SST와 CALIPSO 자료를 이용한 DCD 방법으로 정의된 안개화소 분석

신대근 · 박형민 · 김재환*

부산대학교 대기과학과

(접수: 2013년 9월 10일, 수정: 2013년 11월 5일, 게재확정일: 2013년 12월 2일)

Analysis of the Fog Detection Algorithm of DCD Method with SST and CALIPSO Data

Daegeun Shin, Hyungmin Park, and Jae Hwan Kim*

*Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,
Pusan National University, Busan, Korea*

Abstract Nighttime sea fog detection from satellite is very hard due to limitation in using visible channels. Currently, most widely used method for the detection is the Dual Channel Difference (DCD) method based on Brightness Temperature Difference between 3.7 and 11 μm channel (BTD). However, this method have difficulty in distinguishing between fog and low cloud, and sometimes misjudges middle/high cloud as well as clear scene as fog. Using CALIPSO Lidar Profile measurements, we have analyzed the intrinsic problems in detecting nighttime sea fog from various satellite remote sensing algorithms and suggested the direction for the improvement of the algorithm. From the comparison with CALIPSO measurements for May-July in 2011, the DCD method excessively overestimates foggy pixels (2542 pixels). Among them, only 524 pixel are real foggy pixels, but 331 pixels and 1687 pixels are clear and other type of clouds, respectively. The 514 of real foggy pixels accounts for 70% of 749 foggy pixels identified by CALIPSO. Our proposed new algorithm detects foggy pixels by comparing the difference between cloud top temperature and underneath sea surface temperature from assimilated data along with the DCD method. We have used two types of cloud top temperature, which obtained from 11 μm brightness temperature (B_S1) and operational COMS algorithm (B_S2). The detected foggy 1794 pixels from B_S1 and 1490 pixel from B_S2 are significantly reduced the overestimation detected by the DCD method. However, 477 and 446 pixels have been found to be real foggy pixels, 329 and 264 pixels be clear, and 989 and 780 pixels be other type of clouds, detected by B_S1 and B_S2 respectively. The analysis of the operational COMS fog detection algorithm reveals that the cloud screening process was strictly enforced, which resulted in underestimation of foggy pixel. The 538 of total detected foggy pixels obtain only 187 of real foggy pixels, but 61 of clear pixels and 290 of other type clouds. Our analysis suggests that there is no winner for nighttime sea fog detection algorithms, but loser because real foggy pixels are less than 30% among the foggy pixels declared by all algorithms. This overwhelming evidence reveals that current nighttime sea fog algorithms have provided a lot of misjudged information, which are mostly originated from difficulty in distinguishing between clear and cloudy scene as well as fog and other type clouds. Therefore, in-depth researches are urgently required to reduce the enormous error in nighttime sea fog detection from satellite.

Key words: Sea fog detection, DCD method, COMS, CALIPSO

*Corresponding Author: Jae Hwan Kim, Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea.
Phone : +82-51-510-2172, Fax : +82-51-515-1689
E-mail : jaekim@pusan.ac.kr

1. 서 론

안개는 미세 물방울이 대기 중에 존재하여 시정이 1 km 미만인 대기현상을 말하며, 이 중 바다에서 발생하는 안개를 총칭하여 해무라 한다(KMA, 2009). 해무는 염분입자들이 응결핵 역할을 하기 때문에 낮은 상대습도에서도 쉽게 응결이 일어난다(KMA, 2009). 또한, 육지에서 발생하는 안개보다 입자 농도가 낮고 크기가 큰 특성을 가진다(Twohy *et al.*, 1995). 한반도 주변에서 발생하는 해무는 주로 5월에서 7월 사이에 많이 발생하며(Cho *et al.*, 2000; Won *et al.*, 2000), 이 류무 또는 증기무가 대부분을 차지한다(Byun *et al.*, 1997; Won *et al.*, 2000). 이러한 해무는 해상사고 중 40% 가량을 유발하여 경제적, 사회적으로 많은 피해를 가져다준다(Kim, 1998). 이 같은 손실을 최소화하기 위해서는 해무를 정확하게 탐지하고 예측하는 것이 매우 중요하다.

해무를 탐지하는 데에 있어서, 지상 관측을 통한 방법은 관측 지점이 일부 해안과 섬 지역으로 매우 제한되어 있다. 반면, 위성을 이용한 관측은 실시간으로 광범위한 영역의 관측이 가능하기 때문에 해무 탐지에 상당한 이점을 갖는다. 위성을 이용한 안개탐지는 가시채널의 반사도를 이용한 방법과 Eyre *et al.*(1984)에서 소개된 Dual Channel Difference(DCD) 방법을 기반으로 발전되어왔다. 가시 채널의 반사도를 이용한 안개탐지 방법은 낮 시간대의 안개를 탐지하는 데에 있어서는 매우 효과적이거나 일사가 없는 야간에는 사용이 불가능하다. 그렇기 때문에 야간의 안개탐지는 주로 DCD 방법에 의존한다. DCD 방법 이전의 연구에서는 하나의 적외 채널 밝기온도 값을 바탕으로 구름의 고도를 추정하였는데, 안개는 지면과의 온도차가 적어 지면과 구별이 어려운 경우가 많았다(Enrst, 1975; Eyre *et al.*, 1984). 하지만, DCD 방법을 도입하면서 두 개 채널의 밝기온도 값을 사용하여 구름이 없는 청천지역과 안개지역을 훨씬 더 효과적으로 구분해낼 수 있게 되었다.

DCD 방법은 근적외 파장과 적외 파장의 수직에 대한 방출률의 차이를 이용한다. 빙정에 비해 상대적으로 입자의 크기가 작은 수직에 대해서 $11\ \mu\text{m}$ 의 적외 파장은 1에 가까운 방출률을 나타내며 흑체에 가까운 특성을 보이는 반면, $3.7\ \mu\text{m}$ 의 근적외 파장은 0.8~0.9의 방출률을 가진다(Hunt, 1973). 이러한 방출률의 차이는 안개나 하층운의 존재 시 위성의 근적외채널과 적외채널간의 밝기온도차(BTD, Brightness temperature difference)를 발생시키며 특히, 크기가 큰 수직보다 크기가 작은 수직에서 더욱 뚜렷하게 나타난다(Bendix *et al.*, 2004). DCD 방법은 Eyre *et al.*(1984)의 연구에서 처음 소개된 이후 수많은 안개탐지 연구에 적용되

어 오고 있다. d'Entremont(1986), d'Entremont *et al.* (1987), Sanders and Kriebel(1988), Bendix and Bachmann(1991)은 극궤도 위성인 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)의 Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR) 센서에 DCD 방법을 적용하여 안개를 탐지하였고, Ellrod(1995)와 Lee *et al.*(1997), Bendix *et al.*(2004), Gao *et al.* (2009)는 Geostationary Operational Environmental Satellite(GOES)와 Meteosat Second Generation(MSG), Multifunctional Transport Satellite(MTSAT) 등의 정지궤도 위성에 DCD 방법을 적용하여 안개를 탐지하였다. 이 같은 연구들을 통하여 DCD 방법은 현재 안개 탐지 알고리즘에 필수적인 단계로써 수행되고 있다. 이 외에도 최근에는 DCD 방법과 함께 SST나 해상풍 자료를 사용하여 안개를 탐지하거나 구름 표면의 균질성을 이용하여 안개와 하층운을 구분하는 방법 등보다 정확한 안개탐지를 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Heo *et al.*, 2008; Park and Kim, 2012).

육지에서 발생하는 안개와 비교했을 때, 해무는 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 분포한다. 그리고 해상에는 해염입자와 수증기가 많이 존재하기 때문에 그 지속 시간 또한 길다. 이 같은 이유로 해무는 육지의 안개에 비해서는 상대적으로 탐지가 용이한 편이다. 그럼에도 불구하고 여전히 위성에서 탐지된 해무영역은 상당한 불확실성을 포함하고 있다(Cermak and Bendix, 2007; Heo *et al.*, 2008; Park and Kim, 2012). 특히 야간에는 비교적 정확한 안개 탐지가 가능한 가시채널의 사용이 불가능하기 때문에 이에 대한 연구가 더욱 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation(CALIPSO) 라이다(Lidar, Light detection and ranging) 자료와 Sea Surface Temperature(SST) 자료를 이용하여 위성에 탑재된 적외선 센서를 이용한 야간 해무탐지방법의 문제점을 분석하였다. 이를 위해, DCD 방법에 SST 자료를 함께 사용한 해무탐지 알고리즘을 여러 다양한 해무탐지 알고리즘과 비교, 분석하여, 추후 야간 해무탐지 알고리즘의 개선방향을 제시하고자 하였다.

2. 자 료

Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS)는 지구적도상공 36,000 km 고도, 동경 128.2도에 위치하며 기상관측, 해양관측 통신서비스 임무를 수행하는 정지궤도 복합위성이다. COMS는 2010년 6월 27일 발사되어 한반도 및 주변 해역에 대해서 24시간 실시간 관측을 수행하고 있으며, 15분 간격으로 연속적인 자료를 생산해내고 있다. COMS는 Geostationary

Ocean Color Imager(GOCI)와 Meteorological Imager(MI) 두 개의 센서를 탑재하고 있으며 본 연구에 사용된 MI 센서는 각각 1 km와 4 km의 공간해상도를 가진 1개의 가시채널과 4개의 적외채널을 보유하고 있다. 야간의 해무탐지를 위해서는 MI 센서의 단파적외채널(3.7 μm channel)과 적외채널(11 μm channel)의 밝기온도자료가 사용되며, 본 연구에서는 야간에 CALIPSO 위성이 한반도 인근을 지나는 시간대인 1800 UTC의 자료를 사용하였다.

SST 자료는 적외채널의 밝기온도와와의 차이를 통해서 구름의 고저를 판단하는 데 사용될 수 있다(Ellrod, 2002; Ahn *et al.*, 2003; Park and Kim, 2012). 본 연구에서는 야간 해무탐지를 위해 기존의 BTD 경계값과 함께 SST와 11 μm 채널의 밝기온도차를 의미하는 Surface Temperature Difference between cloud top and underneath sea surface temperature(STD) 경계값을 사용하였다. 이때 사용될 수 있는 SST 자료는 위성관측, 또는 모델을 바탕으로 한 다양한 자료들이 존재한다. 따라서 이처럼 다양한 SST 자료 중에서 그 사용 목적에 맞는 적절한 SST 자료의 선택이 필요하다. 본 연구와 마찬가지로 해무탐지를 위해 SST 자료를 사용한 박형민과 김재환(2012)의 선행연구에서는 Aqua/Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E) 마이크로웨이브채널로 관측된 SST를 사용했으나, 이 센서는 현재 2011년 10월 이후 기계적 결함이 발생함에 따라 자료의 생산이 중단된 실정이다(Japan Aerospace Exploration Agency, 2011). 이에 본 연구에서는 AMSR-E SST와 마찬가지로 한반도 인근 해역에서 하루 1회 자료를 제공하면서 공간해상도가 매우 좋은 Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis(OSTIA) SST 자료를 선택하였다. OSTIA SST는 영국 Met Office에서 제공하는 전 지구영역에 대한 고해상도 SST 자료이다. 이 자료는 지구를 관측하고 있는 여러 위성들과 지상관측자료를 이용하여 자료동화 과정이 수행된 수치모델 값으로써 약 6 km의 공간해상도를 가진다(Stark *et al.*, 2007). 또한 -0.17°C 의 편의(bias)와 0.39°C 의 Root Mean Square Error(RMSE)를 보이며(Stark *et al.*, 2007), 특히 한반도 인근 해역에서 비교적 높은 정확도를 보이는 것으로 알려져 있다(Xie *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010). OSTIA SST는 하루 1회 생산되기 때문에 약 15분 간격으로 제공되는 밝기온도 자료에 비해 시간간격이 매우 큰 편이다. 그러나 SST는 일 변동성이 크지 않고(Gentemann *et al.*, 2003; Kawai and Wada, 2007), 자료의 해상도를 생각해 봤을 때, 밝기온도 자료와의 시간 불일치에 의한 편차는 크지 않을 것으로 사료된다.

안개영역의 구름 연직 분포 분석을 위해 사용된

CALIPSO는 미국 National Aeronautics and Space Administration(NASA)의 극궤도 지구 관측 위성들 중 하나로써 2006년 4월 28일 발사되어 대기 중의 구름과 에어로솔의 연직 분포 분석을 위한 자료를 제공하는 임무를 수행하고 있다. 따라서, CALIPSO는 야간에 하루 1~2회 정도 한반도 인근 해역을 지나며 그 시간대는 1600~1900 UTC에 해당한다. CALIPSO는 Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarisation(CALIOP) 센서와 Imaging Infrared Radiometer(IIR), 그리고 Wide-Field Camera(WFC)를 탑재하고 있다. 본 연구에서는 이 중 CALIOP 센서에서 관측된 구름의 연직 분포 정보를 이용하여 안개영역의 복사 특성을 분석하고 각종 해무탐지 알고리즘을 검증하였다. CALIOP은 직접 레이저를 쏘아 후방산란 신호를 관측하는 능동 관측 센서로써 고도별로 다른 공간해상도를 갖는다. 이 센서는 532 nm와 1064 nm 두 개의 채널을 이용하여 구름과 에어로솔을 구분하고, 편극비(depolarization ratio)로써 빙정입자와 수적입자를 추정한다. 본 연구에 사용된 자료는 CALIPSO Lidar Level 2 Vertical Feature Mask Product(VFM) Collection 3 자료로써 빙정(ice), 수적(water), 방향성 빙정(oriented ice)으로 구분되는 구름의 연직 정보를 제공한다. Kim *et al.*(2008)에 의하면 CALIOP에서 탐지된 운고와 운정고도는 지상 관측 라이다와의 비교검증 결과 상당한 일치성을 보이며, 특히 야간에는 지표면에 반사된 태양광의 영향이 없기 때문에 0.1 km 이내의 낮은 편차를 나타낸다.

본 연구에서는 고도에 따라 공간해상도가 다른 CALIPSO Lidar Level 2 VFM의 전 고도 자료를 사용하기 위하여 5 km 간격의 자료를 사용하였고, OSTIA SST와 COMS-MI 밝기온도, 그리고 CALIPSO-CALIOP 자료는 각기 다른 시간, 공간해상도를 가지고 있기 때문에 자료 분석에 앞서 이들을 같은 격자에 맞추는 collocation 과정이 선행되었다. 자료의 공간일치를 위하여, COMS의 각 화소는 가장 가까운 거리에 위치한 OSTIA SST 격자값을 읽어오도록 하였고, CALIPSO의 관측점을 포함하는 COMS 화소는 CALIPSO가 제공하는 연직정보를 갖도록 하였다. 따라서 collocation된 자료는 COMS의 공간해상도를 가지며, CALIPSO 경로에 해당하는 일부 COMS 화소는 구름 연직정보를 갖게 된다. 또한 SST 자료와 CALIPSO가 하루 1회씩 자료를 제공함에 따라 collocation된 자료는 하루의 시간간격을 갖는다.

연구의 해당 영역은 한반도 인근 해역에서 해무 발생이 잦은 지역을 최대한 포함하도록 하여 위도 30~50도 경도 115~142도로 설정하였으며, 모든 자료는 해무가 가장 많이 발생하는 2011년 5~7월의 기간에 대하여 분석이 수행되었다.

3. 본 론

3.1 DCD 방법의 불확실성

기존의 DCD 방법을 이용한 안개탐지 알고리즘은 과거 여러 연구들을 통해 상당히 효과적인 안개탐지가 가능함이 증명되었음에도 불구하고, 여전히 많은 안개가 아닌 지역, 또는 안개를 탐지하지 못하는 지역들을 포함하고 있다. 해무 탐지에 있어서 이러한 DCD 방법의 불확실성은 DCD 방법으로 탐지된 안개화소들의 운정고도 분포에서도 나타난다. Figure 1은 5~7월의 한반도 주변해역에서, DCD 방법으로 탐지된 안개화소들 중 CALIPSO가 지나가는 화소들의 운정고도 분포를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 5~7월의 BTD 경계값에 포함되는 전체 화소들 중 운정고도가 2 km 이상인 화소가 약 47.2%를 차지하고 있다. 허기영 등(2008)에 의하면 한반도 주변에서 발생하는 안개의 두께는 약 200~300 m에 달하는 반면, 하층운의 고도는 1800 m 이상으로 나타난다. 이를 바탕으로 생각해 볼 때, 자료가 갖는 불확실성을 최대한 고려한다 하더라도 일반적인 중/상층운의 운정고도인 2 km(Ahrens, 2010) 이상의 구름은 결코 안개로 보기 어렵다. 즉, Fig. 1은 실제 DCD 방법을 이용해 탐지된 안개영역에 포함되는 구름들 중에서 안개가 아닌 다른 종류의 구름들이 약 47.2% 가량을 차지하고 있음을 나타낸다. 따라서, 정확한 해무탐지를 위해서는 DCD 방법 외에 추가적으로 다른 방법이 사용될 필요가 있다. 이에 이러한 불확실성을 최소화하

Fig. 1. Cloud top altitude distribution of pixels defined as fog from the DCD method from May to July 2011 from CALIPSO measurements.

기 위하여 SST 자료와 적외 채널 밝기온도자료를 바탕으로 한 새로운 경계값으로써 STD 경계값을 사용하여 해무영역을 분석하고 해무탐지에 적용해 보았다.

3.2 Surface Temperature Difference(STD)

기본적으로 해무는 다른 구름들에 비해 해면에 매우 가깝게 존재하기 때문에 상대적으로 높은 운정온도를 가지며, 이러한 해무의 운정온도는 해무 아래의 해수면온도와 큰 차이를 보이지 않는다. 반면, 다른 구름의 경우 해무에 비해 상대적으로 높은 고도에 위치하기 때문에, 해수면온도와 구름의 밝기온도 사이에 큰 차이가 나타나게 된다. 이 같은 이유로, 구름의 운정온도와 구름 아래 해수면온도와의 차이(STD)의 적절한 경계값을 적용함으로써, 해무를 다른 구름들로부터 구별할 수 있다.

STD를 정의하기 위한 운정온도와 구름 아래 해수면온도 자료로써 각각 COMS 11 μ m 밝기온도자료와 OSTIA SST 자료가 사용되었다. 하지만 이 두 자료는 각각 위성에서 관측된 밝기온도와 모델에서 산출된 SST 값으로써 동일한 청천의 해수면 온도 산출 시, 자료 간에 편차가 존재하게 된다. 따라서 STD를 정의하기 위해 앞서 SST를 청천에서의 11 μ m 밝기온도에 맞게 보정해줄 필요가 있다. SST의 보정은 구름이 없는 청천화소에서, SST와 BT11 값들 사이의 회귀분석을 통해 이루어졌다. 여기서 청천화소는 Fig. 2와 같

Fig. 2. The difference distribution of original sea surface temperature and 11 μ m brightness temperature around Korea Peninsula at 1800 UTC in May 2011. The pixels under shading is found to be clear pixels.

이 SST와 BT11의 차이값 분포를 바탕으로 구해진다. 본 논문에 포함하지는 않았지만 낮 시간대에 가시채널의 반사도가 5 이하인 청천화소들의 SST와 BT11 차이값(Original SST-BT11) 분포를 분석해 본 결과, 이들 대부분이 SST와 BT11 차이값의 빈도수(frequency)가 가장 높은 값을 중심으로 분포하는 것을 알 수 있었다. 본 연구가 수행되는 야간에는 가시광을 사용할 수 없기 때문에 이 같은 SST와 BT11 차이값 분포를 바탕으로 청천화소를 정의하였다. 충분한 수의 청천화소 표본을 확보하기 위해, SST와 BT11 차이값 분포의 최빈값을 중심으로 전체 면적의 10%에 해당하는 영역을 청천화소로 정의하였고, Fig. 2의 어떻게

표현된 부분이 이에 해당한다. 이렇게 정의된 청천화소들의 SST와 BT11 값을 바탕으로 Fig. 3과 같이 이들의 산포도를 통해 회귀식이 구해진다. 각 화소에 해당하는 SST 값에 이 회귀식을 적용함으로써 보정된 SST 값들을 얻을 수 있다. SST 보정에 사용되는 회귀식은 월 별로 그 달에 해당하는 한반도 주변해역의 SST와 BT11 값들을 바탕으로 구해지며, 식 (1)~(3)은 각각 5~7월에 해당하는 SST 보정에 사용된 회귀식을 나타낸다

$$\text{Adj_SST} = \text{Original SST} \times 0.9988 - 3.48 \quad (1)$$

$$\text{Adj_SST} = \text{Original SST} \times 0.9972 - 2.42 \quad (2)$$

$$\text{Adj_SST} = \text{Original SST} \times 0.9943 - 4.68 \quad (3)$$

3.3 안개와 청천 군집 분석

해무탐지 알고리즘을 적용하기에 앞서, 해수면 온도자료와 밝기온도자료를 바탕으로 구한 한반도 주변해역의 BTD와 STD를 이용하여 안개화소의 복사 특성을 분석해 보았다. 횡축은 BTD이고, 종축은 STD로 설정된 산포도는 안개화소의 BTD와 STD 값을 동시에 살펴볼 수 있는 장점을 갖는다. Figure 4는 한반도 주변에서 안개가 가장 많이 발생하는 5, 6, 7월 한반도 주변 해역의 BTD와 STD의 산포도이다. 세 달 모두 비슷한 위치에서, 주변에 비해 상대적으로 많은 화소들이 집중되어 있는 두 개의 특징적인 분포가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이들을 BTD가 낮은 쪽부터 각각 A-군집과 B-군집으로 정의하고 그 복사 특성을 분석해보았다. 해무입자에 대한 적외, 근적외 파장의 방출률 특성과 해무 발생고도를 근거로 살펴볼 때, BTD가 음수이고 STD가 0에 가까운 A-군집은 안개 또는 일부 하층운이 존재하는 화소들로써 생각할 수 있다. 반면, B-군집은 BTD와 STD 모두 0에 근접하므로 구름이 존재하지 않는 청천화소들로 사료된다.

Fig. 3. Relationship between COMS 11 μ m brightness temperature and OSTIA sea surface temperature at 1800 UTC in May 2011.

Fig. 4. Scatter density plot between BTD and STD in (a) May, (b) June, (c) July 2011.

CALIPSO 자료를 이용하여 실제 안개와 청천화소들이 BTD와 STD 산포도 상에서 갖는 분포특성을 Fig. 4의 A, B-군집과 비교하여 살펴보았다. 본 연구에서 초점을 맞춘 야간의 CALIPSO 경로를 따라, 해당 영역 내에서 하루 동안 0~450개의 대기연직정보를 포함한 화소들을 얻을 수 있다. 충분한 수의 표본을 확보하기 위하여, 월별로 누적된 CALIPSO 화소들을 이용하여 5~7월의 안개와 청천화소에 대한 복사특성 분석을 월별로 수행하였다.

Figures 5a, d, g는 각 월별로 누적된 CALIPSO 경로상의 모든 화소들을 이용하여 그린 BTD와 STD의 산포도이다. 이들의 분포를 살펴보면, Fig. 4와 마찬가지로

가지로 A-군집과 B-군집의 위치에 가장 많은 화소들이 집중된 모습을 보이며, 전체적으로도 Fig. 4와 유사한 패턴을 보이고 있다. 이는 Fig. 4에서 A-군집과 B-군집에 해당하는 화소들이 Figs. 5a, d, g에도 충분히 포함되어 있음을 의미한다. 이 중에서, 안개와 청천화소들의 BTD와 STD 분포를 살펴보기 위해 CALIPSO 자료를 이용하여 안개화소와 청천화소를 각각 정의하고 그 분포를 살펴보았다. 안개는 그 발생 특성상 해수면에서부터 발생하여 일정고도까지 분포한다. 여기서 CALIPSO 운고자료가 약 0.1 km의 오차를 갖는 점을 고려하여(Kim *et al.*, 2008), 0.1 km 이하의 고도에서부터 연속적으로 액체수적이 존재하는

Fig. 5. BTD-STD relation of (a) all collocated COMS, OSTIA, and CALIPSO pixels, (b) foggy pixels, and (c) clear pixels defined by CALIPSO in May. The same as of (d), (e), and (f) in June, and (g), (h), and (i) in July.

Fig. 6. CALIPSO data pixels with vertical profile of water droplet starting from the ground.

화소들을 안개화소로 정의하였다. Figure 6은 이렇게 정의된 안개화소들의 연직분포를 나타낸다. 이들은 0.609 km의 평균 운정 고도와 0.268 km의 표준편차를 갖는데 안개로 보기 힘든, thickness가 큰 일부 극값을 제거하기 위하여, 평균값을 중심으로 표준편차에 해당하는 약 1 km를 안개의 운정고도로 정의하고 이보다 높은 고도를 가진 화소는 안개화소에서 제외하였다. 반면, 청천화소는 모든 고도에서 어떠한 구름도 존재하지 않는 화소로 정의하였다. 이렇게 안개와 청천으로 각각 정의된 화소들을 각각 BTD와 STD의 산포도로 나타내 보았다. 그 결과 Figs. 5b, e, h에서 볼 수 있듯이 안개화소는 일부 화소를 제외하면 대부분 BTD가 음수이고 STD가 0에 가까운 영역에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 반면, Figs. 5c, f, e의 청천화소들은 BTD와 STD 모두 0이 되는 지점을 중심으로 분포하고 있었다. 이는 Fig. 4의 A-군집, B-군집의 위치와 거의 일치하며, 이들이 각각 안개와 청천화소의 분포특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 여기서 안개는 BTD와 STD 산포도 상에서 5월에서 7월로 갈수록 0을 중심으로 횡축방향으로 넓게 퍼지는 특성을 보이며, 이는 Fig. 4에서도 확인할 수 있다. 이 같은 안개와 청천의 월별 분포 특성은 수증기에 대한 두 파장의 민감도 차이 또는 그 외에 파장별 특성차이로 인한 것으로 사료되며, 이 때문에 안개 탐지 시 월별로 차별화된 BTD 경계값을 적용할 필요가 있음을 나

타낸다.

3.4 경계값 선정

BTD와 STD의 산포도를 이용해 살펴본 안개와 청천군집의 복사특성을 바탕으로 안개화소를 구별하기 위한 BTD와 STD의 경계값을 각각 선정하였다. BTD 경계값은 안개와 청천을 구분하는 경계가 되는 BTD 값을 의미하며, 앞서 언급한 것처럼 안개가 존재할 시에 BTD는 음의 값을 나타낸다(Hunt, 1973). 하지만 이 값은 청천인 경우의 BTD 값인 0에서 크게 떨어져 있지 않기 때문에, 경계값에 따라 안개로 탐지되는 영역이 크게 달라질 수 있다. 이러한 경계값은 태양 고도, 수증기량, 센서에서 사용하는 파장대 등 다양한 요인에 따라 다르게 나타난다(Sanders and Kriebel, 1988; Bendix *et al.*, 2003, Bendix *et al.*, 2004; Yoo *et al.*, 2006; Cermak and Bendix, 2007). 이에 본 연구에서는 2010년 6월 궤도에 오른 COMS 위성 자료와 OSTIA-SST 자료를 바탕으로 COMS에 최적화된 BTD 경계값을 월별로 선정하였다.

BTD 경계값을 선정하기 위해 박형민과 김재환(2012)의 선행 연구에서는 해당 영역 내 모든 화소의 BTD 값 분포를 히스토그램으로 그려 분석하였다. 여기서 안개가 발생하는 날에는 뚜렷하게 두 개의 모드를 나타내는데 이는 수직의 방출율에 관한 이론적 배경에 근거해 볼 때 각각 안개와 청천화소들에 의한 것으로 생각할 수 있다(Cermak and Bendix, 2007; Park and Kim, 2012). 같은 방법으로 해무가 자주 발생하는 5, 6, 7월의 BTD 분포를 월별로 살펴본 결과, 세 달 모두 두 개의 모드를 보임을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 BTD와 STD의 산포도를 이용하여 안개와 청천을 구분하는 BTD 경계값을 월별로 선정하였다. 먼저 안개와 청천의 경계를 확실하게 하기 위해 산포도에서 일정 비율 이하의 화소들을 모두 제거하였다(Figs. 7a, b, c). 제거되는 화소의 기준은 그 값을 바꿔가며 반복 수행한 결과, 안개와 청천지역의 경계가 가장 잘 표현되는 0.075% 미만으로 정하였다. 그리고 남아있는 값들의 BTD를 히스토그램으로 그려 두 지역을 구분하는 최적의 경계값을 선정하였다(Figs. 7d, e, f). 그 결과, 야간 해무탐지를 위한 BTD 경계값으로 5월에 -1.38, 6월에 -1.10, 7월에 -0.54가 각각 선정되었다.

STD 경계값은 BTD 처럼 안개와 하층운 또는 상층운이 구분되는 뚜렷한 경계가 나타나지 않기 때문에, 해무의 운정고도를 바탕으로 경계값을 선정하였다. 3.3 절에서 CALIPSO를 이용하여 안개로 정의한 화소들을 분석한 결과에 의하면 안개화소는 약 1 km의 운정고도를 가진다. 여기에 표준대기의 기온감률을 적용하여(Wallace and hopps, 2006), 6.5 K를 안개의 STD

Fig. 7. Scatter density plot between BTD and STD after removing high cloudy pixels and collocation-error pixels in (a) May, (b) June, (c) July. Color bar at the right hand side shows frequency distribution in %. (d), (e), and (f) represent the frequency distribution of 3.7-11 μm brightness temperature difference.

경계값으로 정하였다. 이는 허기영 등(2008)에서 분석한 해무의 청천표면과 구름표면의 밝기온도차 값과도 크게 다르지 않은 값으로써 대부분의 안개를 포함할 수 있을 것으로 사료된다. STD 경계값은 BTD 경계값과는 달리 전체 안개화소의 고도분포와 선행연구를 바탕으로 구해졌기 때문에 월별로 동일한 하나의 값을 적용하였다.

3.5 불량화소 분석

CALIPSO 자료를 이용한 구름 연직정보 분석과정은 CALIPSO와 COMS의 공간분해능 차이로 인한 불확실성을 포함하고 있다. 이는 3.3절의 분석에서도 나타나는데, Fig. 5의 안개와 청천화소의 BTD-STD 산포도를 살펴보면, 각각 안개와 청천 군집의 중심으로부터 크게 벗어나 위치하는 화소가 일부 존재하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 안개와 청천화소의 특성으로 보기 어려운 화소들으로써 사례일을 선정하여, 이 같은 불량화소들에 대한 분석을 수행하였다. 사례일은 CALIPSO로 정의한 안개화소와 청천화소의 분석을 위한 사례일을 따로 구분하여 각각 Fig. 4의 A-군집과 B-군집의 중심에서 벗어난 화소가 다수 존재하는 날들로 선정되었다. 안개화소 분석을 위한 사례일로써

2011년 5월 4일과 5월 16일, 그리고 청천화소 분석을 위한 사례일로써 2011년 5월 16일과 5월 18일이 각각 선정되었다. Figures 8a, c는 각 사례일의 CALIPSO 자료로 정의된 안개화소들의 BTD-STD 산포도이고, Figs. 8b, d는 같은 날의 COMS 11 μm 적외영상을 배경으로 탐지된 안개영역과 CALIPSO 경로를 나타낸 그림이다. Figures 8a, c에서 BTD와 STD의 안개 경계값을 벗어난 화소들은 보라색 사각표식으로 강조하여 표현되었고, 이들의 공간분포(geolocation)는 Figs. 8b, d에서 파란색으로 표시된 CALIPSO 경로 중 하늘색 사각표식으로 나타내었다. Figures 8a, b의 5월 4일의 사례에서는 이러한 불량화소가 동해 안개탐지 영역의 한가운데에 위치하고 있는데, 이들은 안개영역 내부에 일부 존재하는 청천지역의 끝자락에 자리하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Figs. 8c, d의 5월 16일 사례에서는 한반도 남쪽의 안개탐지영역의 경계와 한반도 남부 해안의 청천지역의 일부에 위치하고 있다. 이 화소들은 안개와 청천이 혼합되어 있을 가능성이 매우 높고, 이는 COMS와 CALIPSO의 해상도 차이로 인한 오차를 발생시킬 수 있다.

Figure 9는 청천화소 분석을 위한 사례일로써 Fig. 8과 같은 방법으로 표현한 그림이다. 단, 여기서 Figs.

Fig. 8. (a) Scatter plot between BTD and STD for foggy pixels defined by CALIPSO Lidar Level 2 data at 1800 UTC on 4 May 2011. (b) Foggy area determined from BTD-only (yellow) and BTD-STD-combined method (orange). (c), (d) are same as (a), (b) at 1800 UTC on 16 May 2011. The purple colored pixels outside the threshold values in (a) and (c) are located at the edge of foggy area.

Fig. 9. (a) Scatter plot between BTD and STD for clear pixels defined by CALIPSO Lidar Level 2 data at 1800 UTC on 16 May 2011. (b) Foggy area determined from BTD-only (yellow) and BTD-STD-combined method (orange). (c), (d) are same with (a), (b) at 1800 UTC on 18 May 2011. The purple colored pixels placed far away from clear pixel group in (a) and (c) are located at the edge of foggy area.

9a, c의 산포도는 안개화소가 아닌 청천화소들을 이용하여 그려졌다. 청천화소에서는 그 군집에서 크게 벗어난 화소들만을 뽑아 분석을 수행하였고, 이들은 Figs. 8a, c와 마찬가지로 보라색 사각표식으로 강조되었다. 5월 16일의 경우 Fig. 9a의 청천 군집에서 음의 BTD 방향으로 크게 벗어난 화소들을 Fig. 9b에서 살펴봤을 때, 제주 동쪽의 안개영역 가장자리에 위치하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 Figs. 9c, d의 5월 18일의 사례에서는 Fig. 9c에서 청천 군집의 횡축과 종축 모두 양의 방향에 위치한 화소들을 Fig. 9d에서 살펴봤을 때, 울릉도 부근의 상층운 끝자락과 일본 큐슈 남쪽방향에 있는 상층운과 청천지역의 경계에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 안개화소 분석 사례와 마찬가지로 이러한 화소들은 안개와 상층운이 섞여 있을 것으로 생각할 수 있고, 이는 CALIPSO 분석에서 오차를 발생시킬 수 있다. 즉, CALIPSO 자료는 COMS의 공간 분해능과 비교했을 때, 매우 작은 점에 불과하므로, 이 점에 해당하는 CALIPSO 연직 대기 정보가 COMS의 화소 전체를 항상 대표할 수 있다고 보기는 어렵다. 이 같은 이유 때문에 발생하는 불량화소의 대부분은 안개로 탐지되는 영역의 가장자리에 위치한다. 안개탐지의 경계값을 이용하여 이러한 불

량화소들을 분석해 본 결과, 5월과 6월, 7월에 대해 각각 CALIPSO로 정의한 전체 안개화소들 중 17%, 31%, 40%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 월별로 불량화소의 비율이 이처럼 다르게 나타나는 이유는 BTD-STD 산포도로 나타낸 안개와 청천화소의 월별 분포특성과 관련된 것으로 보인다. 3.3절에서 언급한 바와 같이 5월에 비해 7월의 BTD-STD 산포도는 횡축 방향으로 화소들이 퍼져서 분포하는 특성을 보인다. 이로 인해, 7월로 갈수록 안개화소와 청천화소가 겹치는 부분이 많아지게 되고, 이는 BTD의 경계값이 안개와 청천을 효과적으로 구분하기 점점 어려워짐을 의미한다. 다시 말해, 앞서 불량화소로 분석한 이 수치에는 실제 자료 간 해상도 차이로 인한 불량화소만을 나타내는 것이 아니라, BTD 경계값에 포함되지 못한 안개화소도 영향을 미쳤기 때문에 이 같은 차이를 나타낸 것으로 보인다.

3.6 STD 경계값을 이용한 안개화소 분석

3.1절에서 분석한 것처럼, DCD 방법으로 탐지된 안개화소에는 운정고도가 매우 높은 안개가 아닌 다른 구름들이 많이 포함되고 있다. STD 경계값을 사용하여, DCD 방법으로 탐지된 안개화소 중에 이 같은 안

Fig. 10. In BTd-STD scatter plot, the STD distribution of foggy pixels defined by the BTd threshold value. The Err_STD is defined as STD value greater than 6.5 K in (a) May, (b) June, (c) July 2011.

개가 아닌 다른 구름들을 분석해 보았다. STD 경계 값 이상의 STD 값을 가지는 화소는 해수면 온도와 운정온도의 차이가 매우 크다는 것을 의미한다. 그러므로 이러한 화소는 안개보다 운정 고도가 매우 높은 다른 구름들이 존재하는 것으로 볼 수 있다. Figure 10은 CALIPSO 경로상의 모든 화소들 중, BTd 경계 값에 의하여 안개로 판명된 화소만을 이용하여 나타낸 BTd-STD의 산포도 그림이다. 여기서 Fog_STD 그룹은 BTd 경계값과 STD 경계값이 함께 사용될 경우, 새롭게 안개로 정의되는 영역을 나타낸다. 반면, STD 경계값을 초과하는 화소들은 안개가 아닌, 다른 구름으로 분류하여 Err_STD 그룹으로 정의하였다. Err_STD 그룹에 해당하는, 즉, BTd 경계값으로만 판단된 안개화소 중 STD 경계값에 의해 안개가 아닌 높은 운정고도를 가진 것으로 여겨지는 화소들은 5월, 6월, 7월에 각각 43%, 19%, 26%에 달하는 것으로 나타났다.

3.7 CALIPSO를 이용한 해무탐지 알고리즘 분석

CALIPSO 자료를 이용하여, DCD 방법으로 탐지한 안개화소를 다른 여러 해무탐지 알고리즘과 함께 비교, 분석하여 살펴보았다. 다른 해무탐지 알고리즘으로는 BTd 경계값과 함께 STD 경계값을 사용한 알고리즘(B_S1), BTd 경계값과 함께 BT11 대신, COMS Level 2 Cloud top temperature(CTT)의 STD(SST-CTT) 경계값이 적용된 알고리즘(B_S2), 그리고 마지막으로 COMS Level 2 안개 알고리즘(COMS_Fog)이 사용되었다. B_S2 알고리즘의 경우 CTT를 산출하는 과정에서 반투명 구름에 대한 보정과 COMS Cloud masking이 수행된다는 점에서 B_S1 알고리즘과 가장 큰 차이를 갖는다(Choi *et al.*, 2007). 또한 COMS_Fog 알고리즘은 DCD 방법과 함께 고유의 구름 제거 과정이 적용되는 특징이 있다.

Table 1. Contingency table for verification fog pixels using CALIPSO satellite.

	CALIPSO Yes	CALIPSO No
Algorithm Yes	Hits (H)	False alarms (F)
Algorithm No	Misses (M)	Correct negatives (C)

Table 2. The results of score test of sea fog detection algorithms.

	POD	POFD	CSI
DCD_only	0.700	0.129	0.189
B_S1	0.636	0.084	0.230
B_S2	0.595	0.067	0.249
COMS_Fog	0.250	0.022	0.170

2011년 5~7월 동안 연구 영역을 통과하는 CALIPSO 궤적의 화소들을 바탕으로 각 알고리즘에 대해 score test를 수행하였다. Table 1은 score test를 위해 사용된 분할표(contingency table)이며, Table 2는 Probability of detection(POD), Probability of False detection(POFD), Critical Success Index(CSI)의 세 지수로써 score test를 수행한 결과를 보여준다. POD, POFD, CSI는 식 (4)~(6)과 같이 계산되며, 모든 지수는 0에서 1사이의 값을 가진다. POD와 CSI는 그 값이 높을수록, POFD는 낮을수록 알고리즘의 신뢰도가 높다는 것을 의미한다.

$$\text{POD} = H/(H + M) \quad (4)$$

$$\text{POFD} = F/(F + C) \quad (5)$$

$$\text{CSI} = H/(H + F + C) \quad (6)$$

DCD_only 알고리즘으로 안개를 탐지한 경우는 가

Table 3. The number of pixels for cloud type from detected pixels by various nighttime sea fog algorithms. The percentiles in brackets are the ratios of each pixels for total foggy pixels defined by each algorithm.

Algorithms	Pixel characteristics identified by CALIPSO			
	Total foggy pixels defined by each algorithm	Foggy pixels	Clear pixels	Other Cloud pixel
CALIPSO	749			
DCD_only	2542	524 (20.6%)	332 (13.1%)	1686 (66.3%)
B_S1	1794	476 (26.5%)	329 (18.3%)	989 (55.1%)
B_S2	1490	446 (29.9%)	264 (17.7%)	780 (52.3%)
COMS_Fog	538	187 (35.0%)	61 (11.3%)	290 (53.9%)

장 많은 수의 안개화소를 탐지함에 따라 가장 높은 POD를 보인다. 하지만, 이 알고리즘으로 탐지한 화소에는 안개가 아닌 다른 화소들이 매우 많이 포함되어 상당히 좋지 않은 POFD와 CSI를 나타내고 있다. 반면, B_S1 알고리즘은 STD 경계값이 추가로 적용됨에 따라, 일부 안개가 아닌 화소가 제거되어 DCD_only 알고리즘에 비해 좋은 POFD와 CSI를 보인다. B_S2 알고리즘은 B_S1 알고리즘보다도 다소 나은 POFD와 CSI 값을 보이는 반면, POD는 B_S1 알고리즘보다 조금 낮게 나타났다. 마지막으로, COMS_Fog 알고리즘은 가장 좋은 POFD를 나타낸 반면, 가장 좋지 않은 POD와 CSI를 보였다. 이는 COMS_Fog 알고리즘이 상당히 많은 수의 안개화소를 제대로 탐지하지 못하고 있음을 의미한다.

앞선 분석과는 다른 관점으로, 각 알고리즘에서 안개화소로 관측된 화소들을 CALIPSO 자료를 이용하여 분석하였다. Table 3은 Table 2의 분석에서 사용된 각 알고리즘을 통하여 안개로 탐지된 화소 중 실제 안개와 청천화소, 그리고 다른 구름화소의 수를 CALIPSO 자료로써 분석하여 나타낸 것이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 DCD_only 알고리즘은 앞선 skill score 분석에서 상당히 높은 POD를 보였지만, CALIPSO 분석 결과 오직 20.6%의 안개만을 포함하고 있다. 이는 DCD_only 알고리즘이 안개로 탐지한 화소들 중에 안개가 아닌 다른 화소들이 지나치게 많이 포함되어 있음을 의미한다. 이러한 안개가 아닌 화소들을 제거하기 위해 사용된 B_S1과 B_S2 알고리즘의 경우는 안개화소를 각각 27%와 30%, 다른 종류의 구름화소를 각각 55.1%와 52.3% 포함하여 DCD_only 알고리즘보다는 안개가 아닌 화소의 비율이 약간 줄어든 결과를 보였다. B_S2 알고리즘은 B_S1 알고리즘보다 개선된 운정온도를 사용함에 따라 조금 더 좋은 결과를 나타낸 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 이 두 알고리즘 역시 여전히 70% 가량의 안개가 아닌 화소들을 포함하고 있다. 마지막으로, COMS_Fog 알고리즘은 35%의 안개화소를 포함하여 안개의 비율은

다른 알고리즘에 비해 다소 높으나, 앞선 skill score 분석에서도 알 수 있듯이 안개를 매우 과소 탐지하는 경향이 있다. 이는 이 알고리즘에 포함된 구름 제거 과정에서 많은 수의 안개화소가 함께 제거되기 때문인 것으로 보인다.

앞서 살펴본 바와 같이, 분석이 수행된 모든 해무 탐지 알고리즘은 약 70%에 임박하는 안개가 아닌 다른 화소들을 포함하고 있다. 즉, 기존의 이론과 같이 (Hunt, 1973) 안개와 하층운이 존재할 시에만 3.7 μm 와 11 μm 의 밝기온도차가 음의 값을 나타내는 것이 아니라, 일부 청천과 중·상층운 구름화소 또한 음의 밝기온도차를 보였다. 이처럼 안개나 하층운이 아닌 화소가 음의 밝기온도차를 보이는 것은 3.7 μm 채널과 11 μm 채널 사이에 수직에 대한 방출률뿐만 아니라 수증기나 다른 기체에 대한 민감도, 또는 그 외의 대기나 해수면에 대한 파장 특성에 있어서도 차이가 존재함을 의미한다. 뿐만 아니라, 이러한 밝기온도차를 이용한 방법은 안개와 하층운을 구별하는 데에도 상당한 어려움을 갖는다. 이를 보완하고자 본 연구에서는 STD 경계값을 사용하여 안개를 하층운으로부터 구별해 내고자 하였으나 SST의 일변동으로 인한 자료의 불확실성 또는 그 외 다른 요인으로 인해 기대했던 만큼의 결과는 얻지 못하였다. 이에 따라, 해무 탐지 알고리즘들은 해무로 탐지한 영역 중 실제 오직 30% 가량의 안개만을 포함하며 안개보다 안개가 아닌 화소가 훨씬 더 많이 포함되는 심각한 문제를 갖는다. 특히, 야간에는 사용할 수 있는 위성의 파장대가 제한되기 때문에 청천지역을 해무와 구분하고 다른 구름들을 제거하기 위해서는 이러한 해무의 불확실성을 유발하는 채널 특성들을 보다 정확하게 규명할 필요가 있어 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 해무탐지에 있어서 DCD 방법의 불확실성을 분석하고, 다른 해무탐지 알고리즘과의 비

교, 분석 통해 위성자료를 이용한 해무탐지 알고리즘의 개선방향을 제시하고자 하였다. STD 경계값 및 CALIPSO를 이용한 분석 결과 DCD 방법으로 탐지한 안개화소에는 안개뿐만 아니라 청천화소 및 상당수의 다른 구름화소들이 함께 포함되고 있었다. 이는 안개와 하층운뿐만 아니라 일부 중상층운과 청천 화소에서도 음의 BTD가 나타나고 있음을 의미하며, 이러한 부분은 야간 해무탐지에 있어서 심각한 문제를 유발한다. 또한 하층운의 경우는 안개와 매우 비슷한 고도에 존재하여 입자구성에 유사성을 갖기 때문에 야간의 제한된 채널만으로는 이를 구별해 내기가 쉽지 않다. 이를 보완하기 위해 운정온도와 구름아래 해수면 온도차인 STD의 경계값을 사용한 B_S1와 B_S2 알고리즘은 일부 안개가 아닌 구름을 제거하였음에도 불구하고 여전히 상당수의 하층운 및 다른 구름들이 안개와 함께 포함되었다. COMS Levels 2 안개 알고리즘은 고유의 구름 제거과정을 통해 하층운을 포함한 다른 구름들로부터 안개를 구별해 내하고자 하였으나, 이는 구름뿐만 아니라 많은 수의 안개화소 또한 함께 제거해버리는 문제를 야기하였다. 이와 같이 위성을 이용한 야간의 해무탐지는 제한된 채널을 사용함에 따라 여전히 안개 이외의 구름 및 청천 지역으로부터 안개를 구별하는데 많은 문제를 보이고 있다. 따라서, 효과적인 야간 해무탐지를 위해서는 야간에 사용 가능한 위성 파장대의 채널 특성을 보다 정확하게 규명하기 위한 심도 있는 연구가 요구된다. 또한 하층운을 안개와 보다 확실히 구별할 수 있는 방안에 대한 연구 또한 지속적으로 수행될 필요가 있다. 본 연구에서 처음 시도된 CALIPSO 위성을 이용한 해무영역의 분석은 기존의 일부 지상관측자료에만 의존했던 야간 해무탐지 알고리즘의 검증에 CALIPSO 경로상의 전체 안개영역에 대해 가능하게 하였다. 특히, 지상 관측과는 다르게 CALIPSO 자료는 야간에 높은 정확도를 가지기 때문에 야간해무의 검증에 활용 가치가 클 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기후변화 감시예측 및 국가정책 지원 강화 사업(CATER 2012-7090)지원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- 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.
- Ahrens, C. D., 2001: Essentials of Meteorology: An invitation to the Atmosphere 3rd Edition. *Brooks/Cole*, pp 94.
- Bendix, J., and M. Bachmann, 1991: Operational detection of fog in the alpine region by means of advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery of NOAA-satellites. *Proc. 5th AVHRR Data User's Meeting*, Tromsø, Norway, Jun.25-Jun.28, 1991, 307-312.
- _____, B. Thies, and J. Cermak, 2003: Fog Detection With Terra-MODIS and MSG-SEVIRI. *Proc. 2003 Meteorological Satellite Data Users' Conference*, Weimar, Germany. Aug. 31-Sep. 2, 2003, 429-435.
- _____, J. Cermak, and B. Thies, 2004: New perspectives in remote sensing of fog and low stratus-TERRA/AQUA-MODIS and MSG. *Proc. 3rd International Conference on Fog*, Cape Town, South Africa, Oct. 11-Oct. 15, 2004, G2.1-G2.4.
- Byun, H.-R., D.-K. Lee, and H.-W. Lee, 1997: Analysis on the Characteristics and Predictability of the Marine Fog over and near the East Sea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **33**, 41-62.
- Cermak, J., and J. Bendix, 2007: Dynamical nighttime fog/low stratus detection based on meteosat SEVIRI Data: A feasibility study. *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 1179-1192.
- Cho, Y.-K., M.-O. Kim, and B.-C. Kim, 2000: Sea fog around the Korean Peninsula. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **39**, 2473-2479.
- Choi, Y.-S., C.-H. Ho, M.-H. Ahn, and Y.-M. Kim, 2007: An exploratory study of cloud remote sensing capabilities of the Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) imagery. *Int. J. Remote Sens.*, **28**, 4715-4732.
- d'Entremont, R. P., 1986: Low-and midlevel cloud analysis using nighttime multispectral imagery. *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, **25**, 1853-1869.
- _____, and L. W. Thomason, 1987: Interpreting meteorological satellite images using a color-composite technique. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **68**, 762-768.
- Ellrod, G. P., 1995: Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Wea. Forecasting*, **10**, 606-619.
- _____, 2002: Estimation of low cloud base heights at night from satellite infrared and surface temperature data. *National Weather Digest*, **26**, 39-44.
- Ernst, J. A., 1975: Fog and stratus "Invisible" in meteorological satellite infrared (IR) imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 1024-1026.
- Eyre, J. R., J. L. Brownscombe, and R. J. Allam, 1984: Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery. *Meteor.*

- Mag.*, **113**, 266-271.
- Gao, S., W. Wu, L. Zhu, G. Fu, and B. Huang, 2009: Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huang-hai Sea using MTSAT-1R IR data. *Acta Oceanol. Sin.*, **28**, 23-35.
- Gentemann, C. L., C. J. Donlon, A. Stuart-Menteth, and F. J. Wentz, 2003: Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1140.
- Heo, K.-Y., J.-H. Kim, J.-S. Shim, K.-J. Ha, A.-S. Suh, H.-M. Oh, and S.-Y. Min, 2008: A remote sensed data combined method for sea fog detection. *Korean J. Remote Sens.*, **24**, 1-16.
- , S.-Y. Min, K.-J. Ha, and J.-H. Kim, 2008: Discrimination between Sea Fog and Low Stratus Using Texture Structure of MODIS Satellite Images. *Korean J. Remote Sens.*, **24**, 571-581.
- Hunt, G. E., 1973: Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **99**, 346-369.
- Japan Aerospace Exploration Agency, 10. 4. 2011.: Observation Halted by Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E). http://www.jaxa.jp/press/2011/10/20111004_amsr-e_e.html, (2013. 9. 9)
- Kawai, Y., and A. Wada, 2007: Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review. *J. Oceanogr.*, **63**, 721-744.
- Kim, M. O., 1998: *Characteristics of sea fog distribution around the Korean peninsula*. Chonnam University, 64 pp.
- Kim, S.-W., S. Berthier, J.-C. Raut, P. Chazette, F. Dulac, and S.-C. Yoon, 2008: Validation of aerosol and cloud layer structures from the space-borne lidar CALIOP using a ground-based lidar in Seoul, Korea. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 3705-3720.
- KMA, 2009: Meteorological-Encyclopedia, <http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp>, (2013. 9. 9).
- Lee, H.-W., Y.-M. Cha, S.-H. Lee, and D.-H. Kim, 2010: Impact of High-Resolution Sea Surface Temperatures on the Simulated Wind Resources in the South-eastern Coast of the Korean Peninsula. *J. Environ. Sci.*, **19**, 171-184.
- Lee, T. F., F. J. Turk, and K. Richardson, 1997: Stratus and fog products using GOES-8-9 3.9- μ m data. *Wea. Forecasting*, **12**, 664-677.
- 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.
- Saunders, R. W., and K. T. Kriebel, 1988: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.*, **9**, 123-150.
- Stark, J. D., C. J. Donlon, M. J. Martin, and M. E. McCulloch, 2007: OSTIA: An operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. *Proc. OCEANS 2007-Europe*, Aberdeen, Scotland, Jun. 18-Jun. 21, 2007, 1-4.
- Twohy, C. H., P. A. Durkee, B. J. Huebert, and R. J. Charlson, 1995: Effects of aerosol particles on the microphysics of coastal stratiform clouds. *J. Climate*, **8**, 773-783.
- Wallace, J. M., and P. V. Hobbs, 2006: *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, Academic Press, p. 11.
- Won, D.-J., S.-Y. Kim, K.-E. Kim, and K.-D. Min, 2000: Analysis of Meteorological and Oceanographic Characteristics on the Sea Fog over the Yellow Sea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **36**, 631-642.
- Xie, J., J. Zhu, and Y. Li, 2008: Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China. *Cont. Shelf Res.*, **28**, 1286-1293.
- 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.

※ 영어로 작성되지 않은 한글 및 일본어 참고문헌은 편집진에서 영어로 번역하였습니다. 번역된 참고문헌은 다음과 같습니다.

기상청, 2009: 기상백과. <http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp>, (2013. 9. 9)

KMA, 2009: Meteorological-Encyclopedia, <http://web.kma.go.kr/communication/encyclopedia/list.jsp>, (2013. 9. 9)