

극궤도(MODIS) 및 정지궤도(GOES-9) 위성 관측을 이용한 한반도에서의 안개 탐지

유정문^{1,*} · 윤미영¹ · 정명재² · 안명환³

¹이화여자대학교 과학교육과, 120-750 서울특별시 서대문구 대현동 11-1

²NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

³기상연구소 원격탐사실, 156-720 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

Fog Detection over the Korean Peninsula Derived from Satellite Observations of Polar-orbit (MODIS) and Geostationary (GOES-9)

Jung-Moon Yoo^{1,*}, Mi-Young Yun¹, Myeong-Jae Jeong² and Myoung-Hwan Ahn³

¹Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea

²NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA

³Remote Sensing Research Laboratory, METRI/KMA, Seoul 150-720, Korea

Abstract: Seasonal threshold values for fog detection over the ten airport areas within the Korean Peninsula have been derived from the data of polar-orbit Aqua/Terra MODIS and geostationary GOES-9 during a two years. The values are obtained from reflectance at $0.65 \mu\text{m}$ ($R_{0.65}$) and the difference in brightness temperature between $3.7 \mu\text{m}$ and $11 \mu\text{m}$ ($T_{3.7-11}$). In order to examine the discrepancy between the threshold values of two kinds of satellites, the following four parameters have been analyzed under the condition of daytime/nighttime and fog/clear-sky, utilizing their simultaneous observations over the Seoul metropolitan area: brightness temperature at $3.7 \mu\text{m}$, the temperature at $11 \mu\text{m}$, the $T_{3.7-11}$ for day and night, and the $R_{0.65}$ for daytime. The parameters show significant correlations ($r > 0.5$) in spatial distribution between the two kinds of satellites. The discrepancy between their infrared thresholds is mainly due to the disagreement in their spatial resolutions and spectral bands, particularly at $3.7 \mu\text{m}$. Fog detection from GOES-9 over the nine airport areas except the Cheongju airport has revealed accuracy of 60% in the daytime and 70% in the nighttime, based on statistical verification. The accuracy decreases in foggy cases with twilight, precipitation, short persistence, or the higher cloud above fog. The sensitivity of radiance and reflectance with wavelength has been analyzed in numerical experiments with respect to various meteorological conditions to investigate optical characteristics of the three channels.

Keywords: fog detection, MODIS, GOES-9, infrared threshold, reflectance, numerical experiments

요약: 본 연구에서는 극궤도 위성 Aqua/Terra에 탑재된 MODIS 복사계와 정지궤도 위성 GOES-9의 2년간 관측 자료를 이용하여, 한반도 10개 공항 지역에 대한 안개 탐지 가시 경계값 및 적외 경계값을 각각 $0.65 \mu\text{m}$ 에서의 반사율 ($R_{0.65}$) 그리고 $3.7 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도 간의 차이($T_{3.7-11}$)에서 계절별로 유도하였다. 이들 경계값이 두 종류 위성에서 서로 다르게 나타나는 원인을 조사하기 위하여, 수도권 지역에 대한 극궤도 및 정지궤도 위성들의 동시 관측 자료를 이용하여 주야간 청천과 안개 시에 다음 변수들을 비교분석하였다; $3.7 \mu\text{m}$ 밝기온도($T_{3.7}$), $11 \mu\text{m}$ 밝기온도(T_{11}), 그리고 $T_{3.7-11}$. 주간 경우에는 $R_{0.65}$ 도 사용되었다. 위 변수들은 공간 분포에서 두 위성 간에 0.5 이상의 유의적인 상관성을 보였다. 이 분석에서 두 위성 간에 경계값 차이는 $3.7 \mu\text{m}$ 채널 파장대 불일치 뿐만 아니라 공간 분해능 불일치에도 기인하였다. 한편 GOES-9에서 유도된 안개 탐지 경계값은 청주 공항을 제외한 한반도 9개 공항의 안개 및 청천 시에 대한 통계적인 검증에서 주간에 약 60%, 그리고 야간에는 약 70%의 정확도를 보였다. 그러나 정확도는 여명, 안개층 위에 상층운 존재, 강수 동반, 그리고 짧은 지속 시간 하에서 발생하는 안개에 대하여 감소하였다. 안개 탐지에 사용되는

*Corresponding author: yjm@mm.ewha.ac.kr

Tel: 82-2-3277-2710

Fax: 82-2-3277-2684

세 채널의 광학적인 특성을 조사하기 위하여, 파장에 따른 복사휘도 및 반사율의 민감도가 수치 실험을 통하여 여러 기상 상태 하에서 분석되었다.

주요어: 안개 탐지, MODIS, GOES-9, 적외 경계값, 가시 반사율, 수치실험

서 론

안개 현상은 시정 장애나 수자원 공급을 통하여 인간 활동과 생태계에 상당한 영향을 줄 수 있으므로(Underwood et al., 2004), 위성관측을 이용한 정확한 안개 탐지는 재해 방지 및 경제적 파급 효과를 줄 수 있다(e.g., Hess, 1974). 특히 우리 나라의 경우에 최초의 다목적 정지궤도 위성인 통신해양기상위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite; COMS)이 2008년에 발사될 예정이어서, COMS 자료를 안개탐지 현업에 활용하는 것이 기상자료처리시스템에서 주요 과제가 되고 있다(기상연구소, 2005). 정지궤도 위성관측은 일반적으로 극궤도 위성에 비하여 공간 분해능에 있어서 열악하나, 시간적인 관측 횟수에 있어서는 우수하다.

극궤도 위성의 공간적 장점을 이용하여, 국지적인 지역(예, 공항) 등에 대한 안개탐지 연구는 극궤도 위성 Aqua/Terra에 탑재된 MODIS(MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer) 자료를 사용하여 최근에 국내에서도 시도되었다(Yoo et al., 2005; 유정문 외, 2005). Yoo et al.(2005)는 MODIS 자료를 기초로 인 천국제공항에 대한 안개탐지 적외차($3.7 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 간의 밝기온도 차; $T_{3.7-11}$) 경계값을 계절 구분 없이 주·야간 별로 제시한 바 있다. 그러나 극궤도 위성과 정지궤도 위성(e.g., Geostationary Operational Environmental Satellite-9; GOES-9)간에 공간 분해능 차이가 이들 위성에서 유도된 안개탐지 경계값에 영향을 줄 수 있다. 따라서 MODIS 자료를 이용하여 기존 연구에서 유도된 안개 탐지 경계값은 COMS 자료처리시스템에는 적용되기 어렵다. 또한 이러한 경계값은 안개 형성을 결정하는 기상 상태에 따라 계절적으로 변화할 수 있다(임현호 외, 2005). 따라서 지정된 관측 지역 및 시간(즉, 동시관측)에 이 두 종류 위성에서 유도된 안개탐지 경계값을 비교분석하는 것은 단일 위성관측에서 발생하는 단점이나 결측을 보완하는 데에 도움을 줄 수 있다.

안개는 그 형성 원인에 따른 분류(예, 이류무와 복사무 등)에서 보는 바와 같이 다양한 조건 하에서 발

생하므로, 수치모델을 안개탐지에 활용하는 데는 상당한 한계가 있다. 더욱이 해상 안개에 대한 수치실험(변희룡 외, 1997)은 해상에서의 관측자료의 부족, 그리고 수치모델 오류에 의한 비선형 효과로 인하여 여전히 미흡한 실정이다. 또한 수치모델을 통한 안개 예보는 소요 시간이 길고 미세한 물리 과정을 다루어야 하는 어려움을 내포하고 있다(김영아 외, 2003; Maruyama et al., 2004). 수치모델이나 지상관측을 통한 안개 탐지에 비하여, 위성관측 방법은 광범위한 지역의 안개 정보를 단시간 내에 제공할 수 있는 반면에, 그 정확성에 있어서는 여전히 많은 개선의 여지가 있다. 특히 안개 원격탐지는 수평 시정의 파악에서 부정확하며, 상층운 존재, 지형, 그리고 태양천정각 등에 의존하는 단점을 갖는다(Bendix, 2002; Bendix et al., 2004).

안개 탐지에 극궤도 위성관측 자료를 활용한 국외 연구에서, Erye et al.(1984)은 Advanced Very High Resolution Radiometer(AVHRR) 자료를 이용하여 안개 및 층운 탐지에 적외차($3.7 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 밝기온도 간의 차이)를 이용하였다. Ellrod (1995)는 정지궤도 위성인 GOES-9 자료를 사용하여 안개탐지를 시도하였다. Bendix et al.(2003)는 MODIS와 Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI)의 적외차 자료를 이용하여 야간 안개 발생 시에 위성 센서에 따른 안개탐지 경계값 차이를 보였다(Cermak et al., 2004).

안개 탐지를 위한 국내 연구에서, Park et al. (1997)은 AVHRR 자료의 적외차를 이용하여 한반도 지역에 대하여 특정 일에 야간의 하층운 및 안개 탐지를 시도하였다. 기상연구소(1999; 2001)와 Ahn et al.(2003)은 정지위성인 GMS-5 자료를 활용하며, 한반도 주변의 해무 탐지를 시도한 바 있다. 김희아와 최준태(2004), 하경자 외(2005)는 Erye et al.(1984)의 DCD(Dual Channel Difference) 방법을 GOES-9 자료에 적용하여 사례 분석을 통한 안개탐지 개선을 시도하였다. 이와 같이 기존 연구에서도 극궤도나 정지궤도 위성 자료들을 사용하여 특정 지역(예, 해양)에 제한된 사례에서 안개 탐지를 시도한 바 있으나,

두 종류 위성의 장기간 자료를 사용하여 한반도 지역에 대한 안개탐지 경계값을 제시하고, 검증하려는 시도는 이루어지지 않았다.

본 연구의 목적은 2년간 극궤도 위성자료(MODIS) 및 정지궤도 위성자료 (GOES-9)를 이용하여 한반도 10개 공항에 대한 안개탐지 경계값을 유도하고 검증하는데 있다. 여기서 가시 및 적외 채널에서 유도된 경계값은 주야간 및 계절에 따라 두 위성자료 간에 비교 분석되었으며, 각 채널에 대한 안개탐지 타당성은 복사전달모델(Santa Barbara Discrete Ordinate Radiative Transfer; SBDART, 유정문 외, 2005)의 수치실험을 통하여 조사되었다.

자료 및 방법

본 연구에서는 극궤도 및 정지궤도 위성 관측에서 안개탐지 경계값을 유도하고 비교분석하기 위하여, 수도권 지역에 대하여 2003년 1월~2004년 12월 기간에 극궤도 위성 Aqua/Terra의 MODIS 자료, 그리고 한반도 지역에 대하여 2003년 6월~2005년 5월 기간에 정지궤도 위성 GOES-9 자료를 사용하였다 (Table 1). 여기서 사용한 자료의 파장들은 기존 연구 (Erye et al., 1984; Bendix et al., 2003; Bendix et al., 2004)에서 안개탐지에 사용하였던 가시 영역 0.65 μm , 그리고 적외 영역 3.7 μm 및 11 μm 의 세 채널이다.

Table 1에서 보는 바와 같이, 공간 분해능이 다른 두 종류 위성관측 값들을 비교분석하고, 이들 간에 상관관계를 안개 및 청천 시에 구하기 위하여, 공간 분해능이 우수한 MODIS 자료를 GOES-9 분해능으로 속아내기(thinning)하였다. 수도권을 비롯한 한반도 지역에 대한 계절별 안개탐지 경계값을 산출하기 위하여, 이들 위성 자료와 거의 동시 관측된 전국 10개

Table 1. Intercomparison of spectral bands and spatial resolutions of three corresponding channels for GOES-9 and MODIS, used in this study. The observational periods of GOES-9 and MODIS are ~30 minutes and ~12 hours, respectively

Wavelength (μm)		Spatial resolution (km)	
GOES-9	MODIS	GOES-9	MODIS
0.55~0.75	0.62~0.67	1	0.25
3.8~4.0	3.66~3.84	4	1
10.2~11.2	10.78~11.28	4	1

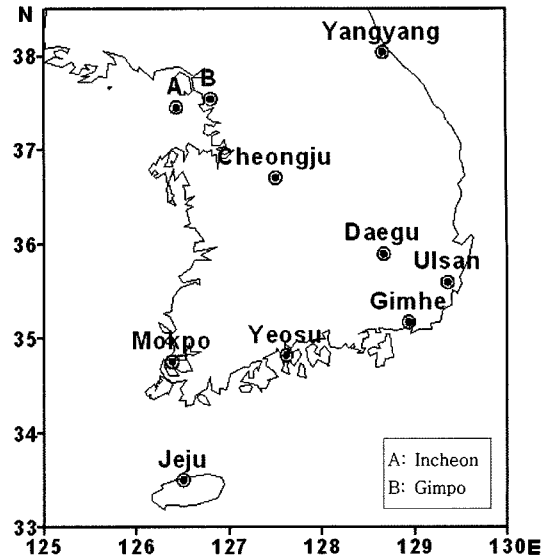


Fig. 1. Location of meteorological stations at ten airports in the Korean Peninsula.

공항 지상 관측소의 안개 및 운량 자료를 이용하였다(Fig. 1).

대략 30분 간격으로 관측 자료를 제공하는 GOES-9 경우에서 이들 공항에서 발생한 총 안개 횟수(693회) 중에 다음의 다섯 종류의 안개 발생 사례는 본 연구에서 제외되었다; i) 30분 이내의 안개 지속시간 (195회, 약 28%), ii) 여명(Twilight), 즉 일출/일몰 전후의 한 시간 이내(115회, 약 16.6%), iii) 강수 동반 안개(26회, 약 3.8%), iv) 안개층 위에 상층운이 존재하는 안개(179회, 약 25.8%), 그리고 v) 특정 경계값이 2 σ (표준편차)에서 벗어나는 특이 자료(21회, 약 3%). 이들 안개 경우는 현재 안개탐지 방법의 적용에 있어서 부적합 또는 GOES-9의 시공간 분해능의 제한으로 인하여 본 연구에서 포함하지 않았다.

안개층 위에 존재하는 상층운을 추정하기 위하여, 20 km \times 20 km 공간격자에서 운정 온도를 주로 반영하는 11 μm 밝기온도(T_{11})를 지상온도 기후값과 비교하였다. 다시 말해, T_{11} 값이 지상온도 기후값에 비하여 현저하게 낮을 때 안개층 위에 상층운이 존재한다고 가정하였으며(유정문 외, 2005의 Fig. 4), 계절별로 사용된 기준은 다음과 같다; 봄(-5 $^{\circ}\text{C}$), 여름(9 $^{\circ}\text{C}$), 가을(1 $^{\circ}\text{C}$), 그리고 겨울(-9 $^{\circ}\text{C}$). 이들 온도는 해당 지역의 계절별 기후값에 비하여 대략 11~17 K가 낮으므로, 이러한 기준은 20 km \times 20 km 면적에서 안개층 위에 존재하는 2~3 km 고도 이상의 상층운을

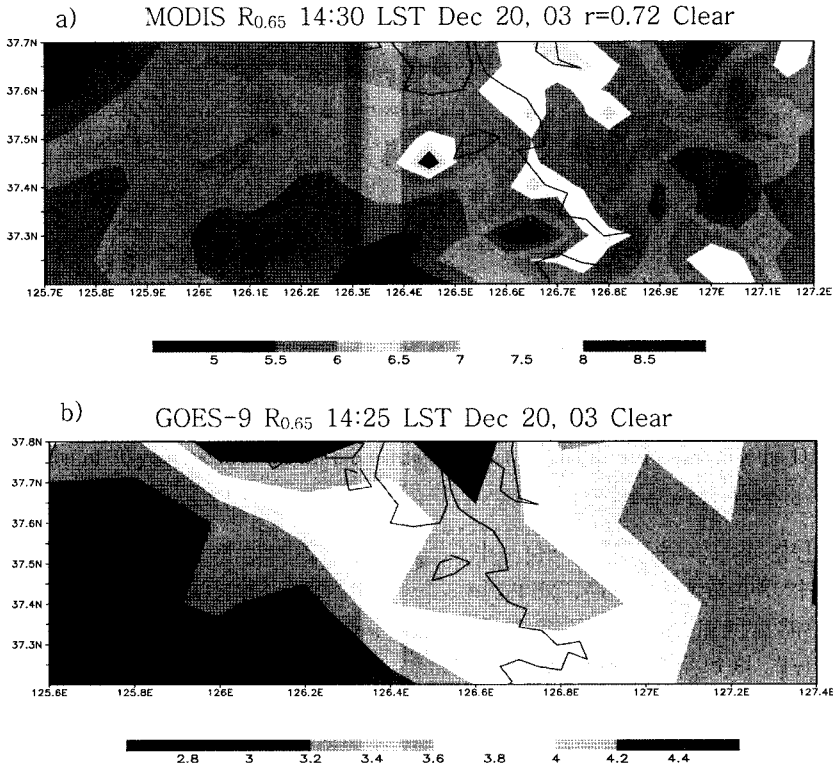


Fig. 2. Satellite-observed reflectance ($R_{0.65}$) values (unit; %) of MODIS and GOES-9 at $0.65 \mu\text{m}$, and the correlation in $R_{0.65}$ between them over the Seoul metropolitan area during daytime clear-sky on December 20, 2003 of a) MODIS 14:30 LST, and b) GOES-9 14:25 LST.

제거하는 효과를 갖는다. 여명 기간 부근에 발생한 안개 사례는 주야간 경계값 적용이 어려우므로 경계값 산출 자료에서 제거하였다. 한반도 10개 공항에서 발생한 안개 발생 횟수(총 693회) 중에서 위에서 언급한 제한된 상황을 제외하고, 본 연구의 경계값 유도에 사용된 사례는 157회로 총 횟수에 대하여 약 23%에 해당한다.

연구 결과

극궤도 및 정지궤도 위성의 계절별 안개 탐지 경계값

위성관측을 이용한 안개 탐지에 있어서 적외 및 가시 경계값은 자연적인 또는 인위적인 요소에 따라 변화할 수 있다. 경계값에 영향을 줄 수 있는 인위적인 요소로는 위성관측의 공간 분해능이 될 수 있다. 예를 들면, 중규모 또는 종관 규모의 안개 현상은 공간 분해능이 다른 MODIS와 GOES-9 관측(i.e. 복사 휘도 또는 반사율)에서 평활 효과(smoothing effect)

로 인하여 각각 다르게 나타난다(Table 1). 가시 반사를 경계값은 동일한 안개 상태 하에서도 자연적인 요소의 경우에 해당하는 태양 천정각과 방위각의 변화에 따라 계절별로 변한다.

Table 2는 수도권 지역에 대하여 2년 기간에 GOES-9과 MODIS의 위성관측 자료, 그리고 인천 및 김포 공항에서의 안개 및 청천 관측 자료를 기초로 유도된 계절별 안개탐지 경계값을 나타낸다. 여기서 안개와 청천 간의 구분을 최적화하는 가시 경계값($Th_{0.65}$)과 적외차 경계값($Th_{3.7-11}$)은 각각 $R_{0.65}$ 와 $T_{3.7-11}$ 관측값을 기초로 계절별로 유도되었다. 안개와 대비되는 청천(clear-sky)을 유도하기 위하여, 윤량이 1할 이하인 경우를 청천으로 분류하였다. 이 표에서 괄호 안의 값들은 같은 지역에 대하여 극궤도 위성 MODIS에서 산출된 안개탐지 경계값이며, 정지궤도 위성인 GOES-9 경계값과 비교하기 위하여 제시되었다. 본 연구에서는 먼저 수도권의 두 공항 자료를 기초로 경계값을 유도한 후에, 다른 8개 공항(양양, 청주, 대구, 울산, 김해, 목포, 여수, 제주)의 안개 발생

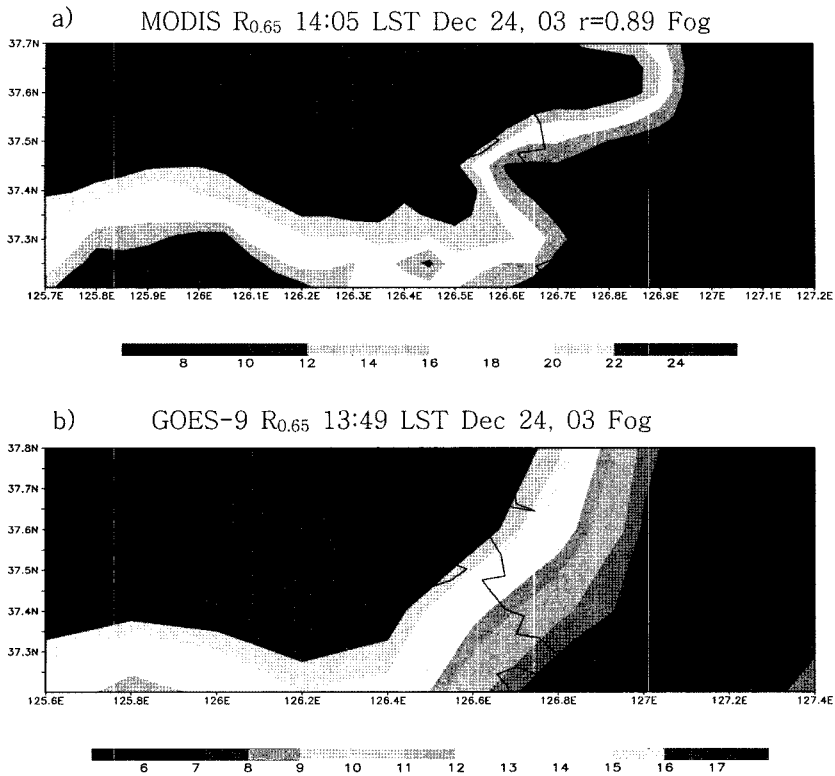


Fig. 3. Satellite-observed reflectance ($R_{0.65}$) values (unit; %) of MODIS and GOES-9 at $0.65 \mu\text{m}$, and the correlation in $R_{0.65}$ between them over the Seoul metropolitan area during daytime fog on December 24, 2003 of a) MODIS 14:05 LST, and b) GOES-9 13:49 LST.

시에도 적용하여 그 정확성을 검증하였다.

GOES-9(MODIS)에서 유도된 계절별 적외 경계값 ($Th_{3.7-11}$)은 봄의 주간에 7.25 K(23.5 K) 이었으며, 야간의 경우에는 -0.40 K(3.4 K)이었다(Table 2). GOES-9 (MODIS) 가시 반사율 경계값($Th_{0.65}$)은 10.0%(15%) 이었다. 여름의 경우는 주간에 적외경계값($Th_{0.65}$)이 8.15 K(21.0 K), 야간은 -0.65 K(3.6 K)이었으며, 가시 반사율 경계값은 10.70%(18%)이었다. 가을 주간에 GOES-9(MODIS)의 적외 경계값이 9.70 K(22.0 K), 야간은 -0.91 K(2.6 K)이었고, 가시 반사율 경계값이 9.40%(15.5%)이었다. 겨울 주간에 적외 경계값은 7.00 K(21.5 K), 야간의 적외 경계값은 -0.72 K(2.8 K) 이었다. 또한 겨울 주간에 가시반사율 경계값은 8.90% (11.0%)이었다.

요약하면, GOES-9(MODIS)의 계절별 적외 경계값은 주간에 7.25~9.70 K(21~23.5 K), 야간에 -0.91~-0.40 K (2.6~3.6 K)이었다(Table 2). 또한 청천에 비하여 안개 시에 $T_{3.7-11}$ 값은 주간에 상승하였고, 야간에는 하락하였다. 이러한 원인은 불투명한 수적에 대한 방출율은

$3.7 \mu\text{m}$ 근적외선 채널에서 0.8~0.9인 데 기인한다. 따라서 야간 안개 발생 시에 $3.7 \mu\text{m}$ 밝기온도는 주변 온도보다 낮게 된다(Anthis and Cracknell, 1999; Eyre et al., 1984). 이러한 두 채널 간의 밝기온도 차이(또는 적외 경계값; $T_{3.7-11}$)는 기존의 여러 연구에서 안개 탐지에 이용되어 왔다(e.g., 김영화 외, 1997; MSG, 2003). 주간에만 사용되는 가시 반사율 경계값은 8.9~10.7% (11~18%)으로 청천시의 바다 표면 반사율 3~10%(Moran and Morgan, 1994)에 비하여 대체로 큰 편이다.

이와 같이 안개 탐지를 위한 적외 및 가시 경계값 들은 주야간, 계절별로 그리고 위성 공간 분해능에 따라 차이를 보였다. 그러나 본 연구에서 유도된 계절별 안개 탐지 경계값은 2년 기간의 관측 자료에서 유도되었음에도 불구하고, 통계 표본 수의 부족으로 불안정한 편이다. GOES-9과 MODIS의 안개 관측 자료는 야간에 비하여 주간에 부족하였으며, 이러한 경향이 특히 가을철 주간에 뚜렷하였다. 따라서 좀더 안정적인 계절별 안개탐지 경계값을 유도하기 위해서

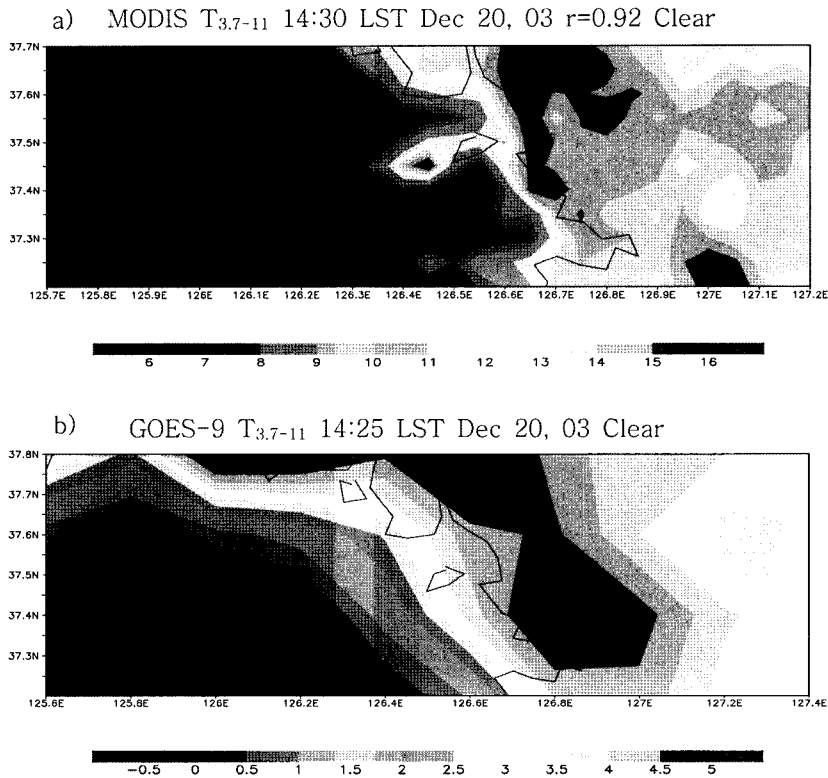


Fig. 4. Same as in Fig. 2 except for brightness temperature difference between 3.7 μm and 11 μm ($T_{3.7-11}$). The unit of $T_{3.7-11}$ is K.

는 장기간의 자료 사용이 요구된다.

MODIS에 비하여 낮은 공간 분해능으로 인하여 GOES-9의 적외 및 가시 경계값은 주간과 야간 모두 작았다(Table 2). 두 종류 위성 간에 이러한 경계값 차이는 공간 분해능 차이에 의한 평활 효과 외에 각 채널 파장대 차이(Table 1)와 검정(calibration) 오차로 인하여 나타나는 것으로 추정되었다. 특히 이러한 파장대 및 검정에 의한 차이는 11 μm에 비하여 3.7 μm에서 상대적으로 큰 것으로 추정되었다(Tables 3-4). 평활효과, 파장대 차이, 가능한 검정 오차, 그리고 안개 입자에 대한 3.7 μm 방출율(0.8-0.9) 특성 등의 복합적인 원인으로 인하여, 수도권 지역에 대한 두 위성 간의 관측값 차이의 범위는 3.7 μm에서 3-14 K로 11 μm 경우(1-2 K)에 비하여 뚜렷하게 컸다.

극궤도와 정지궤도 위성 관측 간의 상관

안개 탐지를 위한 적외 및 가시 계절별 경계값들의 산출에 있어서, 수도권 지역에 대한 MODIS와 GOES-9 위성관측 자료를 모두 사용하였다. 두 종류 위성 간에 경계값 차이를 비교 분석하기 위하여, 같

은 관측 시간 및 지역(수도권)의 조건 하에서 공간적인 상관관을 구하였다. 이 지역에서 각 격자는 GOES-9에서 20 km, MODIS에서는 5 km 간격으로 평균되었다. 따라서 두 위성 관측값 간에 상관관을 구하기 위해서는 MODIS 자료를 20 km 격자 간격으로 속아내기 한 후에 MODIS와 GOES-9자료와의 상관관을 구하였다. 이러한 상관관은 인천국제공항 관측소에서 안개, 청천으로 분류한 결과를 기초로 안개 또는 청천 시에 구하였다. 여기서 청천은 윤량이 1할(8할 기준) 이하 경우를 의미한다. 본 연구에서는 두 종류 위성 관측 간의 상관관을 주간 청천, 주간 안개, 야간 청천, 야간 안개의 한 가지씩 대표적인 사례에 대하여 제시하였다. 이들 상관값은 주간 경우에 $R_{0.65}$, $T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$ 의 네 종류 변수에 대하여, 그리고 야간에는 $R_{0.65}$ 를 제외한 세 종류 변수($T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$)에 대하여 분석되었다.

두 위성이 거의 동시 관측한 자료에 대해서 상관관을 구한 결과, 주간 청천 시에 MODIS(2003년 12월 20일 14:30 LST)와 GOES-9(2003년 12월 20일 14:25 LST) 사이에 가시채널 반사율($R_{0.65}$)의 상관관

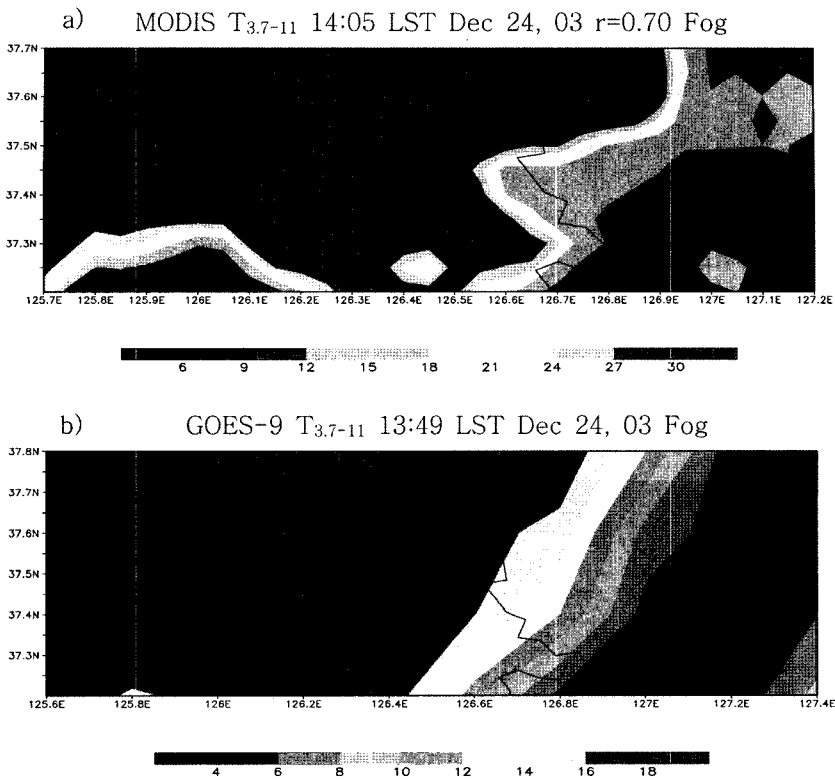


Fig. 5. Same as in Fig. 3 except for brightness temperature difference between 3.7 μm and 11 μm ($T_{3.7-11}$). The unit of $T_{3.7-11}$ is K.

$r=0.72$ 이었다(Fig. 2). 같은 시각에 $T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$ 에 대한 두 위성관측 간의 상관은 각각 0.72, 0.88, 0.92로 모두 유의적이었다(Fig. 4; $T_{3.7}$ 과 T_{11} 에 대하여는 보이지 않음).

주간 안개 시에 MODIS(2003년 12월 24일 14:05 LST)와 GOES-9(2003년 12월 24일 13:49 LST) 간의 가시 반사율의 상관은 $r=0.89$ 이었다(Fig. 3). 같은 시각에 $T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$ 에 대한 두 위성관측 간의 상관은 각각 0.54, 0.90, 0.70으로 모두 유의적이었다(Fig. 5; $T_{3.7}$ 과 T_{11} 에 대하여는 보이지 않음).

야간 청천의 경우에 MODIS 위성관측은 2004년 1월 4일 02:40 LST, 그리고 GOES-9는 2004년 1월 4일 02:25 LST의 자료이다. $T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$ 의 경우에 각각의 상관은 0.91, 0.91, 0.51로 유의적이었다(Fig. 6; $T_{3.7}$ 과 T_{11} 에 대하여는 보이지 않음). 야간 안개 시에 MODIS(2004년 1월 7일 03:10 LST)와 GOES-9(2004년 1월 7일 03:01 LST) 간의 $T_{3.7}$, T_{11} , $T_{3.7-11}$ 에 대한 상관은 각각 0.83, 0.88, 0.57로 유의적이었다(Fig. 7; $T_{3.7}$ 과 T_{11} 에 대하여는 보이지 않음).

한편, 인천공항에 대한 MODIS $T_{3.7-11}$ 관측값은 주

간 청천(Fig. 4a)시 11 K, 그리고 주간 안개시(Fig. 5a) 29.5 K이었다. 이 때의 MODIS 겨울철 적외 경계값(Tables 2-3)은 21.5 K로 주간에 안개와 청천 구분에 적절하였다.

야간 청천과 안개의 사례에 대한 안개탐지 경계값의 검증에는 각각 2004년 1월 4일과 2004년 1월 7일의 겨울철 자료가 사용되었다(Figs. 6-7). GOES-9 $T_{3.7-11}$ 관측값은 인천 공항에서 야간 청천(Fig. 6b) 시에 -0.4 K, 안개(Fig. 7b) 시에 -5.0 K이었다. GOES-9 겨울철 적외 경계값(Tables 2 and 4)은 야간의 경우 -0.72 K로 야간에 안개와 청천 구분에 적절하였다.

MODIS $T_{3.7-11}$ 값에서도 동일한 날에 인천공항에서 야간 청천의 경우(Fig. 6a)에 4.3 K, 그리고 야간 안개(Fig. 7b) 경우에는 -1.5 K이었다. 이때의 MODIS에서 산출된 겨울철 경계값(Tables 2 and 4)은 2.8 K로 안개와 청천 구분에 적절하였다.

안개 탐지에 대한 검증

수도권 지역의 인천국제공항 및 김포공항의 GOES-9 위성관측 자료에서 유도된 안개탐지 계절별 경계값

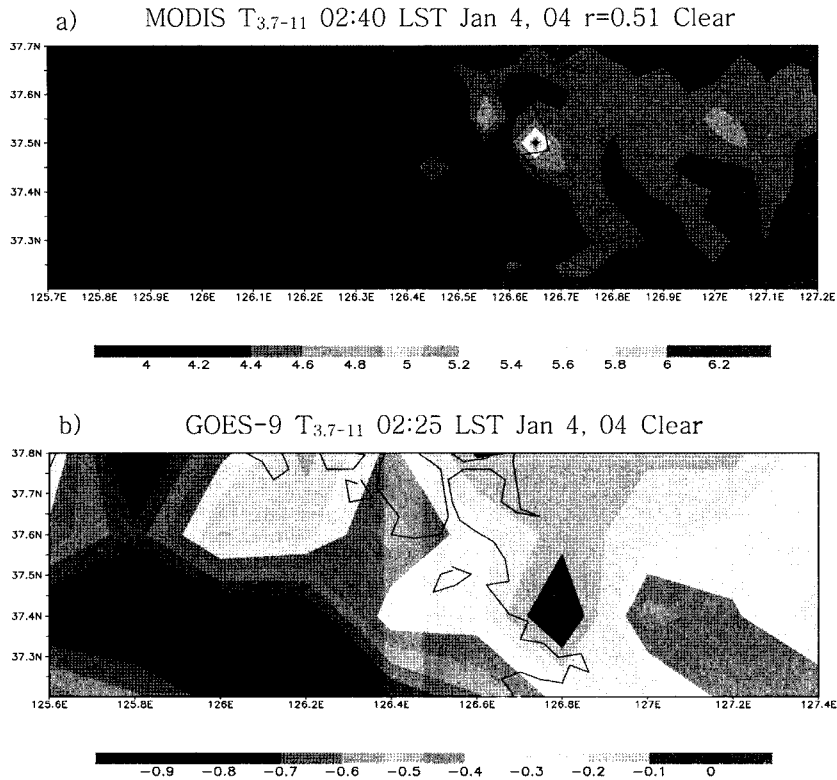


Fig. 6. Satellite-observed brightness temperature difference between 3.7 μm and 11 μm ($T_{3.7-11}$) of MODIS and GOES-9, and the correlation in $T_{3.7-11}$ between them over the Seoul metropolitan area during nighttime clear-sky on January 4, 2004 of a) MODIS 02:40 LST, and b) GOES-9 02:25 LST. The unit of $T_{3.7-11}$ is K.

을 이들 두 공항을 포함한 한반도 10개 공항(Fig. 1)에 적용하여, 경계값에 대한 통계적인 검증을 실시하였다. 본 연구에서는 Bendix et al.(2004)에서 사용된

바 있는 검증을 실시하였으며, 이에 대한 세부적인 설명을 Appendix에 제시하였다(Table A1). 여기서 위성에서의 안개 탐지의 정확성 여부를 반영하는 세

Table 2. Seasonal average values of the GOES-9 brightness temperature difference ($T_{3.7-11}$) between 3.75 μm and 11 μm , and the $T_{3.7-11}$ threshold ($Th_{3.7-11}$) values for fog detection during daytime fog (DF), daytime clear (DC), nighttime clear (NC), and nighttime fog (NF) over two 20 km \times 20 km areas of the Incheon (126.43 E, 37.47 N) and Kimpo (126.48 E, 37.33 N) airports for the period from June 2003 to May 2005. The values of GOES-9 reflectance at 0.65 μm ($R_{0.65}$) and the $R_{0.65}$ threshold ($Th_{0.65}$) are additionally used for daytime fog detection. The number (N) of observations and their standard deviations (σ) are also given. The values in parentheses stand for the MODIS thresholds. The units of $R_{0.65}$ and $T_{3.7-11}$ are % and K, respectively.

	DF		DC		DF	$Th_{3.7-11}$	DC		NC		$Th_{3.7-11}$	NF	
	$R_{0.65} \pm \sigma$	$Th_{0.65}$	$R_{0.65} \pm \sigma$	$T_{3.7-11} \pm \sigma$			N	$T_{3.7-11} \pm \sigma$	N	$T_{3.7-11} \pm \sigma$		N	$T_{3.7-11} \pm \sigma$
Spring	33.72 \pm 13.90	10.0 (15.0)	4.31 \pm 1.69	22.73 \pm 4.67	4	7.25 (23.5)	2.63 \pm 2.64	16	0.03 \pm 0.33	18	-0.40 (3.4)	-2.25 \pm 2.42	11
Summer	33.36 \pm 11.85	10.70 (18.0)	6.30 \pm 1.47	14.06 \pm 2.80	3	8.15 (21.0)	4.18 \pm 1.53	10	1.02 \pm 0.81	18	-0.65 (3.6)	-1.61 \pm 0.36	6
Fall	9.50 \pm 0.00	9.40 (15.5)	8.03 \pm 2.76	11.65 \pm 0	1	9.70 (22.0)	4.70 \pm 2.54	7	-0.35 \pm 0.76	18	-0.91 (2.6)	-1.83 \pm 2.07	20
Winter	14.81 \pm 4.19	8.90 (11.0)	4.57 \pm 1.21	16.15 \pm 3.41	4	7.00 (21.5)	3.31 \pm 1.53	9	0.26 \pm 2.81	10	-0.72 (2.8)	-2.55 \pm 1.87	12
Annual	25.31 \pm 14.24	9.98 (14.9)	5.46 \pm 2.26	17.45 \pm 5.35	12	8.0 (22.0)	3.60 \pm 1.90	42	0.24 \pm 1.08	64	-0.67 (3.1)	-2.07 \pm 2.02	49

Table 3. The satellite observations and correlation in $R_{0.65}$, brightness temperature at $3.7 \mu\text{m}$ ($T_{3.7}$), brightness temperature at $11 \mu\text{m}$ (T_{11}), $T_{3.7-11}$ between GOES-9 and MODIS over the Incheon International Airport during the daytime periods of clear-sky on December 20, 2003 (MODIS 14:30 LST; GOES-9 14:25 LST) and fog on December 24, 2003 (MODIS 14:05 LST; GOES-9 13:49 LST). The values in parentheses indicate the range of either GOES-9 or MODIS observations over the Seoul metropolitan area (SMA; 125.7-127.2 E, 37.2-37.7 N). The units of $T_{3.7}$, T_{11} and $T_{3.7-11}$ are K, and the unit of $R_{0.65}$ is %

	Correlation MODIS & GOES		GOES-9			MODIS		
	Clear	Fog	Clear	Threshold	Fog	Clear	Threshold	Fog
$R_{0.65}$	0.7	0.9	3.8 (2.8~4.4)	9.0	16.0 (6.0~17.0)	6.8 (5.0~8.5)	11.0	23.0 (8.0~24.0)
$T_{3.7}$	0.7	0.5	3.8 (0.0~5.5)		16.0 (8.0~18.0)	10.5 (5.0~16.0)		30.0 (12.0~32.0)
T_{11}	0.9	0.9	0.5 (-3.0~3.0)		-1.0 (-2.0~6.0)	-0.5 (-3.0~4.0)		0.5 (-2.0~7.0)
$T_{3.7-11}$	0.9	0.7	3.5 (-0.5~5.0)	7.00	17.0 (4.0~18.0)	11.0 (6.0~16.0)	21.5	29.5 (6.0~30.0)

Table 4. Same as in Table 3 except for $R_{0.65}$ and the nighttime periods of clear-sky on January 4, 2004 (MODIS 02:40 LST; GOES-9 02:25 LST), and fog on January 7, 2004 (MODIS 03:10 LST; GOES-9 03:01 LST)

	Correlation MODIS & GOES		GOES-9			MODIS		
	Clear	Fog	Clear	Threshold	Fog	Clear	Threshold	Fog
$T_{3.7}$	0.9	0.8	-4.5 (-8~1)		-6.0 (-8~1)	1.8 (-3~8)		-2.5 (-5~6)
T_{11}	0.9	0.9	-4.1 (-8~2)		-1.0 (-4~2)	-2.5 (-7~4)		-1.0 (-5~3)
$T_{3.7-11}$	0.5	0.6	-0.4 (-0.9~0)	-0.72	-5.0 (-5~0.5)	4.3 (4~6.2)	2.8	-1.5 (-2~4)

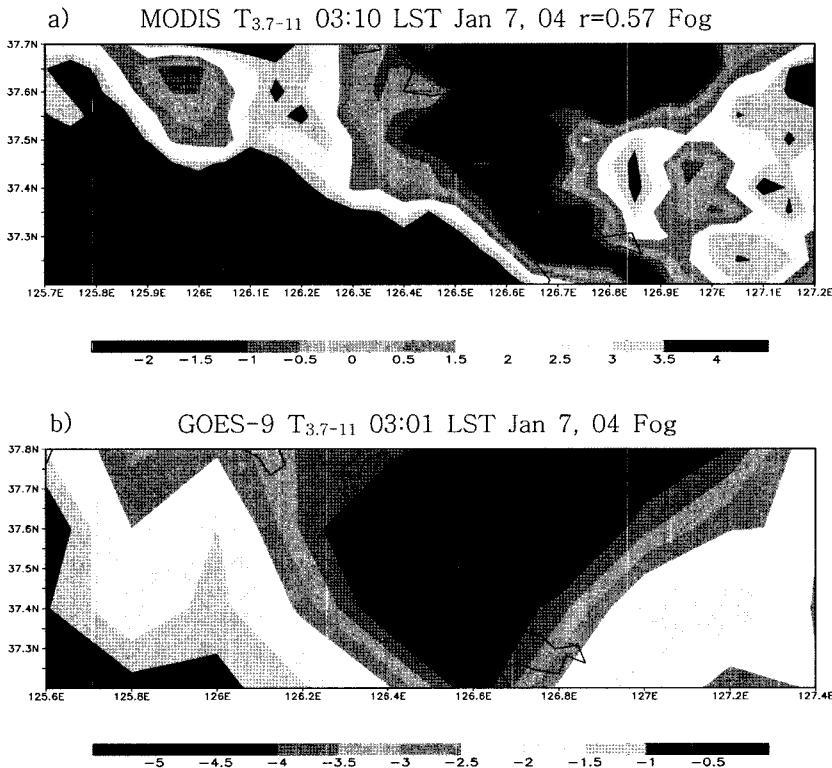


Fig. 7. Satellite-observed brightness temperature difference between $3.7 \mu\text{m}$ and $11 \mu\text{m}$ ($T_{3.7-11}$) of MODIS and GOES-9, and the correlation in $T_{3.7-11}$ between them over the Seoul metropolitan area during nighttime fog on January 7, 2004 of a) MODIS 03:10 LST, and b) GOES-9 03:01 LST. The unit of $T_{3.7-11}$ is K. The unit of $T_{3.7-11}$ is K.

Table 5. Contingency tables of three kind of GOES-9 data (Day time $R_{0.65}$, Day time $T_{3.7-11}$, Night time $T_{3.7-11}$), and verification scores for fog detection over the ten airport areas (20 km × 20 km) of the Korean Peninsula during the period from June 2003 to May 2005. Here the ‘SYNOP’ in table means the observation at ground stations, and in this study is considered as a ground truth

Day	GOES ($R_{0.65}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.11
		Fog	33	4	POD: 0.42
		No Fog	46	142	CSI: 0.40
Day	GOES ($T_{3.7-11}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.10
		Fog	35	4	POD: 0.44
		No Fog	44	142	CSI: 0.42
Night	GOES ($T_{3.7-11}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.09
		Fog	58	6	POD: 0.74
		No Fog	20	97	CSI: 0.69

Table 6. Same as in Table 5 except for nine airports, excluding the Cheongju airport

Day	GOES ($R_{0.65}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.08
		Fog	33	3	POD: 0.62
		No Fog	20	117	CSI: 0.59
Day	GOES ($T_{3.7-11}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.09
		Fog	31	3	POD: 0.58
		No Fog	22	117	CSI: 0.55
Night	GOES ($T_{3.7-11}$)		SYNOP		Verification Scores
			Fog	No Fog	FAR: 0.10
		Fog	54	6	POD: 0.75
		No Fog	18	92	CSI: 0.69

개의 확률 지수는 다음과 같다; False Alarm Ratio (FAR), Probability of Detection(POD) 그리고 Critical Success Index(CSI). FAR, POD, CSI는 각각 위성관측 안개 경보 중에 잘못된 안개 경보, 위성관측 안개 경보의 적중, 그리고 위성관측 및 지상관측 안개 발생 중에 위성관측 안개 경보의 적중에 대한 확률을 나타낸다. 한반도 10개 공항 지역에 대한 통합적인 검증에서 주간(의 가시($R_{0.65}$) 및 적외($T_{3.7-11}$) 경계값은 FAR(~10%), 그리고 POD 및 CSI(~40%)의 확률을 보였다(Table 5). 다시 말해, 이들 경계값의 정확성은 안개탐지에 있어서 대략 40 %인 것으로 나타났다.

위의 검증을 각 공항 지역에 대해 실시한 결과, 청주 공항에서의 정확도가 가장 낮았으며, 이 지역에 대한 세 종류 확률 지수는 다음과 같았다; $R_{0.65}$

(FAR = 1, POD = 0, CSI = 0), 주간 $T_{3.7-11}$ (FAR = 0, POD = 0.13, CSI = 0.13), 그리고 야간 $T_{3.7-11}$ (FAR = 0, POD = 0.67, CSI = 0.67). 따라서 청주 공항 지역에 결과는 특히 주간 경계값($R_{0.65}$ 와 $T_{3.7-11}$)의 부정확함을 보여주었다.

본 연구에서는 청주공항을 배제한 9개 공항에 대하여 통합적인 검증을 실시한 결과, 안개탐지는 주간에 ~60%, 그리고 야간에 ~70%의 정확성을 보였다 (Table 6).

수치 실험; 안개 탐지 채널의 민감도

Fig. 8는 청천(clear-sky), 광학적으로 두꺼운 안개(Thick Fog), 얇은 안개(Thin Fog)의 세 종류 기상 상태에 대하여 각각 0.3~4 μm 파장 범위에서의 복사

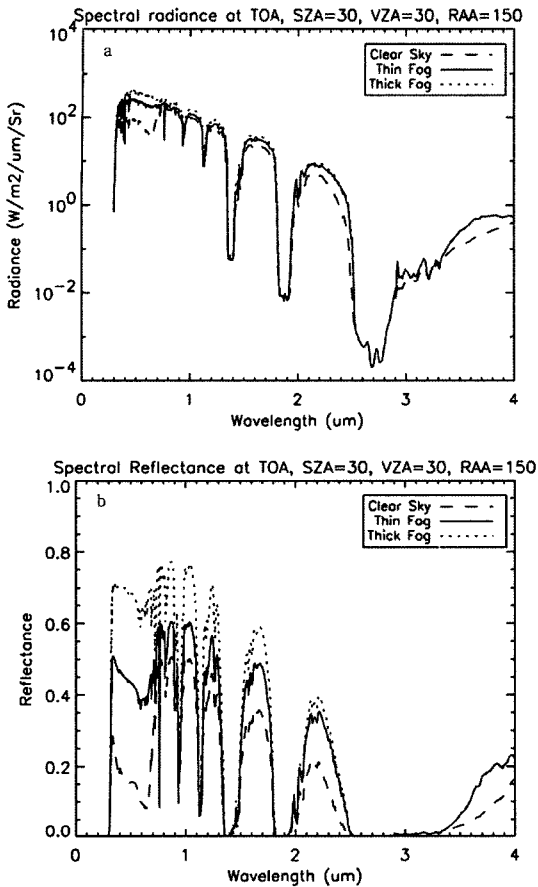


Fig. 8. From theoretical simulation of the SBDART, short-wave (0.3~4 μm) spectral values of a) radiance and b) reflectance at top of atmosphere under three different meteorological conditions of clear sky, thin fog (fog optical thickness, COT = 10), and thick fog (COT = 30). Here a sun zenith angle (SZA) is 30°, a viewing zenith angle (VZA) is 30°, and an azimuth angle (RAA) is 150°.

휘도와 반사율에 대해서 수치실험한 결과이다. 이러한 복사전달모델(SBDART; Ricchiuzzi et al., 1998)의 수치실험을 통하여 GOES-9 또는 MODIS 안개탐지 채널들(0.65, 3.7, 11 μm)의 타당성과 광학적 특성을 알 수 있다. SBDART 모델에 대한 설명은 유정문 외(2005)에서 자세히 기술된 바 있다. 이 실험의 초기 조건으로 태양천정각(Sun Zenith Angle; SZA)은 30°, 방위각(Azimuth Angle; RAA)은 150°, 그리고 관측각(Viewing Zenith Angle; VZA)은 30°로 설정하였다. 본 연구에서는 이 파장 영역 중에 MODIS, GOES-9, 그리고 장차 COMS에 사용될, 위의 세 채널에 대한 반사율 또는 복사휘도 값을 강조하여 분석하였다.

수치 실험에서 0.65 μm 반사율과 복사휘도 값은 세 경우(청천, 짙은 안개, 얇은 안개)를 각각 구분하였다(Fig. 8). 그러나 이러한 가시채널 반사율 값은 태양 천정각에 크게 의존함으로 이에 대한 보정(또는 정규화) 없이는 안개탐지 경계값으로 사용되기 어렵다. 한편 3.7 μm에서의 근적외 채널값은 안개와 청천 현상 간은 구분하였으나, 광학적으로 두꺼운 안개와 얇은 안개를 구분하지 못하였다. 따라서 이 채널과 11 μm와의 차를 이용해서 안개 탐지에 사용될 필요가 있다. 이러한 적외차를 이용한 경계값은 광학적 두께가 16 이하인 안개를 탐지하는데 유용하다(유정문 외, 2005의 Fig. 3).

결론

2003년 6월부터 2005년 5월까지 기간에 극궤도 위성(MODIS)과 정지궤도 위성 GOES-9 자료를 이용하여 안개 탐지를 위한 적외(T_{3.7-11}) 및 가시 반사율(R_{0.65}) 계절별 경계값을 유도하고, 전국 10개 공항에 대해서 경계값 검증을 실시하였다. 또한 SBDART 복사전달모델의 수치실험을 통하여 안개에 대한 적외 및 가시 채널의 민감도를 조사하였다.

GOES-9와 MODIS에서 유도된 계절별 적외 경계값은 주간에 7.25~9.70 K, MODIS에서 21~23.5 K, 그리고 야간에는 -0.91~0.40 K, MODIS 2.6~3.6 K이었다. MODIS에 비하여 낮은 공간 분해능으로 인하여 GOES-9의 적외 및 가시 경계값은 주간과 야간 모두 작았다. 두 종류 위성 간에 이러한 경계값 차이는 공간 분해능 차이에 의한 평활 효과 외에 각 채널 파장대 차이와 검정(calibration) 오차로 인하여 나타나는 것으로 추정되었다. 특히 이러한 파장대 및 검정에 의한 차이는 11 μm에 비하여 3.7 μm에서 상대적으로 큰 것으로 추정되었다. 평활효과, 파장대 차이, 가능한 검정 오차, 그리고 안개 입자에 대한 3.7 μm 방출율(0.8-0.9) 특성 등의 복합적인 원인으로 인하여 수도권 지역에 대한 두 위성 간의 관측값 차이의 범위는 3.7 μm에서 3-14 K로 11 μm 경우(1-2 K)에 비하여 현저하게 컸다. 따라서 특정 위성 결측시에 다른 위성 자료를 보완하여 사용하기 위하여는 장차 연구에서 이미 언급된 세 종류 원인을 정량적으로 규명할 필요가 있다.

MODIS와 GOES-9의 수도권 지역에 대한 동시 관측 자료에서 MODIS와 GOES간의 상관은 주간 청천

사 사

이 연구는 기상청의 통신해양기상위성(COMS) 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 그동안 위성자료 수집을 도와준 이화여자대학교 과학교육과 유희림, 이주은에게 감사를 표한다. 좋은 지적을 해주신 심사위원들께도 감사드립니다.

참고문헌

에 $T_{3.7-11}$ 에서 0.92, $R_{0.65}$ 에서는 0.89이었고, 주간 안개 시에는 $T_{3.7-11}$ 에서 0.70, $R_{0.65}$ 에서는 0.72이었다. 두 종류 위성 간의 상관은 야간 청천 시에 $T_{3.7-11}$ 에서 0.51이었고, 야간 안개 시에 $T_{3.7-11}$ 에서는 0.57이었다. 이들 상관값은 0.5 이상으로 유의적이므로, 두 종류의 위성자료는 단일 위성의 결측 시에 상호 보완할 수 있다고 판단되었다.

안개탐지 대상 지역을 제주 지역으로 확장하여, 수도권 지역에서 유도된 적외 경계값을 적용해 본 결과, 경계값들은 대체로 적절하였다. 종합적으로, GOES-9에서 유도된 안개탐지 경계값은 청주 공항을 제외한 한반도 9개 공항의 안개 및 청천 시에 대한 통계적인 검증(FAR, POD, CSI)에서 주간에 약 60%, 그리고 야간에는 약 70%의 정확도를 보였다. 그러나 정확도는 여명, 안개층 위에 상층운 존재, 강수 동반, 그리고 짧은 지속시간 하에서 발생하는 안개에 대하여 낮아졌다.

안개 탐지에 사용되는 세 채널의 광학적인 특성을 조사하기 위하여, 파장에 따른 복사휘도 및 반사율의 민감도가 수치실험을 통하여 세 종류 기상 상태(청천, 엷은 안개, 짙은 안개) 하에서 분석되었다. 이 실험에서 태양 천정각에 민감한 $0.65 \mu\text{m}$ 반사율은 세 종류의 기상 상태를 적절히 구분하였다. 한편, $3.7 \mu\text{m}$ 와 $11 \mu\text{m}$ 적외 채널들은 안개와 청천 현상을 구분하였으나, 광학적으로 두꺼운 안개와 얇은 안개를 구분하지 못하였다. 이들 두 채널을 이용한 적외 경계값은 광학 적 두께가 16 이하인 안개를 탐지하는데 유용하였다.

COMS 자료처리시스템의 목적처럼 이 결과를 한반도 전역으로 확장하여 적용하기 위해서는 좀 더 광범위한 지역을 대상으로 장기간의 자료에서 경계값을 산출·보정할 필요가 있다고 사료된다. 특히 가을철 주간 안개 자료의 표본은 부족하므로 보완될 필요가 있다. 또한, MODIS와 GOES-9에서 관측된 각각 2년 동안의 자료를 지상관측소의 자료와 비교하여 분석한 결과, 상층운 효과와 태양 천정각 효과가 안개 탐지에 있어서 제거되어야 하며, 수치실험 결과가 이를 뒷받침한다. 이 두 변수로 인한 안개 탐지 오차는 장차의 연구에서 복사전달모델 수치실험으로부터 유도된 조건표(look-up table) 활용을 통하여 부분적으로 제거될 수 있다고 생각한다. 또한 두 위성의 자료 분석을 통해 산출된 계절별 경계값은 여명 부근에는 적절하지 않는 것으로 나타났으므로 이 기간에 대한 새로운 안개 알고리즘이 개발되어야 한다.

기상연구소, 1999, GMS-5 자료를 이용한 해무탐지 연구(II), 73 p.
 기상연구소, 2001, 위성자료 처리기술(II), 40 p.
 기상연구소, 2005, 통신해양기상위성 기상 자료 처리 시스템(II), 409-431.
 김영아, 서장원, 윤용훈, 김지호, 2003, 시정 산출 알고리즘 및 안개 예측 모델을 이용한 안개 사례연구. 대기, 13(1), 432-435.
 김영화, 김진철, 김금란, 이희훈, 이미자, 1997, NOAA/AVHRR 적외차 자료를 이용한 야간 안개 및 하층운 탐지. 다미연구지, 14(1), 15-19.
 김희아, 최준태, 2004, 지상기온자료를 이용한 GOES-9 안개 분석과정 개선. 기상학회 봄철학술발표회, 158-159.
 변희룡, 이동규, 이화은, 1997, 동해 및 그 주변에서 발생하는 해무의 특성과 예측 가능성 조사. 한국기상학회지, 33(1), 41-62.
 유정문, 정명재, 윤미영, 2005, 위성관측(MODIS)과 수치실험에서 조사된 안개의 광학적 성질; 야간 안개 탐지에서의 상층운 효과. 한국기상학회지, 41(4), 639-650.
 임헌호, 이화은, 이순환, 2005, 인천국제공항에서 발생한 안개의 특성분석. 한국기상학회지, 41(6), 1111-1123.
 하경자, 김재환, 임규호, 허기영, 이현진, 권하택, 윤경숙, 하종성, 민세윤, Ren Baohua, 2005, 위성영상을 활용한 연안 안개 및 에어로솔 모니터링 기술 개발. 과학기술부.
 Ahn, M.H., Sohn, E.H., and Hwang, B.J., 2003, A new algorithm for fog/stratus detection using GMS-5 IR data. Advances in Atmospheric Sciences, 20(6), 899-913.
 Anthis, A.I., and Cracknell, A.P., 1999, Use of satellite images for fog detection (AVHRR) and forecast of fog dissipation (METEOSAT) over lowland Thessalia, Hellas. International Journal of Remote Sensing, 20(6), 1107-1124.
 Bendix, J., 2002, A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas. Atmospheric Research, 64, 3-18.
 Bendix, J., Thies, B., and Cermak, J., 2003, Fog detection with TERRA-MODIS and MSG-SEVIRI. Proceedings, 2003 Meteorological Satellite Data Users' Conference, Weimar, Germany, European Organization for the

- Exploitation of Meteorological Satellites, 429-435.
- Bendix, J., Cermak, J., and Thies, B., 2004, New perspectives in remote sensing of fog and low stratus-TERRA/AQUA-MODIS and MSG. Proceedings, The third international conference on fog. Fog Collection and Dew, Cape Town, South Africa, University of Pretoria, G2.1-G2.4.
- Cermak, J., Thies, B., and Bendix, J., 2004, A new approach to fog detection using SEVIRI and MODIS data. Proceedings, The 2004 EUMETSAT meteorological satellite conference, 130-136.
- Ellrod, G.P., 1995, Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Weather Forecasting*, 10, 606-619.
- Eyre, J.R., Brownscombe, J.L., and Allam, R.J., 1984, Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteorological Magazine*, 113, 266-271.
- Hess, W.N., 1974, *Weather and Climate Modification*. John Wiley and Sons, New York, USA, 858 p.
- Maruyama, S., Mori, Y., and Sakai, S., 2004, Nongray radiative heat transfer analysis in the anisotropic scattering fog layer subjected to solar irradiation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 83, 361-375.
- Moran, J.M., and Morgan, M.D., 1994, *Meteorology* (4th ed.). Macmillan College Publishing Company, New York, USA, 49-50.
- MSG, 2003, Meteorological products extraction facility algorithm specification document. Technical Report, 62-78.
- Park, H.S., Kim, Y.H., Suh, A.S., and Lee, H.H., 1997, Detection of fog and the low stratus cloud at night using derived dual channel difference of NOAA/AVHRR data, Available on-line from <http://gisdevelopment.net/aars/acrs/>
- Ricchiuzzi, P., Yang, S., Gautier, C., and Sowle, D., 1998, SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Underwood, S.J., Ellrod, G.P., and Kuhnert, A.L., 2004, A multiple-case analysis of nocturnal radiation-fog development in the central valley of California utilizing the GOES nighttime fog product. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 297-310.
- Yoo, J.-M., Kim, Y.-M., Ahn, M.-H., Kim, Y.-S., and Chung, C.-Y., 2005, Characteristics of MODIS satellite data during fog occurrence near the Incheon International Airport. *The Journal of the Korean Earth Science Society*, 26(2), 149-159.

2006년 6월 26일 접수
2006년 7월 21일 수정원고 접수
2006년 7월 26일 채택

Appendix

Table A1에서 FAR은 위성 안개탐지에 의한 안개 경보 중에 (지상 관측에 기초할 때) 잘못된 안개 경보 확률을 나타낸다. POD는 (지상 관측에 기초할 때) 안개 발생 시에 위성 안개탐지가 적중할 확률을 나타낸다. CSI는 위성에서 예측되거나 지상에서 관측된 안개 발생 중에서 위성관측 안개탐지가 정확하게 예측될 확률을 나타낸다.

Table A1. Contingency table for verification of fog detection

		SYNOP	
		FOG	No Fog
GOES-9	Fog	YY	YN
	No Fog	NY	NN

$$\text{False Alarm Ratio: FAR} = \frac{YN}{YY+YN}$$

$$\text{Probability of Detection: POD} = \frac{YY}{YY+NY}$$

$$\text{Critical Success Index: CSI} = \frac{YY}{YY+YN+NY}$$