

남한에서의 안개 사례별 목적과 시정계 계측의 시정 특성 비교

이현경¹⁾ · 서명석^{2)*}

¹⁾국립기상과학원, ²⁾공주대학교 대기과학과

(접수일: 2017년 11월 23일, 수정일: 2018년 1월 11일, 게재확정일: 2018년 1월 22일)

A Comparative Study on the Visibility Characteristics of Naked-Eye Observation and Visibility Meters of Fog 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 23 November 2017; revised 11 January 2018; accepted 22 January 2018)

Abstract Most of the researches on fog in South Korea have been done based on the naked-eye observation but the number of observation sites is just 22. Considering the localities of fog and various durations, it is essential to utilize more than 250 visibility meters that measure visibility every minute. In this study, the visibility characteristics of visibility meters were compared with that of the naked-eye observation using one year data, 2016, and radiation fog and advection fog cases were analyzed in detail. The concordance rate of the two data set was 0.96~0.97, but discordance rate was 0.19~0.47. In general, visibility meters observed fog more frequently than naked-eye. The correlation between two data sets is clearly dependent on the visibility and geographic locations (fog/thick fog (< 100 m) of inland: 0.86/0.61; fog/thick fog: 0.65/0.73 of island/coastal site). In both fog cases, the fog events observed by naked-eye were consistently detected by visibility meters, and visibility meters clearly well detected very short fog/thick fogs. Formation and dissipation time of fog for the fog cases were similar but fog duration by visibility meters was shorter because of exclusion of temporary dissipated time. In addition, the visibility meters showed a detailed distribution of fog events that occurred simultaneously over South Korea. It would be useful to analyze the spatial and temporal characteristics of, in particular, thick fog using visibility meters. However, more works are needed for the filtering criteria for analyzing fog using visibility meters alone.

Key words: Fog, thick fog, visibility, visibility meter, naked-eye observation

1. 서 론

안개는 지표근처에 부유하는 미세한 물 입자(수적)나 빙정으로 인하여 수평시정이 1 km 미만으로 감소되는 기상현상이다(NOAA, 2005). 농경기 사회에서 아

침 안개는 맑은 날씨를 예측하는 좋은 징조로 여기기도 하였지만, 최근 항공, 해양, 도로 교통의 이용이 증가함에 따라 안개는 위험기상의 하나로 인식하게 되었으며, 그 피해가 급격하게 증가하고 있다(Gultepe et al., 2007). 특히, 안개가 낀 날에 발생한 교통사고는 대형 다중 추돌 사고로 이어지기 쉽다. 우리나라에서는 2006년 10월 3일의 서해대교 29중 추돌사고와 2015년 2월 11일에 발생한 인천 영종대교 106중 추돌사고가 안개가 낀 날에 발생하였다.

안개 관측은 안개 예보를 위한 기초적인 자료 중

*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudeahak-ro, Gongju-si 32588, Korea
Phone: +82-41-850-8533, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: msm416@kongju.ac.kr

하나로 안개 현상의 이해와 예측을 위해 기후학적인 분석, 수치예보모델의 검증, 그리고 통계모델의 입력 자료 등으로 활용되고 있다. 우리나라 기상청은 1972년부터 km 또는 m 단위로 안개, 박무 등의 시정장애 현상을 관측해왔으며, 현재는 전국 22개 지점인 춘천, 백령도, 북강릉, 서울, 인천, 울릉도, 수원, 서산, 청주, 대전, 안동, 포항, 대구, 진주, 울산, 창원, 광주, 부산, 목포, 여수, 흑산도와 제주에서 안개 목측을 수행 중이다(KMA, 2016). 이 지점들 중 춘천지점(101)은 2016년 10월 1일부터 북춘천지점(93)으로 변경되었다. 목측은 비교적 장기간 관측자료를 확보하고 있으나, 관측자의 숙련도와 시력차이에 따라 시정이 달라질 수 있으며, 야간이나 식별가능거리에 관측목표물이 없는 경우에 정확한 시정 관측이 어려워질 수 있다(Kim, 1998). 또한 목측은 시정계에 비해 관측 지점 수가 매우 한정되어 있다.

우리나라에서 안개는 봄과 여름에는 차가운 해상 위로 상대적으로 온난 다습한 공기가 이류하면서 해안가에서 자주 발생하며, 상대적으로 맑은 날이 많고 바람이 약한 가을과 겨울에는 복사냉각에 의해 내륙에서 자주 발생한다(Kim and Lee, 1970; Jhun et al., 1998; Won et al., 2000; Heo and Ha, 2004; Lee et al., 2010; Lee and Ahn, 2013). 복사안개는 내륙에서 고기압의 영향으로 맑고 상대습도가 높으며 바람이 약한 날에 지표 및 그 부근의 공기가 복사냉각 되면서 생성되며, 지상에서 925 hPa 부근이나 그 이상의 고도까지 역전층을 동반한다. 이로 인해, 복사안개는 대부분 야간에 발생하여 일출 후 1~3시간 안에 사라지는 특징을 보인다(KMA, 2016; Lutgens et al., 2016).

해무는 이류안개로 수온과 다른 온도를 갖는 대기가 수면 위를 수평으로 이동할 때 발생한다(Taylor, 1917). 대기에 비해 상대적으로 바다가 차가운 경우에는 냉해무(Cold Fog 또는 Cold Sea Fog)로, 대기에 비해 상대적으로 바다가 따뜻한 경우 온해무(Warm Fog 또는 Warm Sea Fog)로 구분하고, 온해무 중 대기가 아주 차가운 경우를 증기안개로 분류하였다(Kim and Yum, 2010; Koračin et al., 2014). 서해안과 같은 연안 지역의 경우 주변 지형이나 해안선 형태의 영향을 받을 뿐만 아니라 바다로부터 연안 지역으로 이류된 공기덩이가 복사 냉각되어 안개가 형성되는 경우도 있기 때문에, 해무와 별도로 연안안개(Coastal Fog)로 구분하기도 한다(Heo and Ha, 2004; Koračin et al., 2005; Yoon et al., 2008; Kim and Yum, 2010). 우리나라의 연안 안개는 주로 5월~8월 사이에 발생한다(Heo and Ha, 2004).

우리나라에서의 안개 발생 특성에 대해 주성분분석과 파엽(Wavelet) 기법을 적용하여 분석한 결과, 대체로 1일, 1~2주, 1~2개월의 다양한 시간규모에서 안개

가 발생하며 복사안개, 전선(강수)안개, 해무 등 서로 다른 유형의 안개가 동시에 서로 다른 곳에서 발생함을 밝혔다(Lee et al., 2010). 안개 지속시간은 6~7시간으로 계절에 따라 큰 차이가 없는 편이다(Lee et al., 2010; Lee and Ahn, 2013).

우리나라에서 안개에 대한 연구는 대부분 지상 관측자의 목측 자료를 이용한 시정 1km 미만의 안개에 대한 연구이다(Kim and Lee, 1970; Jhun et al., 1998; Kim, 1998; Cho et al., 2000; Cho, 2003; Heo and Ha, 2004; Lee and Kim, 2006; Yoon et al., 2008; Lee et al., 2010; Lee and Ahn, 2013; Moon and Lee, 2013). 하지만, 위험기상과 관련성이 높은 짙은 안개에 대한 연구는 기존의 목측 관측 자료로는 한계가 있어 관련 연구가 부족한 상황이다.

안개의 형성과 발달, 소산은 중관 규모의 기상 조건과 지역적인 미세물리과정, 복사과정, 역학과정, 화학적 과정, 지면 조건 등 간의 복잡한 상호작용의 영향을 받기 때문에 시간과 공간적인 변동성이 매우 크다(Gultepe et al., 2007; Tardif and Rasmussen, 2007). 안개 관측을 위해서는 목측보다 공간해상도가 높고, 관측자나 주야에 상관없이 객관적으로 관측하는 기기 관측이 유리하다. 기상청은 시정과 현재일기(현재)를 자동으로 관측하는 시정계를 2009년부터 도입하기 시작하여 2016년 12월말 현재 총 279개의 시정계를 전국에서 운영하고 있다(KMA, 2016; KMA, 2017). 따라서 전국에 비교적 균일하게 분포해 있는 약 280여 지점의 시정계 자료를 이용한다면 우리나라 내륙에서 주로 발생하는 국지적 안개의 상세한 특성에 대해서도 연구가 가능할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라 안개 연구에 시정계 자료의 활용을 위한 선행연구로 2016년 전체기간에 대한 안개 발생 시의 목측 시정과 시정계로 계측한 시정 사이의 특성을 비교하고, 복사안개, 이류안개(해무) 등 대표적인 안개 사례에 대한 안개와 짙은 안개 발생 시의 시정을 목측 자료와 상세하게 비교·분석하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2016년 1월 1일부터 12월 31일까지 기상청의 21개 목측 지점의 기상관 자료, 시정계의 자료, 자동기상관측장비(AWS: Automatic Weather Station)의 상대습도, 그리고 지상 관측자료 중 현재일기를 사용하였다. 총 22개 목측 지점 중 10개월 정도 시정계 자료가 결측된 서산(129) 지점은 분석에서 제외하였다. Figure 1은 안개를 관측하는 목측 지점과 시정계 관측 지점의 공간분포도로, 시정계 관측 지점이 목측 지점에 비해 비교적 전국에 고르게 분포되어 있는 것

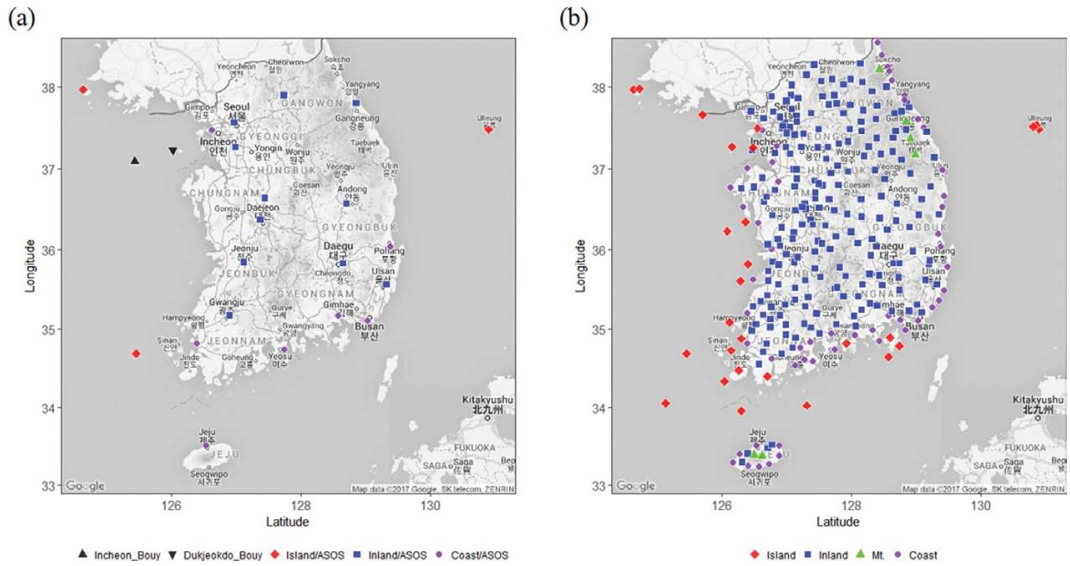


Fig. 1. Spatial distribution of (a) the 21 naked-eye observation sites and 2 buoys (Incheon, Dukjeokdo) and (b) 279 visibility meters in October 2016 operated by KMA over South Korea.

을 보여준다. 안개 관측 지점은 지리적 위치에 따라 내륙, 산간, 해안, 그리고 섬으로 나누었다. 산간지점은 해발고도 600 m 이상으로 내륙에 위치한 지점이며, 해안지점은 해안선에서 3.5 km 이내에 위치한 지점으로 하였고 섬 지점은 제주를 제외한 섬들에 위치한 관측 지점으로 구분하였다.

안개에 대한 시정계 자료의 전체적인 시정 특성 분석을 위해 2016년 1년간 목측 시정과 시정계 계측 시정 등을 이용하였다. 또한 두 관측자료의 특성을 자세히 비교하기 위해 2016년 10월 17일 정오부터 19일 정오까지 만 2일간 내륙 대부분의 지역에서 안개가 발생한 복사안개사례와 2016년 4월 8일부터 11일까지 서해상에서 관측된 이류안개(해무)사례를 선정하였다.

시정계는 안개 관측망과 첨단화 장비로 구분되며, 전자인 경우 1분 평균 시정(단위: m), 10분 평균 시정(단위: m), 1분 순간 현천 코드 값과 15분 평균 현천 코드 값을 제공하며, 후자인 경우 1분 평균 시정(m)과 1분 순간 현천 코드 값을 제공한다(KMA, 2017). 시정계의 현천 코드는 빗방울 입자의 광학관측 자료와 습도센서 자료, 현천 센서에 감지되는 강수입자의 크기, 종말속도 등에 따른 신호의 변화를 이용하여 간접적으로 산출하며, WMO 관측지침에 기준하여 생성된다(Vaisala, 2010; WMO, 2014). 시정계의 측정 불확실성(Measurement Uncertainty)는 시정 600 m 이하에서 50 m, 시정 600 m~1500 m에서는 10%, 시정 1500 m 이상에서는 20%이다(WMO, 2008).

본 연구에서는 각 시정계들의 1분 평균 시정에 10분 이동 평균을 적용하여 1분 간격 시정(이하, 10분 이동 평균 시정)을 재계산하였으며, 10분 이동 평균 시정이 1 km 미만으로 내려간 경우 안개가 발생한 것으로 처리하였다. 이 때 10분 범위 내에 1분 자료가 5개 이하인 경우는 10분 이동 평균 시정 계산에서 제외하였다. 짙은 안개(Thick Fog)는 국제적인 안개 분류 기준인 시정 40~200 m 사이의 안개(Shepard, 1996) 대신에 기상청에서 2015년 3월부터 시범운영 중인 안개특보의 기준인 시정 100 m 미만의 안개로 정의하였으며(KMA, 2016), 10분 이동 평균 시정이 100 m 미만으로 내려간 경우 짙은 안개가 발생한 것으로 보았다. 시정계를 이용한 안개의 발생여부 판단은 기상청에서 2015년 3월부터 시범운영 중인 안개특보의 검증 기준을 참고하였다(KMA, 2016).

시정계로 계측한 안개의 발생시간과 소산시간은 시정계의 10분 이동 평균 시정이 처음 1 km 미만으로 관측된 시간과 6시간 이상 후속 안개현상이 없을 때 마지막으로 1 km 미만의 시정이 기록된 시간으로 각각 정하였다. 안개의 발생시간과 소산시간으로 안개 지속시간을 산정할 때, 1분 간격의 시정계 관측 간격을 고려하여 10분 이동 평균 시정이 10분 이상 시정 1 km 이상 유지된 시간은 일시적으로 안개가 소산된 것으로 판단하여 안개 지속시간에서 제외하였다. 안개 소산시간 산정을 위해 적용한 6시간이라는 간격은 발생 주기가 일 단위로 비교적 짧은 복사안개의 발생 시간과 소산시간 대를 고려하여 결정하였다(Jhun et

al., 1998).

2016년 한 해 동안 21개 지상기상관측 지점의 1시간 간격 지상기상관측 자료의 현재일기에서 안개/질은 안개(< 100 m)가 관측된 경우는 총 3033회/총 390회이었으며, 이 중 전선(강수)안개와 같이 비와 안개가 동시에 관측된 경우는 1087회/177회로 전체 안개 관측횟수의 36%/45%를 차지하였다. 비를 동반한 안개는 대부분 섬 지역인 백령도(102), 울릉도(115), 흑산도(169) 지점에서 관측되었고, 이들 3개 지점의 안개/질은 안개(< 100 m)의 관측횟수는 768회/170회로 비와 안개를 동시에 관측한 경우의 71%/96%를 차지하였다. 실황에서 비와 동시에 안개가 목측된 경우가 적지 않고, 우리나라 주변에서 발생하는 해무의 약 50% 이상이 전선활동에 의한 강수와 연관된 전선(강수)안개로 구분할 수 있다는 연구가 있어(Ahn et al., 2001), 이번 연구에서는 안개 관측에 중점을 두고, 모든 시정계에서 공통적으로 제공되는 1분 간격의 현천 코드를 이용하여, 시간당 3 mm 미만의 약한 비와 약한 이슬비가 내리는 경우의 1 km 미만의 저시정 자료는 안개로 판별하였다(Yoo et al., 2016). 하지만, 시정계 자료처리 시 시간당 3 mm 이상의 비, 소나기, 눈 등의 현천 코드를 가진 1 km 미만의 저시정 자료는 안개로 구분하지 않았다. 또한 분석기간 내 지상기상관측 자료에서 눈과 안개를 동시에 목측한 경우는 총 12회로 대구(143)에서 3회, 대전(133), 청주(131)와 울릉도(115)에서 각 2회, 안동(136), 인천(112)과 백령도(102)에서 각 1회 관측되었으며, 전체 안개관측횟수의 0.4%에 해당하였다. 눈과 질은 안개(< 100 m)를 동시에 목측한 경우는 없었다. 눈과 안개가 동시에 관측되는 경우가 드물고, 시정계의 현천 코드에서 소나기/눈을 안개, Unknown Precipitation 등으로 잘 구분하지 못하는 점을 고려하여 이번 연구에서는 기사란과 지상기상관측의 현재일기에 소나기/눈이 관측된 날의 1 km 미만의 시정 자료는 안개로 구분하지 않았다.

시정계로 계측한 안개의 정확도를 높이기 위해 일정 상대습도 미만의 저시정 자료는 안개분석에서 제외하였다. 이 때 목측 안개를 기준으로 시정계 계측 안개의 정확도를 평가하여, Equitable Threat Score가 가장 높았던 상대습도 88%를 임계값으로 적용하였다. 상대습도를 적용한 품질검사는 시정계만 안개를 관측한 경우(False Alarms)를 줄여주는 역할을 했다. 21개 목측지점에서 1시간 간격의 지상기상관측 시 안개가 관측된 경우의 평균 상대습도는 97.4%였으며, 중위값은 98%, 최대값은 100%, 최소값은 79%(관측 지점: 울릉도(115))이었다. 자동관측기기의 상대습도 관측자료가 없는 경우에는 시정계 자료만으로 안개 유무를 판단하였다. 시정계 자료에서 안개자료를 산출하는 과정은 Fig. 2에 요약하였다.

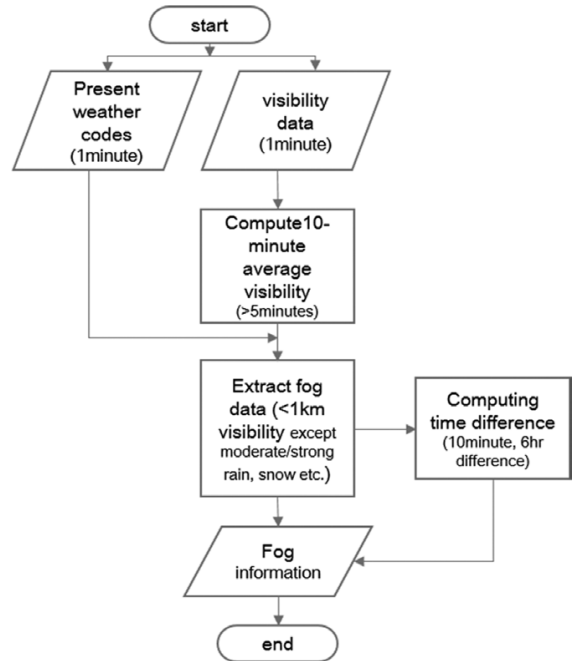


Fig. 2. The flow chart for retrieval of fog information using visibility meter data

3. 결 과

3.1 안개에 대한 시정계 자료의 특성

2016년 한 해 동안 전국 21개 목측 지점의 안개에 대한 시정계 계측 안개의 정확도(POD: Probability of Detection)는 Table 1과 같이 시정거리에 따라 0.96~0.97로 높은 값을 보였다. 하지만, FAR (False Alarm Ratio) 값이 0.19~0.47이고, 목측에 대한 시정계 계측 안개 발생빈도를 나타내는 Bias는 1.20~1.80으로 시정계 계측이 목측에 비해 전체적으로 안개를 빈번하게 탐지하고 있다. 특히 시정 100 m 미만의 질은 안개의 경우 FAR와 Bias가 상대적으로 큰 편으로 시정계 계측이 목측보다 질은 안개를 더 빈번하게 관측하였다. 목측에서는 안개를 관측했으나 시정계가 안개를 관측하지 못한 경우(Misses)는 총 26건으로 목측 안개를 박무로 계측한 경우가 13건(50%)으로 가장 많았고, 시정계의 현천 코드가 3 mm 이상의 강수로 기록되면서 전선(강수)안개와 같이 비를 동반한 안개가 제외된 경우가 10건(38%), 현천 코드가 눈으로 구분되어 안개처리에서 제외된 경우가 2건(8%), 그리고 결측된 경우가 1건(4%)이었다. 시정계만 안개를 관측한 경우(False Alarms)는 총 151건으로 이 중 3 mm 미만의 약한 비를 동반한 1 km 미만의 저시정을 안개로 계측한 경우가 83건(55%)으로 가장 많았으며, 목측에서

Table 1. The Hits, Misses, False alarms, Correct rejections, Probability of detection (POD), False alarm rate (FAR), and Bias for fog by visibility sensors at 21 naked-eye observation site in 2016. Naked-eye fog observation is used as truth. Data in the parentheses denotes values divided by the number of observation site.

Visibility	Hits	Misses	False alarms	Correct rejections	POD	FAR	Bias
< 1 km	596 (28.4)	26 (1.2)	151 (7.2)	6913 (329.2)	0.96	0.21	1.20
< 500 m	452 (21.5)	13 (0.6)	106 (5.0)	7115 (338.8)	0.97	0.19	1.20
< 200 m	314 (15.0)	11 (0.5)	84 (4.0)	7277 (346.5)	0.97	0.21	1.22
< 100 m	109 (5.2)	5 (0.2)	96 (4.6)	7476 (356.0)	0.96	0.47	1.80

Table 2. Summary of mean, difference (Diff.: Visibility - Naked), root-mean-square error and correlation coefficient of visibility between hourly naked-eye observation and visibility meter at 21 naked-eye observation sites in 2016. Asterisk signs (*) mean the results using visibility meters except the upper 2.5% extreme values.

Location of observation site	Visibility	Number of data	Mean (m)		Diff. (m)	RMSE (m)	Correlation coefficient
			Naked-eye	Visibility meter			
Inland (11 sites)	1 km~20 km	102340	15004.40	14992.90	11.50	1262.62	0.98
	< 1 km	665	436.89	497.97	-61.08	202.91	0.86
	< 500 m	386	229.17	252.45	-23.28	88.54	0.76
	< 200 m	144	115.56	148.34	-32.78	80.84	0.29
	< 100 m	23	74.35	88.91	-14.56	27.93	-0.09
		22*	76.36*	86.41*	-10.05*	14.99*	0.65*
Island/Coast (10 sites)	1 km~20 km	90333	15693.02	15787.37	-94.35	1085.84	0.98
	< 1 km	3200	280.11	389.53	-109.42	519.51	0.61
	< 500 m	2568	171.55	210.05	-38.50	233.71	0.52
	< 200 m	1618	100.42	119.17	-18.75	58.71	0.55
	< 100 m	526	68.29	76.60	-8.31	18.52	0.73

박무를 관측했으나 시정계는 안개로 계측한 경우가 65건(43%)이었고, 목측에서는 시정 10 km 이상이었으나 시정계에서 안개로 계측한 경우가 3건(2%)이었다. 시정계 계측 안개와 목측 안개와의 정확도 차이는 비를 동반한 안개와 비로 인한 1 km 미만의 저시정과의 구분여부 그리고 안개와 박무의 경계에서 목측과 계측 간의 시정 관측 오차로 인해 주로 발생하고 있다.

시정계만 짙은 안개를 관측한 경우(False Alarms)는 목측에서 모두 안개를 관측하였으며, 총 96건 중 목측 시정이 100 m~200 m인 경우가 83회로 가장 많았고, 200 m~500 m 미만인 경우가 11회, 그리고 500 m~1 km 미만인 경우가 2회이었다. 목측에서는 짙은 안개를 관측했으나 시정계가 짙은 안개를 관측하지 못한 경우(Misses)는 총 5회로 시정계의 시정이 100 m~200 m 미만인 경우가 2회, 200 m~500 m 미만이었던 경우가 1회였으며, 결측된 경우가 2회이었다.

21개 안개 목측 지점을 지리적 위치에 따라 내륙과 섬/해안으로 구분하여 목측 관측의 시정과 시정계 계측 시정간의 상관 관계를 분석하였다(Table 2). 내륙 지점은 서울, 수원, 청주, 대전, 안동, 대구, 울산, 전주, 광주, 북강릉, 춘천이며, 섬/해안 지점은 백령도,

흑산도, 울릉도, 제주, 인천, 포항, 창원, 부산, 목포, 여수이다. 목측과 시정계의 최고 시정은 20 km로 계측값의 상한으로 맞추었다(Lee et al., 2015). 시정계 자료의 이상치(Outlier)는 외면 스튜던트화 잔차(Externally Studentized Residual)를 사용하여 처리하였다(Suh, 2014).

목측에서 안개를 관측한 경우, 지점에 따라 차이가 있지만, 전체적으로 내륙과 섬/해안에 위치한 시정계 관측 모두에서 목측 시정보다 시정계 계측 시정이 크게 나타났다. 반면에, 두 관측 자료 사이의 상관성은 지리적 위치 및 시정에 따라 상이하게 나타났다. 시정이 1 km 미만인 경우 내륙지점에서는 0.86이나 섬/해안지점에서는 0.61로 낮게 나타났다. RMSE 값도 내륙지점에서 203 m로 상대적으로 작고, 섬/해안지점에서는 내륙지점의 2.5배 정도 크게 나타났다. 안개의 시정거리가 작아지면 목측과 계측 사이의 상관계수도 줄어드나, 100 m 미만으로 시정거리가 작아지면 상대적으로 상관관계가 좋아져서 내륙지점에서는 0.65(자료 수가 적어 극단 값의 영향이 크므로, 상위 2.5%의 극단 값을 제외한 경우(Lee et al., 2015), 섬/해안지점에서는 0.73이 되었다.

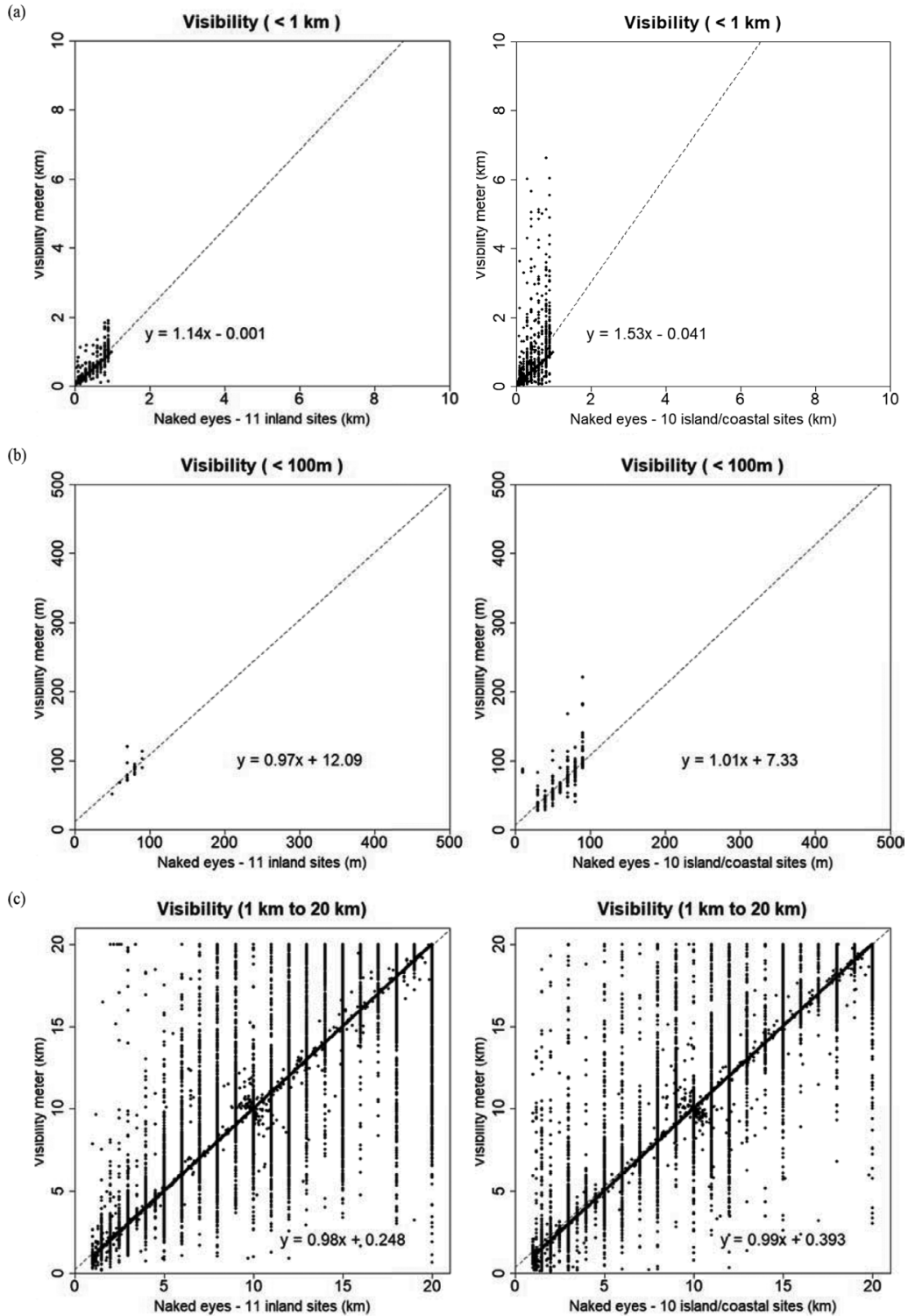


Fig. 3. Scatter plots of visibility obtained by visibility meters and naked-eye observation in term of (a) fog (< 1 km), (b) thick fog (< 100 m), and (c) visibility from 1 km to 20 km for 11 inland sites (left panel) and 10 island/coast sites (right panel).

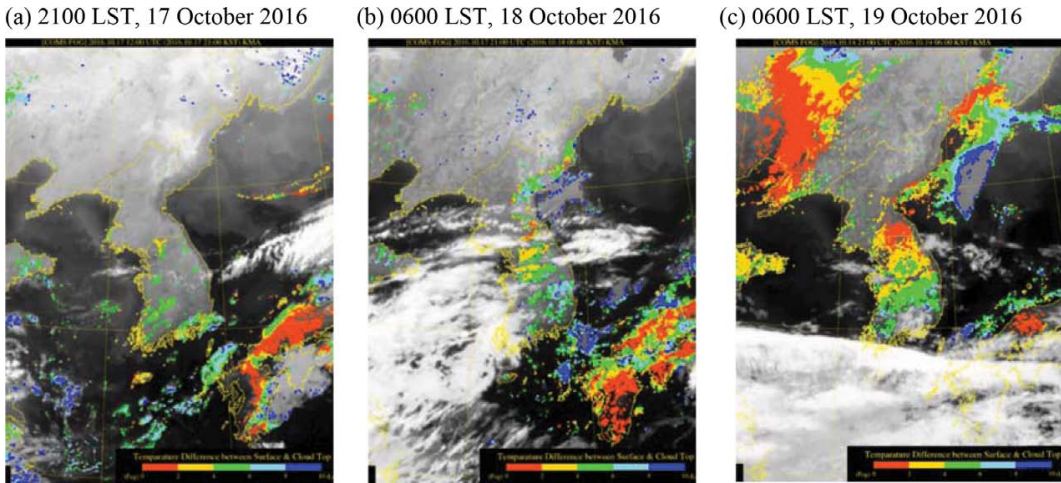


Fig. 4. COMS fog detection images at (a) 2100 LST, 17 October 2016, (b) 0600 LST, 18 October 2016, and (c) 0600 LST, 19 October 2016 of the radiation fog case.

Figure 3의 목측 시정과 시정계 계측 시정의 산포도에서 (a) 시정 1 km 미만인 경우 내륙지점에서는 목측값 대비 계측값의 범위가 최대 2배 정도 차이가 나는 반면, 섬/해안지점의 경우는 계측값의 범위가 최대 6배 이상으로 차이가 컸다. 내륙지점에 비해 섬과 해안지점에서 두 관측 자료 사이의 차이가 크게 나타나는 이유는 섬이나 해안지역의 경우 주변에 시정거리를 판단할 수 있는 지형이나 지물이 부족한 경우 바다를 배경으로 시정을 관측하는 등 목측 관측의 주관적 불확실성에 기인할 수 있다(Kim et al., 2007). 목측과 시정계의 시정 차이는 시정계의 관측 오차, 기기 장애와 센서의 검·보정 문제, 그리고 목측과 계측의 관측 방식의 차이로 인해 관측방향에 따라 안개의 시정거리가 다를 때도 발생할 수 있다. 시정이 1 km~20 km 사이인 경우 관측 지점의 지리적 위치에 관계 없이 두 관측 사이의 상관계수는 0.98로 높았고 절대 오차는 100 m 미만이었으나, RMSE가 1 km 이상으로 큰 편이었다.

3.2 복사안개 사례

복사안개 사례로 2016년 10월 17일 오후부터 10월 19일 오전까지 2일간 발생한 안개의 목측자료와 시정계 계측자료를 비교·분석하였다. Figure 4는 분석기간 내 천리안 위성(COMS: Communication, Oceanic and Meteorological Satellite)의 안개분석 영상으로 내륙의 광범위한 지역에서 안개가 발생하였음을 볼 수 있다.

복사 안개의 발생과 소산 시점을 고려하여, 일 단위 대신에 안개발생 일수 처리시 2016년 10월 17일

오후부터 24시간 간격으로 나누어 분석하였다. 총 279 지점(내륙: 194개소, 산간: 7개소, 해안: 52개소, 섬: 26개소)의 시정계 자료를 이용하였으며, 1일차에는 내륙지점 중 137개(71%) 지점에서, 2일차에는 총 116개(60%) 지점에서 안개가 계측되었으며 평균 안개 지속 시간은 5시간이었다. 목측의 경우 1일차에는 21개 지점 중 5개 지점(24%)에서, 2일차에는 2 지점(10%)에서 안개를 관측하였다.

Figure 5는 시정계 계측 안개의 분포도로 관측 지점의 지리적 위치를 구분하여 안개가 발생한 지점을 표시하였다. 내륙에 위치한 다수의 지점에서 복사안개가 관측되었으며, 같은 기간에 서해안의 섬 지역(영종도(543), 삼시도(609))에서도 연안안개가 관측되었고(Yoon et al., 2008; Kim and Yum, 2010), 강원 산간 지역에서는 동풍의 유입에 따른 활승안개가 발생한 것으로 분석되었다.

복사안개 사례에 대한 목측과 시정계 계측의 안개 시종시점, 안개 지속시간은 Table 3과 같다. 목측으로 내륙에 위치한 청주(131), 안동(136), 전주(146)에서 안개를 관측하였으며, 시정계도 동일한 지점들에서 안개를 계측하였다. 단, 북춘천(93)과 서산(129)에서는 목측에서 안개가 관측되었으나 시정계 관측자료가 없어서 비교에서 제외되었다. 목측 지점과 일치하는 시정계의 평균 안개 지속시간은 목측의 5시간 22분보다 15분 짧은 5시간 17분으로 목측의 95%에 해당하였다. 안개 시작시간은 시정계가 평균 7분 정도 빨리 탐지하였고, 안개 소산시간도 시정계가 평균 1분 정도 빠르게 계측하여, 10분 이상의 일시적 안개 소산시간을 제외하지 않은 시정계의 안개 지속시간은 목측대비

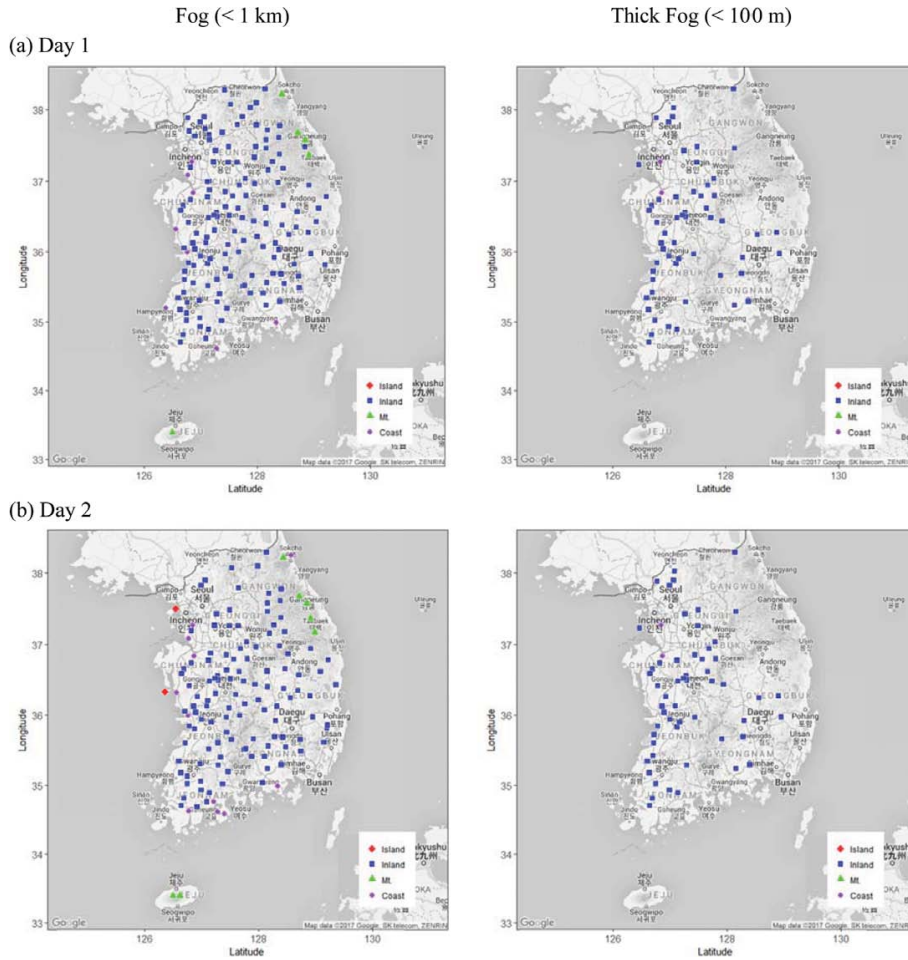


Fig. 5. Spatial distribution of fog (< 1 km) (left panel) and thick fog (< 100 m) (right panel) for the radiation fog case during (a) day 1 (17 afternoon to 18 morning October 2016) and (b) day 2 (18 afternoon to 19 morning October 2016).

Table 3. The comparison of fog occurrence observed by naked eye and visibility meters at the selected 4 stations from 17 October 2016 to 19 October 2016. Time in the parentheses denotes the duration of the thick fog under 100 m visibility.

Station (code)	Date	Naked eye observation		Visibility meter observation	
		Formation-dissipation time	Duration (hh:mn)	Formation-dissipation time	Duration (hh:mn)
Cheongju (131)	18 Oct 2016	05:40-09:39.	4:00	05:39-08:25, 08:38-09:00.	3:10
	19 Oct 2016	05:40-09:19.	3:40	05:16-05:24, 05:37-06:06, 06:56-09:04.	2:48
Andong (136)	18 Oct 2016	01:45-09:29.	7:45	01:53-08:58.	7:06
	19 Oct 2016	01:25-09:49.	8:25	01:09-01:12, 01:24-10:39.	9:20
Daegu (143)	18 Oct 2016	- [mist: 1.1 km at 0900 LST]	-	08:47-08:57	0:11
Jeonju (146)	18 Oct 2016	01:05- $\bar{vs}_{0.1}$ 01:45- $\bar{vs}_{0.1}$ 01:55-04:04.	3:00 (00:10)	01:03- $\bar{vs}_{0.1}$ 01:30- $\bar{vs}_{0.1}$ 01:50-04:06, 04:24-04:33.	3:14 (00:20)

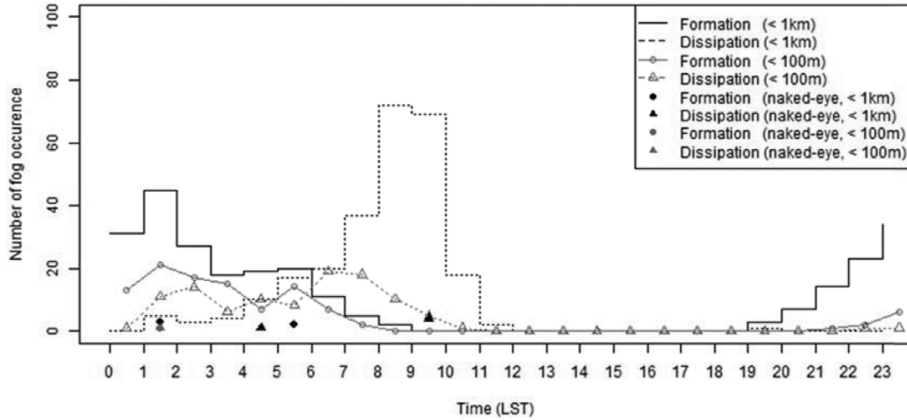


Fig. 6. Diurnal variation of fog formation and dissipation time obtained by inland visibility meters and naked-eyes for fog (< 1 km) and thick fog (< 100 m) in the radiation fog case from 17 October 2016, afternoon to 19 October 2016, morning.

102%에 해당하였다. 대구(143)에서는 10월 18일 오전에 관측자가 박무를 관측하는 가운데(오전 9시 시정: 1.1 km), 시정계만 오전 8시 47분부터 8시 57분까지 일시적으로 안개를 관측하였다.

목측과 시정계로 계측한 안개의 발생시간과 소산시간은 Fig. 6과 같이 안개와 짙은 안개로 구분하여 분석하였다. 시정계로 계측한 안개는 밤 11시부터 새벽 3시 사이에 가장 많이 발생하였고, 일출 후 1~3시간 사이인 오전 8시에서 10시 사이에 대부분 소산되었으며, 오후에는 안개의 발생과 소산이 없었다. 짙은 안개는 자정부터 새벽 3시 사이에 가장 많이 발생하였으며, 일출 후 빠르게 소산되었다. 목측 안개도 새벽에 발생하여 오전 10시 이전에 모두 소산되었다. 목측 지점 중에서는 안동(136)에서 2일차(2016년 10월 18일 오후~10월 19일 오전)에 가장 긴 안개가 발생하였으며, 목측은 8시간 25분간 안개를 관측하였고, 시정계는 9시간 20분간 더 길게 안개를 관측하였다. 내륙에 위치한 시정계 중에서는 충청남도 청양(618)에서 10월 18일 19시 15분부터 15시간 1분 동안 안개가 가장 길게 지속되었다.

시정계로 계측한 내륙의 짙은 안개는 1일차에 55개(28%) 지점, 2일차에 50개(26%) 지점에서 관측되었으며(Fig. 5), 평균 안개 지속시간은 1시간 39분이었다. 또한, 분석기간 내 안개 발생 지점 수 대비 짙은 안개의 발생 지점수의 비율은 42%에 해당하였다. 시정계 계측에서 짙은 안개의 지속시간이 가장 길었던 지점은 전라남도 완주(734)로 10시간 7분을 기록하였다. 목측에서는 1일차에 전주(146)에서만 짙은 안개가 10분 동안 관측되었으며, 비슷한 시간대에 시정계 계측도 짙은 안개를 관측하였다(Table 3). 두 관측 자료에서 짙은 안개 발생 차이는 공간해상도가 높은 시정계

계측의 유용성을 제시한다고 볼 수 있다.

3.3 이류안개(해무) 사례

이류안개 사례로 2016년 4월 8일부터 4월 12일 사이에 서해에 발생한 해무를 선정하였다. Figure 7은 분석기간 내 천리안 위성의 안개분석영상으로 2016년 4월 8일 09시와 4월 10일 09시에 서해상 대부분의 지역과 내륙 일부에서 안개가 탐지되었음을 보이고 있다. 서해상에 폭넓게 나타났던 해무는 4월 11일 09시에는 서해남부해상과 남해서부해상 일부에서만 나타날 정도로 영역이 줄어들면서 점차 소산되었다. 이번 해무는 대기에 비해 상대적으로 바다가 차가운 경우에 발생하는 냉해무(Cold Sea Fog)에 해당하며(Kim and Yum, 2010), 4월 8일 오후부터 분석 기간 내내 인천 부이(22185)와 덕적도 부이(22101)(Fig. 1)의 해수면 온도가 기온보다 상대적으로 낮았다.

해무 분석에는 서해안 섬 지역에 설치된 12개의 시정계 자료를 활용하였다. 2016년 4월 8일에는 11개 지점(92%)에서 안개가 관측되었고, 9일에는 11개 지점(92%)에서, 10일에는 8개 지점(67%)에서, 마지막 날인 11일에는 2개 지점(17%)에서 안개가 관측되었다. 시정계로 계측한 일별 안개 발생 분포도는 Fig. 8과 같으며, 서해안 섬 지역에 설치된 시정계를 포함하여 총 251개의 시정계 자료(내륙: 177개소, 산간: 5개소, 해안: 49개소, 섬: 20개소)를 사용하였다. 분석 기간 내 서해안 섬 지역의 일별 안개 발생 분포는 COMS 안개분석 영상(Fig. 7)의 안개탐지영역과 비교적 잘 일치하고 있다.

해무 발생기간 내 백령도(102)와 흑산도(169)에서 목측과 시정계로 계측한 안개의 분석 결과는 Table 4에 제시하였다. 해무 사례에서 안개 발생시간은 엄밀

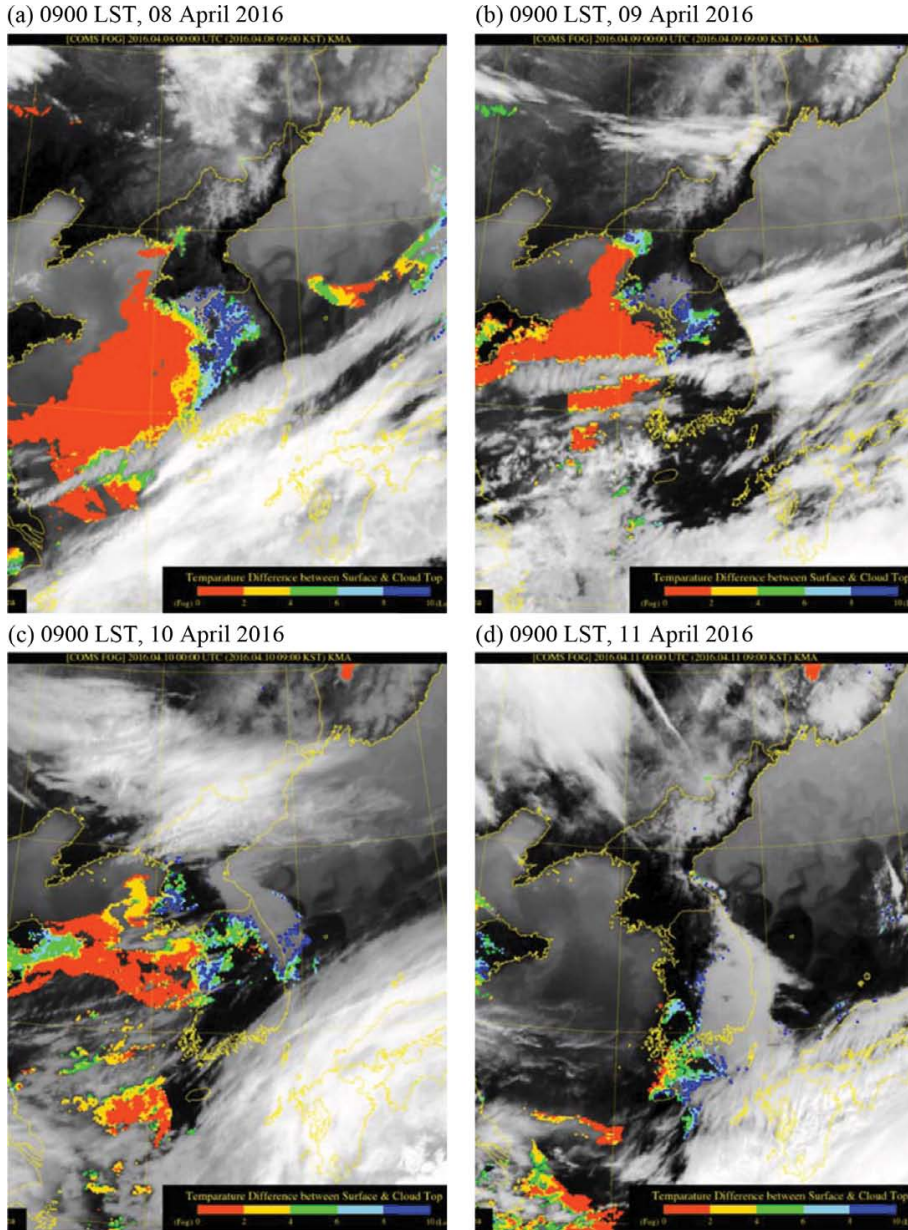


Fig. 7. COMS fog detection images at 0900 LST on (a) 08 April 2016, (b) 09 April 2016, (c) 10 April 2016, and (d) 11 April 2016 for the advection fog case.

하게 말하면 해무의 유입시간에 해당한다. 목측과 시정계로 계측한 평균 안개 지속시간은 각각 17시간 42분, 15시간 29분으로 시정계의 평균 안개 지속시간은 목측의 88%에 해당하였다. 두 관측 사이의 안개 시종시점을 비교하면, 시정계가 목측보다 평균 3분정도 안개가 빨리 관측하였고, 소산시점도 1시간 23분 정도 빠르게 관측하였다. 안개시종시점을 기준으로 한

전체적인 안개 지속시간은 시정계 계측이 목측 대비 93%에 해당했다. 분석기간 동안 약한 비를 동반한 안개가 목측과 시정계 계측에서 모두 관측되었다(Table 4).

흑산도(169)에서 관측자는 2016년 4월 9일 오전 10시 15분에서 12시 19분 사이에 2시간 정도 안개를 관측하였으며, 안개 관측 시 남남동풍이 3 m s^{-1} 이상 지속적으로 불었다. 시정계는 같은 시간 1분 자료에

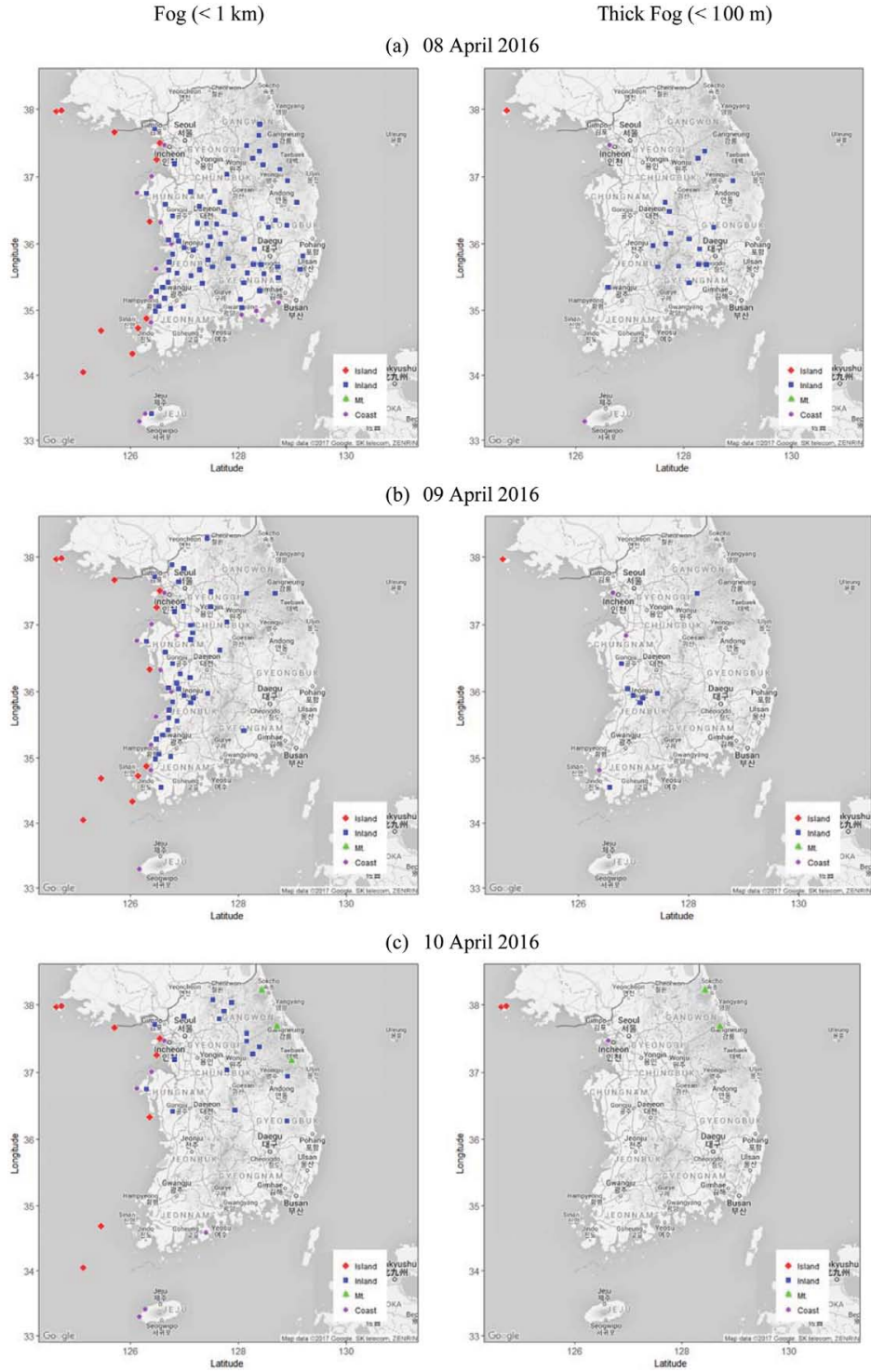


Fig. 8. Spatial distribution of fog (< 1 km) (left panel) and thick fog (< 100 m) (right panel) for the advection fog case that included all locations of visibility meters including inland and mountain regions on (a) 08 April 2016, (b) 09 April 2016, (c) 10 April 2016, and (d) 11 April 2016.

(d) 11 April 2016

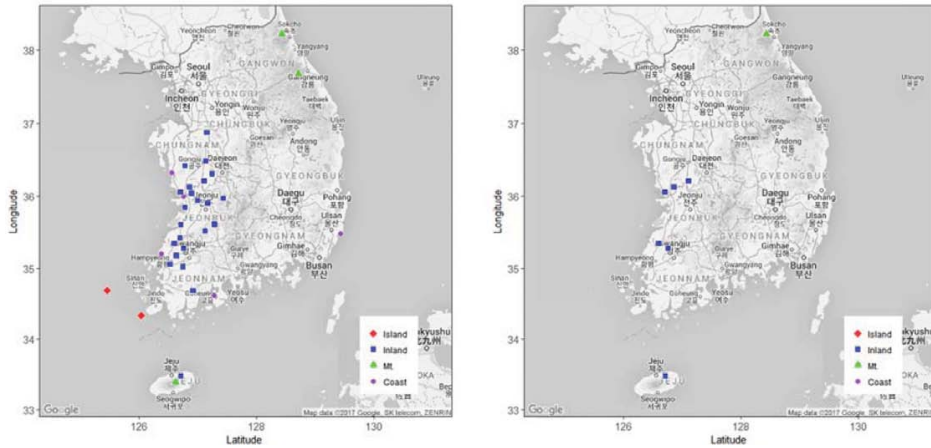


Fig. 8. Continued.

Table 4. The comparison of fog occurrence observed by naked eye and visibility meters at the selected 2 island stations from 08 to 11 April 2016. Time in the parentheses denotes the duration of the thick fog under 100 m visibility.

Station (code)	Date	Naked eye observation		Visibility meter observation	
		Formation-dissipation time	Duration (hh:mn)	Formation-dissipation time	Duration (hh:mn)
Baekryeongdo (102)	08 April 2016	08:10-11:19.	03:10	08:05-09:19, 09:50-10:20.	01:46
	09 April 2016	03:40-16:24, 17:22-		03:38-vs _{0.1} 04:19-vs _{0.1}	
				04:24-vs _{0.1} 04:44-vs _{0.1}	
	10 April 2016	-09:44, 12:48-15:20.	31:21	10:32-14:55, 15:18-15:21, 17:20-vs _{0.1} 21:14-vs _{0.1}	29:24 (05:53), (08:19)
			04:38-vs _{0.1} 04:53-vs _{0.1}		
			05:37-vs _{0.1} 08:30-vs _{0.1}		
			08:41-09:39, 13:43-15:02.		
Heuksando (169)	08 April 2016	00:21-	31:11	00:15-11:50, 12:01-12:07,	26:23
		[drizzle: 07:34-08:43]		12:56-13:14, 14:16-14:17,	
	09 April 2016	-03:45. 05:49-07:49. 10:15-12:19.		-03:50, 05:52-06:13,	
	10 April 2016			06:49-07:52, 08:35-08:44.	
			08:45-08:48.	00:04,	
11 April 2016	-02:39.	05:05	-01:59.	04:23	

서 700 m~20 km 사이의 변화가 큰 시정거리가 나타났으나, 10분 이동 평균 시정은 1 km 미만으로 작아지지 않았다. 바다에서 이류안개가 섬으로 유입되는 경우 관측 방향이나 위치에 따라 안개의 유무나 강도가 다를 수 있다. 이번 이류안개 사례는 목측과 시정계 계측 사이의 관측 방법 차이에 의해 두 관측 사이에 상대적으로 큰 시정거리의 차이가 발생할 수 있을

을 제시한다.

시정계로 계측한 이류안개는 주로 오후 3시~오전 9시 사이에 관측되기 시작하였고, 일출 후 아침 8시~9시에 소산되는 경우가 가장 많았으나 그 외의 시간대에서도 불규칙적으로 소산되었다(Fig. 9). 해무 발생 기간 백령도(102)에서 안개가 가장 길게 지속되었으며 목측으로 31시간 이상, 시정계 계측으로 29시간 이

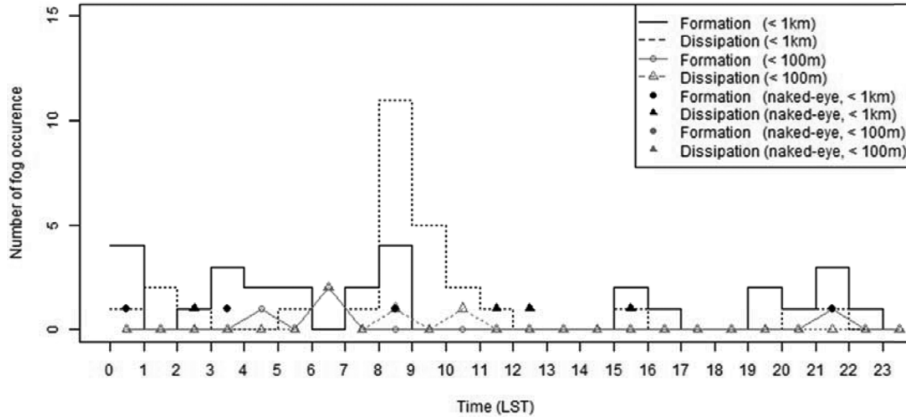


Fig. 9. Diurnal variation of fog formation (inflow of sea fog) and dissipation time obtained by visibility meters and naked-eye observation located on the islands for fog (< 1 km) and thick fog (< 100 m) in the advection fog case from 8 to 11 April 2016.

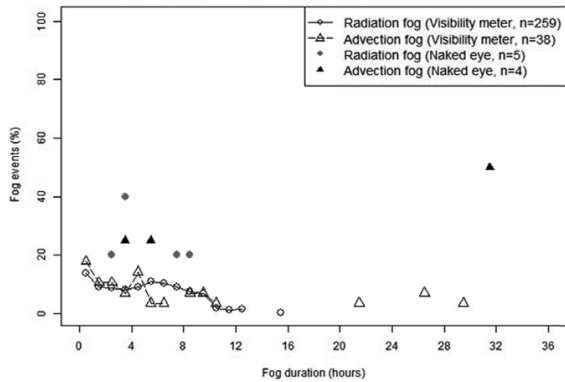


Fig. 10. Frequency distribution of 1 hour interval duration of fog events by visibility meter and naked-eye observation on inland and island for the radiation fog case (17 October 2016, afternoon to 19 October 2016, morning) and the advection fog case (8 to 11 April 2016).

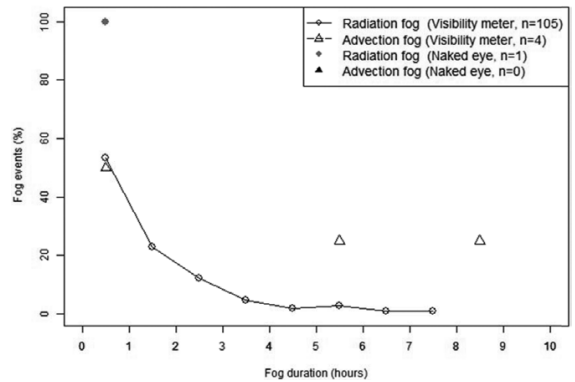


Fig. 11. Same as in Fig. 10 but for thick fog (< 100 m) events.

상 관측되었다(Table 4). 그러나 서해안 섬에 설치된 전체 12개 시정계 지점에서 측정한 안개지속시간은 1시간 미만~29시간 이상으로 지점별로 큰 차이를 보였다(Fig. 10). 복사안개 사례 또한 시정계로 관측 지점수가 목측보다 많았으며 시정계로 측정한 지점별 안개 지속시간은 1시간 미만~12시간 이상으로 다양하게 분포하였다(Fig. 10).

질은 안개는 백령도에서만 시정계로 측추되었으며, 목측 안개의 최소 시정은 백령도에서 관측된 100m 이었다. 백령도에는 2개의 시정계가 섬의 서쪽, 해발 145 m 백령도(102) 지점과 백령도 동쪽, 해발 330 m 백령면(528) 지점에 설치되어 있는데, 동일한 섬 내에서도 시정계의 위치에 따라 질은 안개 발생일자가 달

랐다(Fig. 8). 시정계로 측추한 질은 안개의 평균 지속시간은 3시간 45분으로, 백령도(102) 지점에서는 5시간~8시간 이상 질은 안개가 지속되었고(Table 4), 백령면(528) 지점은 모두 1시간 안에 질은 안개가 약화되면서 섬 내의 시정계의 위치에 따라 큰 차이를 보여주었다(Fig. 11). 시정계로 측추한 질은 안개는 복사안개 사례에서도 관측 지점에 따라 평균 지속시간이 1시간 미만~7시간 이상으로 다양하게 나타났다(Fig. 11). 질은 안개의 지속시간 분포는 안개 유형에 관계없이 목측과 시정계 측추에서 적지 않은 차이를 보이고 있으며, 시정계가 질은 안개의 지속시간을 전반적으로 목측보다 길게 관측하고 있음을 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청에서 2009년부터 설치 운영하고 있는 약 280여개 지점의 시정계 측추 자료와 22

개 지점의 목측 시정 자료를 이용하여 2016년 1년간 안개 발생 시 두 관측 자료의 시정 특성을 비교 분석하였다. 또한 우리나라에서 전형적으로 발생하는 복사안개와 이류안개 사례를 선정하여 두 관측 자료에서의 안개 발생 및 소산 시점 그리고 지속시간에 대해 상세히 비교 분석하였다. 이 과정에서 시정계 계측 시정자료는 안개 외 강수 등에 의해서도 시정이 1 km 미만으로 발생할 수 있기 때문에 품질검사를 통해 안개 외의 자료는 최대한 분석에서 제외하였다.

목측 안개에 대한 시정계 계측 안개의 정확도는 안개의 강도에 관계없이 0.96~0.97로 매우 높게 나타나고 있으나, 시정계가 목측보다 안개를 더 빈번하게 계측하여 FAR이 0.19~0.47 그리고 Bias가 1.20~1.80로 크게 나타나고 있다. 특히 시정 100 m 미만의 짙은 안개의 경우 FAR가 0.47, Bias가 1.80으로 다른 시정 거리에 비해 시정계 계측이 목측보다 짙은 안개를 자주 관측하였다. 또한 두 관측 자료 사이의 상관성은 지리적 위치 및 시정에 따라 상이하게 나타나고 있는데 시정이 1 km 미만인 경우 상관계수는 내륙지역에서는 0.86이나 섬/해안지역에서는 0.61로 낮게 나타났다. 반면에, 짙은 안개(<100 m)가 발생한 경우의 상관계수는 내륙지역에서 0.65(극단값을 포함하면 -0.09)로 섬/해안지역의 0.73보다 낮게 나타나고 있다. 또한, 시정 500 m 미만~1 km 미만의 안개 발생시 섬/해안 지역의 RMSE가 내륙 지역보다 3배 정도 크게 나타났다. 이렇게 지리적 위치 및 강도에 따라 시정 자료의 상관성에 차이가 나는 것은 목측과 시정계 계측 사이의 관측 방법 차이와 목측 관측의 주관적 불확실성에 기인한 것으로 추정되며 이 점에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

복사안개 사례와 이류안개(해무) 사례에서도 목측으로 안개를 관측한 경우에 시정계 역시 안개를 모두 관측하였으며, 시정계만 10분 미만의 일시적인 안개를 관측하기도 하였다. 목측 지점을 기준으로 비교한 두 관측 자료에서 안개의 시종시점은 안개 유형에 관계없이 유사하게 나타났으나, 안개지속시간은 목측보다 평균적으로 5%~10% 정도 짧게 나타나고 있다. 하지만, 짙은 안개의 경우 시정계의 짙은 안개 지속시간이 전반적으로 목측보다 길게 나타났다. 이렇게 안개 지속시간에서 차이가 나는 것은 시정계 계측에서 10분 이상 연속적으로 안개가 탐지되지 않은 경우 안개 지속시간에서 제외한 것과 시정계 계측의 공간 대표성 한계에 의한 것으로 보인다.

시정계로 계측한 안개는 지리적 위치 및 안개 유형에 관계없이 목측 자료와 유사한 분포를 보이고 있으나, 전체 시정계 지점에서 계측한 안개의 시종시점과 지속시간은 지리적 위치, 안개 유형 및 안개 강도에 따라 적지 않은 차이를 보이고 있다. 따라서 시정계

계측 시정자료만을 이용하여 안개의 발생 특성을 분석하기 위해서는 시정계 계측 자료의 품질검사 기법 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

우리나라는 삼면을 둘러싼 바다와 내륙의 복잡한 지형, 강이나 인공 댐 그리고 몬순기후의 영향으로 안개의 지속시간, 공간규모, 유형 및 강도가 다양하게 나타난다. 시·공간 해상도가 높고, 주야 연속적으로 객관적 관측이 가능한 시정계 안개 자료의 품질이 향상된다면 우리나라에서 보다 상세한 안개 특성 분석이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 시정계 관측 지점은 목측에 비해 약 12배 이상 많고 전국에 비교적 균일하게 분포하고 있기 때문에, 시정계 자료를 이용한 안개 발생의 지역별(예: 내륙, 산간, 해안, 섬) 특성 분석이 가능해질 것이다. 또한 시정계 자료와 함께 최근 관측 성능(공간 분해능, 관측주기, 채널 수)이 점점 우수해지고 있는 기상위성자료(COMS, 히마와리, GK-2A)와의 동시 분석도 의미가 있을 것이다(Ahn et al., 2003; Suh et al., 2017).

감사의 글

본 연구는 기상청 국가기상위성센터 “정지궤도 기상위성 지상국 개발(NMSC-2017-01)” 출연금 사업의 일환으로 한국전자통신연구원(ETRI)에서 추진하는 “영상장면분석 표면분야 알고리즘 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 대해 많은 조언을 해주신 심사위원님들께 감사를 드립니다. 그리고 시정계 관련 정보와 자료, 안개관련 정책정보를 제공해 주신 기상청 관련부서 담당자 분들께도 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Ahn, J.-B., J.-W. Suh, and H.-J. Lee, 2001: Simulation study of formation mechanism by sea fog characteristics. *Atmosphere*, **11**, 556-559 (in Korean).
- Ahn, M.-H., E.-H. Sohn, and B.-J. Hwang, 2003: A new algorithm for sea fog/stratus detection using GMS-5 IR data. *Adv. Atmos. Sci.*, **20**, 899-913, doi:10.1007/BF02915513.
- Cho, H.-J., 2003: Analysis of Hazardous Fog and Index Development in Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **38**, 478-489 (in Korean).
- Cho, Y.-K., M.-O. Kim, and B.-C. Kim, 2000: Sea fog around the Korean Peninsula. *J. Appl. Meteorol.*, **39**, 2473-2479, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<2473:SFATKP>2.0.CO;2.
- Gultepe, I., and Coauthors, 2007: Fog research: A review of past achievements and future perspectives. *Pure*

- Appl. Geophys.*, **164**, 1121-1159, doi:10.1007/s00024-007-0211-x.
- Heo, K.-Y., and K.-J. Ha, 2004: Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor.*, **40**, 541-556, doi:10.3346/jkms.2004.19.4.541 (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. *J. Korean Meteorol. Soc.*, **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, K.-W., Y.-J. Kim, and J.-S. Jeong, 2007: Optical Visibility Observation to simulate visibility change. *Proc. autumn meetings of KMS*, 376-377 (in Korean).
- Kim, M.-S., 1998: Affecting Factors on Variations and Long-trends of the Atmospheric Visibility in the Metropolitan Area of Taegu. *J. Korean Soc. Environ. Admin.*, **4**, 97-107 (in Korean).
- Kim, S.-S., and N.-Y. Lee, 1970: On the classification of the fog regions of Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **6**, 1-15 (in Korean).
- KMA, 2016: 2015 Meteorological annual report, KMA, 569 pp (in Korean).
- _____, 2017: Meteorological Information Portal Service System [Available online at <http://afso.kma.go.kr>]
- Koraćin, D., J. A. Businger, C. E. Dorman, and J. M. Lewis, 2005: Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog. *Bound.-Layer Meteor.*, **117**, 447-478, doi:10.1007/s10546-005-2772-5.
- _____, C. E. Dorman, J. M. Lewis, J. G. Hudson, E. M. Wilcox, and A. Torregrosa, 2014: Marine fog: A review. *Atmos. Res.*, **143**, 142-175, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.012.
- 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, doi:10.14191/Atmos.2013.23.1.103.
- 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., and S. Kim, 2006: Distribution Characteristics and Changing Trends of Visibility in Korea. *J. Clim. Res.*, **1**, 23-38 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.-S., H.-K. Kim, J.-M. Lee, K.-L. Kim, and J.-E. Park, 2015: Quality control of visibility observation data according to change of observation environment from naked eye to instrument observation. *Proc. autumn meetings of KMS*, 266-267 (in Korean).
- Lutgens, F. K., E. J. Tarbuck, and D. G. Tasa, 2016: *The Atmosphere: An introduction to meteorology (13th edition)*, Pearson, 528 pp.
- Moon, S.-H., and S.-H. Lee, 2013: A Study on the Change of Fog Frequency and Duration Hours in South Korea. *Climatic Res.*, **8**, 93-104, doi:10.14383/cri.2013.8.2.93 (in Korean with English abstract).
- NOAA, 2005: Surface weather observations and reports, Federal Meteorological Handbook No. 1. [Available online at <http://www.nws.noaa.gov/om/forms/>.]
- Shepard, F. D., 1996: *Reduced Visibility Due to Fog on the Highway*. National Academy Press, 51 pp.
- Suh, M.-G., 2014: *Practical Data Processing and Analysis Using R*, Gilbut Press, 580 pp.
- Suh, M.-S., S.-J. Lee, S.-H. Kim, J.-H. Han, and E.-K. Seo, 2017: Development of Land fog Detection Algorithm based on the Optical and Textural Properties of Fog using COMS Data, *Korean J. Remote Sens.*, **33**, 359-375, doi:10.7780/kjrs.2017.33.4.3.
- 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.
- Taylor, G. I., 1917: The formation of fog and mist. *Quar. J. Roy. Meteor. Soc.*, **43**, 241-268, doi:10.1002/qj.49704318302.
- Vaisala, 2010: User's guide-Vaisala Present Weather Detector PWD22/52, 210543EN-D, 114 pp.
- WMO, 2008: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 6th edition WMO-No. 8, 716 pp.
- _____, 2014: Manual on Codes, International Codes. I.1. part A, WMO-No.306, 480 pp.
- 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. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 631-642 (in Korean).
- 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*, 866-867 (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*, 348-349 (in Korean).