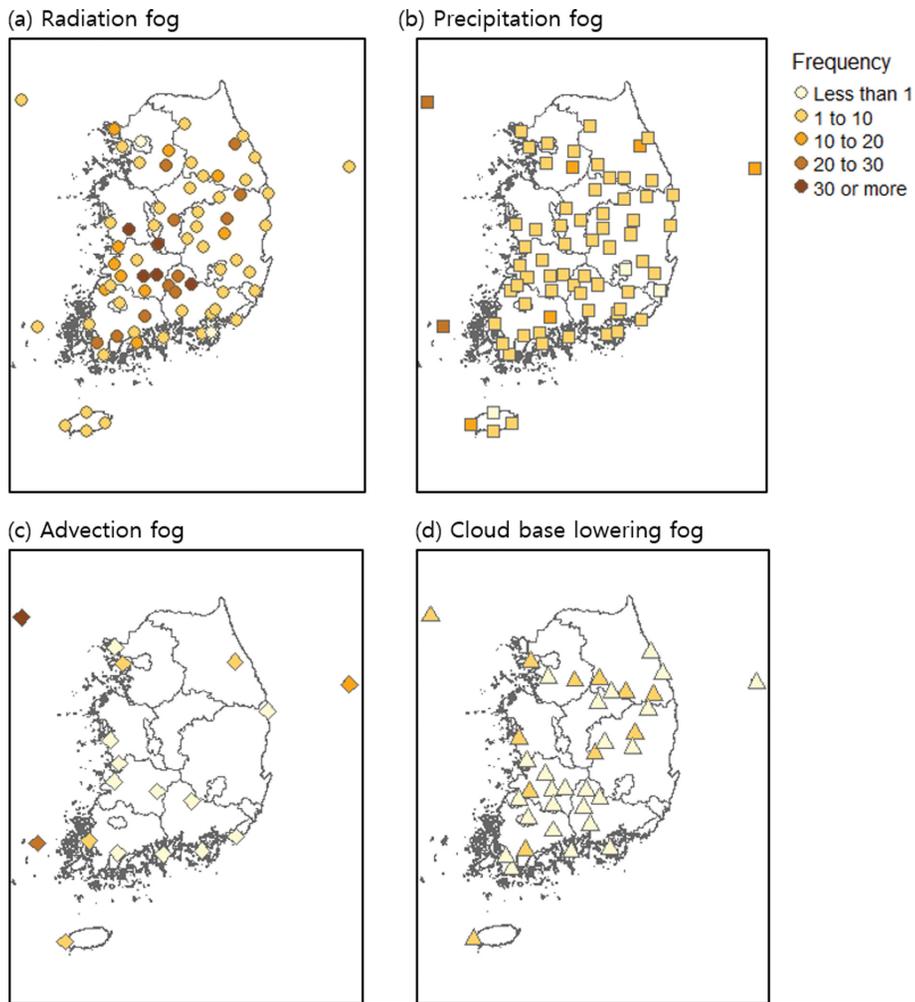


Fig. 10. The spatial distribution of annual mean number of the types of fog, (a) radiation fog type, (b) precipitation fog type, (c) advection fog type, and (d) cloud base lowering fog type for each visibility-meter stations over the three-year study period from 2015 to 2017.

나타났다. 짙은 안개사례는 전체의 20.7%를 차지했고, 섬지역의 경우는 다른 지역에 비해 짙은 안개사례의

비율이 높아, 31%의 사례에서 최소시정이 나타났다. 산간지역은 500 m 미만의 최소시정 발생 비율이 타

Table 2. Percentages of fog types for thick fog events with visibility less than 100 meters.

	Radiation fog	Advection fog	Precipitation fog	Cloud base lowering fog	Morning evaporation fog	Unknown
All stations	62.4%	12.1%	19.4%	1.2%	0.1%	4.7%
Inland	86.2%	0.2%	11.6%	0.9%	0.2%	0.9%
Mountain	33.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	66.7%
Islands	6.3%	49.2%	36.0%	0.5%	0.0%	7.9%
Coast	42.6%	6.4%	33.0%	4.3%	0.0%	13.8%

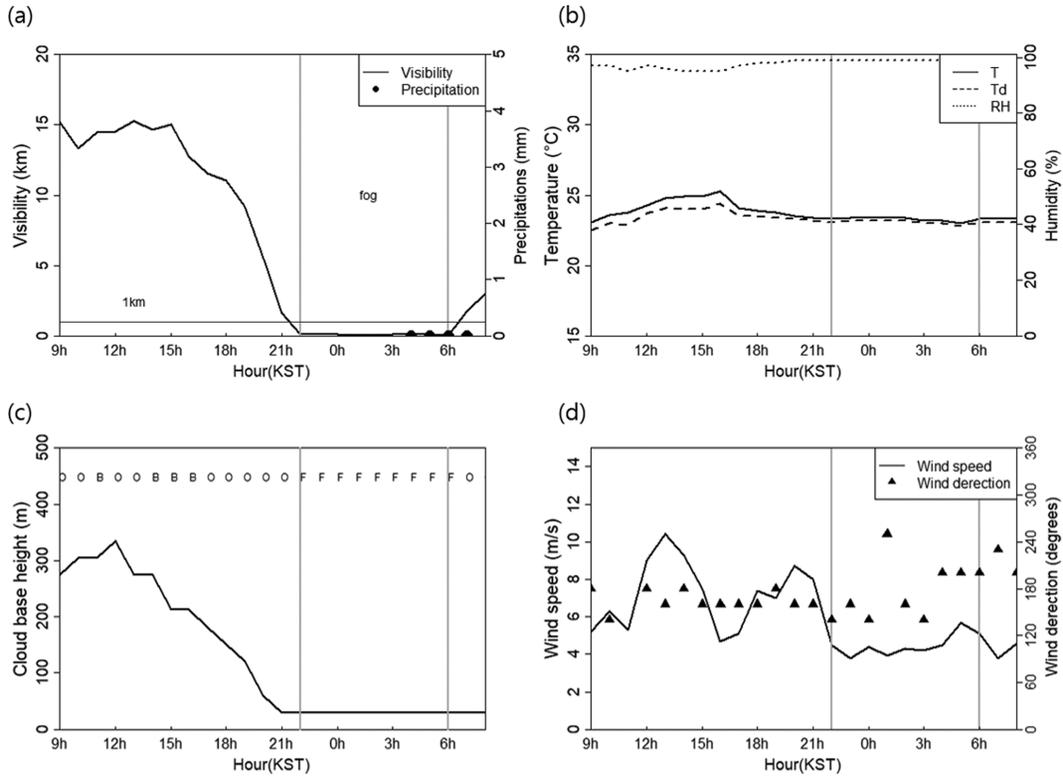


Fig. 11. Horizontal visibility, temperature, relative humidity, cloud base height with summation sky coverage (O: overcast (8/8), B: Broken (5/8-7/8), F: obstacle), wind speed and precipitation of Baekryeongdo (102) for 22–23 July 2016. The period of fog by visibility meter (vertical gray bars) is shown.

지역에 비해 높았으나, 최소시정 100 m 미만의 짙은 안개사례 비율은 오히려 적은 편이었다.

3.2 안개 유형별 발생빈도

안개유형 분류 알고리즘(Fig. 2)을 전체 안개사례에 적용한 결과, 전체 안개사례의 96%에서 안개 유형이 분류되었으며 4%는 미분류로 남았다. Table 1은 복사안개, 이류안개, 강수안개, 운저하강안개, 그리고 아침 증발안개 등 5개 유형에 대한 지역별 발생 비율이며, Fig. 10은 안개유형별 안개사례의 연 평균 발생빈도를 나타낸 것이다. 우리나라에서 복사안개는 맑고 구름

이 없는 날이 많은 가을철에 가장 많이 발생하는데 (Jhun et al., 1998; Heo and Ha, 2004; Lee et al., 2010; Lee and Ahn, 2013), 본 연구에서도 내륙에서는 5개의 안개 유형 중 복사안개의 발생 비율이 71.3%로 가장 높았고, 전체 안개 유형의 58.5%를 차지했다. 다음으로 강수안개 유형은 전체 안개 사례의 28.2%에 해당하며, 모든 지역에서 20% 이상 고르게 분포했다. 특히, 섬지역과 해안가에서는 거의 40%에 이르는 높은 발생 비율을 보였다. 이류안개는 섬지역과 해안지역에서 주로 나타났으며, 섬지역에서는 45.2%의 높은 발생빈도를 보였다. 내륙지역에서 이류안개가 나

타나는 지점은 드물었다. 운저하강안개는 전체 안개 유형의 2.1%로 발생비율은 적지만, 일부 내륙지역을 제외하고 다수의 지점에서 관측되었다. 아침중발안개의 경우 내륙에 위치하고 호수나 강이 있는 중소도시인 충주와 부여에서 각각 2회와 1회가 관측되었으며, 전체적으로 0.1%의 낮은 발생 비율을 보였다.

Table 2는 전체 안개사례 중 20.7% 해당하는 수평 시정이 100 m 미만인 짙은 안개사례에 대한 지역별 안개 유형의 분포를 보여준다. 내륙에서는 짙은 안개 사례의 86.2%가 복사안개 유형에서 나타났으며, 섬지역에서는 짙은 안개사례 중 이류안개 유형이 49.2%, 강수안개 유형이 36.0%를 차지했다. 해안지역의 경우 짙은 안개사례는 복사안개 유형에서 42.6%, 강수안개 유형에서 33.0%로 나타났다. 산간지역은 짙은 안개 사례수가 9개 사례로 적었으며 짙은 안개의 33.3%가 복사안개 유형에서 나타났고 나머지는 유형구분이 되지 않은 사례에서 발생하였다.

5 가지 안개 유형 중 운저하강안개 유형에 대한 국내 연구는 드문 편이나, Kim and Yum (2010)이 인천 공항에 발생한 안개를 해무와 연안안개로 분류하면서 대기연직 프로파일 분석을 통해 일부 해무 사례는 운저하강안개일 가능성이 있다고 언급한 바가 있다. Fig. 11은 본 연구기간에서 발생한 운저하강안개 사례로, 2016년 7월 22일~23일 사이에 백령도에서 계측된 안개에 대한 시정계, 운고계, 그리고 지상관측자료의 시계열 변화를 보인 것이다. 백령도 관측자는 목측으로 2016년 7월 22일 21시 13분부터 안개를 관측하기 시작하여, 다음날인 7월 23일 07시 15분에 안개관측을 종료하였다. 1시간 간격의 시정계 관측자료는 7월 22일 22시부터 다음날 6시까지 안개가 지속되었음을 보이고 있으며(Fig. 11a), 상대습도는 90% 이상을 오전 시간대부터 유지하다가 안개발생 수시간 전에 99%까지 증가하였으며, 노점 편차도 작아졌다(Fig. 11b). 안개 발생이전부터 하늘상태는 흐리거나 구름이 많은 상태가 지속되었으며, 운저 고도는 7월 22일 오전 시간에는 300 m 내외였으나 점차적으로 하강하여 같은 날 21시에 20 m 정도까지 낮아졌고, 22시에 시정도 1 km 미만으로 관측되면서 안개가 시작되었다(Fig. 11c). 안개사례 기간내 풍속은 4 m s^{-1} 내외를 유지하였으며, 7월 23일 새벽시간에 0 mm의 강수량이 기록되기도 하였다(Fig. 11d). 안개 발생시 우리나라의 기상상황은 장마전선의 영향을 받아 전국이 흐리고 비가 오다가 밤사이에 그친 이후로, 동해상에 위치한 고기압의 가장자리에 위치하고 있었다.

연 평균 안개사례 발생빈도 분포(Fig. 4)에서 보는 바와 같이 섬지역과 해안지역에서의 안개발생빈도는 차이가 크다. 해안지역에서는 복사안개와 강수안개의 발생비율이 높고, 이류안개는 많지 않았다. 이러한 결

과는 본 안개 유형분류과정에서 연안안개에 해당하는 이류-복사안개를 별도의 안개 유형분류 과정으로 구분하지 않으면서, 이류-복사안개가 모두 복사안개 유형으로 분류되면서 나타난 결과일 수 있다. 해안지역은 지리적 특성에 의해 낮에 해상으로부터 이류된 습한 공기가 야간의 복사냉각에 의해 이류-복사안개로 발생하기 쉽다(George, 1951; Ryznar, 1977). Choi (2001)은 우리나라 서해와 인근 산지에서 안개 형성에 대한 수치 예보 모델링을 통해 인천 부근의 이류-복사안개의 특성을 분석하였으며, 서해에서 인천으로 유입되는 서풍계열의 바람과 육(산)풍이 해안쪽으로 불어나가면서 서로 만나게 되면 해안가에서는 바람이 약하게 불거나 서풍계열의 바람이 불게 된다고 하였다. Heo and Ha (2004)도 한반도 연안 안개의 발생과 연관된 중관 기압계를 분류하면서, 섬과 연안지역에서 발생한 안개가 모두 바다에서 발생하여 이류해 온 것이라고 할 수는 없으며, 해무와 바다로부터 연안 지역으로 공기가 이류되면서 복사 냉각에 의해 안개가 형성되는 경우를 또 다른 연안안개의 특징으로 구분해야 하는 점을 언급하였다. Figure 12는 서해안에 위치한 인천, 군산, 목포 지점에서 복사안개사례 발생시

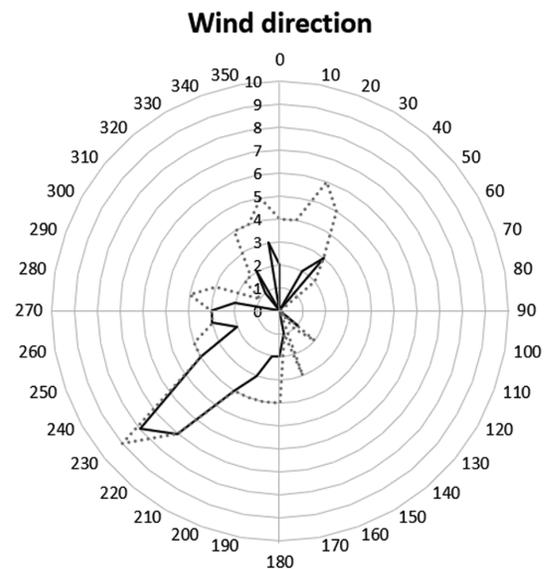


Fig. 12. Frequency of the wind direction observed at the onset of radiation fog events (including advection-radiation fog events that moist air previously advected from the West sea is brought to saturation through radiative cooling over the coastal region) in west coastal region, Incheon (112), Gunsan (140), and Mokpo (165) from 2015 to 2017. Solid line: spring and summer (March to August), dotted line: all year (January to December).

Table 3. Percentages of fog types for coastal areas in South Korea

	Radiation fog	Advection fog	Precipitation fog	Cloud base lowering fog	Morning evaporation fog	Unknown
Yellow sea	52.5%	3.7%	32.2%	4.5%	0.0%	7.0%
South sea	34.6%	4.1%	45.8%	2.7%	0.0%	12.9%
East sea	55.6%	3.7%	33.3%	7.4%	0.0%	0.0%

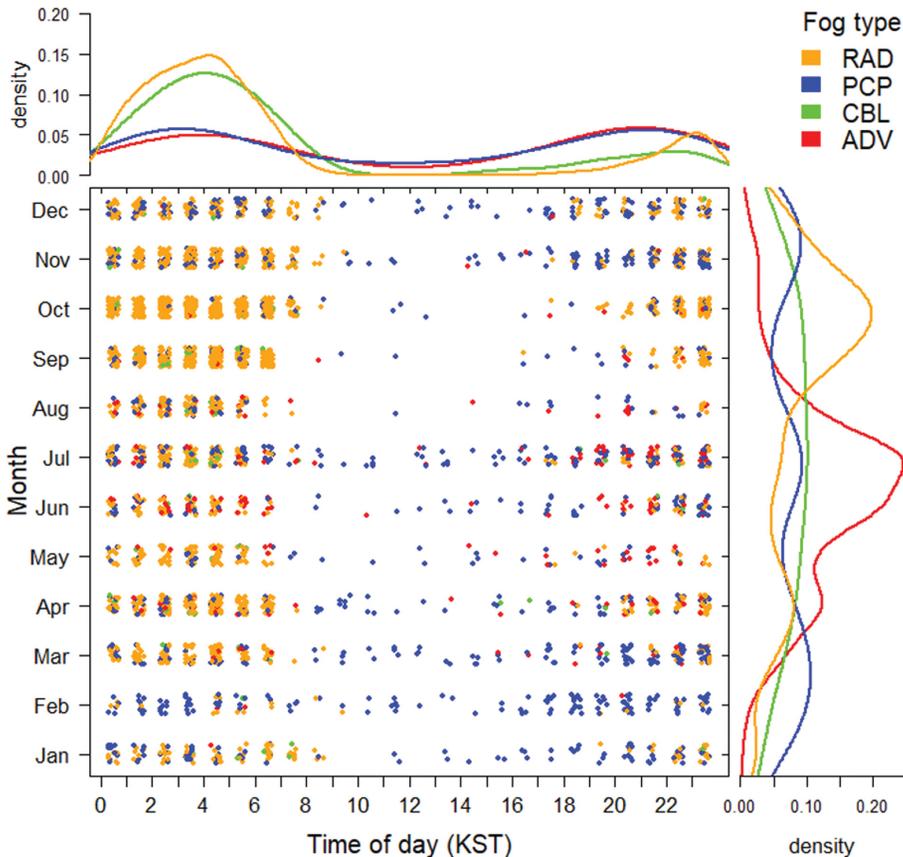


Fig. 13. Frequency distribution of the fog onset time as a function of time of day and month for main four fog types, radiation fog type (RAD), precipitation fog type (PCP), cloud base lowering fog type (CBL), and advection fog type (ADV). Morning evaporation fog type which had 3 fog event cases was excluded in the plot. The data cover from 2015 to 2017 period.

의 풍향을 분석한 결과이다. 실선은 봄철과 여름철의 복사안개사례들의 풍향이며, 점선은 연간 발생한 복사안개사례들의 풍향이다. 봄철과 여름철의 주풍계는 남서풍 계열로 해안지역에서 이류-복사안개가 발생하기 적당한 조건임을 보여준다. 반면에 가을철과 겨울철에는 남서풍과 함께 북풍계열도 적지 않게 불고 있음을 알 수 있다.

각 해역별 안개유형의 발생 비율은 Table 3과 같으며, 남해안 지역은 강수안개의 비율이 다른 해안지역보다 높았으며, 서해안과 동해안지역은 복사안개 유

형이 더 많았다. 연안지역에서 안개발생시 서해안은 고기압형의 중관 기압계가 우세하고, 남해 서부해안 지역에서 정체전선형의 기압계가 많으며, 동해안은 동해 중부지역에 온난이류가 있을 때 안개가 발생하고, 동해 남부는 안개가 특히 적게 나타난다는 Huh and Ha (2004)의 연구결과와 유사하였다. 운저하강안개 유형은 동해안과 서해안 지역에서 상대적으로 자주 나타났다. 또한 제주지역의 안개(Fig. 10)는 강수안개가 많았으며, 전선 및 저기압의 통과에 연관된 것이 많다는 기압계 분석과 유사한 경향을 보여주었다.

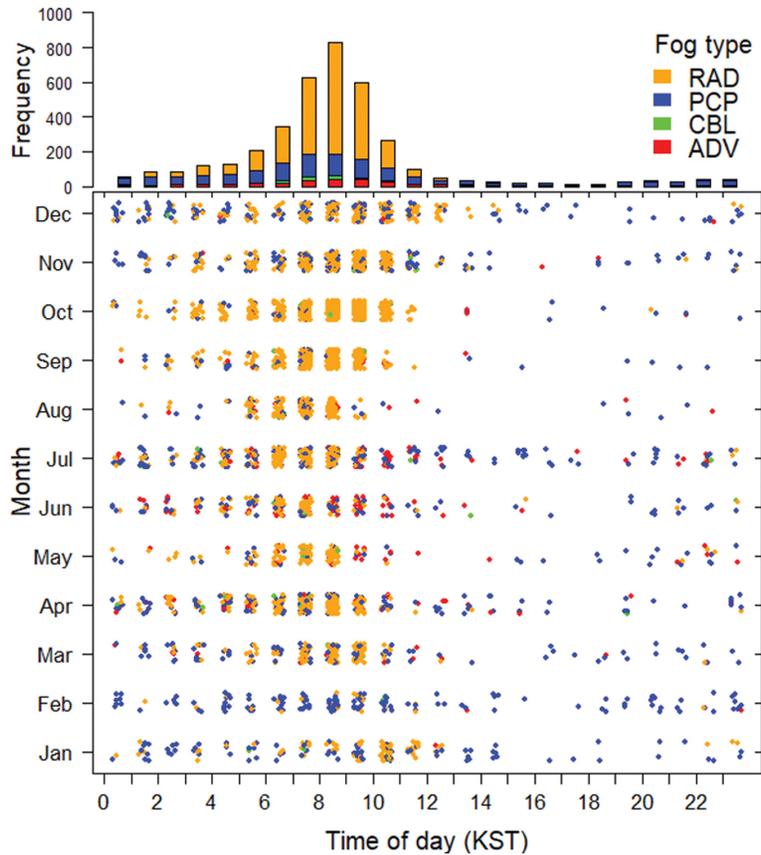


Fig. 14. Frequency distribution of the fog dissipation time for main four fog types, radiation fog type (RAD), precipitation fog type (PCP), cloud base lowering fog type (CBL), and advection fog type (ADV).

산간지역인 대관령과 태백, 두 지점에서의 안개사례 유형 분석결과, 복사안개가 60.8%, 강수안개가 22.7%, 운저하강안개가 2.8%, 그리고 이류안개가 2.3%로 분류되었으며, 미분류가 11.4%로 다른 지역에 비해 가장 많았다. 산간지역의 지형 특성으로 인해 다습한 공기가 산사면을 따라 올라가면서 활승안개가 발생할 수 있다는 기존의 연구를 고려해 볼 때 (Jhun et al., 1998; Sohn, 2010), 복사안개 유형에 활승안개가 포함되어 있을 가능성이 있다.

3.3 안개유형별 발생시각, 소산시각 및 지속시간

Figure 13은 안개 유형별 안개사례의 발생시각과 월별 발생 분포를 보여준다. 복사안개는 일몰이후 서서히 발생 횟수가 증가하여 새벽 4~5시를 전후로 가장 빈번하게 발생하였고, 일출 후에도 기온이 서서히 오르는 겨울철에는 정오를 전후로 안개가 소산되는 안개사례들도 있다. 복사안개로 시작한 안개가 다른 유형의 안개로 이어지는 경우 안개 유형이 복사안개로

분류되면서 소산시각이 오후에 나타나기도 한다. 이류안개와 강수안개는 일중 전 시간대에 걸쳐 발생하였으며, 야간과 새벽시간대에 조금 더 발생빈도가 높았다. 운저하강안개도 복사안개와 비슷한 경향을 보인다. 아침증발안개는 사례수가 3개로 드물게 발생하여 Fig. 14에는 도시되지 않았지만, 3가지 사례 모두 가을철 아침 7시에 안개가 시작되었고, 일출 후 1~3시간 이내에 소산되었다. 안개 유형별 월별 안개 발생빈도를 보면, 이류안개는 여름철인 7월에 가장 자주 발생하였고, 복사안개는 가을철인 10월에 월등하게 자주 나타났다. 운저하강안개는 계절적으로 큰 차이는 없으나, 겨울철이 다른 계절에 비해 상대적으로 적은 편이다. 강수 안개는 여름철과 봄철에 많았으며, 늦은 봄과 가을철에 상대적으로 적게 발생하였다. 안개 소산은 대부분 일출 전후인 7시에서 10시 사이에 집중되며, 복사안개의 경우 일출시간에 따라 안개 소산시각도 계절변동을 하는 경향이 뚜렷하다. 운저하강안개도 대부분 일출시간을 전후해서 소산되었으며,

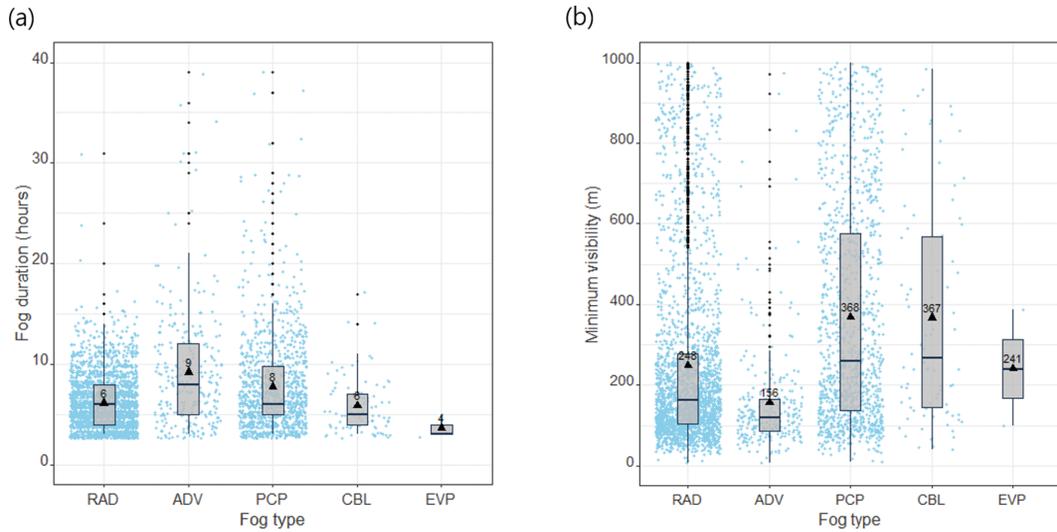


Fig. 15. Distribution of (a) fog event duration and (b) minimum visibility during fog events, for each fog type from 2015 to 2017 over South Korea. Box plot are defined using the 5th (lower whisker), 25th (lower edge of box), median (horizontal line within box), 75th (upper edge of box), and 95th (upper whisker) percentile. Black triangles (▲) indicate the mean fog duration and mean visibility of each fog type, respectively.

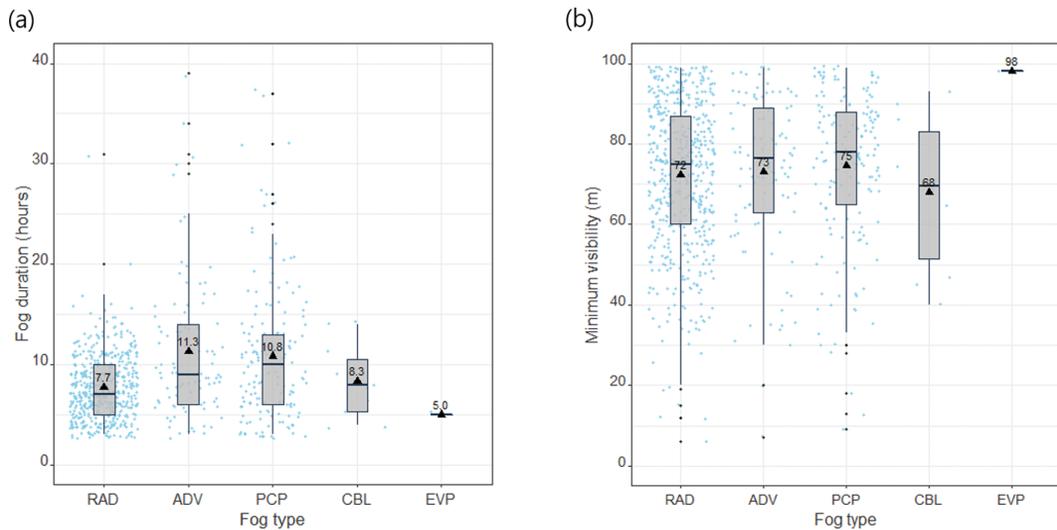


Fig. 16. Same with figure 15 but for thick fog events with visibility less than 100 meters.

강수안개와 이류안개는 소산시간이 일중 다양하게 분포했으며 일출시간 이후에 상대적으로 소산 빈도가 높았다.

Figure 15는 안개 유형별 지속시간과 최소시정의 분포를 보인 것이다. 안개 유형 중에서 이류안개와 강수안개 발생시 안개사례의 지속시간이 가장 길었다. 25% 이상의 이류안개에서 12시간 이상 지속되었으며,

5%의 일부 사례에서는 21시간 이상 지속되었다. 이류안개인 해무는 복사안개와 달리 일출 후에도 쉽게 소산되지 않고, 다른 안개유형에 비해 지속시간이 길다(NIMR, 1986). 차가운 해수면 위의 긴 경로를 따라 상대적으로 따뜻한 공기가 이동하는 해무의 특성상 다른 안개 유형들에 비해 지속시간이 긴 것으로 보인다. 강수안개도 전체 사례 중 25% 이상에서 8시간 이

상 지속되었다. 반면에, 야간시간대에 발생한 복사안개는 일출 후 태양에너지로 인해 대기가 가열되면서 안개가 빠르게 소산되기 때문에 전체의 75%가 8시간 이내의 지속시간을 보였으며, 평균 지속시간은 6시간이었다. 아침증발안개 유형의 지속시간이 가장 짧은데 이는 아침에 지표 수증기가 증발할 때 태양에너지로 인해 대기의 기온이 오르면서 안개 형성을 억제하기 때문으로 보인다(Tardif and Rasmussen, 2007).

안개 유형별 최소시정의 분포에서 이류안개사례의 최소 시정이 평균 156 m로 가장 짧았으며, 95%에 해당하는 안개의 최소시정이 300 m 미만으로 짧았다. 아침증발안개와 복사안개의 최소시정은 각각 241 m와 251 m로 나타났다. 강수안개와 운저하강안개의 최소 시정은 각각 368 m와 367 m였으며, 최소시정의 변동폭이 다른 안개유형보다 크게 나타났다. 짙은 안개 사례의 유형별 지속시간은 1 km 미만의 안개사례보다 모든 유형에서 길게 나타났으며, 최소시정의 평균값은 유형별로 거의 비슷했지만, 복사안개 유형에서 매우 짙은 안개사례의 비율이 높았다(Fig. 16).

4. 요약 및 고찰

본 연구에서는 시정계 계측자료를 이용하여 남한지역에 대해 최근 3년(2015~2017)간 시정계 자료 중 수집율이 높고, 운고계 자료가 있는 86개 지점에서의 안개현상을 판별하고, 안개사례(fog event)를 정의하였다. 자동기상관측과 운고계 자료 중 안개 형성에 관련된 주요 기상 인자들과 위성 안개탐지 자료, 해상 부이 자료 등을 부가적으로 활용하여 안개 유형 구분 알고리즘을 개선한 후 안개 발생에 대한 통계적인 특성을 분석하였다. 안개 유형은 복사안개, 이류안개, 강수안개, 아침증발안개 그리고 운저하강안개(Cloud base lowering fog) 등 총 5가지로 구분하였다. 안개 유형별 분포와 안개의 시종과 지속시간 등에 대한 통계적인 특성 분석시 지형을 고려하여 내륙, 산지, 해안, 섬 등 4개의 지역으로 구분하였으며, 안개의 강도는 수평시정 1 km 미만의 안개와 수평시정 500 m, 200 m, 100 m 미만의 안개 등으로 나누었다.

안개사례는 해상에 위치한 섬 지역에서 자주 발생하였으며, 내륙에서는 주로 경기남부, 전남·전북 동부 지역/경남 서북부지역, 강원 산간지역에서 발생빈도가 높았으나, 인접한 지점 간에도 발생빈도 차가 크게 나타났다. 짙은 안개사례는 섬지역과 제주 서부해안, 내륙에서는 경기남부, 충북 중부, 전북 동부지역과 전남 남동부지역, 경남 북서부지역에서 발생빈도가 높았다. 봄에는 섬지역과 전남남부지역, 경기 서부지역이 다른 곳에 비해 안개사례의 발생빈도가 높았으며, 여름에는 섬지역과 산간지역에서 안개사례가 자주 발생하

였다. 특히 섬지역은 해기차가 큰 7월에 안개사례의 발생 빈도가 매우 높았으며, 짙은 안개로 이어지는 경우가 많았다. 서해의 섬지역과 서해안지역의 안개 발생빈도가 가장 높았으며, 해안지역은 상대적으로 해상의 섬 지역에 비해 안개사례 건수가 적었으며, 두 지역 간의 차이는 여름에 가장 크게 나타났다. 동해의 섬지역과 해안지역은 서해에 비해 해기차가 크지 않아 안개발생빈도수는 적으나 계절 변동은 서해와 유사하였다. 남해는 다른 바다에 비해 안개의 발생이 적고, 늦은 가을에서 겨울사이에는 안개사례가 관측되지 않았다. 안개사례의 강도별 발생빈도수는 최소 시정거리가 100 m 이상 200 m 미만인 구간에서 가장 높았으며, 전체 안개사례의 1/5 정도가 100 m 미만의 짙은 안개로 이어졌다.

5가지 안개 유형중 복사안개 유형이 전체 안개 유형의 절반을 넘었으며, 내륙에서 가을철인 10월에 발생빈도가 월등하게 많이 발생하였다. 강수안개는 모든 지역에서 고르게 나타났으며, 섬지역과 해안지역에서의 발생 빈도는 40% 정도이다. 이류안개는 해무의 발생이 잦은 섬 지역에서 가장 많이 나타났다. 해안지역에서의 이류안개는 6% 정도로 나타났는데, 이는 연안에서 발생하는 안개의 특징인 이류-복사안개가 복사안개 유형으로 함께 분류되었기 때문으로 보인다. 운저하강안개는 전체 안개사례의 2% 정도 비율로 모든 지역에서 고르게 나타났으며, 해안지역에서 상대적으로 발생 빈도가 높았다. 아침증발안개는 내륙에서 드물게 나타났다.

복사안개는 일몰 이후에 발생하기 시작하여 새벽 4~5시 사이에 가장 많이 발생하였으며, 일출 후 1~3 시간 후에 대부분 소산되었다. 이류안개와 강수안개는 전 시간대에 걸쳐 안개 소산시간이 분포하며, 야간과 새벽시간대의 발생빈도가 상대적으로 높은 편이었다. 운저하강안개는 늦은 밤과 새벽 사이에 발생하고 있으며, 안개 소산시간은 주로 새벽시간과 일출 전후 시간대가 많았다. 안개의 지속시간은 이류안개가 가장 길게 나타났으며, 강수안개, 복사안개의 순으로 나타났다. 안개유형별 최소시정은 이류안개 유형에서 가장 작았지만, 100 m 미만의 짙은 안개사례의 최소시정은 복사안개 유형이었다. 5가지 주요 안개 유형 외에 산지와 연안에서 나타나는 활승안개와 이류-복사안개 등 부가적인 원인에 의해 발생하는 안개 유형도 기존의 연구에서 이미 제시되었지만, 객관적인 분류를 위한 기상 요소나 기준값을 적용하기가 어려웠다. 최근 구름입자 수나 부피 평균직경을 관측하는 안개장비 자료와 고해상도 위성 안개탐지 자료 등의 새로운 관측자료를 통해 지역에 따라 세분화된 안개 유형의 구분과 특징분석도 가능할 것으로 보인다.

국지적 특성이 강한 안개의 특성상 안개의 관측지

접 수나 관측소 위치 선정에 따라 안개 다발지역의 분포와 지역별 평균 안개 일수, 안개 지속시간 등 안개의 통계적 특징에 변동이 있을 수 있다. 시정계 계측자료를 이용한 단기간의 안개 분석이 아닌 장기간의 안개 특성 변화 등 기후 분석을 위해서는 관측 지점의 선정에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 안개 분석의 정확도를 확보하기 위해서는 관측기기의 검·보정 등 기기에 대한 유지보수와 자료 품질검사에 대한 후처리 등이 필수적으로 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국기상산업기술원 “기상·지진See-At기술개발/기상관측기술” 사업의 일환으로 추진하는 “한반도 주변 안개발생의 시·공간 특성 분석을 위한 지상 및 위성관측 자료 통합 활용기법 개발(2018-0384-02)” 과제에의 지원으로 수행되었습니다. 논문을 세심하게 검토해 주시고, 많은 조언을 해 주신 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 연구에 필요한 다양한 관측 자료와 관련 정보를 제공해 주신 기상청 관련부서 담당자 분들께도 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ahn, J. B., J.-W. Suh, and H.-J. Lee, 2001: A modeling study of formation mechanism of sea fog events by its characteristics. *Atmosphere*, **11**, 556-559 (in Korean).
- Akimoto, Y., and H. Kusaka, 2014: A climatological study of fog in Japan based on event data. *Atmos. Res.*, **151**, 200-211, doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.003.
- Anderson, J. B., 1931: Observations from airplanes of cloud and fog conditions along the Southern California Coast. *Mon. Wea. Rev.*, **59**, 264-270.
- Byun, H. R., D.-K. Lee, and H.-W. Lee, 1997: Analysis on the characteristics and predictability of the marine fog over and near the East Sea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 41-62 (in Korean with English abstract).
- Cho, Y.-K., M.-O. Kim, and B.-C. Kim, 2000: Sea fog around the Korean Peninsula. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **39**, 2473-2479.
- Choi, H., 2001: Numerical prediction on fog formation affected by the Yellow Sea and mountain. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **37**, 261-282.
- George, J. J., 1951: Fog. In T. F. Malone, Ed., *Compendium of Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., 1179-1189.
- Gulpepe, I., and Coauthors, 2007: Fog research: a review of past achievements and future perspectives. *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1121-1159.
- Haeffelin, M., and Coauthors, 2010: Paris fog: shedding new light on fog physical processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 767-783, doi:10.1175/2009BAMS2671.1.
- Heo, I.-H., and S.-H. Lee, 1998: The spatial distribution and characteristics of fog in Korea. *J. Kor. Soc. Geo. Environ. Edu.*, **6**, 71-85 (in Korean).
- Heo, J., H.-J. Ki, J.-H. Park, D.-W. Lim, D.-H. Whan, and Y.-H. Kim, 2016: Analysis of fog characteristic and fog type classification at 6 locations in Jeonnam Province. *Proc. Autumn Meetings of KMS, Kor. Meteor. Soc.*, 871-872 (in Korean).
- Heo, K.-Y., and K.-J. Ha, 2004: Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 541-556 (in Korean with English abstract).
- Jhun, J.-G., E.-J. Lee, S.-A. Ryu, and S.-H. Yoo, 1998: Characteristics of regional fog occurrence and its relation to concentration of air pollutants in South Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **34**, 486-496 (in Korean with English abstract).
- Kim, C. K., and S. S. Yum, 2010: Local meteorological and synoptic characteristics of fogs formed over Incheon international airport in the west coast of Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 761-776, doi:10.1007/s00376-009-9090-7.
- Kim, S. S., and N. Y. Lee, 1970: On the classification of the fog regions of Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **6**, 1-15 (in Korean with English abstract).
- KMA, 2018: 2017 annual report. Korea Meteorological Administration, 542 pp (in Korean).
- Lee, H.-D., and J.-B. Ahn, 2013: Study on classification of fog type based on its generation mechanism and fog predictability using empirical method. *Atmosphere*, **23**, 103-112 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-K., and M.-S. Suh, 2018: Comparative study on the visibility characteristics of naked-eye observation and visibility meters of fog over South Korea. *Atmosphere*, **28**, 69-83 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y. H., J.-S. Lee, S. K. Park, D.-E. Chang, and H.-S. Lee, 2010: Temporal and spatial characteristics of fog occurrence over the Korean Peninsula. *J. Geophys. Res.*, **115**, D14117, doi:10.1029/2009JD012284.
- Lee, Y.-S., and S.-Y. Kim, 2006: Distribution characteristics and changing trends of visibility in Korea. *J. Clim. Res.*, **1**, 23-38 (in Korean with English abstract).
- Meyer, M. B., and G. G. Lala, 1990: Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York. *J. Climate*, **3**, 577-586, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0577:caorfo>2.0.co;2.

- NIMR, 1986: Fog Characteristics of the West Coastal region in South Korea. National Institute of Meteorological Sciences, NIMR MR 6, 83 pp (in Korean).
- Niu, F., Z. Li, C. Li, K.-H. Lee, and M. Wang, 2010: Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *J. Geophys. Res.*, **115**, D00K20, doi:10.1029/2009JD013484.
- NMI, 2002: Quality Control of Meteorological Observations, Norwegian Meteorological Institute, Report 8/2002, 109 pp.
- NMSC, 2019: National Meteorological Satellite Center homepage [Available online at <http://nmssc.kma.go.kr>].
- Pilie, R. J., E. J. Mack, C.W. Rogers, U. Katz, and W. C. Kocmond, 1979: The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California coast. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 1275-1286.
- Ryznar, E., 1977: Advection-radiation fog near Lake Michigan. *Atmos. Environ.*, **11**, 427-430.
- Seo, J.-W., H.-J. Oh, J.-B. Ahn, and Y.-H. Youn, 2003: A study on prediction system of sea fogs in the East Sea. *J. Kor. Soc. Oceanography*, **8**, 121-131 (in Korean with English abstract).
- Setiono, R., S.-L. Pan, M.-H. Hsieh, and A. Azcarraga, 2005: Automatic knowledge extraction from survey data: Learning M-of-N constructs using a hybrid approach. *J. Oper. Res. Soc. Amer.*, **56**, 3-14.
- Sohn, H.-J., 2010: Characteristic Analysis of Long Term Variability of Fog Occurrence in South Korea, Master's thesis, Kongju National University, 48 pp (in Korean).
- Tardif, R., and R. M. Rasmussen, 2007: Event-based climatology and typology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1141-1168, doi:10.1175/JAM2516.1.
- 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, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 631-642 (in Korean with English abstract).
- Yoo, J.-H., J.-K. Suh, S.-Y. Park, S.-L. Park, W.-I. Go, and J.-H. Park, 2016: A study on the characteristics of fog using visibility meters in Gangwon Province (2014~2015), *Proc., Autumn Meetings of KMS*, Kor. Meteor. Soc., 866-867 (in Korean).
- Yoo, K.-K., and S.-W. Kim, 2002: Analysis of fog characteristics of adjacent sea of Heuksan-do, *Atmosphere*, **12**, 298-308 (in Korean).
- Yoon, S.-Y., N.-S. Suh, and J.-W. Cho, 2008: Analysis of sea fog characteristics of the West Sea, *Proc. Spring Meetings of KMS*, Kor. Meteor. Soc., 348-349 (in Korean).