아시아-오세아니아 지역에서의 세 지표면 방출률 자료 (MODIS, CIMSS, KNU) 상호비교

박기홍 · 서명석[†]

공주대학교 대기과학과

Inter-comparison of three land surface emissivity data sets (MODIS, CIMSS, KNU) in the Asian-Oceanian regions

Ki-Hong Park and Myoung-Seok Suh[†]

Department of Atmospheric Science, Kongju National University

Abstract : In this study, spatio-temporal variations of Land Surface Emissivity (LSE) of the three LSE data sets in the Asian-Oceanian regions were addressed. The MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) LSE, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS) LSE, and Kongju National Univ. (KNU) LSE data sets were used. The three data sets showed very similar emissivity in the Tibetan Plateau, desert in the Middle East and Australia, and low latitude regions irrespective of season. The emissivity of 12 μm was systematically greater than that of 11 μm , in particular, in the Tibetan Plateau, desert over Middle East and Australia. In general, they showed a weak seasonal variation in the low latitude regions although the emissivity was different among them. However, the three data sets showed quite different spatial and temporal variations in the other regions of Asian-Oceanian regions. The KNU LSE showed a systematic seasonal variation with a high emissivity during summer and low emissivity during winter but the other two LSE data sets showed irregular seasonal variations without regard to the regions. And the annual mean correlations of 11 μm and 12 μm between KNU LSE and MODIS LSE (KNU LSE and CIMSS LSE; MODIS LSE and CIMSS LSE) were 0.423 and 0.399 (0.330, 0.101; 0.541, 0.154), respectively. The relatively low correlations and strong inter-month variations, in particular, in 12 μm , indicated that consistency in spatial variation was very low. The comparison results showed that caution should be given before operational use of the LSE data sets in these regions.

Key Words : Land surface emissivity, MODIS, CIMSS, KNU, comparison

요약 : 본 연구에서는 아시아-오세아니아 지역에서의 세 지표면 방출률 자료 (MODIS, CIMSS, KNU)의 시·공간적 분포와 변동 특성을 비교 분석하였다. 세 자료 모두 계절에 관계없이 티베트 고원, 페르시아만 주변의 중동지역 및 호주 사막지역, 저위도 지역에서 매우 유사한 방출률 분포를 보이고 있다. 일부 지역을 제외한 대부분 지역에서 12 μm 채널의 방출률이 11 μm 보다 크며, 특히 티베트 고원과 중동지역,

접수일(2013년 4월 9일), 수정일(1차 : 2013년 4월 22일), 게재확정일(2013년 4월 22일).

[†] 교신저자: 서명석(sms416@kongju.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

호주 사막지역 일부에서 그 차이가 크다. 저위도 지역에서의 방출률은 서로 상이하지만 방출률의 계절변동이 크지 않은 공통점을 보이고 있다. 그러나 그 외 대부분 지역에서 세 자료는 방출률의 시·공간 변동성에서 큰 차이를 보이고 있다. KNU 자료는 여름에 높고 겨울에 낮은 방출률을 보여 계절변동이 뚜렷하나, MODIS와 CIMSS 자료는 계절에 따른 방출률 변화가 불규칙하며 뚜렷하지 않았다. KNU와 MODIS (KNU와 CIMSS; MODIS와 CIMSS) 자료간의 공간상관계수의 연평균은 $11\ \mu\text{m}$ 와 $12\ \mu\text{m}$ 채널에서 각각 0.423과 0.399 (0.330, 0.101; 0.541, 0.154)로 낮다. 특히 $12\ \mu\text{m}$ 채널의 경우 서로 상관성이 매우 낮을 뿐만 아니라 상관계수의 월 변동도 강하게 나타나 세 자료간 일치성이 매우 낮다. 본 연구 결과는 아시아-오세아니아 지역에서의 지표면 방출률 자료 개선이 시급함을 제시한다.

1. 서론

방출률(Emissivity)이란 주어진 온도에서 임의의 물체를 흑체로 가정했을 때 방출되는 복사에너지와 실제 복사된 에너지의 비로 정의된다. 이론상으로는 0.0 ~ 1.0 사이의 값을 갖지만 자연계의 대부분 물체들은 0.8 이상의 값을 가진다. 위성관측 적외영상 자료로부터 정확한 지표면 온도를 산출하기 위해서는 각 파장대별 지표면 방출률 자료가 필요하다(Kornfield and Susskind, 1977). 또한 열적외파장대(TIR; $8 - 12\ \mu\text{m}$)에서의 지표면 방출률 자료는 기후와 지구-대기 상호작용, 복사수지 등에 중요하다(Hulley and Hook, 2009; Li, 2010). 해수면과 달리 지표면의 방출률은 공간적으로 상이한 지면피복과 시간적으로 변동하는 식생량, 눈 덮임 및 토양수분의 함수이기 때문에 시·공간적인 변동성이 매우 크다(Valor and Caselles, 1996). 이러한 이유로 현재 사용 가능한 현장관측 방출률 자료는 매우 제한적이다. 따라서 광범위한 지역에서의 주기적인 지표면 온도 산출에 필요한 수준의 방출률 측정 자료가 없기 때문에 최근에는 위성관측 자료를 이용하여 방출률을 산출한다(Valor and Caselles, 1996; Jiang *et al.*, 2006; Suh *et al.*, 2008; Sobrino *et al.*, 2008; Hong *et al.*, 2009).

위성자료로부터 방출률을 산출하는 대표적인 방법으로는 Vegetation Coverage Method (VCM) (Valor and Caselles, 1996)와, Temperature and Emissivity Separation (TES) (Gillespie *et al.*, 1999), Temperature-Independent thermal infrared Spectral Index (TISI) (Becker and Li, 1990) 등이 있다. VCM은 지표면이 토양과 식생으로만 구성되어 있다는 가정하에 지면피복자료와 주기적 식생지수 자료를 이용하여 방출률을 산출하는 방법이다. TES는 여러 산출 방법들의 장

점을 융합한 것으로, 각 파장별 방출률 값의 대비로부터 최소 방출률을 추정하기 위해 경험적 관계를 이용하였다. TISI는 상대 방출률(relative emissivity) 산출에 탁월하며, 특히 밤과 낮의 방출률이 같다고 가정할 경우 절대 지향성 방출률(absolute directional emissivity)을 계산할 수 있다. 또한 지면 피복과 식생 양에 대한 정보를 이용하는 지면피복 분류자료 활용법(Classification based emissivity method) (Snyder and Wan, 1998; Snyder *et al.*, 1998), 알파 오차법(Alpha residual method) (Kealy and Gabell, 1990; Kealy and Hook, 1993), 그리고 기준 채널법(Reference channel method) (Kahle *et al.*, 1980) 등이 있다.

현재 가장 일반적으로 이용되고 있는 지표면 방출률 자료는 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA) 산하의 MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Surface Temperature (LST) Group에서 작성 제공하는 Land Surface Emissivity (LSE) (이하 MODIS LSE)와 Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS)에서 제공하는 전지구 적외파장대 방출률(Global Infrared LSE) 자료가 있다. MODIS LSE는 MODIS LST Group에 의해 산출되었으며(Wan, 2008), MODIS 그룹의 분리대기창 알고리즘(split-window algorithm)을 이용한 지표면 온도 산출에 활용될 뿐만 아니라 인터넷을 통해 무료로 공개되고 있다. CIMSS 전지구 적외파장대 방출률 자료는 위스콘신 대학(University of Wisconsin-Madison), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 및 NASA 간의 협약을 통해 설치된 CIMSS에서 제작된 것으로, MODIS MYD11 산출물의 입력자료로 사용되며 위성탐측 자료로부터 온도와 수분 프로파일 같은 대기 특성을 보다 정확하게 산출하기 위해 도입되었다(Seemann *et al.*, 2008). 또한 본 연구에서 사용되는 Kongju National University (KNU) LSE는 공주대학교 대기과

학과 위성기상연구실에서 제작된 것으로, 우리나라 최초의 정지궤도 다목적 위성인 천리안위성(Communication, Oceanic, and Meteorological Satellite, COMS)의 기상자료 처리 시스템 (COMS Meteorological Data Processing System, CMDPS)에서 지표면 온도 산출을 위한 기초자료로 사용되고 있다.

MODIS, CIMSS 및 KNU LSE 자료들 모두 Terra/Aqua 위성의 MODIS 센서로 관측된 자료를 기반으로 도출되었다는 공통점이 있지만, 자료들 사이에는 방출률 산출기법, 산출과정에서 현장관측 자료의 사용 여부, 사용 지면피복 자료의 특성, 시간 합성주기, 해상도 등 많은 과정에서 차이가 있어 방출률 산출 결과가 상이할 수 있다. 하지만 아직까지 한반도를 포함한 아시아-오세아니아 지역에서의 방출률 자료들에 대한 상호 비교 분석이 이루어지지 않았으며, 그 결과 지표면 방출률 자료의 개선이나 새로운 지표면 방출률 자료 산출 시도가 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재 아시아-오세아니아 지역에서 활용되고 있는 세가지 방출률 자료들 (MODIS LSE, CIMSS LSE, KNU LSE)이 갖는 각각의 장·단점, 공통점과 차이점 등을 비교 분석하고자 하였다. 본 연구의 결과는 아시아-오세아니아 지역에서의 지표면 방출률 자료가 갖는 한계점과 이를 개선하기 위한 연구의 근거자료가 될 것이다.

2. 자료 및 연구방법

1) 자료

본 연구에서 사용된 지표면 방출률 자료는 MODIS LSE (Wan, 2008), CIMSS LSE (Seemann *et al.*, 2008) 및 KNU LSE (Korea Meteorological Administration, 2012)이다. KNU LSE는 지표면이 토양과 식생으로만 구성되어 있다는 가정하에 지면피복과 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 이용하는 VCM 기법으로 산출되었다. VCM 기법에서 필요로 하는 주어진 화소에서의 식생비율을 의미하는 Fraction of Vegetation Coverage (FVC)는 Kerr *et al.* (1992)의 방법을 이용하였다. 입력자료로는 2009 ~ 2010년 MODIS NDVI 자료에 최대치 합성법, 시·공간 연속성을 이용한 보정 등을 적용하여

작성한 NDVI 자료를 사용하였으며, 아시아-오세아니아 지역에 대한 지면피복분류자료(Korea Meteorological Administration, 2012)와 European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)에서 작성한 지면피복별 최대방출률 조건표(Look-up table)(Peres and DaCamara, 2005)를 이용하였다. 산출된 방출률 자료의 공간해상도와 주기는 각각 1 km와 8일이며 11과 12 μm 에서의 방출률 값을 제공한다.

MODIS LSE는 지면피복 분류자료 활용법을 이용하여 방출률을 산출하였으며, MODIS 센서의 복사휘도 산출자료(MOD021KM), 위치정보 자료(MOD03), 구름 탐지 자료(MOD35_L2), 분기별 지면피복자료(MOD12Q1) 및 일별 눈 덮임 자료 (MOD10_L2), 그리고 경험적으로 얻어진 방출률을 이용하였다. 이 자료는 단독적인 산출물로 제공되는 것이 아니라 MODIS 산출물 중 지표면 온도 자료에 포함되어 있으며, 현재 Collection 5 (Version 5) 까지 자료가 개선되어 이용되고 있다(Wan, 2008). 다른 자료와 달리 전구 영역에 대해 5분 간격의 국지영역 자료, 1일, 8일 및 월 주기의 합성자료로 다양한 시·공간 해상도의 형태로 제공되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 유형의 MODIS LSE 중 KNU LSE와 시간 및 공간 해상도가 일치하며 11, 12 μm 의 방출률 값을 제공하는 MOD/MYD11A2 (MODIS Land Surface Temperature & Emissivity 8-Day Level 3 Global 1 km) 자료를 사용하였다.

CIMSS LSE는 기선 적합법(Baseline fit method) (Seemann *et al.*, 2008)을 산출에 이용하였으며, MODIS 지표면 온도 및 방출률 자료(MOD11)와 현장관측으로 얻어진 방출률 자료의 조합으로 산출되었다. 전구 영역에 대해 2003년부터 2010년까지 월 주기의 방출률을 제공하고 있으며, 10개 채널(3.6, 4.3, 5.0, 5.8, 7.6, 8.3, 9.3, 10.8, 12.1 및 14.3 μm)에 대한 방출률 값을 포함하고 있다.

본 연구에서 사용된 세가지 방출률 자료들의 특성을 Table 1에 정리하였다. 이 자료들 중 MODIS와 CIMSS LSE 자료는 각각 United States Geological Survey (USGS)와 CIMSS의 홈페이지에서 Anonymous FTP 방식(<https://lpdac.usgs.gov/>, <http://cimss.ssec.wisc.edu/irem/>)으로 다운로드 받아서 사용하였다.

2) 연구 방법

서로 다른 지표면 방출률 자료들을 화소 차원에서

Table 1. Summary of characteristics of the three land surface emissivity data sets (KNU, MODIS, and CIMSS LSE)

Product	KNU	MODIS(MOD/MYD11A2)	CIMSS
Source	KNU Meteorological Satellite Research Lab.	USGS - LP DAAC	CIMSS
Temporal coverage	2010	March 2000 ~ Present	2003 ~ 2010
Frequency	8-day	8-day	Monthly
Spatial resolution	1 × 1 km	1 × 1 km	0.05 × 0.05 degree grid
Spatial coverage	Asia-Oceania Region 90°N, 50°E ~ 60°S, 180°E	Global	Global
Map projection	Plate carree map projection	Sinusoidal Projection	Plate carree map projection
Method	Vegetation cover method (Valor and Caselles, 1996)	Classification-based emissivity method (Snyder and Wan, 1998)	Baseline fit method (Seemann <i>et al.</i> , 2008)

구체적으로 비교분석하기 위해서는 지도 투영법, 공간 해상도 및 시간해상도의 일치화가 필요하다. 본 연구에서는 다음과 같이 각 항목에 대해 시·공간 일치화를 시도하였다.

지표면 방출률 비교를 위해 분석영역은 세 자료가 공통적으로 포함하고 있는 영역 중 아시아와 오세아니아 지역(80°N, 50°E ~ 40°S, 180°E)으로 선정하였으며, 분석기간은 상호 비교가 가능한 2010년으로 선정하였다. 또한 각 자료들은 여러 채널(파장)의 지표면 방출률 값을 제공하고 있는데, 이 중 세 자료가 모두 포함하고 있는 분리대기창 영역의 11, 12 μm 방출률 자료만을 분석에 이용하였다.

세 자료 중 MODIS LSE와 KNU LSE 자료는 공간해상도가 1 × 1 km 이며 CIMSS 자료는 0.05 × 0.05° 이다. CIMSS LSE와 KNU LSE 자료는 플레이트 커리 지도 투영법(Plate carree map projection)이며 MODIS LSE는 시누소이드 도법(Sinusoidal grid)을 이용하고 있다. 따라서 하나의 지도 투영방법으로 통일하기 위하여 MODIS LSE 자료를 MODIS Reprojection Tool (MRT) 프로그램을 이용하여 플레이트 커리 지도 투영법으로 재투영하였다. 이 투영법은 위도와 경도 격자가 수직으로 만나며, 한 화소의 위도와 경도의 거리가 같아 자료의 이용 및 관리가 수월하며 다른 형태로의 재투영이 비교적 간단하다. 따라서 자료의 화소 수와 시작지점의 위도와 경도 정보만으로 전체자료의 위·경도를 쉽게 계산하여 사용할 수 있는 장점이 있지만, 극으로 갈수록 왜곡이 커져 극점이 하나의 줄로 나타나는 등 지형적 왜곡이 심한 단점이 있다(Kang *et al.*, 2007). KNU LSE와 MODIS LSE는 동일한 1 km 공간해상도의 자료이므로 각 화소의 일대일 일치가 가능하여 비교분석이 용이하다. 그

러나 CIMSS LSE는 0.05° (약 6 km)의 공간해상도이기 때문에 비교분석을 위한 공간해상도 일치가 요구된다. 따라서 대원 거리(Great circle distance) 방법을 이용하여 화소 중심 간의 위경도 차이를 거리(km)로 계산한 후, 거리에 대해 가중 평균하는 방법으로 KNU LSE와 MODIS LSE 자료를 상대적으로 저해상도인 CIMSS LSE의 공간해상도로 일치시켰다. 또한 세 자료 중 KNU LSE와 MODIS LSE는 동일한 시간주기의 자료이므로 각 화소의 일대일 일치가 가능하여 비교분석이 용이하지만, CIMSS LSE는 월 주기의 자료이기 때문에 KNU LSE, MODIS LSE의 8일주기와 CIMSS LSE가 가장 가까운 날에 해당하는 자료를 이용하였다.

본 연구에서는 분석영역으로 설정한 아시아와 오세아니아 지역에 대해 계절별 지표면 방출률의 공간분포를 분석하였으며, 파장대별 방출률의 비교를 위해 각 자료별 11, 12 μm 채널의 방출률 차를 분석하였다. 또한 분석영역 내에서 위도 대별로 임의의 화소를 선정하여 11, 12 μm 채널 방출률에 대한 시계열을 분석하였으며, KNU-MODIS, KNU-CIMSS 및 MODIS-CIMSS에 대해 각 화소별 방출률 차를 계산하여 공간분포를 분석하였다. 여기서 사용된 세 자료 모두 실측 자료가 아니기 때문에 세 방출률 자료 사이의 유사성을 차이(difference)와 공간 상관계수(correlation coefficient)를 통해 분석하였다.

3. 결 과

1) 계절별 공간분포

Fig. 1은 각 자료의 11 μm 채널 지표면 방출률의 계절

Fig. 1. Spatial distribution of 11 μm emissivity of KNU LSE (left), MODIS LSE (center), and CIMSS LSE (right) for the selected months.

별 공간분포를 나타낸 것이다. 계절에 관계없이 세 자료 모두 다른 지역에 비해 티베트 고원, 호주 사막지역 및 페르시아만 주변의 중동지역에서 낮은 방출률을 보이고 있다. 이 지역들에서 방출률은 서로 다르지만 타 지역들에 비해 약 3% 정도 낮은 값을 갖는다는 점에서

유사성이 있는 것으로 보인다. 또한 적도와 저위도 지역에서는 방출률은 서로 상이하지만 계절에 따른 방출률의 변동이 매우 적다는 공통점이 있다. 그러나 그 외 대부분 지역에서는 세 자료의 방출률 공간분포가 현저히 다른 것을 확인할 수 있다.

KNU LSE는 상대적으로 낮은 방출률을 나타낸 티베트 고원, 호주 사막지역 및 중동지역과 높은 방출률을 나타낸 저위도부근을 제외한 대부분 지역에서 계절에 따른 큰 변동을 보이고 있다. 식생이 최대로 성장하는 여름에 높은 방출률을 보이며, 반대로 겨울에 낮은 값을 보이고 있다. 특히 위도 30°N 이상의 지역에서는 여름~겨울 사이에 최대 0.04 정도의 큰 계절변동을 보이고 있다. 남반구 또한 호주 사막지역을 제외한 대부분 지역에서 북반구와 유사한 계절변동 패턴이 나타났지만 북반구에 비해 변동폭이 적게 나타났다. 적도와 저위도 지역에서는 연중 높은 방출률이 나타났다. KNU LSE가 상대적으로 큰 계절변동을 보인 것은 방출률 산출과정에서 8일 주기 식생지수 자료를 이용한 것에 기인한 것으로 판단된다.

MODIS LSE는 KNU LSE와 다르게 지표면 방출률의 공간 및 계절변동이 크지 않은 것으로 나타났다. 특히, 여름과 가을보다 봄과 겨울에 방출률이 높은 특징을 보이고 있다. 또한 지리적 위치 및 계절에 관계없이 분석 자료 모두가 0.96 이상의 높은 값을 보이며, 시·공간적으로 연속적이지 않은 불규칙한 변동을 보이고 있다.

CIMSS LSE는 MODIS LSE와 유사한 시·공간적 변동을 보이고 있지만, MODIS LSE에 비해 전체적으로 낮은 방출률을 보이고 있다. 다른 두 방출률 자료들에 비해 방출률이 계통적으로 낮은 특징을 보이고 있는데 이는 산출과정에 적용된 기선적합법과 관련된 것으로 생각된다.

전체기간에 대해 방출률의 공간분포를 시각적으로 분석한 결과 세 자료 모두 방출률의 계절변동 및 공간분포에서 적지 않은 오류들을 포함하고 있음이 밝혀졌다. KNU LSE는 계절에 관계없이 위도 60°N 이상 고위도 지역의 특정 화소들에서 주변보다 현저히 높은 방출률을 보이고 있다. 높은 방출률을 갖는 화소들은 산출과정에 사용된 지면피복자료에서 영구적인 습지(Permanent wetlands)로 분류된 화소들이며, Kang *et al.* (2007)의 연구에서도 비교가 불가능한 화소들로 분류된 것들이다. 따라서 KNU LSE에서 특이 값들이 나타나는 오류는 사용된 지면피복 자료에서의 분류오류에 의한 것으로 추정된다. MODIS LSE는 위도 40°N 이상의 지역, CIMSS LSE는 호주 대륙과 인도 지역 등 계절별로 불특정한 지역에서 오류가 나타나고 있다. 이것

은 방출률 자료의 공간분포 상에서 대각선 방향의 일정한 빗살무늬 형태로 나타나고 있는데, 이러한 불연속들은 많은 자료들을 합성하는 과정에서 기하학적 보정과 같은 전처리 그리고 구름제거 등에서 발생한 오류로 추정된다. 또한 MODIS LSE는 구름에 의한 오염 때문에 육지임에도 불구하고 방출률 값이 제공되지 않는 부분이 곳곳에 나타나고 있으며, MODIS LSE와 CIMSS LSE 두 자료는 강이나 호수가 육지와 구분되어 있지 않아 해당 부분에서 높은 방출률을 보이고 있다 (예: 러시아의 바이칼 호, 카스피 해).

2) 11 μ m, 12 μ m 채널 방출률 비교

11 μ m와 12 μ m 채널의 방출률은 지표면 종류에 관계없이 매우 유사하지만 사막이나 반 사막 등에서는 적지 않은 차이가 있다. 두 채널의 방출률 차는 분리대기장 알고리즘을 이용한 지표면 온도 산출 추정에 있어 중요한 역할을 하는 변수이다. 따라서 각 자료에 대해 화소별로 11 μ m와 12 μ m 채널의 방출률 차를 분석하였다.

Fig. 2는 겨울과 여름에 대한 KNU LSE의 11 μ m와 12 μ m 채널 방출률 차의 공간분포이다. 계절에 관계없이 11 μ m와 12 μ m 채널의 방출률은 서로 유사한 공간분포를 보이고 있지만, 방출률 차는 대부분의 지역에서 -0.006 ~ -0.002로 12 μ m 채널의 방출률이 조금 큼을 볼 수 있다. 티베트 고원과 중동지역, 호주대륙 중부의 일부 건조지역의 경우 더 큰 음의 방출률 차를 보이고 있으나, 식생이 많은 동남아시아는 -0.002 ~ 0.0으로 매우 작은 방출률 차를 보이고 있다. 반면 고위도 지역과 북극 주변의 일부 섬 지역에서는 양의 방출률 차가 나타났다는데, 이것은 빙하나 적설지역에서 11 μ m의 방출률이 12 μ m 보다 큰 것에 기인한다. 사막 등 일부 건조지역을 제외하면 대부분 지역에서 겨울에 비해 여름에 두 채널 사이의 방출률 차가 작아짐을 볼 수 있다. 이는 두 채널 간 방출률 차의 히스토그램에서도 잘 나타나고 있다 (Fig. 3). 이것은 식생이 많아질수록 두 채널 사이의 방출률 차가 작아지는 것과 관련된 것이다.

Fig. 4는 겨울과 여름에 대한 MODIS LSE의 11 μ m와 12 μ m 채널의 방출률 차를 나타낸 것이다. 여름의 경우 대부분 지역에서 -0.006 ~ -0.002로 큰 음의 방출률 차를 보이고 있으며, 특히 티베트 고원과 중동 지역 등 건조지역에서는 -0.008의 큰 방출률 차를 보이고 있다.

Fig. 2. Spatial distribution of 11 μm and 12 μm emissivity and their differences in KNU LSE data set for the 1st half of January and July.

Fig. 3. Frequency of differences between 11 μm and 12 μm emissivity in KNU LSE data set for the 1st half of January and July.

Fig. 4. Spatial distribution of 11 μm and 12 μm emissivity and their differences in MODIS LSE data set for the 1st half of January and July.

Fig. 5. Frequency of differences between 11 μ m and 12 μ m emissivity in MODIS LSE data set for the 1st half of January and July.

Fig. 6. Spatial distribution of 11 μ m and 12 μ m emissivity and their differences in CIMSS LSE data set for the 1st half of January and July.

Fig. 7. Frequency of differences between 11 μ m and 12 μ m emissivity in CIMSS LSE data set for the 1st half of January and July.

반면 겨울의 경우 위도 40 ~ 60°N 부근의 광범위한 지역과 그 주변 일부 지역에서는 0.0 ~ 0.004의 양의 방출률 차가 나타나고 있으며 다른 지역은 여름과 유사한 양의 방출률 차를 보이고 있다. 여름과 겨울 MODIS

LSE 자료의 두 채널간 방출률 차의 히스토그램을 보면 두 계절의 차이를 명확히 알 수 있다(Fig. 5).

CIMSS LSE의 겨울과 여름에 대한 11 μ m와 12 μ m 채널간의 방출률 차를 Fig. 6과 7에 나타내었다. KNU LSE,

MODIS LSE에서와 다르게 두 채널간의 방출률 차가 매우 다양할 뿐만 아니라 그 크기도 매우 크게 나타나고 있다. 계절에 관계없이 티베트 고원과 중동지역, 인도 동부의 일부지역, 호주대륙 중부 및 동남아시아 지역에서는 음의 방출률 차가 나타나고 있다. 하지만 겨울의 경우 위도 40°N 이상의 광범위한 지역에서 대부분의 방출률 차가 나타나고 있으며, 우리나라와 일본, 중국 남부지역에서도 양의 방출률 차를 보이고 있다. 또한 호주대륙에서도 중부 일부지역을 제외하고 양의 방출률 차가 광범위하게 나타나고 있다. 여름에는 위도 60°N 이상의 대부분 지역, 우리나라와 일본, 중국 남

부지역, 호주대륙의 남부지역 등에서 방출률 차가 음으로 나타나고 있다. 일부지역(예: 티베트 고원 북서쪽 지역)에서는 두 채널간의 양의 편차가 겨울에 비해 여름에 증대되었지만, 전체적으로 볼 때 겨울보다 여름에 음의 방출률 차가 빈번하게 발생하고 있다.

3) 시계열 분석

Fig. 8은 각 지표면 방출률 자료에서 위도대별로 임의로 선택한 화소들에 대해 방출률 값의 시계열을 나타낸 것이다. 지리적 위치에 따른 시계열 차의 객관적인 분석을 위해 위도 60°N 이상 지역, 위도 30°N 이상

Fig. 8. Seasonal variations of 11 μm and 12 μm emissivity from the three LSE data sets for the randomly selected pixels.

60°N 미만 지역, 그리고 우리나라와 일본, 저위도지역, 호주대륙에서 표본을 선정하였다. 위도 60°N 이상의 지역에서 KNU LSE의 경우 연 변동폭이 0.02 ~ 0.03로 강한 변동을 보이며 여름 ~ 가을 기간에 MODIS LSE보다 높은 방출률을 보이고 있다. 반면 MODIS LSE는 연중 높은 방출률을 보이며 연 변동폭이 0.01 정도로 KNU LSE 보다 매우 작게 나타나고 있다. CIMSS LSE도 연중 방출률 값의 변동은 작지만, MODIS LSE에 비해서는 큰 변동을 보이고 있다. 또한 대부분의 구간에서 MODIS LSE보다 0.01 정도 작을 뿐만 아니라 매우 불규칙한 변동패턴을 보이고 있다. 세 자료는 지리적 위치에 관계없이 서로 상이한 계절변동 패턴을 보이고 있지만 각 자료들의 11 μm 와 12 μm 두 채널의 방출률은 대부분 지역에서 매우 유사한 계절변동 패턴을 보이고 있다.

KNU LSE와 MODIS LSE의 경우 위도 30°N 이상 60°N 미만의 지역에서도 위도 60°N 이상 지역과 유사한 계절변동을 보이고 있다. 반면 CIMSS LSE는 여름에 방출률이 급격히 감소되고 있으며, 특히 12 μm 채널의 방출률이 더 작은 값을 보이고 있다. 우리나라와 일본지역에서는 대부분의 기간 동안 KNU LSE가 가장 높은 방출률을 나타내고 있다. 적도를 포함한 위도 30°N 미만의 저위도 지역에서는 KNU LSE가 연중 0.99 이상의 높은 방출률을 보이고 있는데, 이것은 식생지수를 이용

한 지표면 방출률 산출의 결과로 해석된다. MODIS LSE도 연중 0.98의 높은 방출률을 보이고 있으며, KNU LSE와 MODIS LSE 두 자료 모두 작은 계절변동을 보이고 있다. 반면 CIMSS LSE는 방출률이 0.98 미만으로 작을 뿐만 아니라 불규칙한 변동을 보이고 있으며, 일부 계절에서 11 μm 의 방출률이 12 μm 보다 크게 나타나고 있다. 호주사막 지역에서도 KNU LSE와 MODIS LSE가 연중 0.97 ~ 0.98 정도로 일정한 방출률을 보이는 반면, CIMSS LSE의 경우 방출률이 0.96 이하로 작을 뿐만 아니라 불규칙한 계절변동을 보이고 있다. 호주 남동부의 시드니 주위의 화소들에서도 이와 비슷한 시계열 패턴이 나타나고 있다.

4) 상호비교

세 방출률 자료 간의 차를 정량적으로 분석하기 위하여 세 자료 간 방출률 차의 공간분포, 월별 방출률 차(difference) 및 공간 상관계수(correlation coefficient)를 분석하였다. Fig. 9는 KNU LSE와 MODIS LSE의 겨울과 여름의 방출률 차의 공간분포를 나타낸 것이다. 겨울의 11 μm 채널 방출률의 경우 위도 60 ~ 70°N 일부지역, 우리나라와 일본 남부를 제외한 위도 30°N 이상의 대부분 지역에서 KNU LSE에 비해 MODIS LSE가 높게 나타나고 있다. 반면 저위도의 동남아시아 지역에서는 KNU LSE가 더 높게 나타나고 있으며, 호주 대륙 또한 중부와 남부 일부를 제외한 대부분 지역에서 KNU LSE가 높

Fig. 9. Spatial distribution of emissivity differences between KNU LSE and MODIS LSE data for the 1st half of January and July.

Table 2. Summary of comparison results (Diff. and Corr.) between KNU LSE and MODIS LSE data set

Month	11 μm		12 μm	
	Diff.	Corr.	Diff.	Corr.
Jan.	−0.0083	0.2667	−0.0056	0.2410
Feb.	−0.0081	0.2785	−0.0054	0.2566
Mar.	−0.0083	0.2084	−0.0054	0.2161
Apr.	−0.0090	0.2784	−0.0058	0.2549
May	−0.0039	0.4836	−0.0024	0.4720
Jun.	0.0010	0.4627	0.0014	0.4592
Jul.	0.0048	0.5950	0.0044	0.5509
Aug.	0.0053	0.5727	0.0047	0.5321
Sep.	0.0041	0.5834	0.0037	0.5489
Oct.	−0.0006	0.5445	0.0000	0.5246
Nov.	−0.0052	0.4470	−0.0036	0.4228
Dec.	−0.0071	0.3548	−0.0049	0.3025
Mean	−0.0029	0.4230	−0.0016	0.3985

게 나타나고 있다. 여름의 11 μm 채널 방출률은 티베트 고원, 카스피해 북부 및 중동에 이르는 광범위한 지역에서 MODIS LSE가 높게 나타나고 있다. 그 외 대부분 지역에서는 KNU LSE가 높게 나타나고 있으며, 특히 러시아 북부와 캄차카 반도의 일부 지역에서 MODIS LSE 보다 약 0.028 정도 높은 방출률을 보이고 있다. 12 μm 채널 방출률 차의 공간분포는 계절에 관계없이 11 μm 채널 방출률 차와 매우 유사하게 나타나고 있다. 전 분석기간에서 두 자료사이의 최대 양의 방출률 차는

0.0305(12 μm : 0.0273)이고 최대 음의 방출률 차는 −0.0462(12 μm : −0.0241)으로 11 μm 에서 차가 더 강함을 볼 수 있다.

Table 2는 KNU LSE와 MODIS LSE의 월별 방출률 차와 공간 상관계수를 나타낸 것이다. 11 μm 와 12 μm 두 채널 모두 여름부터 가을까지 양의 방출률 차를 보이며 최대 0.0053(12 μm : 0.0047)의 차가 나타나고 있고, 그 외 봄과 겨울에는 −0.0090(12 μm : −0.0058)의 비교적 큰 음의 방출률 차가 나타나고 있다. 상관계수는 두 채널 모두 0.2 ~ 0.6 사이의 값을 보이며 월별로 상이하게 나타나고 있다. 특히 여름 ~ 가을 기간에 비교적 높은 상관관계를 보이고, 겨울에 가장 낮은 상관관계를 보이며 계절간의 차이가 뚜렷하게 나타나고 있다.

Fig. 10은 KNU LSE와 CIMSS LSE의 방출률 차에 대한 공간분포이다. 겨울의 11 μm 채널 방출률은 티베트 고원과 호주 사막지역의 일부 화소에서 음의 방출률 차를 보이며 CIMSS LSE에 비해 KNU LSE가 낮은 방출률을 보이고 있다. 위도 40°N 이상의 광범위한 지역에서는 방출률 차가 불규칙적으로 혼합되어 있어 뚜렷한 패턴이 나타나지 않고 있다. 반면 그 외 지역에선 KNU LSE가 높은 방출률을 보이고 있으며, 특히 저위도 지역과 호주 북부지역에서 매우 높게 나타나고 있다. 여름의 11 μm 채널의 경우 티베트 고원과 호주 사막의 매우 좁은 영역에서 CIMSS LSE가 높게 나타나고 있지만, 그 외 대부분 지역에서 KNU LSE가 높게 나타나고 있다.

Fig. 10. Spatial distribution of emissivity differences between KNU LSE and CIMSS LSE data for the 1st half of January and July.

Table 3. Summary of comparison results (Diff. and Corr.) between KNU LSE and CIMSS LSE data set

Month	11 μm		12 μm	
	Diff.	Corr.	Diff.	Corr.
Jan.	0.0074	0.1578	0.0088	-0.0287
Feb.	0.0074	0.1149	0.0092	-0.0671
Mar.	0.0083	0.1185	0.0091	-0.1109
Apr.	0.0096	0.1313	0.0096	-0.0859
May	0.0138	0.2713	0.0133	0.0660
Jun.	0.0188	0.4513	0.0172	0.2039
Jul.	0.0217	0.5785	0.0200	0.2993
Aug.	0.0216	0.6132	0.0205	0.3449
Sep.	0.0199	0.5800	0.0186	0.3181
Oct.	0.0164	0.4704	0.0151	0.2148
Nov.	0.0128	0.2925	0.0122	0.0540
Dec.	0.0109	0.2165	0.0113	0.0069
Mean	0.0141	0.3330	0.0137	0.1013

특히 인도 북부와 중국 지역에서 겨울에 비해 큰 방출률 차가 나타나고 있다. 겨울의 12 μm 채널은 티베트 고원과 중동지역을 제외한 대부분의 지역에서 양의 방출률 차를 보이고 있으며, 그 중 호주 대륙에서 매우 큰 양의 방출률 차가 나타나고 있다. 여름의 12 μm 채널의 경우 티베트 고원과 중동 지역에서 겨울에 비해 적은 음의 방출률 차를 보이고 있는 반면, 중앙아시아 북부와 몽골지역, 호주 북부지역에서는 매우 큰 양의 방출률 차를 보이고 있다. 그 외 지역들은 11 μm 채널과 유사한

공간분포를 보이고 있지만 그 크기는 11 μm 채널보다 작게 나타나고 있다. 전 분석기간에서 최대 0.1508(12 μm : 0.1468)의 양의 방출률 차와 -0.0512(12 μm : -0.0321)의 음의 방출률 차를 보이고 있다. 이 결과는 KNU LSE와 CIMSS LSE의 방출률 차가 KNU LSE와 MODIS LSE의 방출률 차보다 매우 큼을 제시한다.

두 자료는 채널에 관계없이 전체 기간에 대해 양의 방출률 차를 나타내어 CIMSS LSE에 비해 KNU LSE가 전체적으로 높은 방출률을 갖는 것으로 분석되었다. 상대적으로 여름에 크고 겨울에 작은 방출률 차가 나타나고 있다. 상관계수는 11과 12 μm 모두 여름에 높고 겨울에 낮은 값을 보여 월별로 큰 차이를 보이고 있다. 특히 12 μm 채널의 경우 겨울에 0에 가까운 상관계수를 보여 상관관계가 거의 없는 것으로 분석되었다(Table 3).

Fig. 11에 MODIS LSE와 CIMSS LSE의 방출률 차 공간분포를 나타내었다. 채널과 계절에 관계없이 대부분 지역에서 양의 방출률 차를 보이고 있어 MODIS LSE가 CIMSS LSE보다 높은 방출률을 갖는 것으로 나타나고 있으며, 특히 위도 40 ~ 60°N 사이의 지역과 호주 북부 지역에서 0.03 이상의 큰 방출률 차가 나타나고 있다. 예외적으로 겨울 11 μm 채널의 티베트 고원과 중동 지역에서 음의 방출률 차가 약하게 나타나고 있다. 전 분석기간에 대해 최대 0.1450(12 μm : 0.1378)의 양의 방출률 차, -0.0313(12 μm : -0.0250)의 음의 방출률 차가 나

Fig. 11. Spatial distribution of emissivity differences between MODIS LSE and CIMSS LSE data for the 1st half of January and July.

Table 4. Summary of comparison results (Diff. and Corr.) between MODIS LSE and CIMSS LSE data set

Month	11 μm		12 μm	
	Diff.	Corr.	Diff.	Corr.
Jan.	0.0146	0.6059	0.0137	0.1933
Feb.	0.0153	0.5044	0.0145	0.2325
Mar.	0.0160	0.6085	0.0142	0.2461
Apr.	0.0180	0.6805	0.0150	0.3116
May	0.0175	0.6377	0.0157	0.1290
Jun.	0.0173	0.5039	0.0156	-0.0213
Jul.	0.0163	0.3601	0.0155	-0.0619
Aug.	0.0157	0.4325	0.0158	-0.0099
Sep.	0.0152	0.4176	0.0148	0.0794
Oct.	0.0166	0.5766	0.0150	0.2417
Nov.	0.0172	0.6085	0.0155	0.2610
Dec.	0.0177	0.5542	0.0162	0.2442
Mean	0.0165	0.5409	0.0151	0.1538

타났다. 이 결과는 KNU LSE와 CIMSS LSE의 방출률 차와 유사한 크기이며, CIMSS LSE의 방출률이 다른 두 자료에 비해 전체적으로 낮은 값을 포함하고 있음을 알 수 있다.

상관계수는 11 μm 채널의 경우 평균 0.5409로 나타나 상대적으로 높은 상관성을 보이고 있지만, 12 μm 채널의 경우 평균 0.1538로 현저히 낮은 상관관계를 보이고 있다. 특히 12 μm 채널의 경우 여름 ~ 가을 사이에 0에 가까운 값이 나타나 두 자료간에 상관성이 거의 없는 특징을 보이고 있다(Table 4).

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 위성자료로부터 지표면 온도 산출시 전 지구적 배경자료로 주로 사용되고 있는 MODIS, CIMSS 및 KNU LSE 자료에 대해 아시아와 오세아니아 지역을 중심으로 시·공간적 분포와 변동 특성을 비교 분석하였다.

세 방출률 자료는 계절에 관계없이 다른 지역에 비해 티베트 고원, 호주 사막지역 및 페르시아만 주변의 중동지역에서 낮은 방출률을 보이고 있으며, 적도와 저위도 지역에서는 방출률 값은 서로 상이하지만 계절에 따른 방출률 변동이 크지 않은 공통점을 보이고 있다. 그러나 그 외 대부분 지역에서 세 자료는 큰 차이를

나타내고 있다.

KNU LSE는 여름에 높고 겨울에 낮은 방출률을 보이며 계절에 따른 변화가 뚜렷하나, MODIS LSE와 CIMSS LSE는 계절에 따른 변화가 뚜렷하지 않을 뿐만 아니라 불규칙하다. 지리적 위치에 관계없이 세 자료 모두 11 μm 와 12 μm 두 채널의 방출률은 대부분 유사한 계절 변동패턴을 보이고 있으나, 일부 지역을 제외하고 대부분 12 μm 채널의 방출률이 더 높게 나타나고 있다(특히 건조지역).

세 자료는 12 μm 에 비해 11 μm 채널의 방출률이 더 높은 상관성을 보여 두 자료의 공간변동에서 채널간의 차이가 뚜렷한 특징을 보이고 있다. KNU LSE-MODIS LSE 및 KNU LSE-CIMSS LSE 간의 상관관계는 채널에 관계없이 여름에 가장 높게 나타났으나, MODIS LSE-CIMSS LSE의 경우 여름에 가장 낮은 상관성을 보이고 봄에 가장 높게 나타나고 있다.

지역적으로는 저위도 지역과 적도에서 다른 지역에 비해 유사한 방출률 값을 보이고 있다. 반면 호주 및 중앙아시아 지역 등에서 세 자료간의 차이가 나타나고 있으며, 특히 고위도의 북극 주변 일부 섬에서 자료간에 차이가 크게 나타나고 있다.

세 방출률 자료가 유사성을 보이는 부분은 고원지대와 사막 등의 불모지 또는 연중 식생이 활발한 저위도 지역과 같이 시간변화에 따른 지면피복의 변화가 거의 없는 지역으로 분석되었다. 그러나 동일한 기상 위성자료를 입력자료로 사용하였음에도 지리적 위치, 채널 및 계절에 관계없이 방출률 산출결과에 큰 차이가 나타난 것은 위성자료에 내재된 구름 제거 등 전처리의 수준 차, 보조 입력자료 및 산출기법의 차이에 의한 것으로 보인다. 따라서 이러한 자료들의 특성을 정확히 파악하지 않고 다른 자료의 산출(예: 지표면온도, 복사수지 등)에 사용하게 된다면 다음 단계 산출물의 정확도에도 영향을 미칠 것이다.

본 연구에서 제시한 분석결과는 실제의 관측 값과 비교한 것이 아닌 자료간의 상대적인 비교 결과이기 때문에 보다 정확한 검증을 위해 다양한 지역에서의 현장관측 자료의 확보가 필요하다. 또한, 정확한 지표면 방출률을 산출하기 위해 검증된 지면피복과 식생지수 등의 보조자료와 전처리 기법의 개선이 요구된다. 이를 이용하여 방출률 자료의 개선뿐만 아니라 새로운

방출률 산출 알고리즘 개발을 위한 연구도 진행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 “다중위성 기반의 동아시아 지표면온도 및 지면피복지도 산출”의 일환으로 (재)기상기술개발원(CATER 2012-2067)의 지원으로 수행되었습니다. 유익한 지적을 통해 논문의 질을 크게 향상시켜 주신 두 분의 심사위원님께 감사 드립니다.

참고문헌

- Becker, F., and Z.L. Li, 1990. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands, *Remote Sensing of Environment*, 32: 17-33.
- 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.
- Hong, K.-O., M.-S. Suh, and J.-H. Kang, 2009. Improvement of COMS Land Surface Temperature Retrieval Algorithm, *Korean Journal of Remote Sensing*, 25(6): 1-10.
- Hulley, G.C., and S.J. Hook, 2009. Intercomparison of versions 4, 4.1 and 5 of the MODIS Land Surface Temperature and Emissivity products and validation with laboratory measurements of sand samples from the Namib desert, Namibia, *Remote Sensing of Environment*, 113(6): 1313-1318.
- Jiang, G.-M., Z.-L. Li, and F. Nerry, 2006. Land surface emissivity retrieval from combined mid-infrared and thermal infrared data of MSG-SEVIRI, *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 326-340.
- Kahle, A.B., D.P. Madura, and J.M. Soha, 1980. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: analysis for geological applications, *Applied Optics*, 19: 2279-2290.
- Kang, J.-H., M.-S., Suh and C.-H. Kwak, 2007. A Comparison of the Land Cover Data Sets over Asian Region: USGS, IGBP, and UMD, *Atmosphere*, 17(2): 159-169.
- Kealy, P.S., and A.R. Gabell, 1990. Estimation of emissivity and temperature using alpha coefficients, *Proc. of the second Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) workshop*, Pasadena, CA, Jun. 6, vol. 90-55, pp. 11-15.
- Kealy, P.S., and S.J. Hook, 1993. Separating 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 algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 41: 197-209.
- Korea Meteorological Administration, 2009. *Development of retrieval and application algorithms for land surface information from satellite data*, pp. 58-95.
- Kornfield, J., and J. Susskind, 1977. On the effect of surface emissivity on temperature retrievals, *Monthly Weather Review*, 105(12): 1605-1608.
- Li, Z., J. Li, X. Jin, T.J. Schmit, E.E. Borbas, and M.D. Goldberg, 2010. An objective methodology for infrared land surface emissivity evaluation, *Journal of Geophysical Research*, 115(D22), doi:10.1029/2010JD014249.
- 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.
- Seemann, S.W., E.E. Borbas, R.O. Knuteson, G.R. Stephenson, and H.-L. Huang, 2008. Development of a Global Infrared Land Surface Emissivity Database for Application to Clear Sky Sounding Retrievals from Multi-spectral Satellite Radiance

- Measurements, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47: 108-123.
- Snyder, W.C., and Z. Wan, 1998. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36: 214-225.
- Snyder, W.C., Z. Wan, Y. Zhang, and Y.Z. Feng, 1998. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space, *International Journal of Remote Sensing*, 19: 2753-2774.
- Sobrino, J.A., J.C. Jiménez-Muñoz, G. Soria, M. Romaguera, L. Guanter, J. Moreno, A. Plaza, and P. Martinez, 2008. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2): 316-327.
- Suh, M.-S., S.-H. Kim, and J.-H. Kang, 2008. A comparative study of algorithms for estimating land surface temperature from MODIS data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 24: 65-78.
- 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.
- Wan, Z., 2008. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products, *Remote Sensing of Environment*, 112: 59-74.