

지표면온도 알고리즘 기술 분석서 Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33



지표면온도 (LST) 알고리즘 기술 분석서 (LST-v5.0)

NMSC/SCI/ATBD/LST, Issue 1, rev.0 2012.12.12



지표면온도

알고리즘 기술 분석서

Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33

REPORT SIGNATURE TABLE

Function	Name	Signature	Date
Prepared by	서명석		2012.12.21
Reviewed by			
Authorised by			



지표면온도 Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33

DOCUMENT CHANGE RECORD

Version	Date	Pages	Changes
		0 10	- COMS 발사이전에 MTSAT-1R을 사용하여 알고리즘을 개발
		8-12	한 것을 COMS자료를 사용하여 알고리즘 개발.
			- 지표면온도 산출을 위한 복사전달모델 모의 실험설계를 수정
		0.11	하였음. (개선된 TIGR자료 사용, 위성천정각 50도 이내, 기온
		9-11	감률 및 방출율 조건 개선).
			- 지표면온도 산출 식이 변경됨.
		7 11	- 지표면온도 산출 식에서 휘도온도차 제곱, 방출율 차 항까지
		7, 11	고려.
		14-16	- 개선된 산출식으로 추정한 LST의 개선정도의 영향을 평가함.
Ver. 5	5 2012.12.21 23		- MODIS LST와 검증 시 시공간 일치 방법 변경 (기존: 10분이
		23	내 MODIS LST의 주변화소 평균-> 변경: 5분이내 MODIS LST
			주변화소가 모두 육지, 맑을 경우 평균)
	23-25	23-25	- 개선된 산출식의 검증 결과 (AWS검증은 지표면온도의 변동
			특성 상 정확하지 않아 삭제. MODIS LST와의 검증만 실시)
			- 북반구 영역의 산출 결과 추가
		2, 26-27	(Ver. 4의 "4. 천리안 발사 후 COMS화 및 알고리즘 개선"부분
			은 Ver. 5에서 개선된 내용이므로 삭제)
		707	- 개선된 알고리즘의 새로운 문제점 및 개선가능성 제시 (Ver.
		21	4의 COMS LST 개발방안이 진행되었으므로 삭제)



지표면온도

알고리즘 기술 분석서

Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33

차 례

- 2. 개요
- 3. 배경 및 목적
 - 2.1. 물리적 배경
 - 2.2. 지표면온도와 방출률 산출방법 및 장단점
 - 2.3. CMDPS 산출물로서의 중요성 및 활용 분야
- 4. 알고리즘
 - 3.1. 이론적인 배경 및 근거
 - 3.2. 산출방법
 - 3.2.1. 지표면온도 산출식 개발
 - 3.2.2. 개선영향 평가
 - 3.3. 산출과정
 - 3.4. 검증
 - 3.4.1. 검증방법
 - 3.4.2. 검증자료
 - 3.4.3. 시공간일치방법
 - 3.4.4. 검증결과분석
- 5. 산출결과 해석방법
- 6. 문제점 및 개선 가능성
- 7. 참고문헌



List of Tables

- Table 1 : Initial conditions for MODTRAN4 simulation
- Table 2 : Vegetation and ground types and respective values of emissivity for the 17 IGBP classes
- Table 3 : Legend of land cover code used for the emissivity estimation
- Table 4 : Validation results of COMS LST using MODIS LST
- Table 5 : Description of data used for LST retrieval.
- Table 6 : Description of data used for emissivity estimation



List of Figures

- Figure 1 : Distribution of TIGR data according to the SZA used as an input data for MODTRAN4 simulations.
- Figure 2 : Response function of IR1 and IR2 channel of MTSAT-1R, MTSAT-2, and COMS.
- Figure 3 : Scatter plots of estimated LST (ordinate) and prescribed LST (abscissa) according to the day/night time
- Figure 4 : Histogram of bias between estimated LST and prescribed LST according to the day/night time
- Figure 5 : Distribution of RMSE according to the variables which have effect to retrieve LST.
- Figure 6 : Flow chart for the LST retrieval process using satellite data
- Figure 7 : Sample image of NDVI (2nd, June)
- Figure 8 : Sample image of FVC (2nd, June)
- Figure 9 : Spatial distribution of land cover over CMDPS full disk
- Figure 10 : Sample image of IR1 (10.8 µm, left) and IR2 (12.0 µm, right) emissivities
- Figure 11 : Distribution of difference between COMS LST and MODIS LST, used original COMS LST (left) and improved LST (right) on day time(upper) and night time (lower)
- Figure 12 : Scatter plots between COMS LST and MODIS LST, used original COMS LST (upper) and improved LST (lower) on day time and night time
- Figure 13 : Sample image of LST derived from COMS data (2, February, 2012).
- Figure 14 : Monthly scatter plots between CMDPS and MODIS LST from June to September in 2011.



List of Acronyms

ATBD	Algorithm Technical Basis Document
AWS	Automatic Weather System
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CMDPS	COMS Meteorological Data Processing System
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
EROS	USGS/Earth Resource Observation & Science
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FVC	Fraction of Vegetation Coverage
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies
GSW	Generalized Split-Window
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
HYPS	Hypsometric Methods
LOWTRAN	Low Spectral Resolution Transmission Code
LSA	UEMETSAT/Land Surface Analysis
LST	Land Surface Temperature
LUT	Look-Up Table
MCLST	Multi-Channel Land Surface Temperature
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer
MODTRAN	Moderate Resolution Transmittance Code
MSG	EUMETSAT/Meteosat Second Generation
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEM	Normalized Emissivity Method
RTM	Radiative Transfer Model
SAF	Satellite Application Facility
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
SZA	Satellite Zenith Angle
TES	Temperature Emissivity Separation Algorithm
TIGR	TOVS Initial Guess Retrieval
TISI	Temperature Independent thermal infrared Spectral Indices Method
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder





Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33

TTMTwo Temperature MethodVCMVegetation Cover MethodVISSRVisible and Infrared Spin Scan Radiometer



지표면온도	Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21
알고리즘 기술 분석서	File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page:1/33

1. 개요

지표면온도 (Land Surface Temperature: LST)는 주어진 화소를 구성하는 토양, 식 생 등의 가중평균온도를 의미한다. 지표면온도는 지면-대기 상호작용에서 에너지와 수증 기의 교환을 조절하는 중요한 지면의 생물리적 (bio-physical) 요소 중의 하나로써 주 로 농업, 수치예보와 기후모델의 입력 및 검증자료로 활용되고 있다. 수치모델 및 농업분 야 등 다양한 응용분야에서 지표면온도의 중요성이 부각됨에 따라 정량적이고 정규적인 관측의 필요성이 제기되고 있다. 하지만 지표면은 구성요소가 다양할 뿐만 아니라 상대 적으로 비열이 작아서 다른 기상요소에 비해 지표면온도는 시공간적으로 변동성이 매우 크다. 이러한 이유로 지표면온도는 현재까지 정규적인 관측이 거의 이루어지지 못하고 있는 변수중의 하나이다.

불규칙하게 분포한 기존의 지상 관측과 달리 기상위성은 높은 공간분해능으로 일관성 있게 주기적으로 관측을 수행하며, 접근이 곤란한 지역 (예: 바다, 사막, 및 산악지역 등) 도 관측이 가능하다. 이러한 이유로 기상위성의 적외채널 자료로부터 지표면온도를 산출 하는 방법이 다양하게 시도되고 있다. 특히, 최근에는 공간분해능, 복사분해능 및 관측주 기 면에서 기상위성의 관측 성능이 크게 향상됨에 따라 기상위성자료로부터 지표면온도 를 산출하려는 많은 노력들이 시도되고 있으며 특히 미국의 MODIS 그룹과 유럽의 MSG/LSA그룹에서는 지표면온도 산출의 현업화를 시도하고 있다 (http://www.icess.ucsb.edu/modis/modis-lst.html, http://landsaf.meteo.pt).

Wexler (1954)는 이미 1954년에 기상위성으로 지표면온도를 관측할 수 있는 가능 성을 제시하였고, Price (1984)는 최초로 분리대기창 알고리즘 (split-window algorithm)을 이용하여 지표면온도 산출을 시도하였다. Becker and Li (1990)는 해수 면 온도 계산에 이용되고 있는 분리대기창 방법을 지표면온도 산출에도 활용할 수 있음 을 이론적으로 제시하였으며, Vázquez et al. (1997)은 NOAA의 AVHRR 자료에 5개 의 분리대기창 알고리즘을 적용하여 산출된 지표면온도를 비교분석하고 식생지수 산출 방법에 따른 지표면온도 산출수준에 대해 분석하였다. 그리고 Prata and Cechet (1999)은 GMS-5 VISSR 자료를 이용하여 지표면온도 산출 정확도를 높이기 위해 오 스트리아에 위치한 두 지역의 현장 관측값과 GMS-5/VISSR, NOAA/AVHRR-2 자료 를 여러 분리대기창 (GSW) 알고리즘에 적용하여 비교, 분석하였다. Peres and Dacamara (2002)는 MSG 자료에 TTM (two temperature method)과 GSW (generalized split-window) 방법을 적용하여 지표면온도를 추정하는 과정에서 TTM과 GSW가 각각 상호보완 (synergistic)적으로 적용될 수 있음을 보였으며, Han et al. (2004)은 GOES와 NOAA/AVHRR 자료에 5개의 다른 분리대기창 알고리즘을 적용하 여 산출된 지표면온도를 비교한 바 있다. Sobrino and Romaguera (2004)는 MODTRAN3 을 이용하여 MSG-1 SEVIRI 자료에 적합한 지표면온도 산출 알고리즘을



개발하였다. 그러나 아시아 지역에서는 기상위성으로부터 지표면온도 산출 연구가 거의 없었다.

본 연구에서는 유럽의 MSG/LSA 그룹과 같이 2009년 말에 발사예정인 우리나라 최 초의 통신해양기상위성 (Communication, Ocean, and Meteorological Satellite; COMS) 자료로부터 아시아지역의 지표면온도를 현업적으로 산출하기 위한 알고리즘을 개발하고 있다. 본 연구에서 산출될 지표면온도의 산출주기는 북반구만 산출할 경우 15 분, Full disk의 경우 3시간이고 공간분해능은 4 km이다. 본 문서에서는 지표면온도의 산출 배경 및 목적, 본 연구에서 선택한 알고리즘의 이론적 배경, 그리고 지표면온도 산 출 과정과 방법을 소개한다. 또한 본 연구에서 산출한 지표면온도의 정확도를 검증하는 데 사용되는 기준자료와 방법에 대해 소개하고 산출결과의 활용방안에 대해 소개한다. 끝으로 지표면온도 산출 알고리즘이 갖는 문제점과 향후 개선방안을 제시한다.

2. 배경 및 목적

2.1. 물리적인 배경

1) 지표면온도

절대온도가 0K 이상인 모든 물체는 플랑크 법칙에 따라 복사에너지를 방출한다. 이 때 지구상의 대부분의 물체는 흑체 (black body)나 회색체 (grey body)가 아니기 때문 에 파장에 따라 방출률이 다르다. 또한 지표상에서 방출된 에너지가 대기를 통과하는 과 정에서 대기 중의 온실기체에 의한 파장별 흡수와 재방출의 영향을 받는다. 따라서 지표 면에서 방출된 복사에너지를 기상위성에서 측정하여 역 플랑크 법칙으로 온도자료를 산 출하기 위해서는 지표면의 방출률과 대기효과를 반드시 고려하여야 한다. 일반적으로 지 표면이나 해수면 온도 측정에 사용되는 기상센서들은 대기의 영향을 최소로 받는 대기의 창에 해당되는 파장대를 이용한다.

위성에 탑재된 센서에 도달하는 파장별 복사량은 지면복사 ()와 대기경로복사 () 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

(1)

위 식에서 *i*와 τ_i는 각각 파장역과 지표면과 센서 사이 대기의 투과율을 나타낸다. 또한 지표면에서의 상향복사량은 지표면온도에 의한 복사량과 하향대기복사의 반사량의 합이다.



(2)

위 두 식에서 보는 바와 같이 위성자료로부터 지표면온도를 계산하는 과정에서 대기 의 영향을 보정하기 위해서는 1) 대기경로복사 (), 2) 대기경로 투과율 (), 3) 하향 복사량 및 4) 지표면의 방출률을 알아야 한다. 단일 채널을 이용할 경우 위의 네 가지를 계산하기 위한 상세 대기 연직 구조 정보와 방출률 자료가 각 화소별로 필요한데 이는 현실적으로 거의 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 사용되는 방법이 대기에 의한 흡수효과가 상이한 두 파장역을 이용하는 분리대기창 방법 (split-window method)이다. 분리대기창 방법을 이용한 지표면온도 산출 알고리즘은 일차적으로 지면 의 방출률을 알고 있다는 점과 지표면온도가 두 채널의 온도에 선형으로 비례하다는 가 정을 한다. 즉, 두 채널의 방출률을 알고 있다면 분리대기창 방법은 해수면온도 식에서와 같이 대기에 의한 흡수효과를 쉽게 제거할 수가 있다. 일반적인 분리대기창 알고리즘은 다음과 같이 쓸 수가 있다.

(3)

는 상수이고, 는 각각 채널 i와 j에서의 휘도온도이다. 의 값은 주로 지표면 의 방출률과 대기 (특히 수증기)의 함수로 결정된다.

대부분의 분리대기창 알고리즘들은 위성에서 측정된 복사휘도 대신 휘도온도를 사용 한다. 측정된 분광별 복사강도에서 휘도온도는 플랑크 방정식을 역으로 이용하여 계산할 수가 있다.

(4)

이 방법은 각 파장별로 계산하지 않고 중심파장 (ν_e)을 이용할 경우 약간의 오차가 발 생하기 때문에 최소자승법을 이용하여 오차를 보정한 식을 이용한다. 아래 식에서 a와 b 는 최소자승법으로 계산되어지는 상수이다.

(5)

분리대기창 알고리즘의 대부분은 다양한 근사를 적용한 복사전달방정식을 이용하거나 현장관측 자료를 이용하여 도출한다.



Date:2012.12.21 C-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp
33

2) 방출률

주어진 온도에서 임의의 물체를 흑체로 가정했을 때 방출되는 복사에너지와 실제 복 사된 에너지의 비로 정의되는 방출률은 이론상으로는 0.0~1.0 사이의 값을 갖으나 대부 분 0.8 이상의 값을 갖는다. 해수면과 달리 지표면의 방출률은 구성 물질, 파장, 토양수 분, 방향 및 구성요소의 구조 (structure)들의 함수이기 때문에 시공간적으로 변동성이 매우 크다. 따라서 지표면온도 산출에 필요한 수준의 방출률을 측정 할 수가 없기 때문 에 다른 방법으로 각 화소 및 채널별로 방출률을 산출하여 이용한다. 이 때 방출률 산출 에 가장 많이 이용되는 방법이 각 화소가 식생과 토양으로만 구성되었다는 가정을 전제 로 하는 vegetation coverage method (VCM)이다 (Valor and Caselles, 1996). 이 방법은 방출률의 시공간적 변동성을 공간적으로 변동하는 지면피복과 시간적으로 변동하 는 식생지수의 조합으로 산출한다. 즉, 각 지면피복별로 작성된 식생과 토양에 대한 방출 률 조견표 (look up table: LUT)와 각 지면피복에서 시간적으로 변동하는 식생비율자료 를 이용한다 (Kerr *et al.*, 1992; Gutman and Ignatov, 1998). 최근에는 눈 덮임 (snow cover)을 함께 고려하는 방법도 개발되고 있다.

2.2. 지표면온도와 방출률 산출방법 및 장단점

식(2)를 식(1)에 대입하고 정리하면

(6)

과 같이 쓸 수 있다. 식(6)에서 보는 바와 같이 위성에서 측정된 값은 각 채널별로 하나 지만 미지수는 지표면온도, 방출률 및 대기연직구조 등 3개여서 미지수가 방정식보다 많게 된다. 따라서 기상위성에서 측정된 복사휘도를 이용하여 지표면온도를 산출하기 위해서는 온도와 습도의 대기연직구조자료를 알고 있거나 지표면의 방출률을 알고 있다는 가정을 하 게 된다. 즉, 어떤 보조 자료를 알고 있거나 다른 방법으로 산출이 가능한 것으로 가정하느 냐에 따라서 지표면온도를 산출하는 방법이 다르게 된다. 최근에는 지표면을 구성하는 다 양한 물체들에 대해 특별관측한 방출률 자료들이 축적되고 있고 수치모델의 해상도 및 예 측수준이 향상되고 있지만 일반적으로 각화소별 채널별 방출률 자료도 구하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 각 화소크기의 대기연직구조 자료도 실시간으로 구하기가 매우 어려운 것이 현실이다.

1) 분리대기창 법 (split-window method)

이 방법은 Price (1984)가 최초로 개발한 이후 현재 가장 많이 이용되고 있는 것으로 식(6)에서 지표면의 방출률을 알고 있고 대기의 투과율은 흡수도가 다른 2개 이상의 채널



을 이용하여 보정할 수 있다는 가정을 한다. 이 방법은 이미 채널별 방출률이 거의 일정한 바다에서의 해수면온도 산출에서 현업적으로 활용되고 있다. 식(6)에서 각 채널별 방출률 을 알고 있거나 다른 방법으로 산출이 가능하고 두 개 이상의 채널을 이용하면 대기의 영향 (대기의 투과율, 하향 및 상향복사)도 보정이 가능하므로 우리가 원하는 지표면온도를 산 출할 수가 있다. 이 방법은 주로 수증기에 대한 흡수효과가 상이한 분리대기창 영역 (10.8 µm, 12.0µm)을 이용한다. 이 방법의 장점은 적용하기가 쉬울 뿐만 아니라 산출정확도도 높 기 때문에 현재 MODIS, MSG/LSA 등에서 현업용으로 이용되고 있을 뿐만 아니라 그 외 많은 사례연구에서도 이용되고 있다 (Kerr *et al.*, 1992; Kwak et al., 2006; Prata and Cechet, 1999; Price, 1984; Vázquez *et al.*, 1997).

초기의 분리대기창 방법은 해수면 온도 산출에서와 같이 대기의 창 영역에 해당하는 적 외채널들을 이용하여 대기영향을 보정하는 단순한 회귀식이었으나, 최근에는 지표면온도의 정확도에 영향을 주는 대기의 영향 (주로 수증기)뿐만 아니라 위성천정각 (Satellite zenith angle: SZA), 지면의 방출률 등의 영향도 동시에 고려하는 알고리즘들이 개발되고 있다 (Wan, 1999). 지면의 방출률과 분리대기창 채널 자료를 이용한 일반적인 지표면온도 산출 회귀식은 다음과 같이 표현할 수가 있다 (Wan, 1999).

$$T_{s} = (A_{1} + A_{2} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + A_{3} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^{2}}) \frac{T_{10.8} + T_{12.0}}{2} + (B_{1} + B_{2} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} + B_{3} \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^{2}}) \frac{T_{10.8} + T_{12.0}}{2} + C$$
(7)

위 식에서 *T_s* 는 지표면온도, *T*_{10.8}, *T*_{12.0} 은 각각 채널 10.8μm와 12.0μm 에서의 휘도 온도 (brightness temperature)를 나타낸다. 대부분의 분리대기창 방법에서는 위성에서 측정되는 복사휘도(radiance) 대신 휘도온도를 사용한다. *A*₁, *A*₂, *A*₃, *B*₁, *B*₂, *B*₃, *C* 는 각 각 다양한 대기조건, 지표면온도, 위성천정각 조건을 이용한 회귀식으로부터 구하는 상수 들이다. 또한 ε = $\frac{\varepsilon_{10.8} + \varepsilon_{12.0}}{2}$, $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{10.8} - \varepsilon_{12.0}$ 이고, $\varepsilon_{10.8}$, $\varepsilon_{12.0}$ 은 각각 채널 10.8 μm와 12.0μm 에서의 방출률을 의미한다. 따라서 위 식에서 미지수는 $\varepsilon_{10.8}$, $\varepsilon_{12.0}$, *T*_{10.8}, *T*_{12.0} 인데 $\varepsilon_{10.8}$, $\varepsilon_{12.0}$ 를 알고 있다고 가정하였으므로 위성에서 측정한 두 채널의 휘도 온도만 있으면 지표면온도의 산출이 가능하다. 그러나 이 방법으로 지표면온도를 산출하 기 위해서는 지표면의 방출률이 필요하기 때문에 먼저 각 화소의 채널별 방출률 자료가 구축되어 있어야 한다.

2) TTM 법 (two temperature method)

이 방법은 식(6)에서 대기의 연직구조를 알고 있고 짧은 시간주기로 연속 관측이 가능 하다는 가정 하에 개발된 방법이다. 즉, 지표면의 방출률은 짧은 시간동안에는 거의 변화가



없으므로 복사전달모델로 모의한 각 채널별 복사휘도와 위성에서 측정한 복사휘도사이의 차가 최소가 되도록 하는 지표면온도를 반복 계산법을 이용하여 산출한다. 아래 식에서 n 은 관측 횟수를, i는 채널을 의미하며 x는 온도 또는 방출률을 의미한다.

$$f(x) = \sum (L_{sat n,i} - L_{m odel n,i})^2$$
(8)

이 방법의 장점은 지표면의 채널별 방출률 자료가 없어도 적용이 가능하고 상대적으로 정확도가 높은 점이다. 하지만 이 방법은 시공간적으로 해상도와 정확도가 높은 대기연직 구조 자료가 필요할 뿐만 아니라 계산시간이 오래 걸리는 문제점이 있다. 또한 이 방법은 근본적으로 관측주기가 짧고 동일 위성 천정각으로 관측을 수행하는 정지궤도위성에만 적 용이 가능하다.

3) MCLST 법 (multi-channel land surface temperature)

이 방법은 분리대기창 방법을 확장한 것으로 볼 수 있으며 각 지면 피복별 생물리적 특 성이 바다와 같이 거의 변함이 없다고 가정하고 각 지면피복별로 지표면온도 산출 알고리 즘을 개발한다. 이 방법의 장점은 사막이나 열대우림과 같이 상대적으로 시공간적 변동성 이 적은 지면피복에 대해서는 적용이 용이한 점이다. 반면에 대부분의 지면피복이 시공간 적으로 변동성이 크기 때문에 현업차원에서는 적용이 곤란하다. 아래 식에서 a(i) 값이 지 면피복의 함수이다.

$$T_s(i) = a_0(i) + a_1(i) T_{11} + a_2(i) (T_{11} - T_{12}) + a_3(i) (T_{11} - T_{12})^2 + a_4(i) (\sec\theta - 1)$$
(9)

4) 방출률 산출법

Gillespie (1985)에 의해 개발된 NEM (normalized-emissivity method)와 Watson (1992)의 Spectral-ratio method는 각각 초기조건으로 온도와 방출률을 처방 한 후 미지의 변수를 반복적으로 계산하여 상수로 가정한 변수들을 순차적으로 재계산하여 방출률을 산출하는 방법이다. 다중 분광채널 자료를 이용하도록 개발된 알고리즘들은 상당한 수준의 정확도 있는 산출물을 기대할 수 있다. 대표적인 방법으로 TISI (temperature independent thermal infrared spectral indices method, Becker and Li, 1990)와 TES (temperature emissivity separation algorithm, Gillespie *et al.*, 1998; Gillespie *et al.*, 1999) 등을 들 수 있다. TISI는 상대방출률 (relative emissivity) 산출에 탁월하며, 특히 밤과 낮의 방출비율이 변하지 않는다고 가정할 경우 절대 지향성 방출률 (absolute directional emissivity)을 계산할 수 있다. 그러나 일정 관측각 이상의 영역에 대해서는 복사전달 모델을 이용한 계산이 필요하며, 낮과 밤 각각 에 대한 자료가 필요하다. TES는 여러 산출 방법들의 장점을 융합한 것으로, 각 파장별 방출비율 값의 대비로부터 최소 방출률을 예측하기 위해 경험적 관계를 이용하였다. 그

국가기상위성센터



러나 10~12 µm 파장범위내의 최소 4~5개 적외채널이 확보되었을 때만 적용이 가능하다 는 단점이 있다. 그 밖에도 지표면 유형과 식생의 양에 대한 정보를 필요로 하는 Reference channel method (Kahle *et al.*, 1980) 및 Alpha residual method (Kealy and Gabell, 1990; Kealy and Hook, 1993), Classification based emissivity method (Snyder *et al.*, 1998a; Snyder and Wan, 1998b) 등이 있다.

2.3. CMDPS 산출물로서의 중요성 및 활용 분야

CMDPS 산출물로서 지표면온도는 COMS에 탑재된 열적외 대기창 두 채널의 활용도를 높일 뿐만 아니라 지면피복이나 방출률은 향후 CMDPS에서 타 산출물의 기본 자료로 활용 될 수 있을 것이다. 또한 지표면온도는 도시열섬, 산불탐지와 같은 대기환경분야, 농업분야, 수치모델 및 기후모델의 경계조건과 모델의 모의수준을 검증하는데 활용될 수 있을 것이다.

3. 알고리즘

3.1. 이론적인 배경 및 근거(Theoretical Background)

본 연구에서는 위성자료로부터 지표면온도를 산출하는 다양한 방법 중 지표면의 방출 률을 알고 있다는 가정과 대기의 영향은 흡수효과가 상이한 두 파장역 (10.8µm, 12.0µm) 을 이용하여 보정할 수 있다고 가정하는 분리대기창 방법을 이용하였다. 이 방법을 선택 한 이유는 1) 적용이 용이하고, 2) 계산시간도 짧고, 3) 지상에서의 특별관측 자료를 이 용하여 검증한 결과에서도 산출수준이 다른 방법들과 유사하거나 우수하기 때문이다. 이 러한 장점에 의해 현재 이 방법은 MODIS LST 그룹이나 MSG LSA 그룹 등에서도 현 업적으로 이용하고 있다.

지표면온도 산출식을 개발하기 위해서, 지표면온도의 위성탐지에 영향을 주는 다양한 인자 (수증기, 방출률, 위성천정각)를 고려하여 다음과 같은 중회귀 방정식을 유도하였 다.

$$LST = a + bT_{IR1} + c\Delta T + d\Delta T^2 + e(\sec\theta - 1) + f(1 - \epsilon) + g\Delta\epsilon$$
(10)

위 식에서 T_{IR1} 은 10.8µm에서의 휘도온도이고, ΔT 는 10.8µm와 12.0µm에서의 휘도온 도의 차이, 그리고 θ 는 각 화소에서의 위성천정각, $\epsilon = \frac{\epsilon_{10.8} + \epsilon_{12.0}}{2}$ 를 나타낸다. $a \sim f$ 까지 의 회귀계수는 대기복사전달 모델인 MODTRAN4를 이용하여 TIGR (TOVS Initial Guess Retrieval) 관측 자료와 위성천정각, 지면온도, 방출률 등에 대해 모의한 결과를



이용하여 산출하게 된다.

본 연구에서는 지면이 토양과 식생으로만 구성되어 있다는 가정을 전제로 방출률을 계 산하는 Valor and Caselles (1996)의 VCM (vegetation cover method) 방법을 이용하 였다. 이 방법은 현재 미국의 MODIS 그룹이나 EUMETSAT/LSA (land surface analysis) 그룹에서 사용하는 방법으로 다음과 같다.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i,v} \times FVC + \varepsilon_{i,q} \times (1 - FVC)$$

(11)

위 식에서 ε_i 는 각 채널별 (IR1, IR2) 방출률이며, $\varepsilon_{i,v}$, $\varepsilon_{i,g}$ 는 각 채널에서 지면피복 종류 에 따른 식생 (vegetation)과 토양 (ground)의 최대 방출률을 나타낸다. 각 채널별 유형에 따른 방출률 조견표 (look-up table)는 EUMETSAT MSG (meteosat second generation)에 적용할 목적으로 Peres and DaCamara (2002, 2005)에 의해 작성된 것 을 이용하였다. 이 때 필요한 지면피복 유형은 IGBP (international geosphere-biosphere programme)의 17개 지면피복이다. 또한 (11)식에서 필요로 하 는 주어진 화소에서의 식생비율을 의미하는 FVC (fraction of vegetation coverage)는 Kerr *et al.* (1992)의 방법을 이용하였으며 다음과 같이 식생비율을 계산한다.

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}$$
(12)

위 식에서 NDVI는 AVHRR 또는 MODIS 자료에 대해 최대치 합성법을 적용하여 10일 또는 15일 주기로 작성한 식생지수를 나타낸다. NDVI_{max}와 NDVI_{min}은 각각 주어진 화소 가 식생으로만 구성되었을 때와 식생이 전혀 없는 토양의 식생지수를 의미한다. MSG/LSA 그룹에서는 식생 및 토양으로부터의 재방출과 위성 관측각에 따른 방출률의 변화를 고려하 여 기존의 방출률 산출 알고리즘을 개선하였다 (Peres and DaCamara, 2005). 이 방법은 적용이 용이할 뿐만 아니라 지면피복으로 방출률의 공간분포를 반영하고 식생의 계절변화 를 이용하여 방출률의 시간변동을 고려하는 장점이 있다. 하지만 이 방법은 눈 덮임과 토양 수분의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

3.2. 산출방법(Methodology)

3.2.1. 지표면온도 산출식 개발

기상위성 자료로부터 지표면온도를 산출하는 경험적 회귀식을 도출하기 위해서는 실제 관측에 의해 구축된 matchup database를 사용하여야 하는데, 해수면 온도와 달리 지표면



온도는 matchup database가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 복사전달모델 (radiative transmittance model; RTM) 중의 하나인 MODTRAN4를 이용하여 모의 자 료를 만들어 지표면온도 산출 알고리즘을 개발하였다 (Kwak *et al.*, 2006; Suh *et al.*, 2008; Suh *et al.*, 2009).

MODTRAN4 모델은 밴드모델 모수화로서 대기투과율 및 복사휘도, 복사수지를 계산하 는 모델이다. 파수영역은 0~50,000 으로 가시 및 근적외, 적외역 등이 포함된다. MODTRAN은 LOWTRAN보다 높은 고해상도의 스펙트럼 해상도에 대한 요구 때문에 개 발된 것으로 전체적인 파수 분해능은 이고 UV영역은 20 로 계산된다. LOWTRAN 기반이 일부 포함되어 있으며 분자산란, 구름, 안개, 비 등의 흡수/산란이 포괄 적으로 고려된다. 다중산란 계산 시 정확도를 높여주기 위해 correlated-k 알고리즘을 포 함하고 있고, 대기층에 대한 감쇠 계산은 Beer Lambert 복사전달 코드로 수행된다. 지면 산란은 등방성 (lambertian)이 아닌 BRDF (bi-directional reflectance distribution functions)를 적용하여 정확도를 높였다. MODTRAN4에서는 correlated-k와 BRDFs를 적용함으로써 산란의 정확도를 향상시키고 있다. 또한 복사전달 모의 과정에서 사용자는 tropical (TRO), mid-latitude summer (MLS), mid-latitude winter (MLW), sub-arctic summer (SAS), sub-arctic winter (SAW), U. S. standard (USS)의 6개 기준 대기모델과 사용자 정의 대기 모델을 사용할 수 있다. H20, CO2, O3, N2O, CO, CH4 에 대한 6가지 기후적인 대기 흡수기체들을 비롯하여 HNO₃, NO, NO₂, SO₂, O₂, N₂, NH₃, CFC등의 흡수기체들, 도심, 지방, 사막, 바다, 안개, 화산 등에 대한 에어로솔 프로파일 등 여러 가지 조건들을 포함하고 있어 다양한 조건들에 대해 복사휘도를 계산할 수 있다 (Berk et al., 1999; http://www.vs.afrl.af.mil/).

앞에서도 언급한 바와 같이 위성에 도달하는 열적외 복사휘도는 지표면온도 뿐만 아니 라 각 채널별 방출률, 대기하층에서의 역전층/초단열감률이 포함된 대기 (주로 온도와 습 도)의 연직구조, 위성천정각, 센서의 채널별 분광반응함수의 영향을 받는다. 따라서 모의 지표면온도를 산출하기 위해서는 이러한 영향요인들을 최대한 고려하여야 한다. COMS 영 역에 적합한 대기 중의 수증기에 의한 효과를 고려하기 위해 MODTRAN4에 정의된 6개의 기준대기모델이 아니라, 실제 관측 자료인 TIGR database를 입력 자료로 사용하였다. 5차 년도에서는 새로 개선된 TIGR 자료를 사용하였다. 개선된 TIGR database는 전 지구에 대 해 관측된 2311개의 대기 프로파일을 포함하고 있고, 각 지점은 43개의 기압 층에 대해 온 도(Ta), 기압, 수증기량과 오존량이 포함되어 있다. 2311개의 데이터 중 COMS 위치를 중 심으로 각 지점에서의 위성천정각을 계산하여 위성천정각이 50도 이내인 359개의 자료만 을 선별하여 입력하였다 (Fig. 1). 위성천정각의 관계를 look-up table (LUT)로 만들어 놓 을 것을 사용하였기 때문에 COMS의 중심 위치와 TIGR 지점의 위/경도 값이 주어지면 두 지점 사이의 거리를 계산하여 근사적으로 위성천정각을 계산할 수 있다.





Figure 1. Distribution of TIGR data according to the SZA used as an input data for MODTRAN4 simulations.

지표면의 종류 및 채널에 따라서 방출률이 다르기 때문에 방출률의 효과를 고려하기 위 해 IR1 채널의 방출율을 11단계, IR1과 IR2채널의 방출율 차를 7단계로 조건을 주었다. 지표면온도는 기온 (지면에서 2 m 연직에 있는 온도, Ta)보다 일교차가 심하여 변동폭이 크다. 따라서 주간의 지면 가열과 야간의 역전층 등의 영향을 고려하기 위하여 각 TIGR 지 점에서의 대기온도 (Ta)를 기준으로 Ta-6 K ~ Ta+16 K의 범위에서 2 K 간격으로 총 12단계의 값을 사용하였다. 즉, 본 연구에서 MODTRAN4 모의 시 사용한 조건 (Table 1) 은 대기 프로파일 359개, 적외채널별 방출률 11개, 기온감률 12개, 방출율 차 7개로 총 331,716회의 복사전달모의를 수행하였다.

Subject	Condition
Atmospheric profile	TIGR database : 359 sets.
Satellite zenith angle	$0^{\circ} \sim 50^{\circ}$ (calculated value of each point)
	IR1 : 0.9478 ~ 0.9968 (intv: 0.0049)
Emissivity of channel	$-0.012 \le \Delta \varepsilon \le 0.012$ (intv.: 0.004) ε (IR2) >1, ε (IR2)=0.9999
Land surface temperature	Ta - 6K ~ Ta + 16K (intv: 2K)

Table 1. Initial conditions for MODTRAN4 simulations.



이렇게 MODTRAN4 모의를 통하여 나온 복사값을 플랑크의 방정식을 사용하여 휘도온 도로 변환한다.

$$B_{i\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda_i^5 (e^{hc/kT_{i\lambda}\lambda_i} - 1)} \qquad T_{i\lambda} = \frac{hc}{k\lambda_i} \frac{1}{\ln(\frac{2hc^2}{\lambda_i^5 B_{i\lambda}} + 1)}$$
(13)

여기에서 *i* 는 적외채널 (IR1, IR2), *h* 는 플랑크상수 (6.62617×10-34 J·s), *k* 는 볼츠만 상수 (1.38066×10-23 J/K), *c* 는 광속 (2.99792×108 m/s), *B_{iλ}* 는 채널별 단위파장에 대한 복사휘도 값으로 단위는 J/s·sr·cm2·μm이다.

위성자료는 각 채널에서 파장별로 센서에 탐지되는 강도가 다르게 존재하기 때문에, 모의자료를 위성으로부터 관측한 온도로 간주하기 위해 COMS의 IR1, IR2에 해당하는 분광반응함수 (spectral response function)값을 적용하였다 (Fig. 2).



Figure 2 Response function of IR1 and IR2 channel of MTSAT-1R, MTSAT-2, and COMS.

이렇게 산출된 모의 자료와 처음 모의 시 처방하였던 지표면온도 자료에 통계처리 도 구인 MINITAB을 이용하여 지표면온도 알고리즘의 회귀계수를 산출하였다. 식(14)는 두 채널 간의 수증기 흡수 차, 위성천정각, 채널별 방출률, 하층에서의 연직온도구조를 모두 고려하여 COMS에 적합하게 유도된 최종 지표면온도 산출 알고리즘이다.



 $LST = 28.1469 + 0.8925 T_{IR1} + 2.0165 \Delta T + 0.1272 \Delta T^2$ (14)

 $+ 2.3630(\sec\!\theta - 1) + 58.0992(1 - \epsilon) - 118.876 \Delta\epsilon$

식(14)에서 필요로 하는 각 채널별 방출률 자료는 식(11)과 식(12)를 이용하여 산출하였다. 이 때 1차적으로 필요한 식생지수 (*NDVI*)는 AVHRR, MODIS 등으로부터 산출한 일별 식생 지수자료에 최대치 합성법을 적용하여 작성한 식생지수이다. 여기서는 최근 3년 (2004~2006)의 GIMMS NDVI 자료에 최대치 합성법을 적용하고, 공간내삽 하여 15일 주기로 작성한 식생지수를 이용하였다. *NDVI_{max}와 NDVI_{min}*은 각각 주어진 화소가 식생으로만 구성되었을 때와 식생이 전혀 없는 토양에서의 식생지수를 의미하는 것으로, 다른 연구에서 사용된 값을 기준으로 본 연구에서 식생지수의 계절변동 특성 분 석을 통해 산출하였다 (Zeng et al., 1999). 또한 각 지면피복 및 채널별 식생과 토양의 방출률 값의 조견표는 Peres and DaCamara (2005)가 작성한 것을 이용하였다 (Table 2).



Table 2. Vegetation and ground types and respective values of emissivity for the 17 IGBP classes.

Vegetation			Ground			
IGBP Class	Туре			Туре		
1-Evergreen needleleaf forest	100% of Conifer	0.9968	0.9973	Mean of alfisols and spodosols	0.9696	0.9732
2-Evergreen broadleaf forest	100% of Conifer	0.9968	0.9973	Mean of alfisols and spodosols	0.9696	0.9732
3-Deciduous needleleaf forest	100% of Deciduous	0.9923	0.9922	Mean of alfisols and spodosols	0.9696	0.9732
4-Deciduous broadleaf forest	100% of Deciduous	0.9923	0.9922	Mean of alfisols and spodosols	0.9696	0.9732
5-Mixed forest	50% of conifer + 50% of deciduous	0.9945	0.9947	Mean of alfisols and spodosols	0.9696	0.9732
6-Closed shrublands	Mean of conifer and deciduous	0.9945	0.9947	100% of aridisols	0.9679	0.9724
7-Open shrublands	Mean of conifer and deciduous	0.9945	0.9947	100% of aridisols	0.9679	0.9724
8-Woody savannas	40% of deciduous + 60% of Grasslands	0.9914	0.9917	100% of aridisols	0.9679	0.9724
9-Savannas	20% of deciduous + 80% of Grasslands	0.9910	0.9915	100% of aridisols	0.9679	0.9724
10-Grasslands	Mean of green and dry grass	0.9907	0.9913	100% of aridisols	0.9679	0.9724
11-Permanent wetlands	50% of Water + 50% of green grass	0.9926	0.9916	Same	0.9926	0.9916
12-Croplands	100% of green grass	0.9948	0.9966	100% of mollisols	0.9727	0.9779
13-Urban and built up	50% of Mixed Forest + 50% of Grasslands	0.9926	0.9930	33% of construction concrete +33% of paving asphalts +33% of roofing shingle	0.9575	0.9710
14-Cropland natural vegetation	33% of Mixed Forest + 33% of Grasslands + 33% of Croplands	0.9934	0.9942	100% of mollisols	0.9727	0.9779
15-Snow and ice	Mean of snow and ice	0.9895	0.9667	Same	0.9895	0.9667
16-Barren or sparsely vegetated	20% of deciduous + 80% Grasslands	0.9910	0.9915	Mean of sandstone, aridisols and sand	0.9478	0.9659
17-Water	Mean of sea and fresh water	0.9904	0.9863	Same	0.9904	0.9863



3.2.2. 개선영향 평가

본 연구에서 개발한 지표면온도 산출 알고리즘의 민감도 연구를 수행하였다. 5차 년 도에서는 수증기의 효과만 고려하였을 경우와 수증기의 효과와 위성천정각을 고려하였을 때, 그리고 수증기 효과, 위성천정각 및 방출률을 모두 고려하여 민감도 연구를 수행한 결과, 가장 많은 인자를 고려하였을 때 정확도가 증가하였다. 6차년도에서는 수증기효과 를 나타내는 휘도온도차의 제곱 및 방출율 차에 대한 항까지 고려할 때 정확도가 증가하 여 이들을 모두 고려한 식 (14)를 최종 지표면온도 산출 알고리즘으로 결정하였으며, 이 에 대한 개선정도를 분석하였다.

개발된 지표면온도 산출 알고리즘의 개선영향을 평가하기 위해 복사전달 모델 모의시 입력된 지표면온도 조건(Reference T.)과 지표면온도 산출 알고리즘으로 추정된 지표면 온도(Estimate T.)를 비교하였다(Fig. 3). 주/야간 관계 없이 상관계수는 0.99로 높게 나 타났고, 주/야간을 모두 나타낸 경우 편의는 0.14K, RMSE는 1.45K로 추정온도가 기준온 도에 근접하였다. 야간의 경우 주간보다 편의는 크지만 RMSE가 작게 나타났다(주간: 편의 0.08K, RMSE 1.42K, 야간: 편의 0.34K, RMSE 1.24K). 주간의 경우 310K와 280K부 근에서 편차가 컸으며 야간의 경우 주로 280K부근에서 추정된 지표면온도가 실제보다 조 금 큰 온도를 나타내었다. 개발된 알고리즘은 야간의 경우 실제보다 약간 높게 추정될 수 있고, 주간의 경우 310K이상에서 낮게 추정할 가능성이 있다.



Figure 3 Scatter plots of estimated LST (ordinate) and prescribed LST (abscissa) according to the day/night time

Fig. 4은 모의 시 사용한 기준 지표면온도 (reference T)에 대한 지표면온도 산출 알고리즘으로 적용결과 추정된 지표면온도 (estimated T)의 편의 (bias)에 대한 히스토 그램이다. 편의의 분포가 대부분 ±4도 이내의 범위로 분포하고 있지만 대체적으로는 ±2도 이내에 좁게 분포하고 있다. 주간의 경우 평균이 0.08K로 0에 가깝고 야간의 경 우 주간에 비해 양의 편차를 보이나 표준편차가 1.14K로 작게 나타났다.



Figure 4 Histogram of bias between estimated LST and prescribed LST according to the day/night time

Fig. 5는 지표면온도 산출에 영향을 미치는 변수 (기온감률, IR1채널의 방출율, IR1와 IR2의 방출율 차, 위성천정각, 휘도온도 차)에 따른 RMSE 분포를 나타낸 것이다. 흰 부분 은 조건에 해당하는 자료가 없는 경우이다. 기온감률과 방출율 차에 대한 RMSE의 경우, 기온감률과 방출율 차가 작거나 클 경우 RMSE가 크게 나타났다. 주로 습윤한 지면에서 방 출율 차가 크며, 건조하거나 에어로졸이 많은 지면에서 방출율 차가 음의 값을 나타낸다. 기온감률이 음의 값을 보이는 부분은 역전층, 15K에 가까운 양의 값인 경우는 초단열 감율 을 보이는 지역이다. 따라서 주로 건조하면서 역전층을 보이는 지역 및 습윤하면서 초단열 감율을 보이는 지역에서 추정 지표면온도와 기준 지표면온도 간의 RMSE가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. IR1채널의 방출율과 두 적외채널간의 방출율 차에 대한 RMSE 분포의 경 우, IR1채널의 방출율 크기와 관계없이 방출율 차가 양의 값일 때 상대적으로 RMSE가 큰 분포를 보였다. 위성천정각과 기온감률에 따른 RMSE의 경우 기온감률이 -4K 이하 및 4K 이상이면서 위성천정각이 40° 이상인 부근에서 RMSE가 크게 나타났다. 위성천정각 이 20° 이하이고 역정층일 경우 혹은 초단열감률일 경우에도 오차가 크게 나타나는데 이 는 TIGR자료가 많지 않기 때문이다. 휘도온도 차(BTD)와 기온감률에 따른 RMSE 분포의 경우, BTD가 -2K이하로 작거나 4K이상 크면서 기온감률이 역전층 및 초단열감율을 보일 때 RMSE가 크게 나타났다. BTD는 주로 대기 중 수증기의 양에 민감하므로 역전층 및 초 단열감률 일 때 수증기양의 고려가 필요한 것으로 나타났다.



Figure 5 Distribution of RMSE according to the variables which have effect to retrieve LST.



지표면온도 알고리즘 기술 분석서

Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33

3.3. 산출과정



Figure 6 Flow chart for the LST retrieval process using satellite data

Fig. 6은 COMS의 IR1 (10.8µm)과 IR2 (12.0µm) 휘도온도 자료와 방출률 자료로부 터 지표면온도를 산출하는 전 과정을 나타낸 것이다. 방출률을 산출하는 프로그램과 지 표면온도 산출 회귀식을 도출하는 프로그램은 독립적으로 구성되어 있으며, 지표면온도 산출 프로그램은 자료 입력, 기본 조건 검사, 지표면온도 산출 그리고 품질 검사의 단계 로 구성되어 있다.

지표면온도 산출을 위해 요구되는 기본적인 입력 자료는 크게 정적 입력 자료와 동적 입력 자료로 나눌 수가 있다. 정적 입력 자료에는 육지/바다 mask 자료가 있고, 동적 입 력 자료는 위성천정각, 구름 분석자료, 방출률, 그리고 COMS IR1, IR2 휘도온도자료 등 이 있다.

지표면온도는 육지의 청천 화소에 대해서만 계산할 수 있으므로 level 1으로 전처리 된 위성 탐사 자료 중 COMS IR1과 IR2 자료를 읽어 들이는 과정에서 구름 구분 자료 및 지면/해양 구분 자료를 함께 읽는다. 이들 자료를 이용하여 지표면온도 산출의 필요 요건을 검사하고 요건이 충족된 화소에 대해서만 지표면온도를 계산하고 그 결과를 출력 한다. 현재는 COMS IR1과 IR2 파장역의 자료를 이용하였다. 각 과정이 진행되는 동안 Log 파일을 생성하여 진행 상태 및 오류 메시지 등을 기록하도록 하였다. QC flag는 지



표면온도가 정상적으로 산출이 되면 128, 극한 값 (LST < 223K or LST > 343K)으 로 산출되면 64로 저장이 되고, 지표면 온도가 정상적으로 산출 되었지만 적설에 의해 정확도가 의심이 되는 화소는 8로 저장한다. 육지 화소 중 구름과 안개에 의해 오염된 경우 (cloud mask / fog)는 각각 32와 16으로 저장한다. 그 밖에 육지/해양의 구분 및 화소의 값이 유효하지 않아 지표면온도가 산출이 되지 못하는 경우는 원인에 따라서 각 각 4와 2를 부여하는데, 해양으로 분리된 화소에 대해서는 4로, 구름영향과 안개, 해양이 아닌 화소에서 방출률 missing 등 배경자료에 문제가 있는 경우에는 2로 표시하도록 하 였다. 따라서 정상적으로 산출된 지표면온도는 QC flag가 128인 경우로, 지표면온도 검 중 시에도 QC flag가 128 인 화소에 대해서만 수행하여야 한다.

방출률 산출을 위해 필요한 자료는 식생지수, 지면피복 분류, 및 각 채널별 지면피복 유 형에 따른 최대 방출률 자료이다. 지면피복 분류 및 중간산출물인 식생비율자료 작성을 위 해서는 우수한 품질의 최근 식생지수 자료가 필요하다. 초기버전 방출률 자료 산출에 이용 된 식생지수 자료는 USGS/EROS (Earth Resource Observation & Science)에서 제공 하는 전구 영역 자료이다 (http://edcsns17.cr.usgs.gov/ AVHRR 1 km 1KM/comp10d.html). 이 식생지수 자료는 전구 영역에 대해 1 km의 고해상도 영상을 제 공하지만 자료의 기간이 1992년 4월 1일부터 1996년 5월 21일까지 10일 주기의 합성자 료로 10년 이상 과거의 자료라는 단점이 있다. 도시개발 및 확장, 벌목, 화재, 용도변경 등 다양한 원인에 의해 지면의 상태는 시시각각 변화하기 때문에 너무 오랜 과거의 자료는 현 재의 지면정보를 제대로 대표하지 못한다. 따라서 기존 개발기술을 기반으로 최근 식생지 수 자료를 이용한 새 식생지수 및 방출률 자료를 작성하였다.

방출률 자료 갱신을 위해 사용된 식생지수 자료는 2004년부터 2006년까지 3년간의 15 일 주기 전구 영역 GLCF/GIMMS (Global Land Cover Facility/Global Inventory Modeling and Mapping Studies)자료이다. 이 자료는 1981년부터 2006년까지 25년간의 AVHRR 자료에 대해 검정, 위치오차 보정 및 에어로졸 등에 의한 대기효과 보정을 실시하 여 제공된다. GLCF 웹페이지 (http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms/)를 통해 쉽게 내 려 받을 수 있다. 장기간 축적된 양질의 전구영역 원격탐사 자료라는 점에서 관심이 집중되 는 자료이기는 하지만 공간해상도가 8 km 라는 한계를 포함하고 있다. CMDPS에서 요구 하는 해상도인 4 km를 충족하기에는 부족함이 있으나 현 시점에서 이에 상응하거나 대체 할만한 자료를 구하기란 쉽지 않다. 본 연구에서는 1차적으로 3년간의 자료 (2004~2006)에 대해 각 주기별로 최대치 합성법을 적용하여 시공간적으로 연속성이 있 는 1년간의 자료를 작성하였다. 해상도 문제의 해결을 위해 1차로 작성된 자료에 대해 공 간내삽법을 적용하여 4 km 해상도 자료를 산출하였다. Fig. 7은 이렇게 작성된 식생지수의 공간분포를 CMDPS 전구 (full disk) 영역으로 재투영 하여 나타낸 것이다. 구름에 의한 오염화소 및 탐사/전송 오류뿐만 아니라 공간내삽에 따른 자료의 계단현상 등의 문제가 발 견되지 않았다.



지표면온도 알고리즘 기술 분석서 Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33



Figure 7. Sample image of NDVI (2nd, June).

앞서 작성된 식생지수 자료에 대해 계절변동 (phenology) 및 도수분포도 (histogram) 분석을 실시하여 연중 식생이 최대로 성장했을 때와 식생지수가 가장 작은 토양의 식생지 수를 파악하여 식생비율 산출 알고리즘의 기초자료로 이용하였다. 식생비율 산출과정에서 식생지수가 식생지수 최대값보다 큰 경우는 최대값으로, 최소값보다 작은 경우는 최소값으 로 치환하여 계산하도록 하였다. Fig. 8은 6월 후반기 (15b)의 식생비율 (FVC) 산출 결과 를 나타낸 것이다. 밝은 색일수록 식생의 비율이 낮거나 사막 또는 나대지를 나타내며, 색 이 짙어질수록 식생의 비율이 높음을 의미한다. 전체적으로 식생지수의 분포와 유사하게 식생지수에 따른 식생비율이 잘 표현되었다. 한반도를 비롯한 아시아 동북지역의 식생비율 이 사막지역과 잘 대비되어 나타나고 있으며, 적도부근의 열대우림에 의한 높은 식생비율 이 잘 표현되었다. 또한 호주지역에서도 사막과 식생지역의 대비가 비교적 잘 나타났다.



지표면온도 알고리즘 기술 분석서 Code:NMSC/SCI/ATBD/LST Issue:1.0 Date:2012.12.21 File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp Page : 1/33



Figure 8. Sample image of FVC (2nd, June).

Fig. 6에 나타낸 바와 같이 방출률 산출을 위해서는 앞서 산출한 식생비율 뿐만 아니라, 각 화소의 지면피복 분류자료가 필요하다 (Fig. 9). 이 지면피복 분류자료는 강전호 외 (2007)의 아시아지역 지면피복 분류자료 비교연구를 토대로, 앞서 보정한 식생지수 자료 에 대해 κ-평균 군집법을 적용하고, 강전호 외 (2009)의 한반도 지면피복 분류자료를 처 방함으로써 한반도 지역을 중심으로 나타났던 분류오류를 개선하여 작성한 자료이다. Table 3은 각 코드 (code)별 지면피복 유형을 정리한 것이다.



Figure 9. Spatial distribution of land cover over CMDPS full disk.



Table 3. Legend of land cover code used for the emissivity estimation	Table	3. Legend of land	cover code	used for the	emissivity	estimation.
---	-------	-------------------	------------	--------------	------------	-------------

code	Description (land cover type)
1	Urban and built-up lands
2	Dryland cropland and pasture
3	Irrigated Cropland and Pasture
4	Cropland and natural vegetation mosaic
5	Deciduous broadleaf forest
6	Deciduous needleleaf forest
7	Evergreen broadleaf forest
8	Evergreen needleleaf forest
9	Mixed forest
10	Grasslands
11	Shrublands
12	Savannas
13	Barren or sparsely vegetated
14	Wetlands
15	Snow and ice
16	Water bodies
17	Tundra
-9995	Space area (outside range of earth)
-9990	Missing value (eg. antarctic)



Figure 10. Sample image of IR1(10.8µm, left) and IR2(12.0µm, right) emissivities.

Fig. 10은 VCM 알고리즘의 최종 산출물인 방출률의 공간분포를 나타낸 것이다. 전체적 으로 IR1(10.8 µm)의 방출률보다 IR2(12.0 µm)의 방출률이 높은 것으로 나타났다. 사막지 역과 식생지역 등 지표면 유형에 따른 방출률의 대비가 잘 표현되었다. 지면/해양 구분자료 (Land/Sea Mask)를 이용하여 육지 화소에 대해서만 방출률이 계산되도록 하였으며 그림 에 나타낸 바와 같이 바다는 하나의 값으로 (-9999, blue) 정의 하였다. 따라서 방출률은



키포머아드	Code:NMSC/SCI/ATBD/LST
시표먼폰노	Issue:1.0 Date:2012.12.21
악고리즉 기숮 부선서	File: NMSC-SCI-ATBD-LST_v5.0.hwp
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Page : 1/33

육지 화소에 대해서만 계산되도록 하였으며 그 값은 최저 0.94부터 최고 0.99 사이의 값을 갖는다. 그림의 밝은 부분은 방출률이 낮은 영역으로써 나대지, 사막, 도시지역 등을 의미 한다. 반면, 어두운 부분일수록 방출률 최고치인 0.99에 가까운 영역으로써, 식생의 종류에 따라 차이는 있으나, 식생의 분포가 조밀하고 많이 성장할수록 큰 값을 갖는다. 방출률 산 출과정에서 보았듯이 VCM 알고리즘은 식생유형 및 식생량의 함수로 계산하기 때문에 위 와 같이 해석할 수 있다. 특히 인도네시아 등을 중심으로 적도지역의 방출률이 높게 나타나 고 있고, 고비사막이나 호주 중심부의 사막지역을 중심으로 방출률이 낮게 나타나고 있는 것이 방출률에 대한 해석을 뒷받침 해주고 있다.

3.4. 검증

3.4.1. 검증방법

본 연구에서 산출된 지표면온도의 정확도를 검증하기 위해 사용된 통계측도는 상관계수 (R), 편의 (bias), 오차제곱근 (RMSE)을 사용하였다.

- R: COMS로부터 산출된 지표면온도와 실제 지표면온도의 공간변동성 패턴의 동질성
 을 평가하는 것으로 -1.0 ~ +1.0사이의 값을 갖으며 +1.0이 가장 변동패턴이
 일치하는 값이다.
- bias : COMS로부터 산출된 지표면온도가 실제 값보다 계통적으로 과대 또는 과소하 게 산출하는지 평가하는 측도로 -∞ ~ +∞의 값을 갖으며 0 일 때가 가장 우수 하게 산출한 것이다. 다만 편의가 0이라고 해서 산출수준이 완벽한 것은 아니다.
 RMSE : COMS로부터 산출된 지표면온도의 정확도를 평가하는 측도로 0 ~ +∞의
- 값을 갖으며 0 일 때가 가장 완벽하게 산출됨을 의미한다. 이 값은 특히 추정 오 차가 큰 값에 민감하다.

3.4.2. 검증자료

MODIS는 극궤도 위성인 AQUA와 TERRA 위성에 탑재된 센서로써, 36개의 채널을 가 지고 있다. 검증을 위해서 MODIS level2 자료 중 MOD11/MYD11자료 (LST)를 사용하 였다. MODIS LST는 1×1 km의 공간 해상도를 가지고, 하나의 관측자료 제공영역 (granule)이 5분의 관측시간은 갖는다. 각 granule은 1354×2030의 배열로 지표면온도 가 제공되고, 각 관측 픽셀의 위/경도는 5×5 화소의 중심으로 271×406의 배열로 제공된 다. MODIS LST는 cloud/clear, land/sea, missing 화소 등의 구분이 없이 지표면온도가 산출된 화소와 그렇지 못한 픽셀 (-999; cloud, sea, missing pixel.. 등)으로만 구분이 되어있다.



3.4.3. 시공간일치방법

MODIS는 극궤도 위성의 자료이기 때문에 관측 시간과 관측영역 등이 매번 달라지는 반면, COMS는 정지궤도 위성이기 때문에 비교적 관측 영역이나 관측주기가 일정하다. 공 간 해상도 역시 1×1, 4×4로 차이가 크기 때문에 정확한 시공간 일치가 중요하지만, 재투 영 (remapping) 방법을 선택함에 있어서 정확한 공간 일치화에 한계가 있는 것이 사실이 다. 또한 MODIS와 COMS 모두 결측 없이 정상적으로 지표면온도를 산출하였다 하더라도 최대 약15분의 시간차이가 발생할 수도 있다. 지표면온도는 시공간에 따른 변동성이 매우 큰 변수이기 때문에 시공간 일치화가 매우 중요하다.

현재 사용된 시공간 일치 방법으로는 두 위성의 시간차이가 ±5분 이내 인 경우, COMS 화소와 가까운 MODIS 화소로부터 주변의 5×5 화소가 모두 육지이고 맑을 경우에만 주변 화소를 면적 평균하여 검증을 수행하였다.

3.4.4. 검증결과분석

MODIS LST를 사용한 검증은, MODIS LST가 참값이라는 가정을 전제로 수행한다. MODIS LST와 COMS LST는 두 가지 모두 위성으로부터 산출한 지표면온도라는 공통점 이 있으나, 극궤도 위성과 정지궤도 위성으로부터 산출되는 것이기 때문에 공간 분해능, 위 성 통과시간, 스캔영역 등에서 차이가 나므로 시공간 일치방법에 따라 검증 결과가 조금씩 달라 질 수 있다.

기존의 CMDPS에서 산출되는 LST와 6차년도의 개선된 LST에 대해 MODIS LST로 검증한 결과를 Table 4에 나타내었다. 기존의 LST는 특히 주간에 약 9.29K의 양의 편이 와 10.42K의 RMSE를 보였으나 개선 후 편이와 RMSE가 각각 -1.64K와 3.12K로 현저 하게 줄어들었다. 하지만 야간에는 편이와 RMSE가 각각 0.76K와 2.52K에서 -2.98K와 3.12K 로 변해 MODIS LST 보다 낮은 온도로 추정하고 있다.

	Total				Day time Night time			ne	
	Corr.	Bias(K)	RMSE(K)	Corr.	Bias(K)	RMSE(K)	Corr.	Bias(K)	RMSE(K)
CMDPS	0.97	6.38	8.59	0.91	9.29	10.42	0.95	0.76	2.52
Improved Alg.	0.98	-1.64	3.12	0.96	-0.93	3.08	0.98	-2.98	3.21

Table 4. Validation results of COMS LST using MODIS LST

Fig. 11과 Fig. 12는 COMS LST 산출 알고리즘의 개선 전과 후에 대해 주/야간 별로 COMS LST의 편차에 대해 공간분포와 산점도로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 주간의 경우 개선 전에 양의 편차가 지리적 위치에 관계없이 크게 나타났으나 개선 후에는 중국 서부의 식생이 상대적으로 적은 지역에서 양의 편차가 크게 날뿐 다른 지역에서는 양 의 편차가 대부분 해소되었다. 야간의 경우 중국 및 한반도 지역에서 나타났던 양의 편차가



대부분 감소되었음을 볼 수가 있다. 주간에서 중국 서부지역에 양의 편차가 크게 나타나는 것은 MODIS LST version 5가 사막이나 나대지 등에서 주간에 약 4~6K 낮게 추정하는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Trigo et al., 2008). 산점도에서는 특히 주간에 계통적 으로 LST를 과대하게 추정하였던 것이 대부분 MODIS LST와 유사하게 보정되었음을 볼 수가 있다. 야간의 경우 주간에서의 양의 편의가 나타나는 기온 특성이 반영되어 음의 편의 가 공간분포 및 산점도에서 뚜렷하게 나타났다. COMS 지표면온도를 해석할 때 야간에서 나타나는 음의 편의를 고려해야할 것이다.



Figure 11. Distribution of difference between COMS LST and MODIS LST, used original COMS LST (left) and improved LST (right) on day time(upper) and night time (lower)



Figure 12. Scatter plots between COMS LST and MODIS LST, used original COMS LST (upper) and improved LST (lower) on day time and night time

4. 산출결과 해석방법

Fig. 13는 2012년 2월 5일 2시 00분의 북반구 지역에 해당하는 지표면온도를 나타 낸 것이다. 영상에서 흰색으로 나타난 부분은 구름에 의한 오염으로 지표면온도 산출 시 기본조건을 만족하지 못해 계산되지 못한 영역을 나타낸다. COMS 위성으로 도출된 지 표면온도는 한반도 및 동아시아 등의 지형과 지면 피복의 공간 분포 및 온도의 계절 변 화를 잘 보이고 있다.



Figure 13. Sample image of LST derived from COMS data (2, February, 2012).

지표면온도 산출과정에 이용된 자료의 특성을 Table 5에 정리하였다.

Input	Dynamic	IR1, IR2, Emissivity, CLD_mask, SZA		
	Static	Land/sea mask		
	LST	LST : 223K ~ 343K Sea(water bodies) : -9999 Space : -9995 Missing : -9990		
Output	QC flag	128: Normal64: extreme value32: Missing by cloud16: Missing by fog8: Missing by snow4: Missing by ocean2: Missing by error		

Table 5. Description of data used for LST retrieval.

Table 6은 방출률 산출과정에 이용된 자료의 특성을 정리한 것이다.



Table	6.	Description	of	data	used	for	emissivity	estimation.
		1						

	Dynamic	NDVI : -1.0 ~ 1.0		
Input	Static	Emissivity LUT Land Cover : 1 ~ 17		
Semi_output	FVC : 0.0 ~ 1.0			
Output	Emissivity IR1 / IR2 : 0.0 ~ 1.0			

Fig. 13은 북반구 영역으로 산출되는 지표면온도로 약 15분 간격으로 제공되고 있으며 배열크기는 가로×세로가 1934×1544이며, 4바이트 실수형으로 저장된다. 북반구 및 남 반구 전체 확장된 Full disk의 산출물 및 입력 자료의 배열크기는 가로×세로 모두 2750이 며, 4바이트 실수형이고 자료의 크기는 약 28.8Mb이다. 산출된 방출률 자료는 값을 변환 하지 않고 실수 형으로 저장하였다. 단, 지표면온도 뿐만 아니라 지면피복 분류자료, 방출 률 자료 모두 CMDPS영역 외의 우주공간은 -9995로, 남극 및 일부 날짜변경선 (international date line) 주변 등 자료 비할당 지역은 -9990으로 정의하였다. 지표면온 도 및 방출률 산출의 전 과정은 Fortran 90을 이용하였으며, 자료의 입출력 등에 관한 기 타 함수나 라이브러리 등은 이용하지 않고 기본 입출력 방법을 이용하여 개발 프로그램 이 외의 기타 자료처리 도구를 이용한 분석 및 이용에 어려움이 없도록 하였다.

5. 문제점 및 개선 가능성

지표면온도를 산출하는데 있어 오차를 유발하는 원인으로는 지표면온도 산출식, 구름탐 지의 정확도 문제, 방출률과 지면피복 등의 배경자료의 정확도 문제, 위성자료 자체의 문제 등이 있다.

개선영향 평가에서 주로 대기 중의 수증기에 영향을 많이 받는 휘도온도 항 및 방출율 차가 매우 크거나 작을 때 오차가 큰 것으로 나타났다. 이는 알고리즘에서 수증기의 영향이 잘 반영되지 않아 나타난 문제로 보이며, 향후 개선이 필요하다. 또한 MODIS LST와 검증 한 결과에서 보인 바와 같이 야간에서 음의 편의가 뚜렷하게 나타났다. 이는 기온감률을 주 /야간 따로 고려하지 않아 나타난 결과로 향후 이 부분을 개선할 필요가 있다.

6. 참고문헌

강전호, 서명석, 곽종흠, 2007: 아시아 지역 지면피복자료 비교 연구: USGS, IGBP, 그 리고 UMd. 대기지, 17(2), 159-169.



강전호, 서명석, 곽종흠, 2009: MODIS 자료를 이용한 한반도 지면피복 분류. *대기지*. Suh, M. S., K. O. Hong, J. H. Kang, 2009: Development of a land surface temperature-retrieval algorithm from MTSAT-1R data. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*

- Becker and Li, 1990: Toward a local split window method over land surface. International Journal of Remote Sensing, 3, 369-393.
- Becker, F., and Z-L. Li, 1990: Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. Remote Sensing of Environment, 32, 17-33.
- Berk, A., G. P. Anderson, P. K. Acharya, J. H. Chetwynd, L. S. Bernstein, E. P. Shettle, M. W. Matthew and S. M. Adler-Golden, 1999: MODTRAN4 version 2 user's manual.
- Gillespie, A. R., 1985: Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. Proceedings TIMS data user's workshop, (JPL Pub. 86-38, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA), pp. 29-44.
- Gillespie, A. R., S. Rokugawa, T. Matsunaga, J. S. Cothern, S. J. Hook, and A.
 B. Kahle, 1998: A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer(ASTER) images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 1113-1126.
- Gillespie, A. R., S. Rokugawa, S. J. Hook, T. Matsunaga, and A. B. Hahle, 1999: Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document, Version 2.4, NAS5-31372, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA.
- Han, K. S., A. A. Viau and F. Anctil, 2004: An analysis of GOES and NOAA derived land surface temperatures estimated over a boreal forest. International Journal of Remote Sensing, 25(21), 4761-4780.
- Kahle, A. B., D. P. Madura, and J. M. Soha, 1980: Middle infrared multi-spectral aircraft scanner data: analysis for geological applications. Applied Optics, 19, 2279-2290.
- Kealy, P. S., and A. R. Gabell, 1990: Estimation of emissivity and temperature using alpha coefficients. Proceedings of second TIMS workshop, (JPL Pub. 90-95, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA), pp. 11-15.
- Kealy, P. S., and S. J. Hook, 1993: Seperating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31, 1155-1164.
- Kerr, Y. H., J. P Lagouarde, and J. Imbernon, 1992: Accurate land surface



temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window. Remote Sensing of Environment, 41, 197-209.

- Kwak, S. Y., M. S. Suh, J. H. Kang, 2006: Retrieval of Land Surface Temperature from MTSAT-1R. Korean J. Remote Sens., 22(5), 385-388.
- Peres, L. F. and C. C. DaCamara, 2002: A synergistic use of GSW and TTM techniques to retrieve LST from MSG data. SAF on Land Surface Analysis Training Workshop , Lisbon, Portugal, July 8-10.
- Peres, L. F., and C. C. DaCamara, 2005: Emissivity maps to retrieve land surface temperature from MSG/SEVIRI. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43(8), 1834-1844.
- Prata, A. J. and R. P. Cechet, 1999: An assessment of the accuracy of land surface temperature determination from the GMS-5 VISSR. Remote Sensing of Environment, 67, 1-14.
- Price, J. C., 1984: Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer, Journal of Geophysical Research 89, 7231-7237.
- Snyder, W. C., Z. Wan, Y. Zhang, and Y. Z. Feng, 1998a: Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. International Journal of Remote Sensing, 19, 2753-2774.
- Snyder, W. C., and Z. Wan, 1998b: BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 214-225.
- Sobrino, J. A. and M. Romaguera, 2004: Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data. Remote Sensing of Environment, 92, 247-254.
- Suh, M. S., S. H. Kim, J. H. Kang, 2008: A Comparative Study of Algorithms for Estimating Land Surface Temperature from MODIS Data. *Krean J. Remote Sens.*, 24(1), 65-78.
- Trigo, I. F., T. M. Isabel, O. Folke, and K. Ewa, 2008, An assessment of remotely sensed land surface temperature, *J. Geophys. Res.*, 113, D17108, doi:10.1029 /2008JD010035.
- Valor, E. and V. Caselles, 1996: Mapping land surface emissivity from NDVI: application to european, african, and south american areas. Remote Sensing of Environment, 57, 164-184.
- VOzquez, D. P., F. J. Olmo Reyes, and L. Alados Arboledas, 1997: A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature





from AVHRR data. Remote Sensing of Environment, 62, 216-222.

Wan, Z., 1999: MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document(LST ATBD): LST calculations. Electronic document.

- Watson, K., 1992. Spectral ratio method for measuring emissivity. Remote Sensing of Environment, 42, 113-116.
- Wexler, H., 1954: Observing the weather from a satellite vehicle, J. British International Society, 13, 269-276.

http://edcsns17.cr.usgs.gov/1KM/comp10d.html

http://glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms

http://landsaf.meteo.pt

http://www.vs.afrl.af.mil

http://www.icess.ucsb.edu/modis/modis-lst.html