

GK2A AMI  
Algorithm Theoretical Basis  
Document

Fog

서명석 공주대학교  
한지혜 공주대학교  
노나영 공주대학교  
유하영 공주대학교

Version 2.0

2021. 11. 30.

### <수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	COMS (Communication Ocean Meteorological Satellite)/MI (Meteorological Imager)를 Himawari-8/AHI (Advanced Himawari Imager)로 변환하여 안개 탐지함	0.1.0.0	2016. 08. 01	서명석
0.2	- 주간/야간 조건을 변경함 - 해수면 온도 및 지상 온도 자료를 이용함	0.2.0.0	2016. 11. 01	서명석
0.3	- 3차 peer-review에서 나온 조언들을 ATBD에 반영함 - 바다에서 보조자료로 사용된 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis)를 CSR (Clear Sky Radiance)로 변경함	0.3.0.0	2017. 12. 15	서명석, 한지혜, 김소형
0.4	- 바다에서의 안개 탐지 알고리즘 결과를 검증하기 위해 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)를 사용함 - 안개 탐지 평가요소들의 임계값을 최적화하기 위해 ROC (Receiver Operating Characteristic) 또는 TS (Threat Score)를 사용함	0.4.0.0	2018. 01. 15	서명석, 한지혜, 김소형
0.5	- 주간에 하층운 가장자리 화소를 제거하기 위해 Himawari-8/AHI의 ch13, ch15, ch16을 보조자료로 사용함 - 사막 및 적설 지역에서 나타나는 오탐지된 화소를 줄이기 위해 지면피복자료와 적설탐지 자료를 사용함	0.5.0.0	2018. 02. 28	서명석, 한지혜, 김소형
0.6	- 안개 탐지 방법을 가중합 방법에서 결정나무기법으로 변경함 - 안개 탐지를 위해 다양한 적외 채널들을 활용함 - 육지에서 지상온도 자료로 사용하던 LDAPS(Local Data Assimilation and Prediction System)를 CSR로 변경함 - 해안가 실험, 안개의 일변동을 활용한 방법, 바다에서 국소 안개 제거하는 방법들을 후처리 과정에 추가함	0.5.7.1	2018. 11. 15	서명석, 한지혜, 노나영, 유하영
1.0	- 주간에 30일 반사도 합성장을 활용 - CSR 자료를 동적으로 편의 보정하여 사용	0.5.8.1	2019. 06. 15	서명석, 한지혜,

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국가기상위성센터 ATBD 개선 필요사항 및 새로운 국문 템플릿을 반영한 ATBD 수정</li> </ul>			노나영, 유하영
1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 야간 정의 기준을 95 °에서 88 °로 변경함</li> <li>- CSR 자료 사용 시, 10분 간격으로 시간 내삽하여 사용</li> <li>- 검증 자료와의 시공간 일치화 방법을 최근 접 화소만을 사용하는 방법에서 3 x 3 화소와 비교하는 방법으로 변경</li> <li>- GK2A 탐지 결과 분석 추가</li> </ul>		2019.10.15	서명석, 한지혜, 노나영, 유하영
2.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 해무 미탐지 개선을 위해 ch7과 ch14의 휘도온도차이, ch13과 ch15의 휘도온도차이 경계값 조정</li> <li>- 이류 해무 미탐지로 인한 육해상 공간불연속 해소를 위해 이류 해무 탐지 실험 추가</li> <li>- 해상 황사 지역에서 나타나는 오탐지 화소를 제거하기 위해 ch8과 ch10의 휘도온도차이 기법 적용</li> <li>- 주간해 해상 청천/구름 가장자리 지역에서 나타나는 오탐지 화소를 제거하기 위해 태양 천정각에 대하여 정규화한 ch3 반사도 적용</li> <li>- 이른 아침 청천 육지 지역에서 나타나는 오탐지 화소를 제거하기 위해 ch3 반사도 차이(청천 반사도 - 현재시간 반사도)를 태양 천정각에 대하여 정규화하여 사용</li> <li>- 위성이 실제로 한반도를 관측하는 시간에 해당하는 자료로 검증하기 위해 10분 평균 시정자료 대신 파일명 기준 + 0 ~ + 5분 동안의 1분 평균 시정의 중앙값을 검증에 활용</li> <li>- 검증 영역으로 시정계 주변 3x3 위성 화소 뿐만아니라 시정계와 최단거리에 있는 위성 화소를 이용하는 방법도 추가 사용</li> <li>- 시정계 주변 3x3 위성 화소를 이용하여 안개 탐지 여부를 정의할때, 시정계 값에 상관없이 일관된 기준을 갖도록 변경</li> </ul>	2.1.2.1 (현업 기준)	2021.11.30	국가기상위성센터 김소형

# <목차>

1. 개요.....	1
1.1 목적 .....	1
1.2 사용자.....	1
1.3 내용 .....	1
1.4 관련 문서.....	1
2. 알고리즘 소개.....	2
2.1 개요 .....	2
2.2 알고리즘 흐름도 .....	2
2.3 입력자료 .....	7
2.4 이론적 배경 .....	9
2.5 수학적 설명 .....	19
2.6. 산출물.....	19
3. 모의자료 및 검증.....	22
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	22
3.2 검증 방법.....	23
3.3 검증 결과.....	25
4. 현업운영 시 고려사항 .....	40
4.1 수치계산 고려사항 .....	40
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항 .....	40
4.3 품질 평가 및 진단 .....	40
4.4 예외사항 처리.....	40
4.5 검증 알고리즘.....	40
5. 가정 및 제한.....	41
5.1 성능 .....	43
5.2 예상 센서 성능 .....	43
5.3 개선을 위한 사전 계획 .....	43
6. 참고문헌 .....	44

## 〈표 목차〉

Table 2. 1. Summary of test elements used for fog detection in this study.	5
Table 2. 2. Input list of GK2A/AMI L1B data used for the fog detection algorithm. . . . .	7
Table 2. 3. Input list of GK2A/AMI L2 data used for the fog detection algorithm. . . . .	8
Table 2. 4. Input list of ancillary data for the fog detection algorithm.	8
Table 2. 5. Physical properties of fog and control factors. . . . .	10
Table 2. 6. Threshold values for the 10 test elements of Himawari-8 and GK2A for daytime. . . . .	18
Table 2. 7. Threshold values for the 5 test elements of Himawari-8 and GK2A for night and dawn. . . . .	18
Table 2. 8. Summary of fog products and flags retrieved from fog detection algorithm developed in this study. . . . .	19
Table 3. 1. Summary of satellite data used for the fog detection algorithm. . . . .	22
Table 3. 2. Validation results with ground observed visibility data according the time of day for training cases. . . . .	276
Table 3. 3. Same as in Table 3.2 except for validation cases. . . . .	287
Table 3. 4. Validation results with ground observed visibility data according the validation area for 21 fog cases. . . . .	39

## <그림 목차>

Fig. 2. 1. General flow chart of the fog detection algorithm using GK2A/AMI data and other ancillary data. . . . .	4
Fig. 2. 2. Fog detection based on the SZA and Land/Sea mask data. . . . .	5
Fig. 2. 3. Spatial distribution of LSD and NLSD at 00:00 UTC (Universal Time coordinate) (09:00 KST (Korea Standard Time)) 20 Oct., 2015 using Himawari-8. (a) LSD_VIS and, (b) NLSD_VIS. . . . .	11
Fig. 2. 4. Relationship between the brightness temperature of 11.2 $\mu\text{m}$ (BT11.2) and Ta(Air Temperature) of LDAPS on (a) Mar. 16, 2017, (b) Jun. 15, 2017, (c) Sep. 01, 2017, and (d) Jan. 03, 2017. . . . .	12
Fig. 2. 5. Same as in Fig. 2.4 except for BT11.2 of CSR. . . . .	13
Fig. 2. 6. Diurnal variation of fog frequency observed by the 290 visibility meters over South Korea. . . . .	14
Fig. 2. 7. Conceptual diagram for the use of life cycle of fog, left (t-1) and right (t). The “O” and “X” stand for fog and no fog, respectively. . . . .	14
Fig. 2. 8. Frequency distribution of the optical/textural properties at the selected fog, cloud, sea, and land area from 03:00 KST to 04:50 KST Apr. 07, 2017. (a) Selected sub-areas, (b) DCD(SWIR-IR), (c) $\Delta\text{FTs}$ , and (d) LSD_BT11.2. . . . .	16
Fig. 2. 9. Frequency distribution of the optical/textural properties of fog pixels on training cases in nighttime. (a) DCD, (b) $\Delta\text{FTs}$ , and (c) LSD_BT11.2. . . . .	17
Fig. 3. 1. Spatial distribution of visibility meter of KMA. . . . .	23
Fig. 3. 2. Contingency table and modified criteria for the validation of fog detection results. . . . .	244
Fig. 3. 3. Sample image of fog detection results at 04:00 KST Sep. 24, 2019. (a) COMS fog image, (b) Ground observed visibility, and (c) KNU_FDA fog image. The red color in (c) indicates foggy pixels. The blue and green dots in (c) indicate false-detected and missed pixels, respectively. . . . .	298
Fig. 3. 4. Same as Fig. 3.3 except for 09:00 KST Sep. 24, 2019 . . . . .	309
Fig. 3. 5. Same as Fig. 3.3 except for 04:00 KST Sep. 17, 2019. . . . .	30
Fig. 3. 6. Same as Fig. 3.3 except for 07:00 KST Sep. 17, 2019. . . . .	321
Fig. 3. 7. Validation results with ground observed visibility data according the time of day. The red and blue lines indicate POD and FAR, respectively. The gray bar represents the total number of fog points	

used for validation. . . . .	32
Fig. 3. 8. Same as Fig. 3.7 except for land. . . . .	33
Fig. 3. 9. Same as Fig. 3.7 except for coast. . . . .	34
Fig. 3. 10. Sample image of fog detection results at 09:00 KST Jul. 28, 2019. (a) COMS fog image, (b) KNU_FDA fog image(before), and (c) KNU_FDA fog image(after). . . . .	35
Fig. 3. 11. Same as Fig. 3.10 except for 10:00 KST Dec. 10, 2019.	36
Fig. 3. 12. Sample image of fog detection results at 12:00 KST Apr. 15, 2020. (a) GK2A fog RGB image, (b) KNU_FDA fog image(before), and (c) KNU_FDA fog image(after). . . . .	37
Fig. 3. 13. Sample image of fog detection results at 16:00 KST May 12, 2020. (a) GK2A dust image, (b) KNU_FDA fog image(before), and (c) KNU_FDA fog image(after). . . . .	38
Fig. 3. 14. Sample image of fog detection results at 06:00~10:00 KST Mar. 11, 2021. The top is KNU_FDA fog image(before), the bottom is KNU_FDA fog image(after). . . . .	39

## 약어표

Acronyms	
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
B	Bias ratio
BT	Brightness Temperature
BTD	Brightness Temperature Difference
CALIPSO	Cloud–Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CMDPS	COMS Meteorological Data Processing System
COMS	Communication Ocean Meteorological Satellite
CSR	Clear Sky Radiance
DB	Data Base
DCD	Dual Channel Difference
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAR	False Alarm Ratio
$\Delta$ FTs	Difference between fog top temperature and Surface Temperature
GEO	Geostationary
GIS	GEO–Graphics Information System
GK2A	GEO–KOMPSAT–2A
IR	Infrared Radiation
KNU_FDA	Kongju National University_Fog Detection Algorithm
KMA	Korea Meteorological Administration
KSS	Hanssen–Kuiper Skill Score
KST	Korea Standard Time
LDAPS	Local Data Assimilation and Prediction System
Lidar	Light detection and ranging
LSD	Local standard deviation
LST	Land Surface Temperature
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service
NIR	Near Infrared Radiation
NLSD	Normalized LSD
OSTIA	Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis
POD	Probability Of Detection
RGB	Red, Green, Blue

RMSE	Root Mean Square Error
ROC	Receiver Operating Characteristic
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS
SD	Standard Deviation
SRF	Spectral Response Function
SST	Sea Surface Temperature
SWIR	Short Wave Infrared Radiation
SZA	Solar Zenith Angle
Ta	Air Temperature
TOA	Top of Atmosphere
TS	Threat Score
UM	Unified Model
UTC	Universal Time coordinate
VFM	Vertical Feature Mask
VIS	Visible
NR	<a href="#">Normalized Reflectance</a>
$\Delta$ VIS	Difference between <a href="#">normalized</a> reflectance of 0.64 $\mu\text{m}$ and surface <a href="#">normalized</a> reflectance

# 1. 개요

## 1.1 목적

본 안개 탐지 알고리즘 기술 분석서 (Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD)의 목적은 정지궤도복합위성 천리안 2A호 (GEO-KOMPSAT-2A, GK2A)의 AMI(Advanced Meteorological Imager) 자료와 다른 보조 자료들로부터 안개 탐지에 필요한 기본적인 물리적 특성과 안개 탐지 알고리즘 산출물의 특성들을 상세하게 제공하는데 있다. 본 문서는 안개 탐지 알고리즘의 이론적 배경에서부터 산출 자료의 특성에 이르기까지 상세한 내용을 제공하는데 그 목적이 있으며, GK2A/AMI의 Level 1B 자료에 단계별 임계값을 적용한 결정나무(decision tree) 기법으로 안개를 탐지하는 과정을 기술하였다. 또한 수치모델 자료 등 안개 탐지에 사용되는 다양한 보조 자료에 대한 설명이 포함되어 있다.

## 1.2 사용자

본 문서의 사용자는 1차적으로 위성자료로부터 안개를 탐지하는 이론적 배경이나 안개 또는 하층운 탐지 알고리즘 개선에 관심이 있는 연구자이고, 2차적으로는 위성으로부터 산출한 안개를 초단기 예보 또는 안개 예보결과 검증과 같은 다른 응용분야에 활용할 사용자들이다.

## 1.3 내용

이 문서는 GK2A/AMI 자료로부터 안개를 탐지하는 이론적 배경을 제시하는 것으로 이 문서는 크게 다음과 같은 내용을 포함하고 있다.

- 개요: 안개 탐지 알고리즘의 목적, AMI 센서의 특성, 그리고 산출물에 대한 간단한 기술
- 알고리즘 소개: 안개 탐지에 필요한 입력 자료에서부터 이론적 배경, 탐지 알고리즘의 특성 그리고 최종 산출물에 대한 소개
- 알고리즘 입력자료 구성과 산출물: GK2A/AMI 알고리즘 개발을 위해 필요한 자료의 구성과 산출물에 대한 소개
- 고려사항: 알고리즘의 특징과 품질 관리 고려사항에 대한 소개
- 가정과 한계: 안개 탐지 알고리즘의 개발 과정에 필요한 가정과 현 알고리즘의 한계에 대한 소개

## 1.4 관련 문서

- 국가기상위성센터, 2015, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (1) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2016, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (2) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (3) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (4) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2018, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (5) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2019, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (6) 연차보고서

## 2. 알고리즘 소개

### 2.1 개요

GK2A/AMI 안개 탐지 알고리즘은 AMI 관측 자료 및 다양한 보조 자료를 이용하여 한반도 및 동아시아 지역에서의 안개 발생 유무를 정량적으로 탐지하기 위한 것이다. 본 안개 탐지 알고리즘은 기본적으로 단계별 임계값을 사용하는 결정나무기법(decision tree)을 사용하며 최종 산출물은 각 화소별 안개 유무이다. 여기서 주야에 따라 사용 가능 위성자료가 다르기 때문에 본 알고리즘에서는 태양 천정각 (Solar Zenith Angle, SZA)에 따라 주/야/여명기/황혼기로 구분하여 안개를 탐지한다. 또한 해상 및 육지에서의 배경자료 및 안개 발생 특성이 다르기 때문에 지리적 위치에 따라 육지/바다/해안가 별로 각 평가요소별 임계값을 최적화하여 사용한다.

주간에는 1차적으로 0.64  $\mu\text{m}$  정규화 반사도(normalized reflectance, NR)와 맑은 상태에서의 지표면 정규화 반사도 차 (Difference between NR of 0.64  $\mu\text{m}$  and surface NR,  $\Delta\Delta\text{VIS}$ )를 이용하여 안개 가능 화소를 탐지하고, 야간에는 3.8  $\mu\text{m}$ 와 11.2  $\mu\text{m}$  채널의 밝기온도 (Brightness Temperature, BT) 차 (Dual Channel Difference, DCD)를 이용하여 안개 가능 화소를 탐지한다. 안개 가능 화소에는 다양한 유형의 구름들이 포함되어 있기 때문에 안개 가능 화소 상부 온도와 지표면 온도(Land surface temperature, LST) 또는 해수면 온도(Sea surface temperature, SST))와의 차 (Difference between fog top temperature and surface temperature,  $\Delta\text{FTs}$ )를 이용하여 하층운 이상의 구름을 제거한다. 2단계의 시험을 통과한 안개 가능 화소에도 운정고도가 낮은 하층운, 아화소 크기의 구름 가장자리, 반투과성 권운, 적설지역, 사막지역 등 안개가 아닌 화소들이 다수 포함되어 있기 때문에 이들을 제거하기 위하여 주/야 별로 사용 가능한 채널 및 보조자료들을 이용하여 단계적으로 안개가 아닌 화소들을 제거한다. 또한 태양 천정각의 영향으로 가시채널의 반사도와 DCD 값의 변동성이 큰 여명기와 황혼기의 경우 새로 탐지하는 대신 안개의 시간 연속성을 고려하여 이전 시간의 안개 탐지 결과를 사용하며, 추가적으로 오탐지 화소를 제거하기 위한 안개 탐지 단계를 수행하였다. 이렇게 탐지된 안개 산출물은 육지와 바다에 대해 각각 기상청 운용 시정계 자료와 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 자료를 이용하여 산출수준을 검증한다.

### 2.2 알고리즘 흐름도

본 연구에서 개발하고자 하는 안개 탐지 알고리즘은 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 크게 온라인과 오프라인 과정으로 되어 있다. 오프라인 과정에서는 안개 탐지에 필요한 초기 임계값을 설정하고, 이들 초기 임계값들을 훈련사례들에 적용한 후 통계적 방법으로 최적화를 수행한다. 그리고 온라인 과정은 6단계로 구성되며 GK2A/AMI 자료 및 보조 자료들을 이용하여 안개를 실시간으로 탐지하고 검증하는 과정이 수행된다.

- 1) 초기임계값 설정: GK2A/AMI 자료를 통해 안개를 탐지하기 위해서는 다양한 임계값들이 필요하다. 안개 탐지에 필요한 다양한 평가요소들 (예: DCD,  $\Delta\Delta\text{VIS}$ ,  $\Delta\text{FTs}$ , LSD, NLSD, NDSI, 등)의 초기 임계값들은 선정된 안개 사례의 빈도수 분석을 통해 결정된다 (Lee, 2016). 다음은 본 알고리즘에서 사용되는 평가요소들을 설명한 것이다.

-  $\text{DCD (K)} = \text{BT}_{3.8} - \text{BT}_{11.2}$

-  $\Delta\text{NVIS (Normalized VIS) (\%)}$

$= 0.64 \mu\text{m}$ 의 정규화 반사도(NR0.64)

=  $0.64 \mu\text{m}$ 의 반사도 \*  $(24.35 / (2\text{COS}(SZA) + \sqrt{498.5225(\text{COS}(SZA))^2 + 1}))$  (Li and Shibata, 2006)

-  $\Delta\text{VIS}$  (%) =  $0.64 \mu\text{m}$ 의 정규화 반사도(NR0.64) - 지표면 기준 정규화 반사도(sfc\_NR0.64)

- LSD (Local standard deviation) = 3 x 3 화소들의 국지 표준 편차

- NLSD (Normalized LSD) = 정규화된 국지표준 편차 (LSD / 3 x 3 화소들의 평균)

- FTs (K) = 안개 가능 화소의 운정 온도 (BT11.2) - 지표면에서의 기준 온도 (CSR\_BT11.2)

- NDSI (Normalized Difference Snow Index) =  $(R0.64 - R1.6) / (R0.64 + R1.6)$

- BT13\_11 (Brightness Temperature Difference) (K) = BT13.3 - BT11.2

- BT10\_12 (K) = BT10.5 - BT12.3

- BT08\_10 (K) = BT8.7 - BT10.5

- BT10\_11 (K) = BT10.5 - BT11.2

- BT12\_13 (K) = BT12.3 - BT13.3

-  $\Delta\text{DCD}/\Delta t$  (K/min) =  $[\text{DCD}(t) - \text{DCD}(t-1)] / \Delta t$

2) 임계값 최적화: 각 평가 요소들의 초기 임계값은 지상 관측 시정계 자료를 이용하여 안개 혼련 사례들에 대해 ROC (Receiver Operating Characteristic) 분석 및 통계적 검증 방법을 통해 최적화하였다 (Lefran, 2015; Suh *et al.*, 2017).

3) 입력 자료 읽기: 안개 탐지를 위해 입력되는 위성 자료들 (AMI 관측자료 (R0.64, BT3.8, BT11.2 등)과 다른 보조 자료들(육지/바다 구분 자료(Land/Sea mask), 태양 천정각, 청천복사휘도(Clear Sky Radiance, CSR)의 BT11.2, 이전 시간 안개 탐지 결과, 임계값 조건표, BT3.8(t-1), BT11.2(t-1) 등)을 읽어 들이는 과정이다.

4) 전처리 과정: 안개 탐지 과정에 필요한 안개의 광학적(DCD,  $\Delta\Delta\text{VIS}$  등) 및 조직적(LSD, NLSD,  $\Delta\text{FTs}$  등) 특징들을 계산한다.

5) 안개 탐지 과정: 안개 탐지 알고리즘은 Fig. 2.2 와 같이 육지/바다 구분 자료와 태양천정각에 따라 나뉘지며 이에 따라 각각 계산된 안개 화소의 광학적 및 조직적 특성들을 이용한다. 육지와 바다에서의 기준 값들이 상이함으로 육지와 해양에서의 각 평가요소 별 임계값들은 다르게 적용한다. 안개 탐지 과정은 주/야/여명기 및 육지/바다에 따라 평가단계가 다른 결정나무기법을 이용한다. 이 때 야간에는 6단계(육지 5단계, 바다 6단계), 주간에는 12단계(육지 10단계, 바다 9단계), 그리고 여명기에는 4단계(육지 3단계, 바다 3단계)의 시험을 통해 안개를 탐지한다(Table 2.1). 각 평가요소들에 대한 자세한 설명은 2.4절의 이론적 배경에 제시하였다.

6) 후처리 과정: 안개와 방출율이 유사한 사막 지역과 반사도가 유사한 적설 지역에서 나타

나는 계통적 오답지를 줄이기 위해, 지면피복 분류자료(Land Cover Map)와 적설 탐지(Snow Cover) 자료를 사용하였다. 공간 불연속을 해소하기 위해, 해안가는 육상 및 해상 안개 탐지 알고리즘으로 각각 탐지한 후 후처리를 통해 공간연속성을 향상시켰다. 해무의 경우 육무와 달리 광범위하게 안개가 발생한다. 따라서 공간 연속성을 이용하여, 국소적으로 발생한 해무를 재평가했다.

- 7) 검증: 육상에서의 안개 탐지 수준 평가는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서 운용하고 있는 약 280여개 지점의 시정계 자료를 이용하여 평가하고, 해상에서는 CALIPSO 위성 자료를 이용하여 안개 탐지 수준을 검증한다.

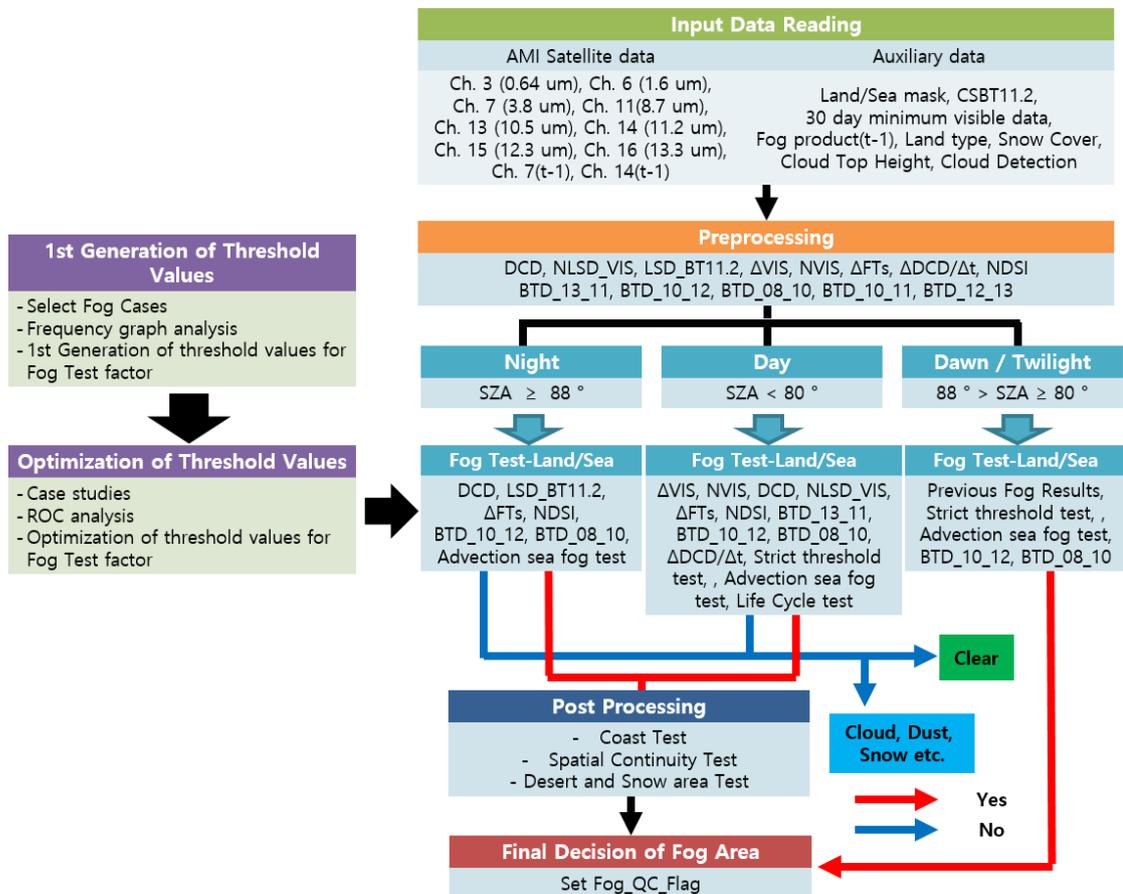


Fig. 2. 1. General flow chart of the fog detection algorithm using GK2A/AMI data and other ancillary data.

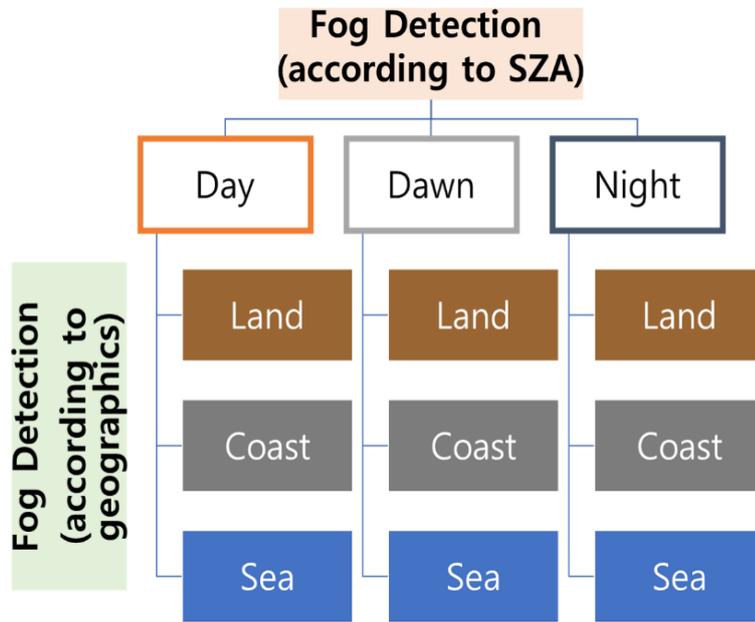


Fig. 2. 2. Fog detection based on the SZA and Land/Sea mask data.

Table 2. 1. Summary of test elements used for fog detection in this study.

No	Test E.	Day	Night	Dawn	Comments
1	$\Delta\Delta\text{VIS}/\text{DCD}$	$\Delta\Delta\text{VIS}$ , DCD	DCD	–	$\Delta\Delta\text{VIS\_TH} = f(\text{Land/Sea})$ , $\text{DCD\_TH} = f(\text{Land/Sea, SZA})$
2	$\Delta\text{FTs}$	0	0	–	$\Delta\text{FTs} = f(\text{Land/Sea, time, accuracy of model})$
3	LSD	NLSD_VIS	LSD_BT11.2	–	$\text{LSD\_TH} = f(\text{Land/Sea})$
4	NDSI	0	–	–	Land and Day only
5	BTD_13_11	0	–	–	
6	BTD_10_12	0	0	0	
7	BTD_08_10	0	0	0	
8	$\Delta\Delta\text{DCD}/\Delta\Delta t$	0	–	–	Land and Day only
9	$\Delta\text{NVIS}$	0	–	–	Sea and Day only
10	Strict threshold	0	–	0	Land only Day – combined test of $\Delta\text{VIS}$ , NLSD, and $\Delta\text{FTs}$ with strict threshold values Dawn – combined test of DCD, LSD, and $\Delta\text{FTs}$ with strict threshold values

					Sea only
11	Advection sea fog	0	0	0	Day – combined test of $\Delta$ FTs, BTD_10_12, BTD_10_11, BTD_12_13, NLSD with advection sea fog threshold values Night/Dawn – combined test of $\Delta$ FTs, BTD_10_12, BTD_10_11, BTD_12_13, LSD with advection sea fog threshold
12	Life cycle	0	–	–	Land and Day only
13	Land cover	0	0	–	Land only
14	Snow cover	0	0	–	Land only
15	Coast test	Combination of fog detection results from ocean and land fog detection algorithm			
16	Spatial continuity test	Post processing of the localized fog or small holes which occurred at sea			

### 2.3 입력자료

안개 탐지 알고리즘에서 사용되는 위성자료 중 AMI/L1B 와 AMI/L2는 Tables 2.2와 2.3과 같으며, 보조자료는 Table 2.4와 같다.

#### 2.3.1 AMI/L1B

안개는 강도, 발생시간, 지리적 위치 등에 따른 속성이 매우 복잡하다. 따라서 안개 탐지에 사용되는 GK2A/AMI L1B 자료는 Table 2.2에 나타낸 바와 같이 가시채널 1개, 근적외 (Near Infrared Radiation, NIR) 채널 1개, 그리고 적외 (Infrared Radiation, IR) 채널 6개 등 총 8개 채널 자료가 사용된다.

Table 2. 2. Input list of GK2A/AMI L1B data used for the fog detection algorithm.

Channel	Description	Center Wavelength [ $\mu\text{m}$ ]	Use
Channel 3	AMI band 3 TOA (Top of Atmosphere) radiance	0.64	Main element for fog detection in daytime
Channel 6	AMI band 6 TOA radiance	1.6	Input data for normalized difference snow index
Channel 7	AMI band 7 TOA radiance	3.8	Main element for fog detection in nighttime
Channel 11	AMI band 11 TOA radiance	8.7	Distinguish fog from clear pixels
Channel 13	AMI band 13 TOA radiance	10.5	Distinguish fog from edge of low clouds
Channel 14	AMI band 14 TOA radiance	11.2	Main element for fog detection in nighttime
Channel 15	AMI band 15 TOA radiance	12.3	Distinguish fog from edge of low clouds
Channel 16	AMI band 16 TOA radiance	13.3	Distinguish fog from edge of low clouds

#### 2.3.2 GK2A/AMI L2

안개 탐지에 사용되는 Level 2(L2) 자료는 맑은 상태에서의 지표면 반사도(sfc\_NR0.64), 적설탐지, 운정고도, 그리고 전시간 안개 탐지 자료이다. 맑은 상태에서의 지표면 반사도는 안개 탐지 일 기준으로 과거 30일간의 최소치 값을 의미한다. 적설 탐지 자료의 경우 영상/장면분석 표면 분야 연구 그룹인 부경대학교에서 개발한 알고리즘이 적용된 자료로 적설 탐지 산출물에서 적설지역(snow)은 1, 청천 지역(snow-free)은 0으로 표현되어 있으며 공간해상도는 2 km이다. 운정고도 자료는 km 단위로 구름의 고도 값이 산출되고 있으며 공간 해상도는 2 km 이다. 안개 탐지에 필요한 L2 자료의 특징은 Table 2.3과 같다. 여기서 전 시간 안개 탐지 자료는 주로 실시간 안개 탐지가 어려운 여명기의 안개 탐지에 기본 자료로 사용된다.

Table 2. 3. Input list of GK2A/AMI L2 data used for the fog detection algorithm.

Name	Description	Use
sfc_NR0.64	Minimum Value Composite of NR0.64 channel for previous 30 days	Main test element for fog detection in daytime
Snow cover	AMI Snow Cover product	For the elimination of falsely detected pixels at the snow covered area
Cloud Top Height	AMI Cloud Top Height product	For the elimination of falsely detected pixels at the cloud area
Previous fog product	Fog product of previous time (t-1)	For fog detection for twilight/dawn

### 2.3.3 보조 자료

GK2A/AMI 자료로부터 안개 탐지에 필요한 보조 자료에는 태양천정각, 지면피복 분류자료, 육지/해양 구분 자료, 수치모델 예측 휘도온도 자료(CSR\_BT11.2), 안개 탐지 평가요소별 임계값, 그리고 안개 탐지 결과의 검증에 위한 기상청 관측 시정계 및 CALIPSO 자료가 필요하다. 본 안개 탐지 알고리즘에 사용되는 보조자료의 특징은 Table 2.4와 같다.

Table 2. 4. Input list of ancillary data for the fog detection algorithm.

Item	Parameter	Use
SZA	Solar zenith angle of each pixel	Distinguish day, night, and dawn/twilight
Observation time	Observation time of each pixel	To apply life cycle method during twilight
	Latitude, Longitude	
Surface data	Land cover map	For the elimination for falsely detected pixels at the desert area
	Land/Sea mask	Distinguish land, sea, and coast
CSR_BT11.2	Brightness temperature of CSR	Distinguish between fog and low-mid-high cloud
Threshold values	Threshold values of test elements for AMI fog detection	Determine fog probability
Visibility meter data	Horizontal visibility of KMA	Validate the fog detection results over South Korea
Vertical feature mask	Vertical feature mask of CALIPSO	Validate the fog detection results over sea

## 2.4 이론적 배경

안개는 주로 크기가 작은 수적이거나 과냉각 수적으로 구성되어 있는 구름 중 구름의 하부가 지면에 접하고 시정이 1km 미만인 현상이다 (예: Eyre *et al.*, 1984; Ellrod, 1995; Gultepe *et al.*, 2007a, b; Koracin *et al.*, 2014). 이러한 안개는 주로 대기가 안정할 때 발생하거나 역전층이 발달할 때 발생한다. 많은 선행 연구들에서 잘 알려진 바와 같이 기본적으로 안개의 광학적 (physical) 및 조직적 (textural) 특성들은 다음과 같다 (예: Lee *et al.*, 1997; Cermak and Bendix, 2005; Gultepe *et al.*, 2007a; Shin *et al.*, 2013; Koracin *et al.*, 2014; Suh *et al.*, 2017).

- 1) 대부분 크기가 작은 수적이거나 과냉각 수적으로 구성되어 있다.
- 2) 수적의 크기나 농도에 따라 차이는 있으나 3.8  $\mu\text{m}$ 에서 방출율이 11.2  $\mu\text{m}$  보다 작다.
- 3) 가시채널에서의 반사도가 지표면보다는 크고 구름과는 유사하다.
- 4) 안개의 두께가 두껍지 않기 때문에 안개 상부의 온도가 지표면온도(지상온도)와 유사하다.
- 5) 안개는 주로 역전층 등 대기가 안정할 때 잘 발생하기 때문에 상부 표면의 공간 변동성이 구름이나 지표면에 비해 작다.
- 6) 해무의 경우 구름보다 경계가 뚜렷하고 이동성이 적다.

안개의 특성, 위성자료를 이용한 안개의 탐지, 예보 방법에 대해서는 많은 연구들이 수행되어 있다 (예: Gultepe *et al.*, 2007b, Niu *et al.*, 2010, Koracin *et al.*, 2014). 또한, 위성자료를 이용한 현업 차원의 안개 탐지 알고리즘 개발에 대한 상세한 내용은 NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service) (2010)나 EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) (2014)에서 찾아볼 수 있다.

Table 2.5는 GK2A/AMI 자료와 같은 위성자료를 이용하여 안개를 탐지할 때 주로 사용되는 안개의 광학적 특성을 보여주고 있다. Table 2.5에 제시된 광학적 특징들은 안개의 강도가 강하고 해무와 같이 광범위하게 발생될 때에는 매우 우수한 탐지수준을 보인다. 그러나 야간이나 여명기/황혼기와 같이 가시채널 및 단파적외 (Short Wave Infrared Radiation, SWIR) 채널의 사용이 어려운 때에는 안개 탐지 가능성이 현저하게 감소된다. 또한 기상위성자료의 특성상 강도가 약한 안개, 아화소 크기의 안개, 구름 아래에 있는 안개, 강수를 동반한 안개, 복잡한 지역에 발생한 안개, 사막이나 적설 위의 안개의 경우에는 안개 탐지율이 현저히 낮아진다. 위성자료로부터 안개를 탐지하는 대부분의 알고리즘들은 안개의 광학적 및 조직적 특성들을 이용하고 있다 (Turner *et al.*, 1986; Wetzell *et al.*, 1996; Bendix, 2002; Ahn *et al.*, 2003; Underwood *et al.*, 2004; Yoo *et al.*, 2006; Park and Kim, 2012). 최근 연구에서는 안개와 하층운을 구분하기 위해 육지에서는 지상의 기온 (air temperature,  $T_a$ ), 해양에서는 해수면 온도 (sea surface temperature)와 같은 보조 자료를 사용하고 있다 (Gultepe *et al.*, 2007a; Shin *et al.*, 2013; Wen *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2019).

Table 2. 5. Physical properties of fog and control factors.

Parameters	Fog Features	Factors	Comments
Spectral Emissivity	- $\epsilon_{3.8} < \epsilon_{11.2}$	- Size and density of droplet - Phase - Time of day	- Nighttime only - Daytime: Solar radiation effect
Fog Top Temperature.	- Similar to surface temperature - Warmer than that of low/mid/high cloud - Spatially uniform	- Fog depth and intensity - Temperature profile	Used for the separation of fog from other clouds
Reflectance	- Greater than that of clear surface - Similar to that of cloud	- SZA - Size, density, phase, etc.	- Daytime only
Roughness	- Less than that over cloud and land surface	- Intensity of inversion layer - Roughness of background (Land)	- NLSD or LSD of 3 x 3 pixels - Sea fog

Figure 2.1의 알고리즘 흐름도에서 설명한 바와 같이 본 알고리즘에서 사용되는 안개 가능성 평가요소들은 대부분 채널자료들의 차 또는 비(ratio)이다. 이들은 주/야 또는 태양천정각의 영향을 받기 때문에 안개 탐지 시마다 반복적으로 산출한다.

야간 안개 탐지의 핵심 평가요소인 DCD는 3.8  $\mu\text{m}$ 와 11.2  $\mu\text{m}$ 의 방출율 차를 이용하는 방법으로 안개 영역에서 3.8  $\mu\text{m}$ 의 방출율이 11.2  $\mu\text{m}$ 보다 낮은 특징을 가진다 (Kim *et al.*, 2018). 주간에는 안개와 맑은 화소를 구분하기 위해서 현재 시각에서 0.64  $\mu\text{m}$ 의 정규화 반사도와 맑을 때의 정규화 반사도 차이를 이용하였다. 이 때 맑을 때의 정규화 반사도 값은 안개 탐지 일을 포함하여 과거 30일간의 자료 중 최솟값을 산출하였다. 그리고 각 화소에서의 정규화 반사도 값이 지리적 위치 (지면피복 및 상태)와 태양 천정각의 영향을 받는 점을 고려하기 위해, 맑을 때의 정규화 반사도 값은 주간의 매 시간 별로 산출하여 이용하였다. 그리고 같은 시간, 같은 위치일지라도 30일동안 태양천정각이 변하기 때문에, 이를 보정해 주기 위해 반사도를 태양천정각에 대해 정규화 하여 사용하였다. 또한 동아시아 지역은 몬순기후의 영향을 받아서 특히 여름철에는 구름이 15일 이상 연속적으로 발생하는 경우가 빈번하기 때문에, 과거 30일까지 합성 기간을 확장하여 기준 정규화 반사도 값을 도출하였다.

위성 자료에서 3 x 3 화소의 표준편차 (Standard Deviation, SD)를 의미하는 LSD는 공간 변동성을 보기 위한 평가요소로써, 안개의 상부 표면은 매끄러운 반면 구름의 상부는 요철이 상대적으로 심한 점을 이용하여 중·상층운과 안개를 구분하는데 사용하였다. 하지만 Suh *et al.* (2017)에서 제시한 바와 같이 LSD만 사용하였을 때는 바다와 하층운을 안개와 구분하기 어려운 부분이 있어 이를 보완하기 위해 3 x 3 화소의 평균으로 나누어 주었다 (NLSD, 식 (2.1)). 즉, 안개의 경우 가시채널의 반사도는 크고 LSD는 작아서 NLSD가 매우 작게 되는데 이러한 특성은

특히 바다에서 유용하다. 구름의 경우 가시채널의 반사도와 LSD가 모두 커서 NLSD는 약간 큰 값을 갖게 된다. 또한 복잡한 육지의 경우 LSD는 크고 반사도는 작으므로 NLSD가 큰 값을 갖게 되지만 사막이나 나대지와 같이 LSD는 상대적으로 작고 반사도는 상대적으로 큰 경우에는 NLSD가 상대적으로 작은 값을 갖게 되어 안개와 구분하기가 쉽지 않게 된다(Fig. 2.3).

$$NLSD = \frac{LSD(3 \times 3 \text{ pixels})}{\text{Average of } 3 \times 3 \text{ pixels}} \quad (2.1)$$

(a) LSD\_VIS

(b) NLSD\_VIS

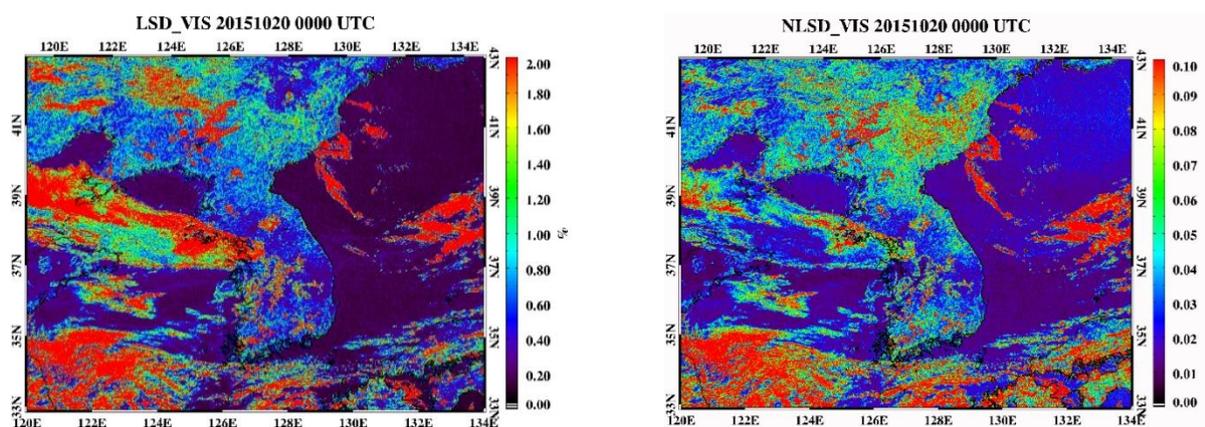


Fig. 2. 3. Spatial distribution of LSD and NLSD at 00:00 UTC (Universal Time coordinate) (09:00 KST (Korea Standard Time)) 20 Oct., 2015 using Himawari-8. (a) LSD\_VIS and, (b) NLSD\_VIS.

하층운과 안개를 구분하기 위해 사용된  $\Delta FTs$ 는 국가기상위성센터에서 제공하는 CSR\_BT11 자료를 이용하여 계산하였다. 이 때 CSR\_BT11은 기상청에서 현업으로 운용되는 수치예보모델 (Unified Model, UM)로 예측한 온습도 프로파일을 복사전달모델인 RTTOV(Radiative Transfer for TOVS)의 입력 자료로 사용하여 모의한 복사휘도온도 값이다. 초기 GK2A/AMI의 안개 탐지 알고리즘을 개발하기 위해 사용된 CSR\_BT11은 1시간 간격으로 17 km의 공간해상도로 제공되었다. 이 때 모델 자료와 위성(GK2A/AMI 또는 Himawari-8/AHI(Advanced Himawari Imager))의 공간해상도가 상이하기 때문에, 위성 화소의 해상도로 모델 자료를 내삽하여 사용하였다. 또한 시간 해상도의 차이는 1시간 안에 지면 온도의 변화가 크지 않다는 가정하에 1시간 자료를 60분 동안 동일하게 사용하여 일치화하였다. 기존에  $\Delta FTs$ 를 계산할 때 육지와 바다에서 각각 다른 배경 자료를 사용함으로써 발생한 공간 불연속을 해소하기 위해 육상에서의 CSR 사용 가능성을 분석하였다. 그동안 육지에서 배경 자료로 사용하였던 국지수치예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)과 CSR의 예측 성능을 종합적으로 판단하기 위해, 각 계절 별로 1개의 사례에 대해 분석하였다(Figures 2.4 와 2.5). 총 4개 사례에 대한 LDAPS의 편의(bias)와 RMSE(Root Mean Square Error)는 각각 1.45 K와 5.08 K이며, CSR의 편의와 RMSE는 각각 -0.36 K와 2.15 K이다. CSR의 편의와 RMSE 모두가 LDAPS 보다 작으므로 본 연구에서는 LDAPS 예측 자료 대신에 CSR 자료를 사용하였다. 현재 UM 자료의 공간해상도가 17 km에서 10 km로 향상되었으며, 이를 2 km로 내삽하여 GK2A/AMI 알고리즘에 적용하였다. 그리고 태양 복사가 입사되면서 1시간 동안의 지표면 온도 변화가 크게 나타나기 때문에, 1시간 동안 온도 변화가 크지 않다는 가정이 모순된다. 따라서 GK2A/AMI 알고리즘에서는 모델

자료를 10분 간격으로 시간 내삽하여 사용하였다.

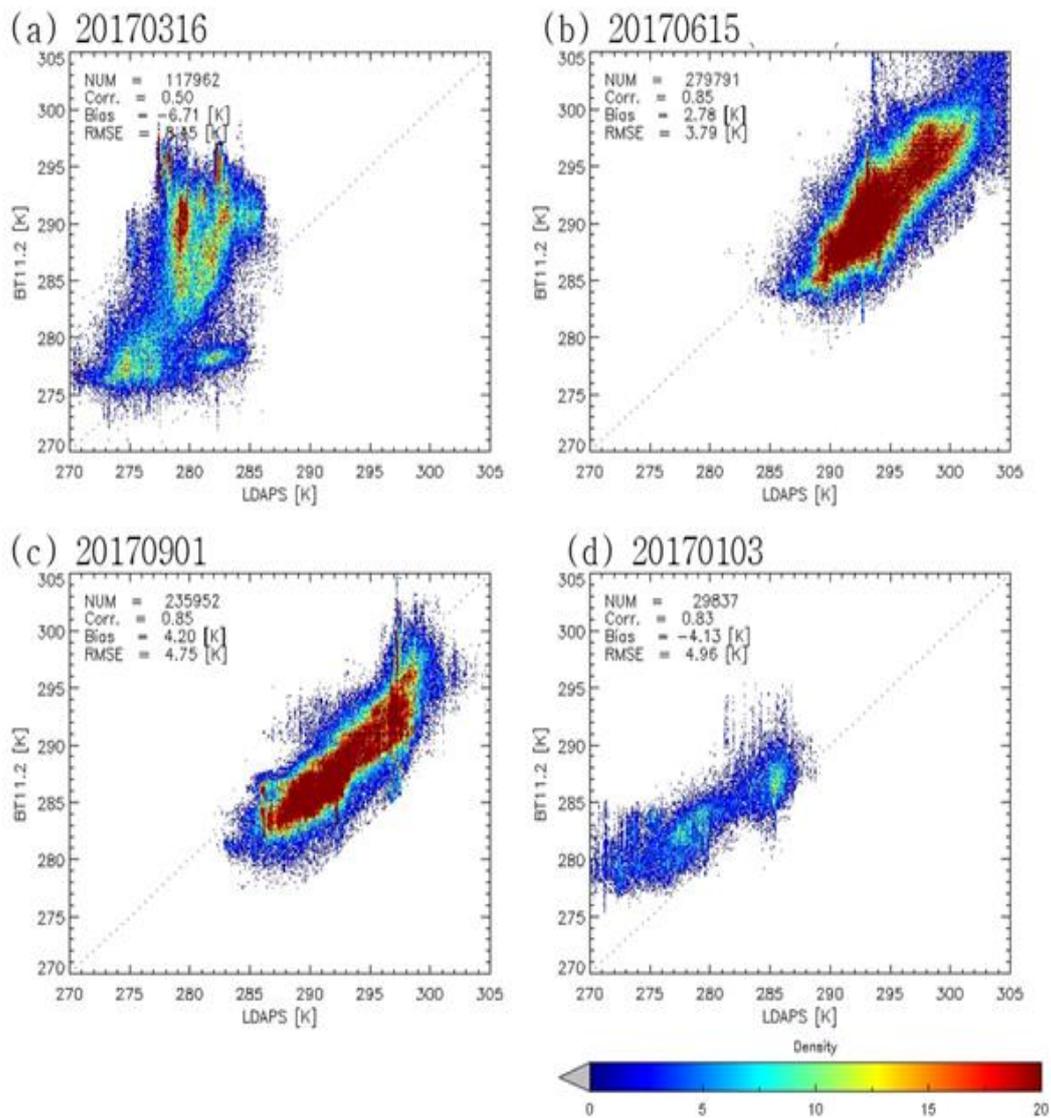


Fig. 2. 4. Relationship between the brightness temperature of 11.2  $\mu\text{m}$  (BT11.2) and Ta (Air Temperature) of LDAPS on (a) Mar. 16, 2017, (b) Jun. 15, 2017, (c) Sep. 01, 2017, and (d) Jan. 03, 2017.

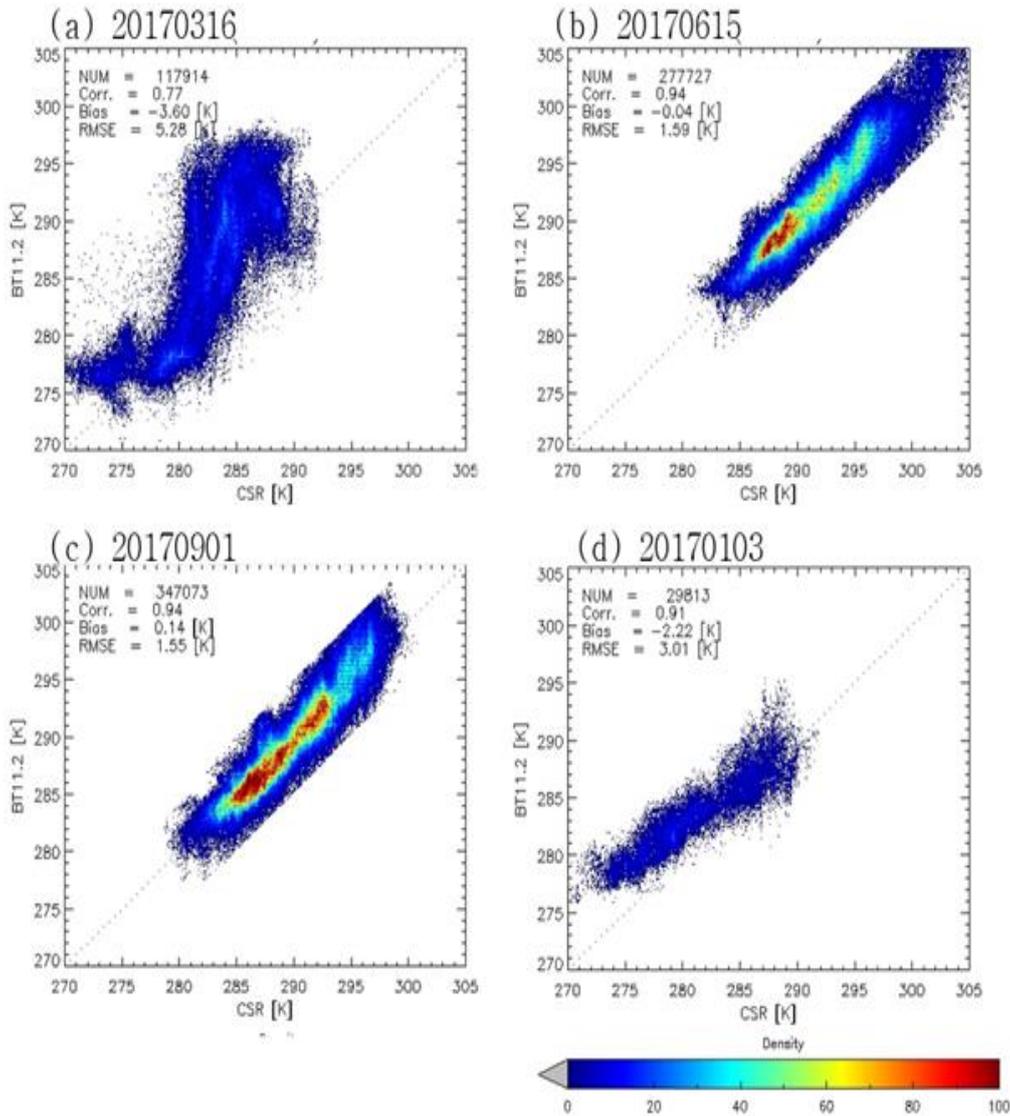


Fig. 2. 5. Same as in Fig. 2.4 except for BT11.2 of CSR.

적설 지수는 눈으로 덮인 지역에서  $1.6 \mu\text{m}$ 의 반사도가  $0.64 \mu\text{m}$ 의 반사도보다 매우 낮은 특징을 이용한 것으로 주로 적설 탐지에 많이 사용되는 방법이다(NOAA, 2015). 하지만 본 연구에서는 적설과 달리 식생 및 토양에서의 채널  $1.6 \mu\text{m}$ 의 반사도가  $0.64 \mu\text{m}$ 의 반사도보다 높게 나타나는 특징을 이용하여 안개와 청천 화소를 구분하는데 이용하였다. 그리고, 정규화 반사도가 청천에서 작고 안개에서 큰 특징을 이용하여 안개와 청천/구름가장자리 화소를 구분하는데 이용하였다. 또한, 주/야에 관계없이 안개 탐지 수준 향상을 위해 4개의 적외 채널들( $8.7, 10.5, 11.2, 12.3, 13.3 \mu\text{m}$ )을 조합한 BTD<sub>13\_11</sub>, BTD<sub>10\_12</sub>, BTD<sub>10\_11</sub>, BTD<sub>12\_13</sub>, 그리고 BTD<sub>08\_10</sub>을 이용하였다. CO<sub>2</sub> 채널인  $13.3 \mu\text{m}$ 와  $11.2 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 차(BTD<sub>13\_11</sub>)를 보조적으로 이용하여 주간에 오탐지된 청천 화소를 구분하였으며,  $10.5 \mu\text{m}$ 와  $12.3 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 차(BTD<sub>10\_12</sub>),  $10.5 \mu\text{m}$ 와  $11.2 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 차(BTD<sub>10\_11</sub>),  $12.3 \mu\text{m}$ 와  $13.3 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 차(BTD<sub>12\_13</sub>)를 보조적으로 이용하여 안개와 중상층운을 구분하였다. 또한  $3.8 \mu\text{m}$ 과 유사한 특징을 가지지만 주/야/여명기에 연속적으로 사용 가능한  $8.7 \mu\text{m}$ 와  $11.2 \mu\text{m}$ 의 휘도온도 차(BTD<sub>08\_10</sub>)를 이용하여 안개와 청천/황사 화소를 구분하였다. 끝으로 주간에 태양복사의 입사로 인한 BT<sub>3.8</sub>의 시간 변화율이 안개와 다른 물체들에서 다르게 나타나는 점을 이용하여 DCD의 시간 변화율( $\Delta\text{DCD}/\Delta t$ )을 이용하여 일부 중상층운 및 청천 화소에서 나타나는 오탐지된 화

소를 최소화하였다.

육지에서 발생한 안개, 특히 복사 안개는 태양 복사가 입사되면서 소산되는 특징이 있다. 따라서 이러한 안개의 일변동성 특성을 이용하여 안개 탐지 수준을 향상시켰다. Figure 2.6에 제시한 바와 같이, 내륙지역에서 안개 발생 빈도수의 일 변동이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데 다른 지역에 비해 일출 후에 안개 빈도수가 급격히 감소할 뿐만 아니라 한 낮에는 안개가 새로 생성되지 않는다. 따라서 주간에 새롭게 안개로 탐지되는 화소는 내륙지역에서는 오탐지로 간주할 수 있다(Fig. 2.7).

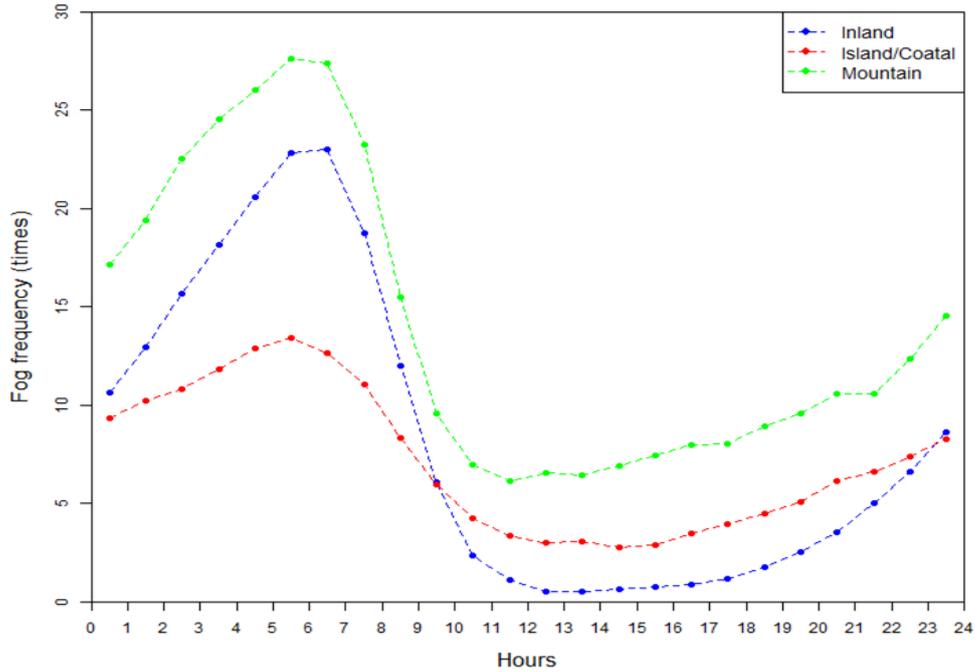


Fig. 2. 6. Diurnal variation of fog frequency observed by the 290 visibility meters over South Korea.

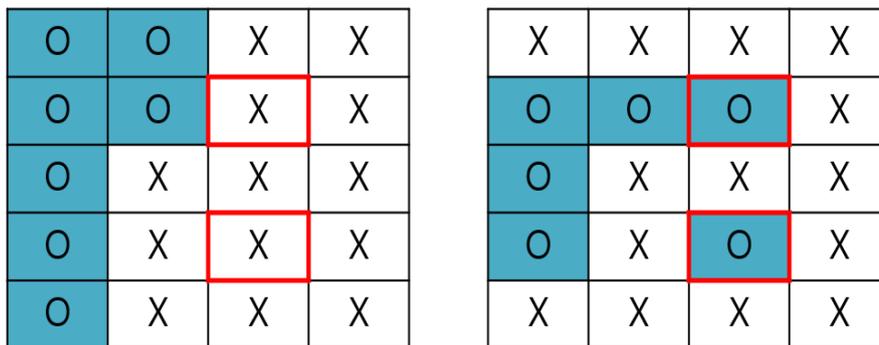


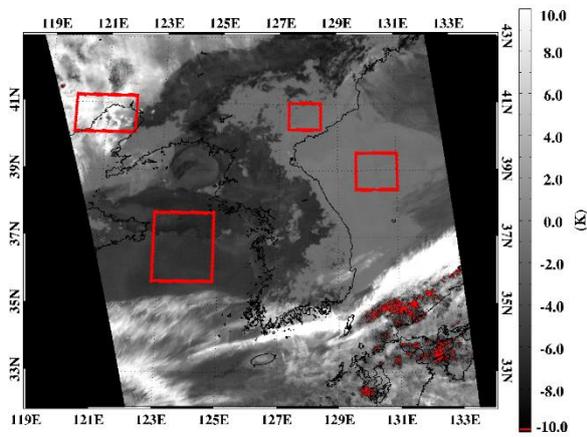
Fig. 2. 7. Conceptual diagram for the use of life cycle of fog, left (t-1) and right (t). The “O” and “X” stand for fog and no fog, respectively.

해양과 육지에서 안개 탐지에 사용되는 평가요소 및 임계값들이 상이함에 따라 해안가 지역에서 안개 탐지 결과에 공간 불연속이 발생할 뿐만 아니라 해안가에서는 육무와 해무의 특징이 복합적으로 나타난다. 따라서 해안가 화소에 대해서는 해양 안개 탐지 알고리즘과 육지 안개 탐지 알고리즘을 모두 수행하여 두 알고리즘 모두 안개로 탐지될 경우 안개 화소로 구분하였다. 반면, 두 알고리즘의 결과가 상이할 경우, 공간 연속성을 고려하여 주변 3 X 3 화소들 중 안개인 화소 수가 절반 이상이면 안개로 탐지하였다.

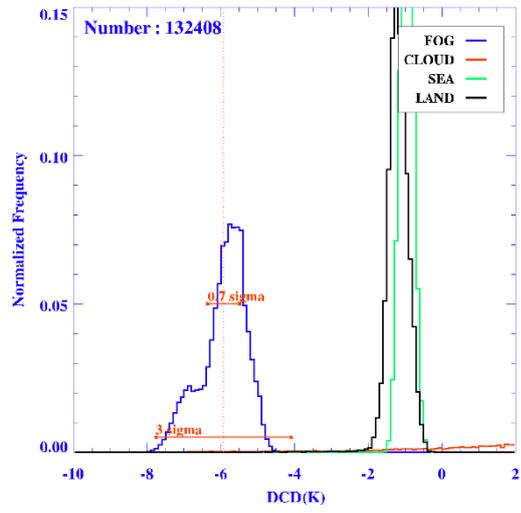
안개는 계절 및 지리적 위치에 따라 발생 빈도 및 강도 그리고 지속시간 등 안개의 특성이 다양하게 나타난다. 따라서 안개 탐지 알고리즘을 개발하기 위해서는 계절 및 지리적 위치에 따라 다양한 안개 사례가 요구된다. 하지만 GK2A/AMI로 안개의 특성을 분석하고 알고리즘을 개발하기에는 현재까지 관측된 안개 사례가 다양하지 않다. 따라서 본 연구에서는 GK2A/AMI와 유사한 Himawari-8/AHI 자료를 이용하여 안개의 특성을 분석하고 알고리즘을 개발하였다. 안개 탐지에 필요한 평가요소들의 임계값을 설정하기 위해, Himawari-8/AHI의 가시채널과 시정계를 이용하여 안개가 발생한 사례를 선정하였다. 지리적 위치와 계절에 따른 안개 특성을 보기 위해 혼란 사례는 계절 별로 각각 2~7개씩 선정하였으며, 검증 사례는 봄, 여름, 가을 각각에 대해 2개씩 선정하였다. 본 연구에서는 주/야에 따라 사용 가능 위성 채널이 상이한 점과 대기환경을 고려하여 안개 탐지를 주간과 야간으로 구분하였으며 임계값도 다르게 설정하였다(Tables 2.6 과 2.7). 각 평가요소 별 초기 임계값을 설정하기 위해 안개 사례에 대한 빈도수 분석을 하였다(Figures 2.8과 2.9). 해무는 광범위하게 발생하지만 지상 관측자료가 없기 때문에 Fig. 2.8과 같이 주관적으로 안개영역을 설정하여 빈도수를 분석하였다. 육무의 경우, 시정계를 기준으로 거리상으로 가장 가까운 화소들에 대한 평가요소들의 값들에 대해 빈도수 분석하였다(Figure 2.9). Figures 2.8과 2.9를 통해, 평가요소들의 분포가 육지 및 해양에 따라서도 다르게 나타남을 알 수 있다. 또한 야간에는 DCD가 0 K 이내로 다른 물체들과 매우 잘 구분되고 있다.  $\Delta FTs$ 는 육/해무 모두 0 K를 중심으로  $\pm 5K$  이내로 나타나고 있어서, 안개와 일부 구름 화소들과 구분할 수 있음을 보여준다. 하지만 다른 유형들과 일부 중복되는 구간은 안개의 광학적/조직적 특성들을 이용한 안개탐지가 매우 어려움을 나타낸다. 빈도수 분석을 통해 설정된 초기 임계값을 미소 변화하면서 통계적으로 최적화하였다. 이 때 최적화된 임계값은 GK2A/AMI의 안개 탐지 알고리즘의 초기 임계값으로 사용하였으며, Tables 2.6과 2.7에 나타내었다. GK2A/AMI에 적용된 초기 임계값은 2019년 7월 ~ 2019년 9월에 발생한 총 12개 안개 사례에 대해 빈도수 분석 후 재설정하였다.

하지만, 사례가 2019년 7월 ~ 2019년 9월에 한정되어 있어 임계값을 최적화하기에는 어려움이 있다. 이에 따라, 해무 미탐지 문제가 발생하여 국가기상위성센터에서는 DCD 임계값이 최적화되지 않았다고 판단하여  $-1.0 \sim 23.0 K$ 의 구간임계값에서 2.5 K의 고정 임계값으로 변경하여 적용하였다. 하지만, 구름 영역에서 오탐지가 다소 많이 나타나 BTD\_10\_12 임계값도 4 K에서 3.3 K로 엄격하게 조정하였다. 또한, 차가운 육상에서 발생하여 따뜻한 해상으로 이류하는 해무는 지면 온도가 급격히 증가함에 따라 기존 경계값 테스트로 탐지하지 못하는 문제점이 있었다. 이에 따라, 이류 해무를 탐지하기 위한 테스트를 추가하였다. 이 테스트에서는 육해상 조건에 따라 급격히 변하는 지면온도를 고려하여, 해상에서 지면온도와 안개 상부 온도차이를 4~10 K로 크게 주고, BTD\_10\_12, LSD(또는 NLSD) 경계값을 각각, 2 K 미만, 0.3 K 미만(또는 0.1 K 미만)으로 설정하여 이류 해무를 탐지하고자 하였다. 또한, 확실한 구름역을 제거하기 위해 GK2A 운정고도 산출물과 여러 휘도온도차이(BTD\_10\_11, BTD\_12\_13)를 이용하였다.

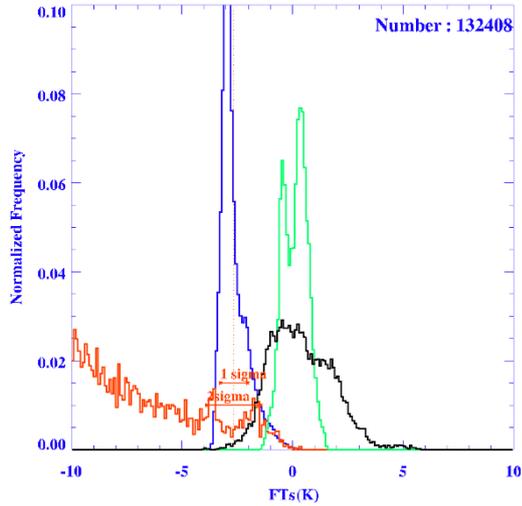
(a) Selected sub-areas



(b) DCD



(c)  $\Delta$ FTs



(d) LSD\_BT11.2

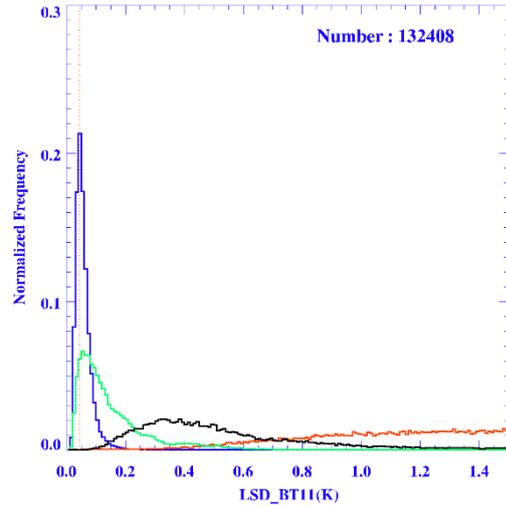


Fig. 2. 8. Frequency distribution of the optical/textural properties at the selected fog, cloud, sea, and land area from 03:00 KST to 04:50 KST Apr. 07, 2017. (a) Selected sub-areas, (b) DCD(SWIR-IR), (c)  $\Delta$ FTs, and (d) LSD\_BT11.2.

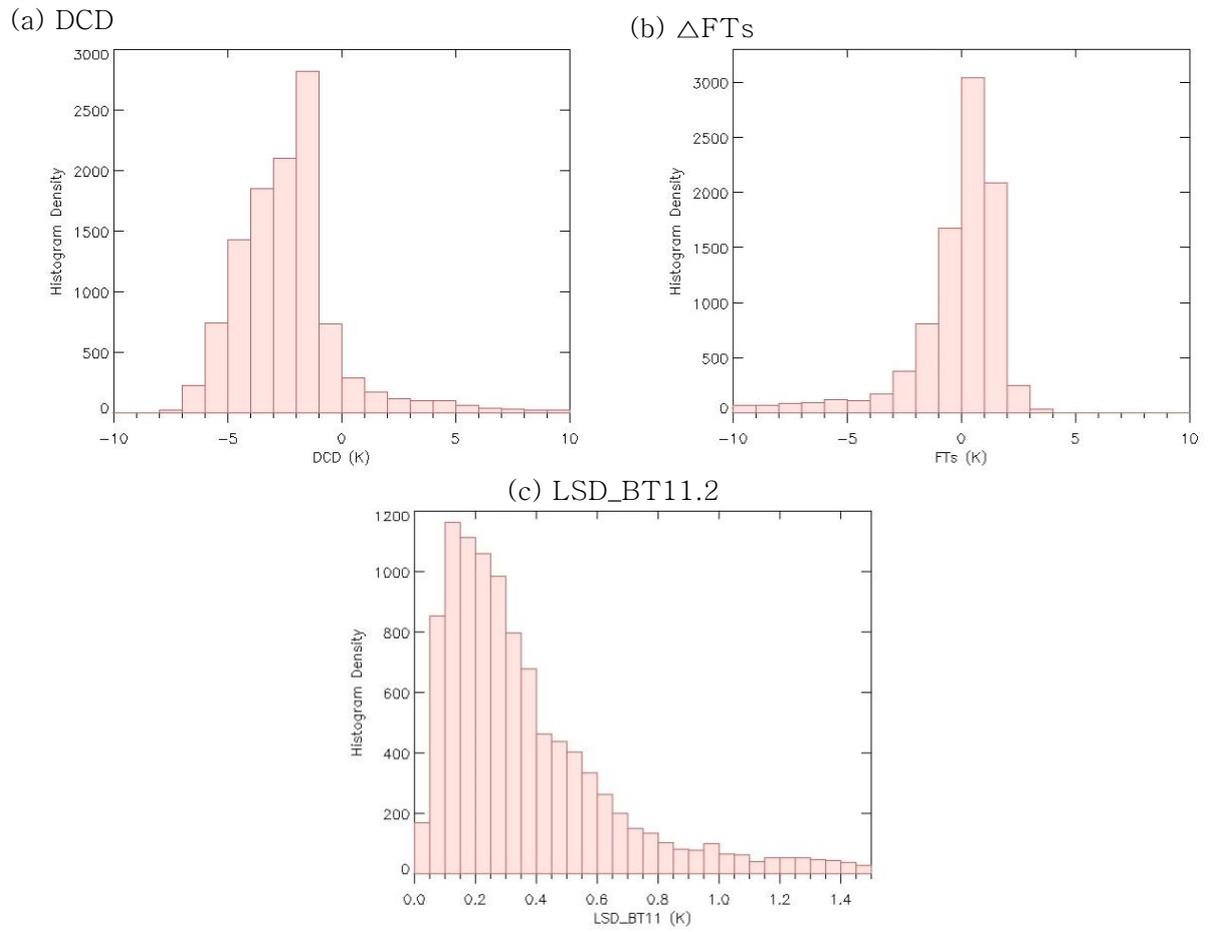


Fig. 2. 9. Frequency distribution of the optical/textural properties of fog pixels on training cases in nighttime. (a) DCD, (b)  $\Delta$ FTs, and (c) LSD\_BT11.2.

Table 2. 6. Threshold values for the 10 test elements of Himawari-8 and GK2A for daytime.

Step	Test elements	Land		Sea	
		Himawari-8	GK2A	Himawari-8	GK2A
1	$\Delta\Delta\text{VIS}$ [%]	2.0 (반사도)	10.7 (정규화반사도)	4.0 (반사도)	10.7 (정규화반사도)
2	$\Delta\text{FTs}$ [K]	-5.0 & 1.0	-3.5 & 1.0	-6.0	-4.0
3	NLSD_vis	0.50		0.30	
4	BTD_08_10 [K]	-1.3		-1.3	
5	NDSI	-0.15		-	
6	BTD_10_12 [K]	3.0	4.0	3.0	3.3
7	BTD_13_11 [K]	-19.0		-19.0	
8	Strict threshold test ( $\Delta\Delta\text{VIS}$ [%], $\Delta\text{FTs}$ [K], NLSD_vis)	4.0(반사도), -5.0, 0.10	10.7(정규화 반사도), -4.0, 0.10		-
9	Advection sea fog test ( $\Delta\text{FTs}$ [K], BTD_10_12 [K], BTD_10_11 [K], BTD_12_13 [K], NLSD_vis, Cloud top height)	-	-	-	-10.0~-4.0, 2.0, 0.15, 10.3, 0.1, 2.0
10	DCD [K]	-1.0 ~ 23.0 (SZA: 80~20)		-1.0 ~ 23.0 (SZA: 80~20)	2.5 (SZA 고정)
11	$\Delta\text{DCD}/\Delta\Delta t$ [K/10min]	-0.14 & 0.35			-
12	$\Delta\text{NVIS}$ [%]	-		23	

Table 2. 7. Threshold values for the 5 test elements of Himawari-8 and GK2A for night and dawn.

Step	Test elements	Land		Sea	
		Himawari-8	GK2A	Himawari-8	GK2A
1	DCD [K]	-1.5	-1.25	-0.5	-1.5
2	$\Delta\text{FTs}$ [K]	-5.0	-3.5	-6.0	-4.0
3	LSD_BT11.2	2.0		1.0	
4	BTD_08_10 [K]	-1.3		-1.3	
5	BTD_10_12 [K]	3.0	4.0	3.0	4.0
6	Advection sea fog test ( $\Delta\text{FTs}$ [K], BTD_10_12 [K], BTD_10_11 [K], BTD_12_13 [K], LSD_BT11.2, Cloud top height)	-	-	-	-10.0~- 4.0, 2.0, 0.15, 10.3, 0.3, 2.0

Strict threshold test					
	1	(DCD [K], $\Delta$ FTs [K], LSD_BT11.2 [K])	-1.9, -5.0, 0.8		-
	2	BTD_08_10 [K]	-1.3		-1.3
Dawn	3	BTD_10_12 [K]	3.0	4.0	3.0 4.0
Advection sea fog test					
	4	( $\Delta$ FTs[K], BTD_10_12[K], BTD_10_11[K], BTD_12_13[K], LSD_BT11.2, Cloud top height	-	-	-10.0~- 4.0, 2.0, 0.15, 10.3, 0.3, 2.0

## 2.5 수학적 설명

2.4 절에서 보인 바와 같이 안개 탐지에 사용되는 수식들은 수학적으로 매우 간단하기 때문에 특별히 수학적 설명이 필요하지 않다.

## 2.6 산출물

본 안개 탐지 알고리즘은 결정나무기법을 사용함으로써, 최종 산출물은 각 화소 별 안개 유무와 안개 탐지 결과의 품질에 대한 자료이다 (Table 2.8). 안개산출물은 매 10분 주기로 산출되며 공간해상도는 야간에는 지리적 위치에 관계없이 2 km이고 주간에는 동아시아는 2 km이지만 한반도는 500 m이다.

Table 2. 8. Summary of fog products and flags retrieved from fog detection algorithm developed in this study.

Product name	Type	Name	Description
FOG	short	long_name	AMI L2 FOG 2km
		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	65535
		Valid_max	7
		Valid_min	1
		scaling_factor	-
		add_offset	-
		units	-
		product_meaning	1: Clear 2: Middle or High Cloud 3: Unknown 4: Probably Fog 5: Fog 6: Snow

			7: Desert or Semi-desert
DQF_	byte	long_name	AMI L2 FOG data quality flags
FOG		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	255
		Valid_max	15
		Valid_min	0
		units	none
		flag_meanings	0: normal 1: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 03) 2: Abnormal – bad quality of composite data (Ch. 03) 3: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 07) 4: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 14) 5: Abnormal – bad quality of auxiliary data (Dynamic) 6: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 05) 7: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 16) 8: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 13) 9: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 15) 10: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 11) 11: Abnormal – bad quality of previous time satellite data (Ch. 07) 12: Abnormal – bad quality of previous time satellite data (Ch. 14) 13: Abnormal – file open error or bad quality of previous time results 14: Abnormal – bad quality of snow cover data 15: Abnormal – undetectable pixels (Under middle/high cloud)
Del_	short	long_name	AMI L2 del_Fta data for image display
Fta		_Unsigned	
		_FillValue	-32768
		Valid_max	60
		Valid_min	-100
		scaling_factor	0.1
		add_offset	0
		units	K
		product_meaning	-
FOG	short	long_name	AMI L2 FOG 500m
500m		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	65535
		Valid_max	7
		Valid_min	1
		scaling_factor	-

		add_offset	-
		units	-
		product_meaning	1: Clear 2: Middle or High Cloud 3: Unknown 4: Probably Fog 5: Fog 6: Snow 7: Desert or Semi-desert
DQF_ FOG500m	byte	long_name	AMI L2 FOG500m data quality flags
		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	255
		Valid_max	15
		Valid_min	0
		units	none
		flag_meanings	0: normal 1: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 03) 2: Abnormal – bad quality of composite data (Ch. 03) 3: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 07) 4: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 14) 5: Abnormal – bad quality of auxiliary data (Dynamic) 6: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 05) 7: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 16) 8: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 13) 9: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 15) 10: Abnormal – bad quality of satellite data (Ch. 11) 11: Abnormal – bad quality of previous time satellite data (Ch. 07) 12: Abnormal – bad quality of previous time satellite data (Ch. 14) 13: Abnormal – file open error or bad quality of previous time results 14: Abnormal – bad quality of snow cover data 15: Abnormal – undetectable pixels (Under middle/high cloud)
Del_ Fta	short	long_name	AMI L2 del_Fta data for image display
		_Unsigned	
		_FillValue	-32768
		Valid_max	60
		Valid_min	-100
		scaling_factor	0.1
		add_offset	0
		units	K

		product_meaning	-
--	--	-----------------	---

### 3. 모의자료 및 검증

#### 3.1 모의 입력자료 및 검증자료

Himawari-8/AHI는 GK2A/AMI와 궤도 특성이 같으며, 분광반응함수(Spectral Response Function, SRF)가 매우 유사하기 때문에 본 연구에서 개발한 안개 탐지 알고리즘을 테스트하기 위해 모의 입력자료로 Himawari-8/AHI의 Ch.3(0.64  $\mu\text{m}$ ), Ch.5(1.6  $\mu\text{m}$ ), Ch.7(3.8  $\mu\text{m}$ ), Ch.11(8.6  $\mu\text{m}$ ), Ch.13(10.4  $\mu\text{m}$ ), Ch.14(11.2  $\mu\text{m}$ ), Ch.15(12.3  $\mu\text{m}$ ), 그리고 Ch.16(13.3  $\mu\text{m}$ )를 사용하였다. 안개 탐지 알고리즘에 주로 사용되는 GK2A/AMI와 Himawari-8/AHI의 채널들의 중심 파장역은 Table 3.1에 나타난 바와 같이 매우 유사하다.

Table 3. 1. Summary of satellite data used for the fog detection algorithm.

Channel	Center Wavelength [ $\mu\text{m}$ ]		Test elements using each channel
	AMI	AHI	
3 (VIS)	0.64	0.64	$\Delta\text{VIS}$ , $\text{NVIS}$ , $\text{NLSD}_{\text{vis}}$ , $\text{NDSI}$
5 (NIR)	1.6	1.6	$\text{NDSI}$
7 (SWIR)	3.8	3.9	$\text{DCD}$ , $\Delta\Delta\text{DCD}/\Delta\Delta t$
11 (IR)	8.7	8.6	$\text{BTD}_{08\_10}$
13 (IR)	10.5	10.4	$\text{BTD}_{10\_12}$ , $\text{BTD}_{08\_10}$ , $\text{BTD}_{10\_11}$
14 (IR)	11.2	11.2	$\text{DCD}$ , $\Delta\text{FTs}$ , $\text{LSD}_{\text{BT}11.2}$ , $\Delta\text{DCD}/\Delta t$ , $\text{BTD}_{13\_11}$ , $\text{BTD}_{10\_11}$
15 (IR)	12.3	12.3	$\text{BTD}_{10\_12}$ , $\text{BTD}_{12\_13}$
16 (IR)	13.3	13.3	$\text{BTD}_{13\_11}$ , $\text{BTD}_{12\_13}$

안개 탐지 결과의 정성적 비교 검증을 위해 국가기상위성센터에서 현업 운영 중인 천리안위성 1호 (Communication Ocean Meteorological Satellite, COMS)를 이용하여 산출한 안개 탐지 자료(COMS Meteorological Data Processing System\_fog, CMDPS\_fog)를 사용하였다. 천리안위성 1호는 15분 주기로 전구를 관측하며 가시채널 1 km, 적외채널 4 km의 공간 해상도를 가진다. 또한 약 280여개의 관측소에서 1분 주기로 관측하는 시정계 자료의 10분 평균 시정(km)을 이용하여 정성적 및 정량적 검증을 하였다 (Fig. 3.1).

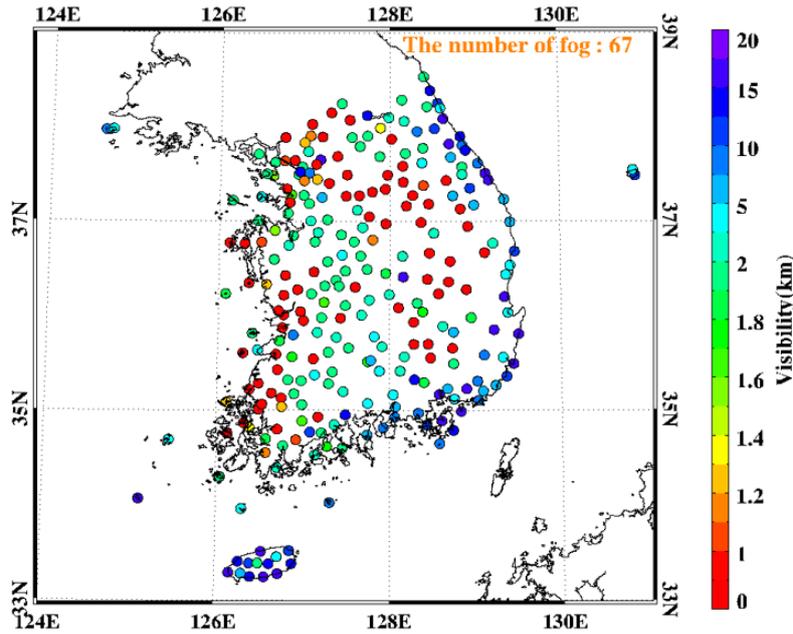


Fig. 3.1. Spatial distribution of visibility meter of KMA.

### 3.2 검증 방법

안개 탐지 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 육상에서는 기상청에서 제공하는 시정계 자료를 이용하고 해상에서는 CALIPSO 자료를 이용하였다. 검증과정에서 관측 영역에 중상층운 등 구름이 있는 경우, 광학센서만을 탑재한 정지궤도 위성으로는 근본적으로 지면정보를 알 수 없으므로 검증에서 제외하였다. 또한 검증과정에서 시정계와 GK2A/AMI의 공간해상도 및 관측주기가 상이한 점은 다음과 같이 일치화하였다. 1분 관측 주기로 운용되는 시정 자료를 위성 관측 시간인 10분과 일치하기 위해, 이전 10분간의 시정 자료를 평균하여 사용하였다. 또한 공간적으로는 위성의 네비게이션 오차와 시정계가 갖고 있는 공간대표성의 한계를 고려하여, 시정계 위치와 가장 근접한 위성 화소를 중심으로 3 x 3 화소의 안개 탐지 결과를 검증대상으로 하였다. 여기서 시정계가 갖는 공간대표성의 한계는 관측센서가 수십 cm 공간내에서의 전방산란 차를 이용하여 시정을 측정하는 과정에서 발생한다.

KNU\_FDA(Kongju National University Fog Detection Algorithm)의 안개 탐지 성능은 Fig. 3.2의 분할표 (Contingency table)에 기초하여 산출되는 POD(Probability Of Detection), FAR(False Alarm Ratio), KSS(Hanssen-Kuiper Skill Score), TS(Threat Score), 그리고 B(Bias ratio)을 사용하였다 (Wilks, 2011). 이 때 검증대상 시정계의 시정이 1km 미만(이상)일 때 이 시정계와 최근접한 위성 화소 주변 3 x 3 화소 중 하나라도 안개(비안개)로 탐지되었을 경우 옳게 탐지한 것(hit 또는 correct negative)으로 하였다. 반면 검증대상 시정계의 시정이 1km 이상(미만)일 때 이 시정계와 최근접한 위성 화소 주변 3 x 3 화소 모두가 안개(비안개)로 탐지되었을 경우 오탐지(False) (미탐지: Miss)로 하였다. 이를 이용한 POD, FAR, KSS, TS, 그리고 B의 산출 방법은 식 (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), 그리고 (3.5)에 각각 나타내었다.

국가기상위성센터는 실제 위성이 한반도를 관측하는 시간(파일명에 있는 시간 기준 +2~+3 분)에 해당하는 자료를 검증에 활용하기 위해 파일명 기준 +0~+5 분 동안의 5 개의 1 분 평균 시정 값들 중에 중앙값을 검증에 활용하도록 변경하였다. 또한, 시정계 자료의 공간대표성이 낮은 점을 고려하여 최단거리 위성자료를 이용하여 검증한 결과도 함께 산출하는 것으로 변경하였다. 그리고 위성 안개탐지 여부를 정의하는 기준이 시정값에 상관없이

일관되어야 한다고 판단하여 시정계와 최근접한 위성 화소 주변 3x3 화소 중 하나라도 안개로 탐지 하였을 경우 안개(Hit(H), False(F))로 정의하고 주변 3x3 화소 모두가 안개가 아니라고 탐지 하였을 경우 비안개(Miss(M), correct negative(C))로 정의하도록 수정하였다. 변경한 검증 방법을 이용한 검증 결과는 3.3.5 절에 제시하였다.

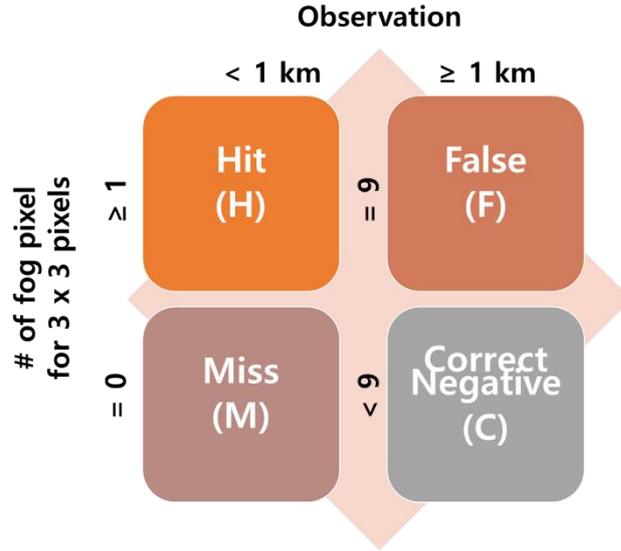


Fig. 3. 2. Contingency table and modified criteria for the validation of fog detection results. See the text for the modified criteria used in this validation.

$$POD = \frac{H}{H+M} \quad (3.1)$$

$$FAR = \frac{F}{H+F} \quad (3.2)$$

$$KSS = POD - FAR \quad (3.3)$$

$$TS = \frac{H}{H+F+M} \quad (3.4)$$

$$B = \frac{H+F}{H+M} \quad (3.5)$$

산출된 POD와 FAR, TS는 모두 0 ~ 1의 값을 가지며, POD와 TS는 안개의 탐지율로 1에 가까울수록, FAR은 오탐지율로 0에 가까울수록 탐지수준이 우수함을 의미한다. 또한 POD와 FAR을 종합적으로 평가하기 위하여 KSS를 이용하였다. KSS는 -1 ~ 1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 탐지수준이 우수함을 의미한다. 안개 탐지의 과대/과소 탐지를 나타내는 지표로 B를 이용

하였다. 이는 1보다 작으면 과소 탐지, 1보다 크면 과대 탐지를 나타낸다.

### 3.3 검증 결과

#### 3.3.1 Himawari-8 안개 탐지 알고리즘 검증 결과

Tables 3.2와 3.3은 16개의 훈련 및 6개의 검증 사례에 대해 지상에서 관측한 10분 평균 시정 자료를 이용하여 KNU\_FDA의 탐지 수준을 검증한 결과이다. 이 때, 중상층운이 있는 경우 정지궤도 위성으로는 지면정보를 알 수 없으므로 검증에서 제외하였다. Shin et al.(2013)에 의하면, 안개의 평균 운정고도와 변동성을 고려하면 약 1 km 이내에서 안개의 운정고도가 나타난다. 따라서 운정고도가 약 1 km 이상일 경우를 구름으로 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 안개발생 시 습윤 단열 감율을 가정하여  $\Delta FTs$ 가 5 K 이상일 경우를 검증에서 제외하였다. 훈련사례와 검증사례 각각의 평균 POD는 0.88 ~ 0.91과 0.86 ~ 0.97로 주/야/여명기에 관계없이 높은 적중률을 보인다. 하지만 각각의 평균 FAR이 0.52 ~ 0.61과 0.45 ~ 0.66로 나타나 오탐지율이 낮지 않다. 훈련사례와 검증사례에서 POD와 FAR 그리고 이들의 표준편차의 차이가 크지 않은 것으로 볼 때 본 연구에서 훈련사례를 통한 임계값들의 최적화가 적절하게 설정되었음을 알 수 있다. 또한 훈련사례와 검증사례 각각의 평균 B가 1.88 ~ 2.35와 1.55 ~ 2.66로 나타나고 있어 본 연구에서의 안개 탐지 알고리즘이 안개를 과대 탐지하고 있음을 알 수 있다. 특히 본 연구에서의 안개 탐지 수준은 주/야/여명기 모두 안개가 강하게 발생하는 가을의 복사무 사례에서 가장 높게 나타나며 여름 사례들에서 가장 낮게 나타나고 있다. 일부 여름 사례들과 2017년 9월 8일 사례 그리고 2017년 4월 15일 사례는 다른 사례들에 비해 안개가 약하게 발생한 사례들로 안개 탐지 수준이 낮게 나타난다. 따라서 본 연구에서의 안개 탐지 알고리즘은 안개의 강도나 유형에 따라 탐지 수준이 민감하게 나타나고 있다. 따라서 안개 탐지의 일관성을 향상시키고 FAR을 줄이기 위해서 더 많은 연구가 필요하다.

Table 3. 2. Validation results with ground observed visibility data according the time of day for training cases.

Case (YYYY MMDD)	POD			FAR			B			TS		
	D	N	D/T									
2017 0315	0.98	1.00	1.00	0.72	0.84	0.70	3.45	6.36	3.28	0.28	0.16	0.30
2017 0328	0.97	1.00	1.00	0.50	0.49	0.45	1.95	1.97	1.83	0.49	0.50	0.55
2017 0402	0.95	0.98	0.98	0.47	0.58	0.37	1.77	2.31	1.56	0.52	0.42	0.62
2017 0407	0.91	0.91	0.89	0.84	0.78	0.80	5.72	4.10	4.48	0.16	0.22	0.19
2017 0415	0.90	0.88	1.00	0.93	0.83	0.90	12.16	5.10	9.58	0.07	0.17	0.10
2017 0501	0.98	0.92	0.93	0.59	0.61	0.36	2.36	2.34	1.44	0.41	0.38	0.61
2017 0513	0.94	0.92	0.97	0.48	0.71	0.49	1.82	3.12	1.91	0.50	0.29	0.50
2016 0709	0.62	0.77	0.93	0.44	0.60	0.49	1.11	1.95	1.83	0.41	0.35	0.49
2016 0806	0.10	0.30	0.50	0.92	0.27	0.40	1.13	0.41	0.84	0.05	0.27	0.37
2016 0811	0.24	0.35	0.39	0.31	0.42	0.54	0.35	0.60	0.85	0.22	0.28	0.27
2016 0812	0.12	0.26	0.28	0.52	0.24	0.38	0.25	0.34	0.45	0.11	0.24	0.24
2016 0913	0.89	0.89	0.87	0.57	0.36	0.40	2.05	1.39	1.46	0.41	0.59	0.55
2016 1019	0.97	0.94	0.94	0.20	0.32	0.31	1.21	1.38	1.37	0.78	0.65	0.66
2016 1220	0.90	0.94	0.98	0.49	0.63	0.64	1.76	2.56	2.70	0.49	0.36	0.36
2017 0103	0.80	0.96	0.86	0.06	0.52	0.11	0.86	1.97	0.96	0.76	0.47	0.77
2017 0214	1.00	1.00	1.00	0.37	0.69	0.58	1.59	3.28	2.40	0.63	0.31	0.42
<b>Total</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	<b>0.54</b>	<b>0.61</b>	<b>0.52</b>	<b>1.89</b>	<b>2.35</b>	<b>1.88</b>	<b>0.43</b>	<b>0.37</b>	<b>0.46</b>
<b>SD</b>	<b>0.32</b>	<b>0.26</b>	<b>0.23</b>	<b>0.24</b>	<b>0.19</b>	<b>0.20</b>	<b>2.89</b>	<b>1.66</b>	<b>2.19</b>	<b>0.23</b>	<b>0.14</b>	<b>0.19</b>

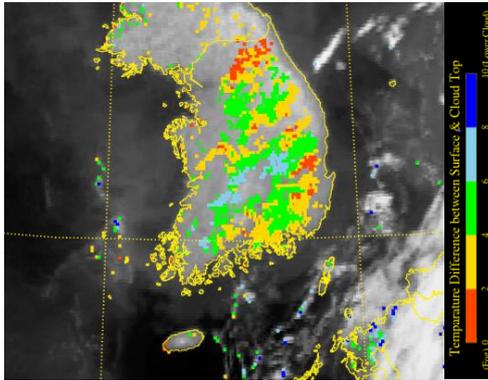
Table 3. 3. Same as in Table 3.2 except for validation cases.

Case (YYYY MMDD)	POD			FAR			B			TS		
	D	N	D/T									
2017 0518	0.68	0.87	0.93	0.32	0.76	0.44	1.00	3.64	1.67	0.51	0.23	0.53
2017 0525	0.79	0.94	0.96	0.19	0.67	0.41	0.98	2.86	1.63	0.66	0.32	0.57
2017 0614	0.81	0.59	0.61	0.92	0.00	0.00	10.6 6	0.59	0.61	0.07	0.59	0.61
2017 0713	0.86	0.93	0.99	0.64	0.60	0.58	2.40	2.31	2.36	0.34	0.39	0.42
2017 0908	0.87	0.80	0.83	0.50	0.74	0.00	1.74	3.13	0.83	0.47	0.24	0.83
2017 1025	0.93	0.87	1.00	0.09	0.68	0.31	1.02	2.72	1.45	0.86	0.31	0.69
<b>Total</b>	<b>0.86</b>	<b>0.89</b>	<b>0.97</b>	<b>0.45</b>	<b>0.66</b>	<b>0.47</b>	<b>1.55</b>	<b>2.66</b>	<b>1.81</b>	<b>0.51</b>	<b>0.32</b>	<b>0.52</b>
<b>SD</b>	<b>0.09</b>	<b>0.13</b>	<b>0.15</b>	<b>0.31</b>	<b>0.29</b>	<b>0.24</b>	<b>3.81</b>	<b>1.05</b>	<b>0.63</b>	<b>0.27</b>	<b>0.13</b>	<b>0.14</b>

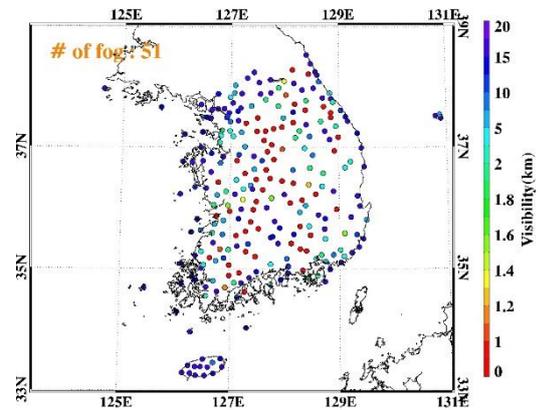
### 3.3.2 GK2A 안개 탐지 결과 정성적 검증

Figures 3.3~3.6은 GK2A/AMI로 탐지된 안개 탐지 결과의 정성적 검증을 위해, CMDPS\_Fog 탐지 결과와 시정계의 10분 평균 시정값의 공간 분포를 함께 나타낸 것이다. 2019년 7월부터 9월까지 각 월 별로 4개의 안개 사례에 대해 분석하였다. 2019년 7월 사례는 옥무와 해무가 동시에 발생하였으며, 7월 4일 사례를 제외한 나머지 3개의 사례는 안개의 강도가 약했으며, 특히 7월 24일과 26일은 한반도 전 지역에 걸쳐 구름이 지나갔던 사례이다. 2019년 8월과 9월 사례는 내륙에 발생한 복사무 사례로 8월 30일, 9월 24일, 9월 29일 ~ 30일은 안개의 강도가 강하며 안개 위에 구름이 최소한으로 지나가는 이상적인 복사무 사례이다. 반면, 2019년 8월 31일과 9월 17일 사례는 비교적 안개의 강도가 약했던 사례이다. 안개의 강도에 따른 탐지 수준을 정성적으로 평가하기 위해, 안개의 강도가 비교적 강했던 9월 24일 사례와 비교적 약한 강도를 보인 2019년 9월 17일 사례를 Figs. 3.3 ~ 3.6에 나타냈다. KNU\_FDA와 CMDPS\_Fog 탐지 결과를 시정계의 공간 분포와 시각적으로 비교했을 때, 안개의 강도가 강한 경우 두 알고리즘 모두 안개를 잘 탐지하고 있다(Figures. 3.3 과 3.4). 2019년 9월 24일 사례에서 주간 시간대에 CMDPS\_Fog에서는 탐지하지 못한 전라남도에 분포한 안개를 KNU\_FDA는 잘 탐지하고 있다(Fig. 3.4). 또한 안개의 강도가 약했던 사례에서도 CMDPS\_Fog 보다 KNU\_FDA가 국지적인 안개를 보다 잘 탐지하고 있다(Figs. 3.5 과 3.6). 하지만, 시정계의 시정과 비교할 때, 두 알고리즘 모두에서 안개의 강도와 관계없이 오탐지와 미탐지 화소가 여전히 나타나고 있다. 따라서 여전히 남아 있는 오탐지 및 미탐지 화소를 제거 또는 탐지하기 위해 지리정보시스템(GEO-Graphics Information System, GIS) 등 다른 보조자료를 활용하여 안개 탐지 기법을 개선할 필요가 있다.

(a) CMDPS\_fog



(b) Ground data



(c) KNU\_FDA

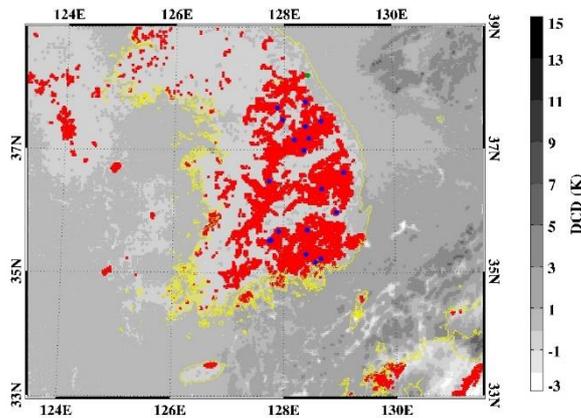
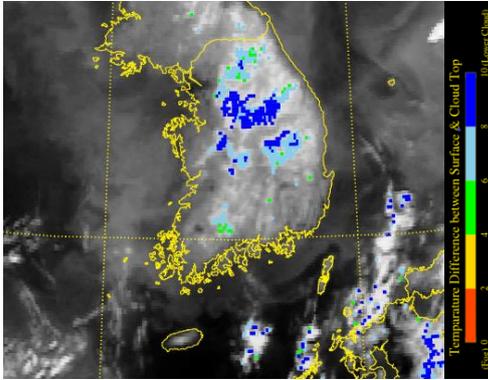
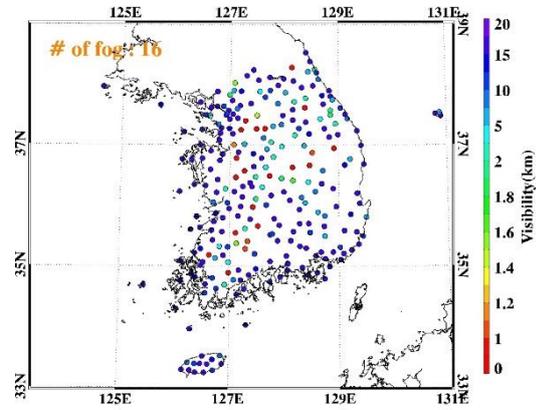


Fig. 3. Sample image of fog detection results at 04:00 KST Sep. 24, 2019. (a) COMS fog image, (b) Ground observed visibility, and (c) KNU\_FDA fog image. The red color in (c) indicates foggy pixels. The blue and green dots in (c) indicate false-detected and missed pixels, respectively.

(a) CMDPS\_fog



(b) Ground data



(c) KNU\_FDA

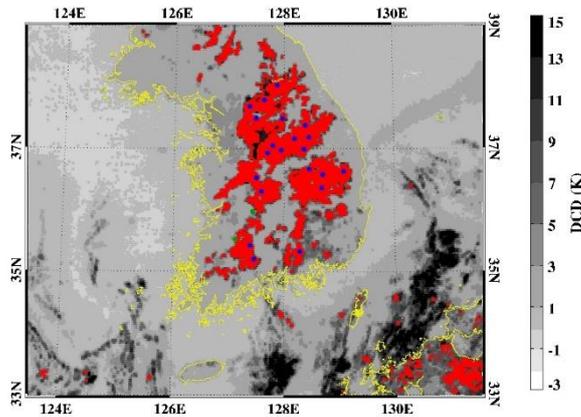
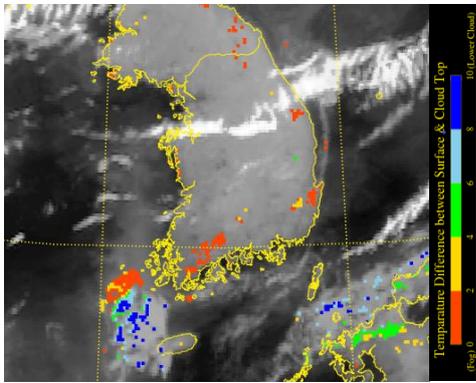
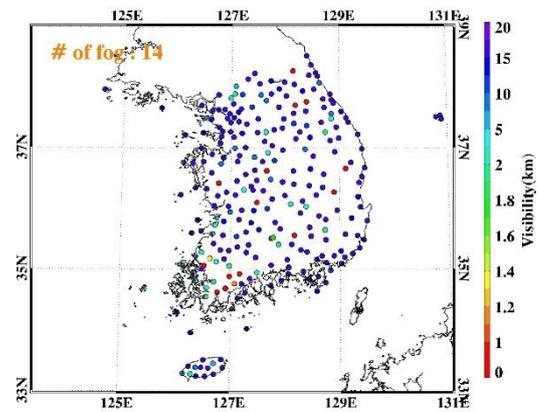


Fig. 3. 4. Same as Fig. 3.3 except for 09:00 KST Sep. 24, 2019.

(a) CMDPS\_fog



(b) Ground data



(c) KNU\_FDA

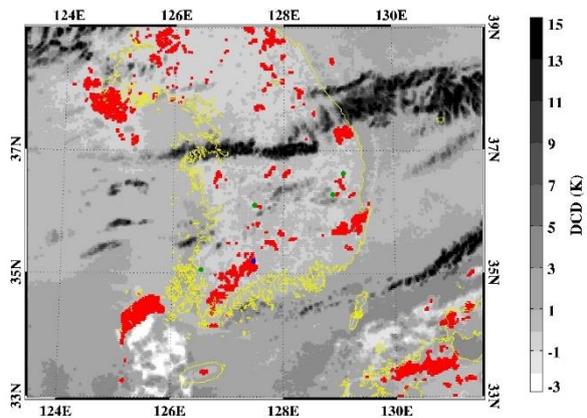
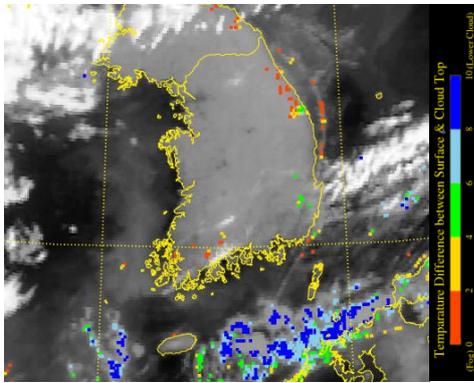
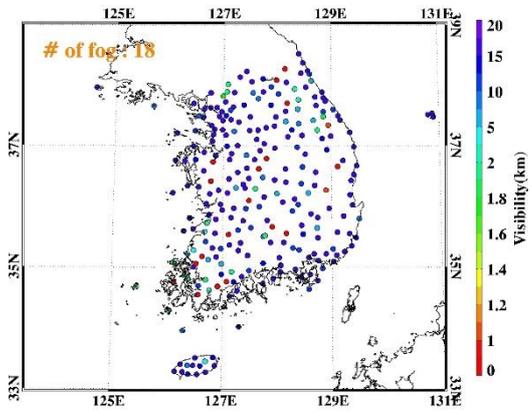


Fig. 3. 5. Same as Fig. 3.3 except for 04:00 KST Sep. 17, 2019.

(a) CMDPS\_fog



(b) Ground data



(c) KNU\_FDA

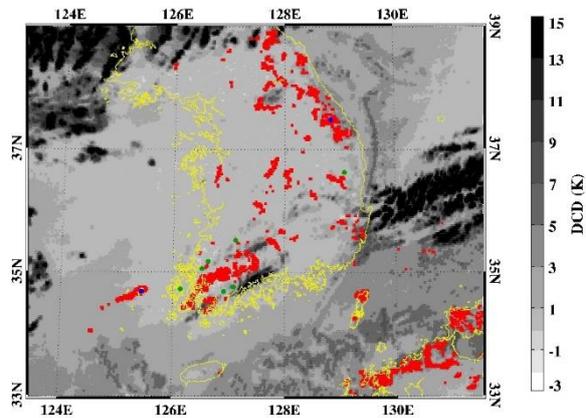


Fig. 3. 6. Same as Fig. 3.3 except for 07:00 KST Sep. 17, 2019.

### 3.3.3 GK2A 안개 탐지 결과 정량적 검증

Figure 3.7은 GK2A/AMI 자료에 KNU\_FDA를 적용하여 탐지한 12개 안개 사례에 대해 시정계의 10분 평균 시정값을 이용하여 정량적으로 검증한 결과이다. 12개 사례 평균 POD와 FAR은 각각 0.84와 0.47로 목표 정확도인 0.70과 0.50을 만족하고 있다(Fig. 3.7(d)). 시간대별로는 여명기에 평균 POD와 FAR이 각각 0.86과 0.38로 탐지수준이 가장 높았으며, 주간이 평균 POD와 FAR이 각각 0.86과 0.57로 탐지 수준이 가장 낮게 나타나고 있다. 안개 사례 중 안개가 측정된 시정계 수가 1000개 이상인 사례에서는 모두 목표 정확도를 만족하였으나 안개가 측정된 시정계 수가 소수인 사례에서는 오탐지율이 0.5 이상으로 상대적으로 높게 나타나고 있다. 전체적으로 볼 때 KNU\_FDA의 안개탐지 수준은 안개발생 시간뿐만 아니라 안개의 강도에도 영향을 받고 있다. 7월 26일 사례의 경우, 주/야/여명기 모든 시간대에서 POD가 FAR보다 작거나 같게 나타나고 있어 탐지수준이 이렇게 낮게 나온 원인을 알아보기 위하여 해당 사례에 대해 위성영상을 상세히 분석하여 보았다. 원인 분석결과 안개 위에 중상층운이 광범위하게 존재하였으나 CSR\_BT11의 예측오차로 인해 중상층운 제거가 적절히 이루어지지 못하여 미탐지 화소가 다수 발생한 것이 주 원인임을 파악하였다.

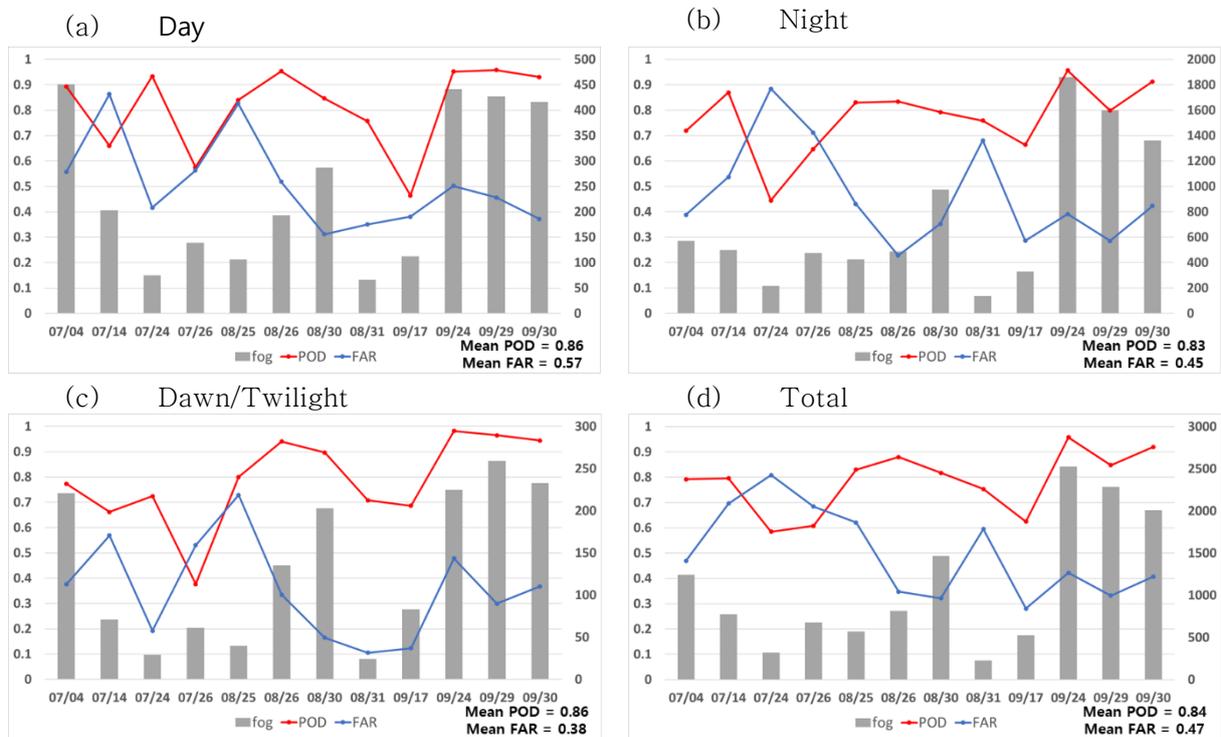


Fig. 3. 7. Validation results with ground observed visibility data according to the time of day. The red and blue lines indicate POD and FAR, respectively. The gray bar represents the total number of fog points used for validation.

지리적 위치별 안개 탐지 수준을 평가하기 위해, 육지/바다 구분자료를 이용하여 육지와 해안가에 대해 정량적 검증을 실시하였다(Figs. 3.8과 3.9). 육지에서의 평균 POD와 FAR이 각각 0.86과 0.46으로 해안가보다 높은 탐지 수준을 보인다(Figs. 3.8(d)와 3.9(d)). 지리적 위치와 시간대를 나눠서 분석한 결과 여름기일 때 육지에서의 평균 POD와 FAR가 각각 0.89와 0.37로 가장 우수한 탐지 수준을 보이고 있다(Fig. 3.8(c)). 야간에는 육지와 해안가에 관계없이 평균 POD와 FAR이 모두 목표 정확도를 만족하는 수준으로 안개를 탐지하고 있다. 반면, 주간에는 육지와 해안가에서 평균 POD가 각각 0.87과 0.83으로 높게 나타나지만, 평균 FAR가 0.55 이상으로 높게 나타나 목표보다 조금 미흡함을 알 수 있다. 해안가에서 여름기일 때 오탐지율은 낮게 나타나지만, 탐지율 또한 낮게 나타나고 있다. 육지에서는 복사무가 많이 발생한 2019년 7월 4일, 9월 24일, 29일~30일 사례에서 탐지 수준이 높게 나타난 반면 안개가 국지적으로 발생한 사례들에서는 탐지 수준이 낮게 나타나고 있다. 또한 해안가에서도 안개가 많이 발생한 2019년 7월 사례들에서는 탐지 수준이 육지보다 높게 나타나고 있으나 안개가 거의 발생하지 않은 2019년 8월 26일과 31일 그리고 9월 18일 사례에서 오탐지율이 높게 나타나고 있다. 종합적으로 볼 때 본 연구에서 개발한 안개탐지 알고리즘이 목표 수준은 달성하였으나 안개 강도, 발생 시각 및 지리적 위치에 따라 탐지 수준이 다양하게 나타나고 있고, 국지적인 안개를 탐지하는데 한계가 있으며 육지보다 해안가에서 오탐지율이 높게 나타나고 있다.

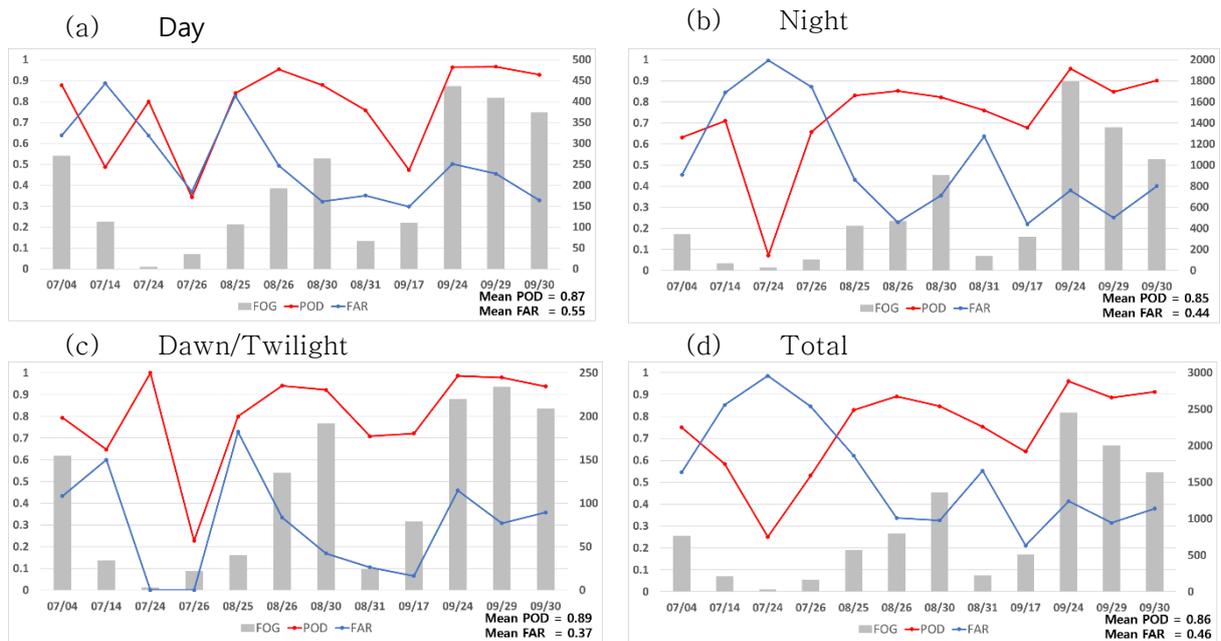


Fig. 3. 8. Same as Fig. 3.7 except for land.

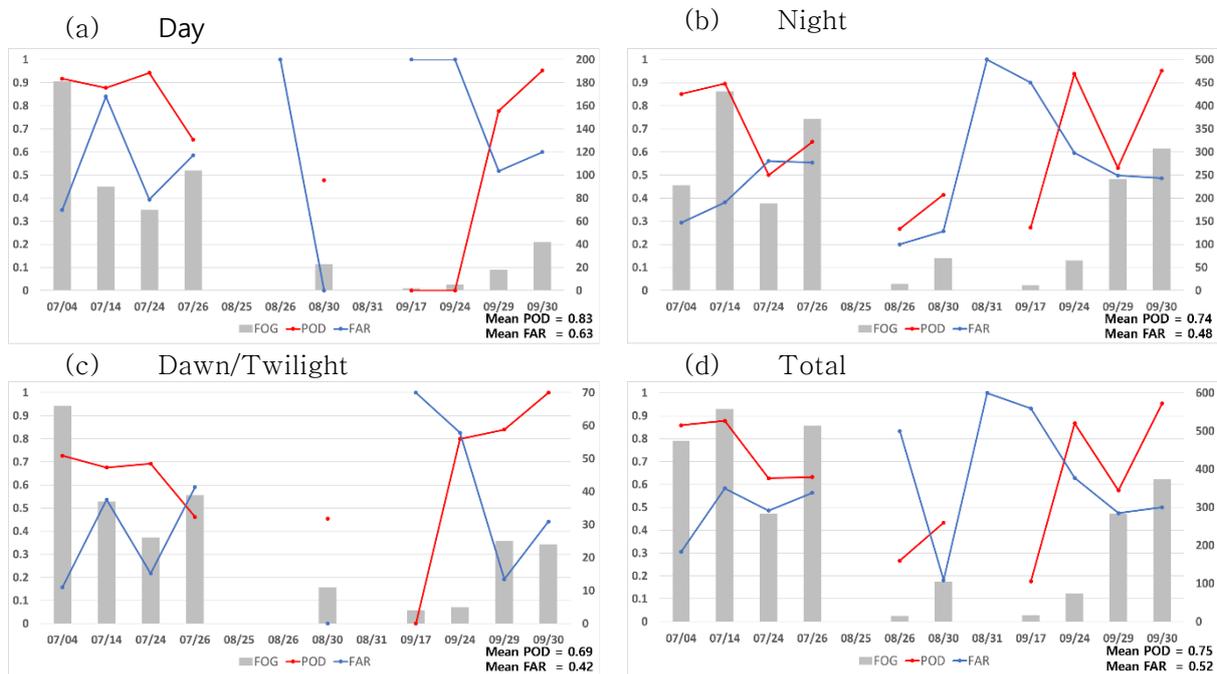


Fig. 3.9. Same as Fig. 3.7 except for coast.

### 3.3.4 현업 운용을 위해 개선한 GK2A 안개 탐지 결과 정성적 검증

국가기상위성센터는 2020년 3월 GK2A/AMI 안개탐지 산출물을 현업화하기 앞서, 발생하는 문제점들을 개선하였다. 먼저, 2019년 7월부터 9월까지의 GK2A/AMI 자료를 이용하여 경계값이 정해짐에 따라 해무 경계값이 최적화되지 않아 해무 미탐지가 발생하는 문제점이 있었다. 이에 따라, DCD 경계값을 동적 임계값에서 정적 임계값으로 조정하였다. 하지만, 구름에서 오탐지가 나타나 BTD\_10\_12의 임계값을 조정할 결과, 기존 GK2A 안개탐지(Fig. 3.10(b))에서 탐지하지 못한 해무를 개선 GK2A 안개탐지(Fig. 3.10(c))에서 잘 탐지하여 해무 미탐지가 해소되는 것을 확인하였다.

또한, 현업화 이후에도 운용중에 발생하는 문제점들을 개선하는 연구를 수행하였다. Figs. 3.11에서 보여준 사례는 차가운 육상에서 안개가 발생하여 따뜻한 해상으로 이루어지는 사례로, 지면 온도가 급격히 증가함에 따라 기존 경계값 테스트로 해무를 탐지하지 못하는 문제점이 있었다. 이에 따라, 이류 해무 탐지 테스트를 추가하여 이류 해무를 탐지하고자 하였다. 이류 해무 탐지 테스트는 지면온도가 해상에서 높아지는 것을 고려하여 해상의 지면온도와 안개상부온도 차이 임계값을 넉넉하게 주고 다른 적외 채널 차이 기반 테스트들을 추가하여 구름 오탐지 영역을 제거하는 테스트이다. 적용 결과, 기존 GK2A 안개탐지(Fig. 3.11(b))에서 탐지하지 못한 이류 해무를 개선 안개탐지(Fig. 3.11(c))에서 잘 탐지하여 육해상 공간불연속이 해소되었다.

그리고 주간 해상에서 구름 가장자리와 청천을 안개로 오탐지하는 문제점이 있었다. 이는 주간 에 안개를 탐지하는 주된 기법으로 사용되는 반사도의 임계값이 안개가 주로 발생하는 이른 아침에 최적화되어 정오에 오탐지가 나타나는 것이었다. 이 문제를 해결하기 위해 시간(태양천정각)에 따라 변하는 반사도를 태양천정각의 코사인의 함수로 나눠주어서 시간에 따라 일정한 값을 가지도록 정규화를 해준 후 안개탐지에 사용하였다. 그 결과, 안개 RGB 영상(Fig. 3.12(a))와 비교했을 때, 기존 GK2A 안개탐지(Fig. 3.12(b))에서 나타나던 구름 가장자리와 청천 영역 오탐지 문제가 개선 안개탐지(Fig. 3.12(c))에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

Figs. 3.13에서 제시한 사례는 주야간 해상에서 황사 영역을 오탐지하는 문제가 발생한 사례이다. Fig. 3.13(a)의 GK2A 황사탐지 영상에서도 황사가 발생한 사례임을 확인할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 먼지에 대한  $8.7\ \mu\text{m}$ 와  $10.5\ \mu\text{m}$  채널의 흡수율 차이로 인해 생기는 적외채널 휘도온도 차이를 해상에 확대 적용하였으며, Fig. 3.13(c)와 같이 해상 황사 오탐지 문제를 개선하였다.

그리고 Fig. 3.14의 위쪽 영상에서 볼 수 있듯이, 이른 아침 육상 청천에서 시간 불연속적으로 오탐지가 발생하는 문제가 있었다. 이는 청천 반사도로 간주하여 사용하는 30일 최소 반사도 값과 현재시간 반사도 값의 차이가 이른 아침 청천에서 크게 나타나 발생한 문제로, 30일 최소 반사도를 산출할때, 30일 동안 동일 시간, 동일 위치에서 달라지는 태양천정각의 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 이를 해결하기 위해 30일 최소 반사도와 현재시간 반사도 차이를 계산할 때, 반사도를 태양천정각에 대해 정규화하여 사용하였다. 그 결과, 이른 아침 육상에서 청천 오탐지가 시간 불연속적으로 발생하는 문제가 개선됨을 확인하였다(Fig. 3.14(bottom)).

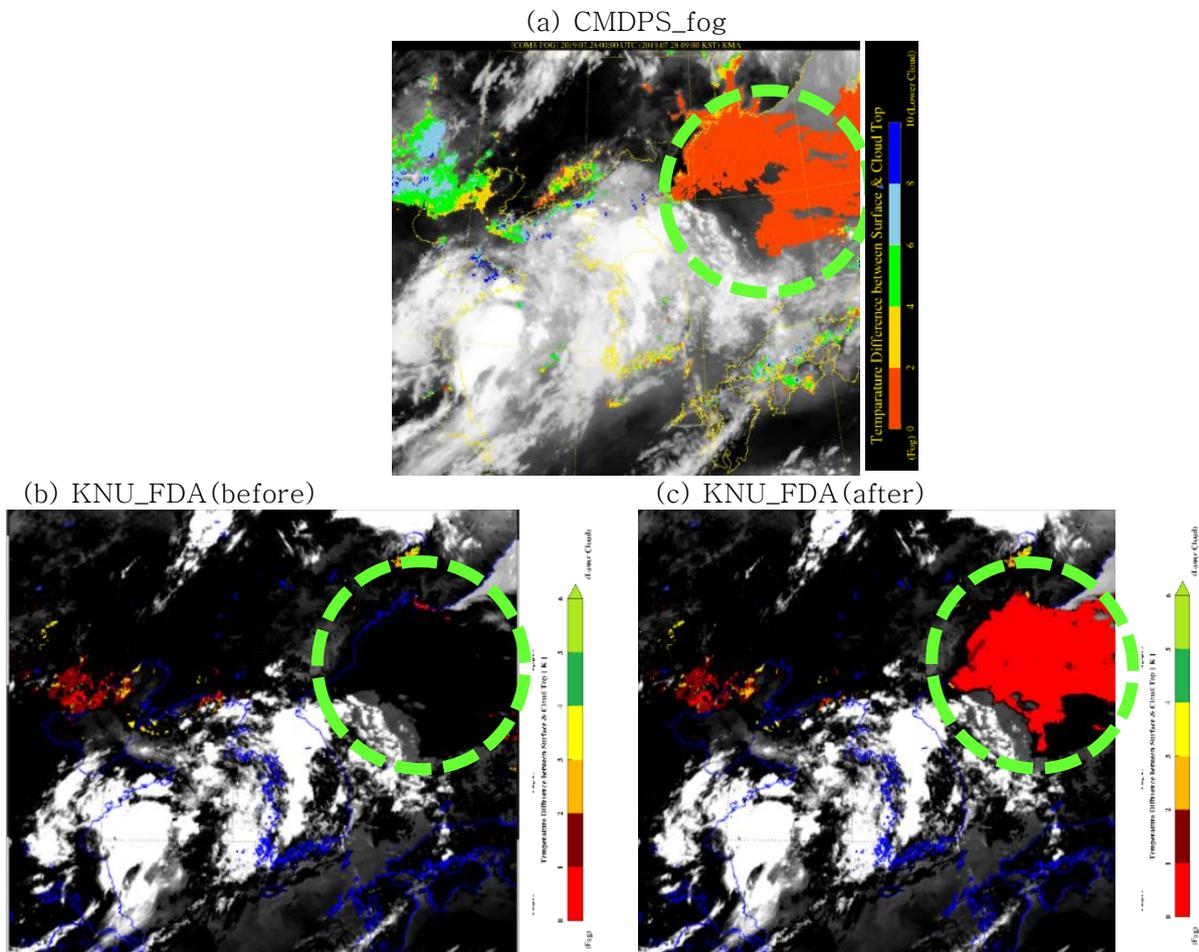


Fig. 3. 10. Sample image of fog detection results at 09:00 KST Jul. 28, 2019. (a) COMS fog image, (b) KNU\_FDA fog image(before), and (c) KNU\_FDA fog image(after).

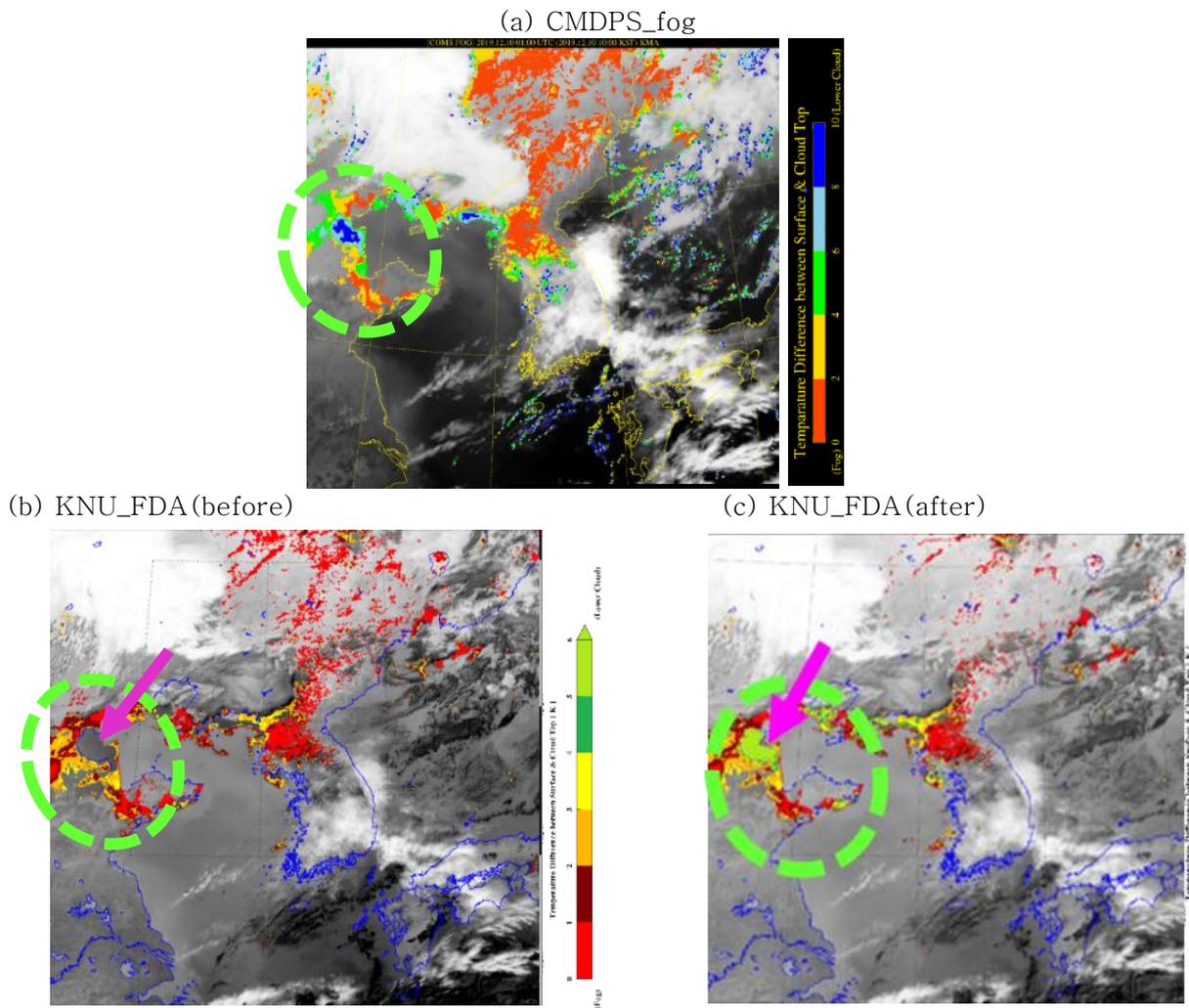
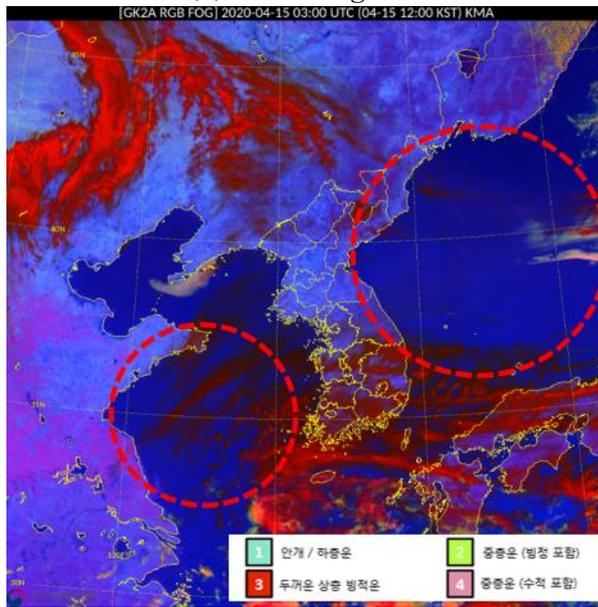
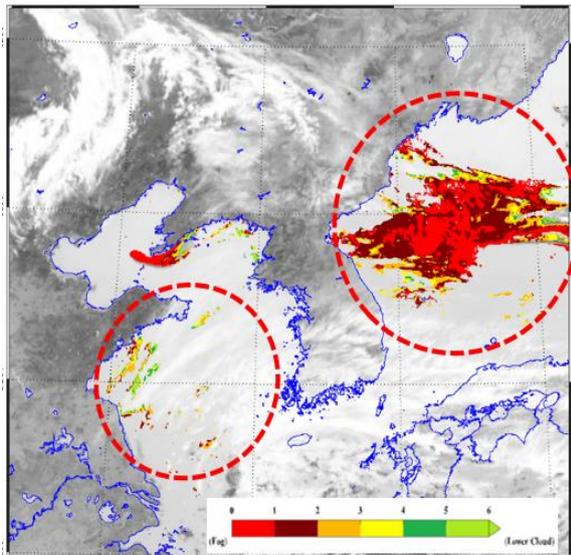


Fig. 3. 11. Same as Fig. 3.7 except for 10:00 KST Dec. 10, 2019.

(a) GK2A fog RGB



(b) KNU\_FDA(before)



(c) KNU\_FDA(after)

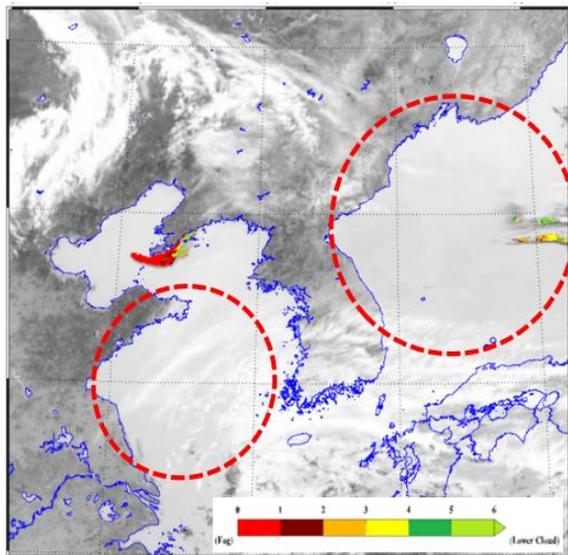


Fig. 3. 12. Sample image of fog detection results at 12:00 KST Apr. 15, 2020. (a) GK2A fog RGB image, (b) KNU\_FDA fog image(before), and (c) KNU\_FDA fog image(after).



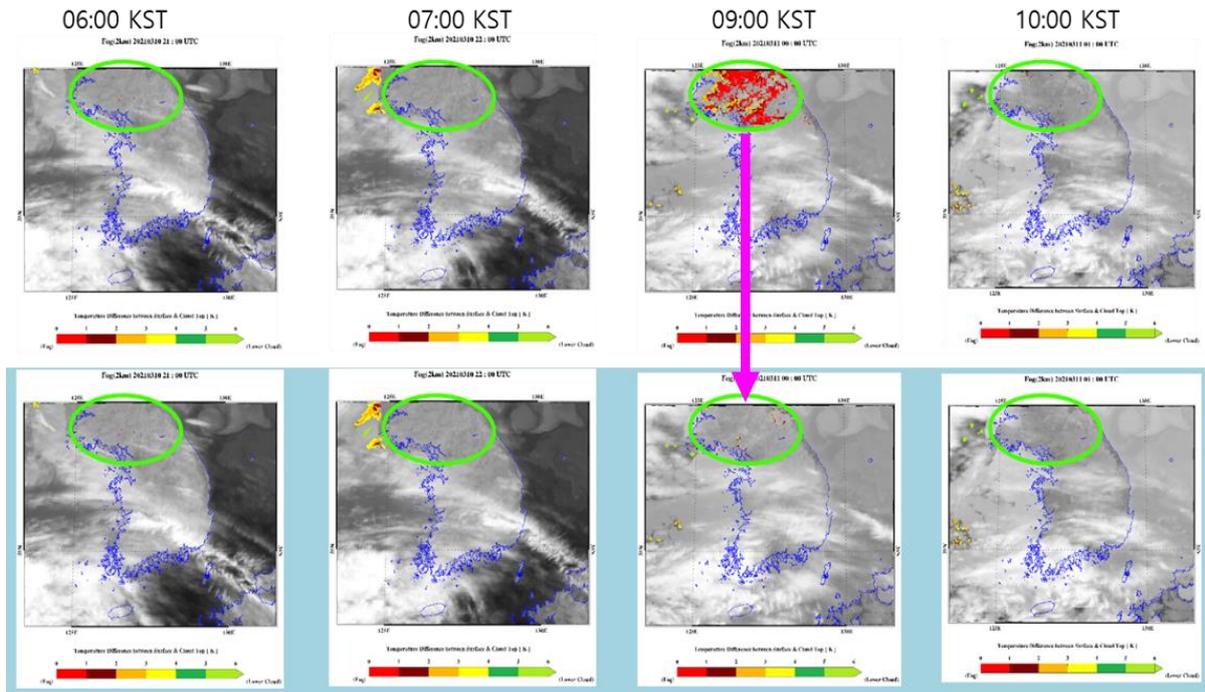


Fig. 3. 14. Sample image of fog detection results at 06:00~10:00 KST Mar. 11, 2021. The top is KNU\_FDA fog image(before), the bottom is KNU\_FDA fog image(after).

### 3.3.5 현업 운용을 위해 개선한 GK2A 안개 탐지 결과 정량적 검증

국가기상위성센터는 3.2 절에서의 설명과 같이 검증 시간을 실제 위성이 한반도를 관측하는 시간으로 적용하고, 시정계와 최단 거리의 위성화소 뿐만아니라 주변 3x3 위성화소 영역으로 비교검증하며, False 와 Correct negative 의 정의를 시정계 값에 상관없이 일관되도록 개선함에 따라 2020 년 3 월에서 2021 년 1 월 동안의 21 개 안개 사례를 이용한 검증을 수행하였다. 그 결과, 2 km 해상도 산출물에 대해서는 최단거리 위성화소만을 이용하여 검증하였을 때, POD 는 0.6, FAR 은 0.61 이였고, 주변 3x3 위성화소를 사용하여 검증했을 때, POD 는 0.82, FAR 은 0.68 의 값을 보였다. 그리고 500 m 해상도 산출물은 최단거리일때, POD 0.48, FAR 0.63, 주변 3x3 위성화소일때, POD 0.75, FAR 0.72 값을 가졌다. 시정계와 최단거리에 있는 위성화소를 이용할 때와 다르게 주변 3x3 위성화소를 이용하여 검증할 때는 시정계 값이 1 km 미만으로 안개가 발생했을 때, 9 개 화소 중 하나라도 안개로 탐지하면 안개를 잘 탐지한 것으로 정의하고, 시정계 값이 1 km 이상으로 안개가 발생하지 않았을 때, 하나라도 안개로 잘못 탐지했을 경우 안개를 탐지하지 못한것으로 정의된다. 이에 따라, 시정계와 최단거리에 있는 위성화소를 이용하여 검증한 결과보다 주변 3x3 위성화소를 이용해 검증했을 때, 탐지율을 뜻하는 POD 값이 더 크게 나타나며, 오탐지율인 FAR 도 더 큰 값을 가졌다.

Table 3. 4. Validation results with ground observed visibility data according the validation area for 21 fog cases.

Products resolution	POD		FAR	
	최단거리	주변3x3	최단거리	주변3x3
2 km	0.60	0.82	0.61	0.68

500 m	0.48	0.75	0.63	0.72
-------	------	------	------	------

## 4. 현업운영 시 고려사항

### 4.1 수치계산 고려사항

2.4 절에서 보인 바와 같이 안개 탐지에 사용되는 수식들은 매우 간단하기 때문에 특별한 수학적 고려사항은 없다. 다만, 안개 탐지 과정에서 8개의 AMI 채널 자료, CSR과 같은 보조자료, 과거 안개 탐지 자료 그리고 다중 일(~ 30일)의 자료들을 통합적으로 사용하는 과정에서 배열을 많이 잡는 점을 고려할 필요가 있다.

### 4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

안개는 기본적으로 강도, 규모 및 지속시간이 지리적 위치 및 계절에 따라 다양할 뿐만 아니라 상층운 또는 강수 발생 시에도 발생한다. 안개가 갖는 이러한 속성을 고려하여 본 연구에서 개발한 안개 탐지 알고리즘은 주/여명기/야 및 육지/바다에 따라 사용 채널, 임계값 그리고 해상도가 달라서 기본적으로 프로그래밍이 매우 복잡하다. 또한 안개 가능성 평가에 사용되는 기준자료 산출을 위해 과거 30일 이상의 자료, 전시간 안개 탐지자료 및 적설탐지 자료 등을 필요로 하며 CSR과 같이 수치모델 자료, 검증용 위한 시정계와 CALIPSO 자료 등 많은 자료들이 필요하다. 따라서 현업운영시 이러한 자료들의 실시간 수집 여부 등을 고려하여야 한다.

### 4.3 품질 평가 및 진단

안개 탐지 알고리즘의 정량적 성능을 평가하기 위해서는 기상청의 시정계 자료와 CALIPSO의 VFM (Vertical Feature Mask) 자료를 이용하여 정기적인 평가가 수행되어야 한다. 이 과정에서 안개 특성에 따른 안개 탐지 수준뿐만 아니라 안개 탐지의 시·공간적 연속성에 대해서도 통계적인 평가가 수행되어야 하며, 이를 기반으로 알고리즘의 최적화를 하여야 할 것이다. 또한 GK2A/AMI 자료가 이용가능 할 때, 안개 산출물과 pseudo-RGB (Red, Green, Blue) 합성 맵의 시각적인 비교 또한 수행되어야 한다.

### 4.4 예외사항 처리

안개 탐지 알고리즘은 현재 작동하기 전에 모든 채널 자료와 보조 자료의 존재 여부와 품질을 확인한다. 주/야 별 안개 탐지 핵심자료들이 사용 불가일 경우에는 안개 탐지를 중단하지만 보조 채널 또는 보조자료들을 사용할 수 없는 경우, 알고리즘은 해당 채널들 또는 보조 자료에 관련된 테스트들을 무시하고 계속 작동된다. 안개 탐지 알고리즘은 GK2A/AMI 채널과 보조 자료의 품질이 나쁜 화소들에 대해 안개 산출물에 플래그를 지정한다.

### 4.5 검증 알고리즘

중상층운이 있는 경우 정지궤도 위성으로는 지면정보를 알 수 없으므로 검증에서 제외해야 한다. 검증 자료로 사용되는 시정계의 정확도에 따라 본 연구 알고리즘의 정확도가 달라지므로 시정계 자료의 품질 검사 또한 수행되어야 한다.

## 5. 가정 및 제한

### 5.1 성능

안개 탐지 알고리즘의 성능은 주간에는 반사도( $0.64 \mu\text{m}$ )의 동적 DB(Data Base)에 영향을 많이 받고 주/야간 공통으로 안개와 하층운을 구분하는 데 사용되는 CSR의 정확도에도 많은 영향을 받는다. 또한 육지/바다 구분자료, 지면피복, 적설탐지 결과 등 다수의 자료들의 품질에 영향을 받는다. 따라서 이 자료들이 충분한 정확도와 공간 해상도/관측 주기로 정기적으로 갱신되는 것을 가정하였다.

### 5.2 예상 센서 성능

안개 탐지에는 AMI 16개 채널 중 8개의 채널 자료를 사용하기 때문에 AMI의 성능이 매우 중요하다. 특히, 안개는 매우 국지적인 현상이며 시·공간적 변동성이 크기 때문에 네비게이션 정확도는 매우 중요한 요소이다.

### 5.3 개선을 위한 사전 계획

육상 안개는 지형의 영향을 많이 받으므로 GIS 정보를 이용하여 국지적인 안개를 탐지하고 안개의 일변동성 방법을 정교화 방안을 모색할 계획이다. 그리고 해안가 및 섬 지역의 시정 자료를 이용하여 해무 알고리즘을 최적화할 것이다.

## 6. 참고문헌

- 국가기상위성센터, 2015, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (1) 연차보고서  
국가기상위성센터, 2016, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (2) 연차보고서  
국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (3) 연차보고서  
국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (4) 연차보고서  
국가기상위성센터, 2018, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (5) 연차보고서  
국가기상위성센터, 2019, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (6) 연차보고서
- 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.
- Bendix, J., 2002: A satellite-based climatology of fog and low stratus in Germany and adjacent areas. *Atmos. Res.*, **64**, 3–18.
- Cermak, J., and J. Bendix, 2005: Fog/low stratus detection and discrimination using satellite data. *Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds*, **50**.
- Ellrod, G. P., 1995: Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Weather Forecast*, **10**, 606–619.
- EUMETSAT, 2014: MSG Meteorological Products Extraction Facility Algorithm Specification Document.
- Eyre, J. R., J. L. Brownscombe, and R. J. Allam, 1984: Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteorol. Mag.*, **113**, 266–271.
- Gultepe, I., M. Pagowski, and J. Reid, 2007a: A satellite-based fog detection scheme using screen air temperature. *Weather Forecast*, **22**, 444–456.
- Gultepe, I., R. Tardif, S. C. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, M. D. Müller, M. Pagowski, B. Hansen, G. Ellrod, W. Jacobs, G. Toth, S. G. Cober, 2007b: Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. *Pure appl. geophys.*, **164**, 1121–1159.
- Han, J. H., M. S. Suh, S. H. Kim, 2019: Development of Day Fog Detection Algorithm Based on the Optical and Textural Characteristics Using Himawari-8 Data. *Korea J. Remote Sens.*, **35(1)**, 117–136.
- Kim, S. H., M. S. Suh, J. H. Han, 2018: Development of Fog Detection Algorithm during Nighttime Using Himawari-8/AHI Satellite and Ground Observation Data. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 1–14.
- Koracin, D., Dorman, C. E., Lewis, J. M., Hudson, J. G., Wilcox, E. M., and Torregrosa, A., 2014: Marine fog: A review. *Atmos. Res.*, **143**, 142–175.
- Lee, S.-J., 2016: Development of Fog Detection Algorithm Based on the Optical and Textural Properties of Fog Using COMS Data. Master's Thesis, Kongju National University, Gongju, Korea.
- Lee, T. F., F. J. Turk, and K. Richardson, 1997: Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9  $\mu\text{m}$  data. *Weather Forecast*, **12**, 664–677.
- Lefran, D., 2015: A One-Year Geostationary Satellite-Derived Fog Climatology For Florida. Master's Thesis, Florida State University, Florida, United States of America.
- Li, J., and Shibata, K., 2006; Notes and Correspondence on the Effective Solar Pathlength. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1365–1373
- NESDIS, 2010: GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical

- Basis Document For Low Cloud and Fog. 78pp.
- Niu, S. J., C. S. Lu, H. Y. Yu, L. J. Zhao, and J. J. Lu, 2010: Fog research in China: An overview. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 639–662, doi: 10.1007/s00376–009–8174–8.
- NOAA, 2015: Satellite Products and Services Review Board Algorithm Theoretical Basis for VIIRS Fractional Snow Cover Product. 12pp.
- Park, H.–M., and J.–H. Kim, 2012: Detection of Sea Fog by Combining MTSAT Infrared and AMSR Microwave Measurements around the Korean peninsula. *Atmos.*, **22**, 163–174
- Shin, D.–G., H.–M. Park, and J.–H. Kim, 2013: Analysis of the Fog Detection Algorithm of DCD Method with SST and CALIPSO Data. *Atmosphere*, **23**, 471–483.
- 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. *Korea J. Remote Sens.*, **33(4)**, 359–385.
- Turner, J., R. J. Allam, and D. R. Maine, 1986: A case study of the detection of fog at night using channel 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Meteorol. Mag.*, **115**, 285–290.
- Underwood, S. J., G. P. Ellrod, and A. L. Kuhnert, 2004. A multiple–case analysis of nocturnal radiation–fog development off California utilizing GOES nighttime fog product. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 297–311.
- Wen, X., Hu, D., Dong, X., Yu, F., Tan, D., Li, Z., Liang, Y., Xiang, D., Shen, S., Hu, C., and Cao, B., 2014: An object–oriented daytime land fog detection approach based on NDFI and fractal dimension using EOS/MODIS data. *Int. J. Remote Sens.*, **35**, 4865–4880.
- Wetzel, M. A., R. D. Borys, and L. E. Xu, 1996: Satellite microphysical retrievals for land–based fog with validation by balloon profiling. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 810–829.
- Wilks, D. S., 2011: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. 3th Ed. Academic Press, 308–318 pp.
- Yoo, J.–M., M.–Y. Yoon, M.–J. Jung, and M.–H. Ann, 2006: Fog Detection over the Korean Peninsula Derived from Satellite Observations of Polar–orbit (MODIS) and Geostationary (GOES–9). *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **27**, 450–463.