

히마와리 위성자료를 이용한 산불방사열에너지 산출 Retrieval of Fire Radiative Power from Himawari-8 Satellite Data Using the Mid-Infrared Radiance Method

김대선* · 이양원**

Kim, Dae Sun · Lee, Yang Won

要 旨

산불방사열에너지(fire radiative power)는 산불로부터 방출되는 에너지로서 산불의 연소과정에서 발생하는 온실가스를 추정하기 위한 기초자료로 이용된다. 유럽, 아프리카, 아메리카 지역의 정지궤도 위성센서들은 준실시간의 산불방사열에너지를 산출 및 제공하고 있지만 아시아권에는 아직까지 정지궤도 위성기반의 공식적인 산불방사열에너지 산출물이 제공되지 않고 있다. 본 연구에서는 중적외 복사휘도법(mid-infrared radiance method)을 이용하여 히마와리(Himawari-8) 위성 기반의 산불방사열에너지를 최초로 산출하였으며, 산출정확도를 검증하기 위해 인도네시아 수마트라 지역에 대해 Aqua/Terra 위성의 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer) 산불방사열에너지 산출물과의 비교검증을 실시하였다. 이 과정에서 NDVI(normalized difference vegetation index)와 FVC(fraction of vegetation coverage)를 이용하여 중적외 복사휘도법의 중요한자인 지표면 방출률을 지면피복 종류에 따라 계산하였으며, 최적화 실험을 통하여 히마와리 AHI(advanced Himawari imager)의 센서계수 $a = 3.11$ 을 도출하였다. 본 연구를 통해 산출된 히마와리 산불방사열에너지는 MODIS를 기준으로 약 20%의 평균절대백분비오차를 나타내었으며 이는 미국과 유럽연합의 정지궤도위성의 산불방사열에너지 검증결과와 유사한 수준의 정확도로 평가된다. 히마와리 산불방사열에너지의 산출정확도는 산불의 크기와 위성관측각에 따라 일부 차이를 보였으나 태양천정각과 토지피복에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있었다. 이 연구는 아시아권의 정지궤도위성 산불방사열에너지 산출을 위한 참고자료로서 활용가치가 있으며 산불방출 온실가스 추정에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

핵심용어 : 산불방사열에너지, 히마와리, 중적외 복사휘도법, 방출률

Abstract

Fire radiative power(FRP), which means the power radiated from wildfire, is used to estimate fire emissions. Currently, the geostationary satellites of East Asia do not provide official FRP products yet, whereas the American and European geostationary satellites are providing near-real-time FRP products for Europe, Africa and America. This paper describes the first retrieval of Himawari-8 FRP using the mid-infrared radiance method and shows the comparisons with MODIS FRP for Sumatra, Indonesia. Land surface emissivity, an essential parameter for mid-infrared radiance method, was calculated using NDVI(normalized difference vegetation index) and FVC(fraction of vegetation coverage) according to land cover types. Also, the sensor coefficient for Himawari-8($a = 3.11$) was derived through optimization experiments. The mean absolute percentage difference was about 20%, which can be interpreted as a favourable performance similar to the validation statistics of the American and European satellites. The retrieval accuracies of Himawari FRP were rarely influenced by land cover types or solar zenith angle, but parts of the pixels showed somewhat low accuracies according to the fire size and viewing zenith angle. This study will contribute to estimation of wildfire emissions and can be a reference for the FRP retrieval of current and forthcoming geostationary satellites in East Asia.

Keywords : Fire Radiative Power, Himawari-8, MIR Radiance Method, Emissivity

Received: 2016.12.01, accepted: 2016.12.23

* 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사과정(Ph. D. Student, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, daejinkds@gmail.com)

** 교신저자 · 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 부교수(Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, modconfi@pknu.ac.kr)

1. 서 론

산불은 지구온난화에 따른 기온, 습도, 강수량의 변화로 발생빈도와 강도가 증가하고 있다(Miller and Safford, 2012). 특히 산불은 다량의 에어로졸 및 온실가스 배출원으로 기후 및 대기모델링의 주요한 변수로 분류된다.

산불방사열에너지(fire radiative power, FRP)는 산불로부터 단위시간당 방출되는 복사에너지의 강도를 의미하며(WMO, 2016), 산불지역 내에 연소되는 식생의 바이오매스와 선형적인 관계를 통해 식생연소율로 전환될 수 있다. 이는 토지피복에 따른 온실가스별 변환계수와 함께 이용되어 산불로부터 방출되는 온실가스의 구성성분을 추정하는 방법으로 활용된다. 유럽중기예보센터(European center of medium range weather forecast, ECMWF)의 전지구산불동화시스템(global fire assimilation system, GFAS)은 이러한 방법에 근거하여 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer) 산불방사열에너지를 통해 전지구 산불 방출가스 일자료를 산출한다.

위성 산불산출물은 기본적으로 산불 마스크(fire mask)와 산불탐지 신뢰도(fire confidence level)에 관한 정보를 포함한다. 하지만 이는 산불의 발생여부에 관한 정보이며 이들만으로 산불의 강도와 다양한 특성을 분석하기에는 무리가 따른다. 반면 산불방사열에너지는 산불에 의한 식생손실에 관한 정보를 제공하기 때문에 산불지역의 식생 종류 정보와 함께 활용되면 산불 방출 온실가스의 추적이 가능하다(Wooster et al., 2005).

과거의 산불방사열에너지 측정은 연소실험이나 현장 관측에 의존적이었으나 이는 시공간적 범위가 매우 제한적일 수밖에 없었다. 최근에는 광범위한 지역의 연속적인 산불방사열에너지 산출을 위해 위성원격탐사 기술을 이용하고 있으며 위성센서의 한두 개 적외채널을 이용한 산불방사열에너지 산출이 가능해졌다(Kaufman et al., 1998; Wooster et al., 2003).

위성기반의 산불방사열에너지는 AVHRR(advanced very high resolution radiometer)이나 MODIS와 같은 극궤도 위성센서로부터 산출되기 시작하였으며, WMO(world meteorological organization)의 OSCAR(observing systems capability analysis and review tool)는 MODIS의 산불방사열에너지 산출능력을 극궤도 위성 중 가장 우수한 수준으로 평가하고 있다(WMO, 2016). 하지만 극궤도 위성은 하루에 동일한 지점을 1-2회 관측하기 때문에 연속적인 정보제공이 어

려우며 경우에 따라서는 산불을 탐지하지 못할 수도 있다. 반면 GOES(geostationary operational environmental satellite)의 Imager나 MeteoSat의 SEVIRI(spining enhanced visible and infrared imager)와 같은 정지궤도 위성센서는 현재 유럽, 아프리카, 아메리카의 광범위한 지역에 대해 10 ~ 30분 간격의 준실시간 산불산출물을 제공하고 있다. 아시아 지역의 정지궤도 위성으로는 COMS(communication ocean meteorological satellite), Fengyun 시리즈, MTSAT(multifunctional transport satellite), 그리고 히마와리(Himawari-8)가 운영되고 있다. 하지만 아시아 및 오세아니아 지역은 인도네시아, 호주, 시베리아 등에서 대형산불이 빈번하게 발생함에도 불구하고 아직까지 정지궤도 위성기반의 공식적인 산불산출물을 제공하지 못하고 있다.

본 연구에서는 히마와리 AHI(advanced Himawari imager) 센서로부터 수집된 4마이크로대 채널자료를 통해 중적외 복사휘도법을 적용하여 동아시아 지역의 산불방사열에너지를 최초로 산출하였다. 히마와리 위성은 적도상공 140.7°E 에 위치하여 2015년 7월 이후로 3개의 1km 가시채널과 13개의 2km 적외채널을 통해 10분 간격의 자료를 생산하고 있다. 산출된 히마와리 산불방사열에너지는 아시아의 대표적 산불사례지역인 인도네시아의 2015년 8월 16일 ~ 31일에 대해 동일한 시공간으로 매칭이 가능한 극궤도 위성 Aqua/Terra의 MODIS 산불방사열에너지 산출물과 비교함으로써 검증에 수행하였다. 또한 산출정확도 특성을 확인하기 위해 토지피복, 산불의 크기, 태양고도각 및 위성 관측각에 따른 오차를 분석하였다.

2. 이론적 배경

위성기반 산불방사열에너지 산출기술은 일반적으로 이중분광법(bi-spectral method), 중적외 휘도온도법(mid-infrared temperature method), 중적외 복사휘도법(mid-infrared radiance method)으로 구분된다.

전통적 기법인 이중분광법(Doizer, 1981)은 4마이크로대 중적외(mid-infrared, MIR) 휘도온도와 열적외(thermal infrared, TIR) 휘도온도가 요구된다. 그러나 이중분광법은 고해상도 센서를 고려하여 고안된 방법이며 MODIS나 정지궤도 위성과 같이 저해상도인 위성센서들에 적용될 경우 서브픽셀(subpixel) 문제가 발생할 수 있는데(Giglio and Kendall, 2001; Peterson et al., 2013) 이는 낮은 공간해상도로 인해 소규모 산불픽셀의 휘도온도가 산불이 아닌 주변지점의 휘도온도와 혼합되는 현상을 말한다.

이러한 문제를 해결하고자 열적외 채널의 관여없이 산불픽셀과 주변픽셀의 중적외 휘도온도 차를 이용하는 중적외 휘도온도법이 고안되었으며 MODIS의 산불방사열에너지 산출에 이용되었다(Kaufman et al., 1998)(Eq. (1)).

$$FRP = 4.34 \times 10^{-19} (T_{MIR}^8 - T_{b,MIR}^8) \quad (1)$$

where T_{MIR}^8 and $T_{b,MIR}^8$: eighth powers of the MIR brightness temperature (K) of a fire pixel and the neighbouring non-fire background.

Eq. (1)에서 4.34×10^{-19} 은 연소실험을 통해 유도된 MODIS의 경험상수로서 타위성 센서에 적용할 경우 조정이 필요하다(Kaufman et al., 1998). 하지만 중적외 휘도온도법을 상대적으로 저해상도인 정지궤도 위성에 적용하는 것은 적합하지 않다. 왜냐하면 낮은 해상도로 인해 중심픽셀과 주변픽셀의 거리가 너무 멀어지므로 $T_{b,MIR}$ 를 계산하기 위한 적절한 주변원도우 설정이 용이하지 못하기 때문이다.

중적외 복사휘도법은 산불로부터 방출되는 중적외 복사휘도(radiance)와 산불의 실제온도(T) 간의 관계에 관한 플랑크 열법칙을 전제로 한다(Eq. (2)).

$$L_{f,MIR} = \epsilon_{f,MIR} B(\lambda, T) \approx \epsilon_{f,MIR} a T^4 \quad (2)$$

where $\epsilon_{f,MIR}$: MIR emissivity of the fire, λ : wavelength, T : temperature, a : constant with units $Wm^{-4}sr^{-1}m^{-1}K^{-4}$

주어진 파장 λ 와 온도 T 에서의 방출률은 동일한 온도 T 에서 방출되는 복사휘도와 흑체복사체에서 방출되는 복사휘도의 비율로 정의된다(Li et al., 2013). 단위상수 a 는 λ 와 T 에 의해 결정된다. Eq. (2) 의 두 식이 동일하다고 볼 때 방출되는 T 를 제거할 수 있으며 그로인해 온도에 대한 정보없이 산불픽셀의 중적외 복사휘도만으로 산불방사열에너지를 산출할 수 있다 (Wooster et al., 2005)(Eq. (3)).

$$FRP = \left(\frac{\sigma \epsilon_f}{a \epsilon_{f,MIR}} \right) L_{f,MIR} \quad (3)$$

where σ : the Stefan-Boltzmann constant($5.67 \times 10^{-18} Wm^{-2}K^{-4}$), ϵ_f : broadband emissivity of a fire pixel, a : constant for observing sensor

Table 1. Constant a for several satellite sensors with the emitter temperature range of 650-1300K

Sensor	a ($\times 10^{-9}$)
Terra MODIS	2.96
Aqua MODIS	2.98
GOES-8 Imager	3.07
GOES-9/10 Imager	3.06
GOES-12 Imager	3.08
Meteosat-8 SEVIRI	3.06

중적외 복사휘도법은 주변원도우를 설정하는 과정없이 산불로부터 방출되는 중적외 복사휘도와 산불의 실제 온도의 관계를 이용하며 센서계수 a 를 통해 실제 산불방사열에너지와의 오차를 최소화한다. 산불방사열에너지 산출 위성센서들은 파장과 성능에 차이가 존재하기 때문에 각각 연소실험을 통해 중적외 복사휘도와 산불의 실제온도 간의 선형관계로부터 경험적 상수인 센서계수 a 를 유도하여 산불방사열에너지 산출알고리즘에 활용하고 있다(Table 1).

3. 연구 방법

3.1 지표면 방출률

Eq. (3) 에 의해 표현되는 중적외 복사휘도법의 주요 변수는 중적외 복사휘도와 지표면 방출률이다. 히마와리 위성에서는 아직 공식적인 방출률 산출물이 제공되지 않으므로 temperature independent thermal infrared spectral index (TISI) (Gillespie et al., 1998), temperature/emissivity separation method (TES) (Becker and Li., 1990), vegetation coverage method (VCM) (Valor and Caselles, 1996) 등을 통한 계산이 필요하다. 그러나 TISI 는 복잡한 계산과정으로 구성되며, TES 는 온도로부터 방출률을 분리하는 과정에서 발생하는 불확실성이 포함될 수 있다(Sobrino et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 식생지수 자료와 토지피복에 따른 최대방출률 조건표를 통해 간단하게 방출률을 계산할 수 있으며 TISI와 TES에 준하는 성능을 보이는 VCM을 이용하였다(Park and Suh, 2013). VCM 은 지표면이 단순히 식생과 나지로만 구성되었다는 가정하에 Eq. (4)와 같이 방출률을 계산한다.

$$\epsilon = \epsilon_v \times (FVC) + \epsilon_g \times (1 - (FVC)) \quad (4)$$

where ϵ_v and ϵ_g : maximum MIR emissivity for vegetation and bare ground.

Table 2. Maximum mid-infrared (MIR) and broadband emissivity values by land cover types

IGBP land-cover types		Land-cover category	Land-cover type	Emissivity	
				Mid-infrared	Broadband
1	Evergreen needleleaf forest	Vegetated areas	1, 2	0.9964	0.9972
2	Evergreen broadleaf forest		3, 4	0.9949	0.9939
3	Deciduous needleleaf forest		5, 6, 7	0.9956	0.9956
4	Deciduous broadleaf forest		8	0.9900	0.9931
5	Mixed forests		9, 16	0.9883	0.9928
6	Closed Shrubland		10	0.9867	0.9926
7	Open Shrublands		12	0.9950	0.9958
8	Woody savannas		13	0.9912	0.9941
9	Savannas		14	0.9924	0.9946
10	Grasslands		Areas not covered by vegetation	1, 2, 3, 4, 5	0.8252
11	Permanent wetlands	6, 7, 8, 9, 10		0.7622	0.9572
12	Croplands	12, 14		0.7807	0.9643
13	Urban and built-up	13		0.9138	0.9516
14	Cropland / natural vegetation mosaic	16		0.7660	0.9271
15	Snow and ice	Water areas	11	0.9842	0.9901
16	Barren or sparsely vegetated		15	0.9844	0.9832
17	Water		17	0.9741	0.9841

본 연구에서는 MeteoSat SEVIRI에 표준적으로 사용되고 있는 IGBP (international geosphere-biosphere programme) 토지피복에 따른 최대방출률 조건표를 참조하였다(Table 2). 해당 픽셀의 식생비율을 의미하는 FVC(fraction of vegetation coverage)는 Kerr et al.(1992)의 방법으로 식생지수 NDVI(normalized difference vegetation index)를 이용하여 계산되었다(Eq. (5)).

$$FVC = \frac{(NDVI) - (NDVI)_{\min}}{(NDVI)_{\max} - (NDVI)_{\min}} \quad (5)$$

where $NDVI_{\max}$ and $NDVI_{\min}$: NDVI values when a target pixel completely consists of vegetation or bare ground.

일반적으로 지표면에서 NDVI는 0 ~ 1 사이의 값을 나타내며 높을수록 지표면의 식생활력도가 큰 것을 의미한다. 본 연구에서는 NDVI 자료로 Aqua/Terra MODIS 1km 16일 자료(MYD13A2, MOD13A2)를 이용하였다. 두 위성의 16일 자료는 8일의 시간차이를 가지며 두 자료를 모두 이용하여 시간해상도가 조밀한 NDVI 8일 자료로 구성하여 사용하였다. MODIS NDVI는 857 nm 근적외 채널과 645 nm 적색채널의 반사도에 의해 계산된다(Eq. (6)).

$$NDVI = \frac{\rho_{857} - \rho_{645}}{\rho_{857} + \rho_{645}} \quad (6)$$

NDVI는 일반적으로 시간의 흐름에 따라 점진적인 증감을 보인다. 하지만 위성기반 NDVI의 시계열 상에서는 종종 구름이나 센서오류에 의한 로우피크(low peak)가 발생한다. 본 연구에서는 계절적 변동과 공간적 패턴을 고려한 Park et al.(2011)의 알고리즘을 참조하여 로우피크들을 보정하여 사용하였다. Fig. 1은 2015년 8월 인도네시아의 임의의 10개 지점에 대한 NDVI 보정효과를 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 MODIS NDVI의 원 자료이며 시계열 상에서 급격히 감소하였다가 증가하는 다수의 로우피크들을 확인할 수 있다. Fig. 1(b)는 이러한 로우피크들이 점진적인 증감패턴에 부합하는 NDVI 값으로 보정된 결과를 보여준다.

3.2 산불방사열에너지 산출 및 검증

본 연구에서는 히마와리의 시공간 해상도에 따라 중적외 복사휘도법을 이용하여 인도네시아 수마트라 지역의 10분 간격 2km 해상도의 산불방사열에너지를 산출하였다(Fig. 2). 하지만 위성에서는 아직 공식적인 산불탐지 산출물이 제공되지 않으므로, 대신에 MODIS 산출물의 산불발생 지점을 대상으로 하여 산불방사열에너지를 산출하였다. 사용한 MODIS 산불산출물은 Aqua와 Terra 1km 자료(MYD14, MOD14)이며 히마와리 구름자료의 활용이 가능한 2015년 8월 16일~31일의 산

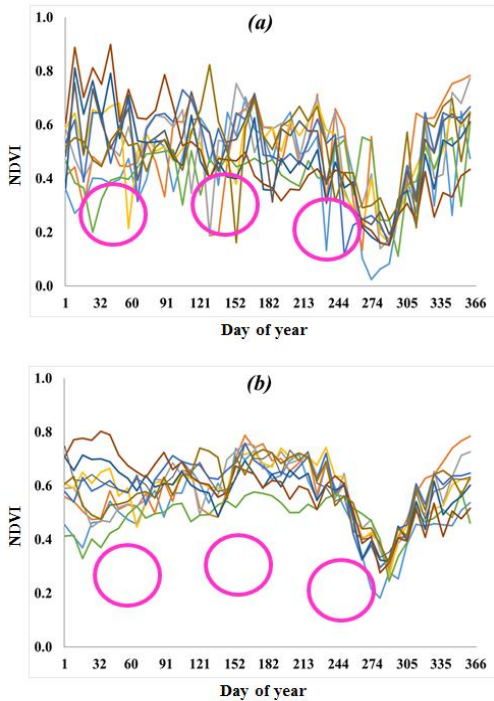


Figure 1. Effects of time-series MODIS NDVI correction for 10 random pixels in Indonesia in August 2015: (a) before correction and (b) after correction

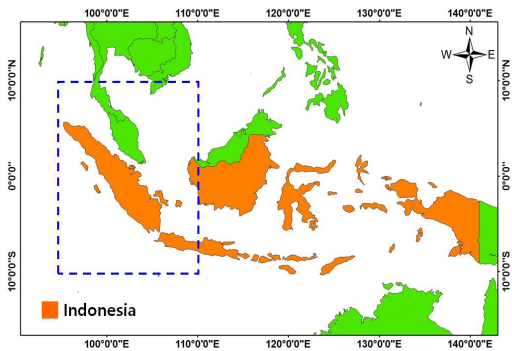


Figure 2. Study area including Sumatra Indonesia (Blue box), 10°N~10°S and 95°E~110°E

불 픽셀들을 수집하였다. 구름은 위성영상에서 픽셀의 중적외 채널의 값에 영향을 미칠 수 있기 때문에 국가 기상위성센터에서 제공하는 히마와리 구름탐지자료를 사용하여 구름에 해당하는 픽셀을 검증대상에서 제외하였다. 연구기간인 2015년 8월은 인도네시아 지역의 건기이며 특히 3개월간에 걸친 대형산불과 다수의 산

불들이 발생했던 기간이다.

히마와리와 MODIS의 공간해상도 차이로 인해 픽셀 간의 일대일 대응이 불가능하므로, 검증에 있어서 기존의 Meteosat SEVIRI와 GOES Imager와 같이 클러스터 단위의 공간일치법을 이용하였다. 히마와리의 2km 픽셀내에 MODIS 1km 4개 픽셀이 정확히 일치하지는 않으므로 클러스터 윈도우 내에 일부 포함되는 MODIS 픽셀들까지 고려하여 최근거리의 픽셀을 중심으로 MODIS 3 × 3 윈도우의 총 9개 픽셀을 클러스터로 구성하였다.

또한 확실한 산불만을 검증에 이용하기 위해서 MODIS 산불탐지 신뢰도(confidence level)가 90% 이상인 케이스만 선별하였다. 또한 구름에 의해 탐지정확도가 떨어질 수 있는 야간 픽셀들을 제거하기 위해 태양천정각(solar zenith angle, SZA)이 85° 이하(Giglio et al., 2003; Xu et al., 2010)이며 MODIS 관측궤적의 가장자리에서 발생하는 왜곡효과(bow-tie effect)를 회피하기 위하여 위성관측각(viewing zenith angle, VZA)이 45° 이하(Roberts et al., 2005)인 클러스터들을 검증대상으로 선정하였다.

또한 MODIS 4마이크로대 중적외 채널의 포화온도는 500K 인데 반해 히마와리는 400K로 다소 차이가 나므로, 휘도온도 400K 이상인 픽셀에 대해서는 두 위성센서가 다르게 감지할 가능성이 존재한다. 따라서 동일한 조건에서의 비교를 위해 히마와리의 포화온도 이하인 매치업들에 대해서 검증을 수행하였다. 클러스터의 공간범위 내에 해당하는 MODIS 산불 픽셀에는 커널 함수에 기초하여 히마와리 중심픽셀을 기준으로 거리에 따라 중심픽셀은 1/2, 가장자리의 8개 픽셀은 1/16 가중치를 부여하였다.

4. 연구 결과

4.1 센서계수 도출

본 연구에서 활용한 중적외복사휘도법에서는 산불의 실제온도와 중적외 복사휘도와의 관계를 나타내는 센서계수 a 가 요구된다. 센서계수는 위성센서별 연소실험에 의해 계산되어야 하나 히마와리 AHI 센서는 아직까지 연소실험이 수행된 바 없다. 따라서 히마와리 AHI 센서계수 산출을 위한 대안으로 역산법(reverse method)을 통해 최적의 센서계수를 도출하는 시뮬레이션을 실시하였다. 먼저 타 위성들의 센서계수(Table 1)를 참조하여 2.80 ~ 3.20 범위내의 0.01 간격의 41개 상수로부터 히마와리 산불방사열에너지를 산출한 후, 이들 중 MODIS 산불방사열에너지와의 오차가 최소화

되게 하는 상수를 찾는 방법을 이용하였으며 최종적으로 히마와리 AHI의 센서계수 $a = 3.11$ 을 유도하였다. 이 과정에서 극단적인 오차를 보이는 3개의 이상치 매치업들이 발견되었으며 이들은 히마와리와 MODIS 사이의 상관관계의 경향에서 12 표준편차 이상을 벗어나는 극단적인 값으로 검증 대상에서 제외되었다.

4.2 히마와리 산불방사열에너지 검증

본 연구를 통해 산출한 히마와리 산불방사열에너지는 MODIS와 15분 시간원도우 내에 구성된 3,068개 검증매치업에 대해 비교되었다(Fig. 3). 비교결과에서 평균편이(mean bias)는 $-17.22\text{MW}/\text{km}^2$, 평균절대오차(mean absolute difference, MAD)는 $42.4\text{MW}/\text{km}^2$, 평균제곱근오차(root mean square difference, RMSD)는 $70.99\text{MW}/\text{km}^2$ 로 나타났다. 그리고 상관계수(r)는 0.878 이며 MODIS 대비 19.96%의 평균절대백분비오차(mean absolute percentage difference, MAPD)를 보였다.

Roberts and Wooster(2008)는 2004년 2, 5, 8월에 아프리카지역에서 발생한 289개 산불에 대하여 Meteosat SEVIRI $3\text{km} \times 3\text{km}$ 해상도의 산불방사열에너지를 산출하여 MODIS와 6분의 시간원도우 내에 해당하는 매치업을 구성하여 약 30%의 오차를 확인하였으며 Xu et al.(2010)는 2007년 7월과 8월 아메리카지역의 약 1,000여개의 산불에 대해 GOES Imager $2.3\text{km} \times 4\text{km}$ 해상도의 산불방사열에너지를 산출하고

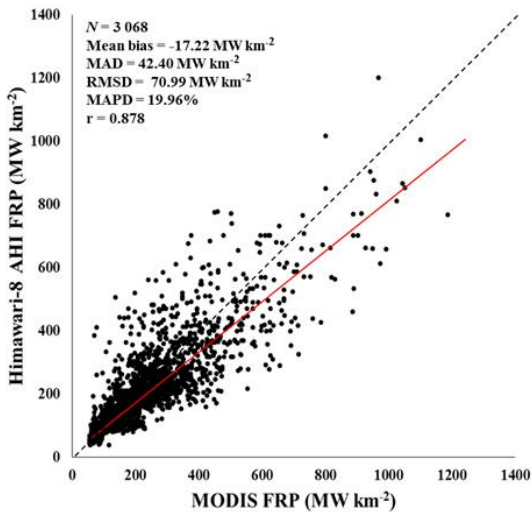


Figure 3. FRP comparisons between the values retrieved using Himawari and extracted from MODIS products

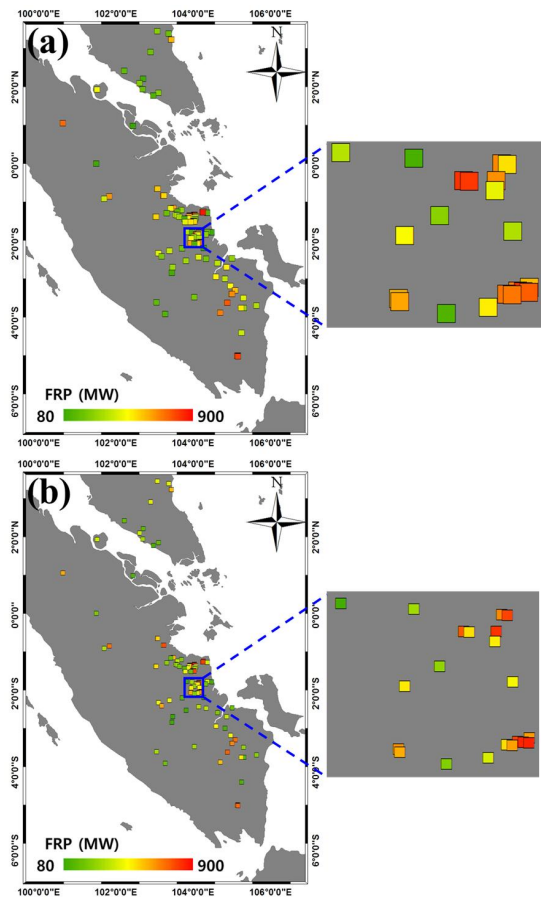


Figure 4. Comparison of Spatial distribution between (a) Himawari and (b) MODIS FRP in 19 August 2015(03:40 UTC)

MODIS와 시간원도우 12분의 매치업을 검증하여 약 17%의 오차를 제시한 바 있다. 이러한 타 정지궤도 위성 산불방사열에너지 산출정확도와 비교할 때, 본 연구에서 산출된 히마와리 산불방사열에너지의 정확도는 이들과 검증조건에 다소 차이가 있지만 대동소이한 결과라 사료된다.

공간분포 상의 히마와리 산불방사열에너지 정확도를 살펴보기 위해서 대형산불의 활동이 왕성했던 2015년 8월 19일 세계시(UTC) 기준 03시 40분의 공간적 분포 패턴을 분석하였다(Fig. 4). 해당 시점의 인도네시아 수마트라 섬 인근에서 탐지된 산불픽셀들은 총 118개이며, 히마와리와 MODIS 산불방사열에너지는 해상도의 차이에 의해 다소 과소 추정되는 경향이 있지만 전체적으로는 MODIS 산불방사열에너지의 공간적 분포패턴을 잘 반영하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 산불픽

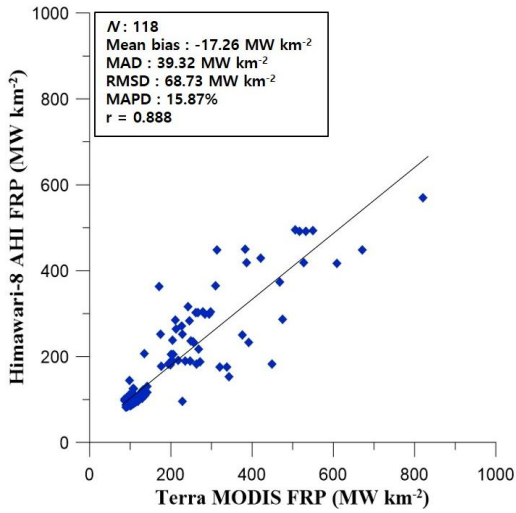


Figure 5. Scatter plot for Himawari and MODIS FRP in 19 August 2015 (03:40 UTC)

셀들에 대한 통계적 수치도 상관계수(r)가 0.888로 나타나 MODIS와 상당히 유사한 결과를 보였다(Fig. 5).

4.3 정확도 특성 분석

최종 산출된 히마와리 산불방사열에너지는 토지피복, 산불의 크기, 태양천정각 그리고 위성관측각에 따라 분류하여 산출정확도의 특성을 평가하였다(Fig. 6). 2015년 8월 16일~31일 인도네시아 수마트라 지역에서 발생한 산불은 토지피복이 대부분이 산림으로 분류되었으며 농지로 분류된 산불과 비교할 때 오차가 유사한 수준으로 평가되었다. 이는 히마와리 산불방사열에너지 산출에서 토지피복의 영향이 크지 않다는 것으로 해석될 수 있다(Fig. 6(a)). 또한 산불의 크기를 히마와리 픽셀 2km에 포함되는 MODIS 산불픽셀의 수(number of fire pixels in cluster)로 나타내어 살펴본 결과, 산불의 크기가 MODIS 2개 픽셀 이상인 경우에서 조금 더 큰 오차를 보였다. 따라서 정확한 FRP의 산출을 위

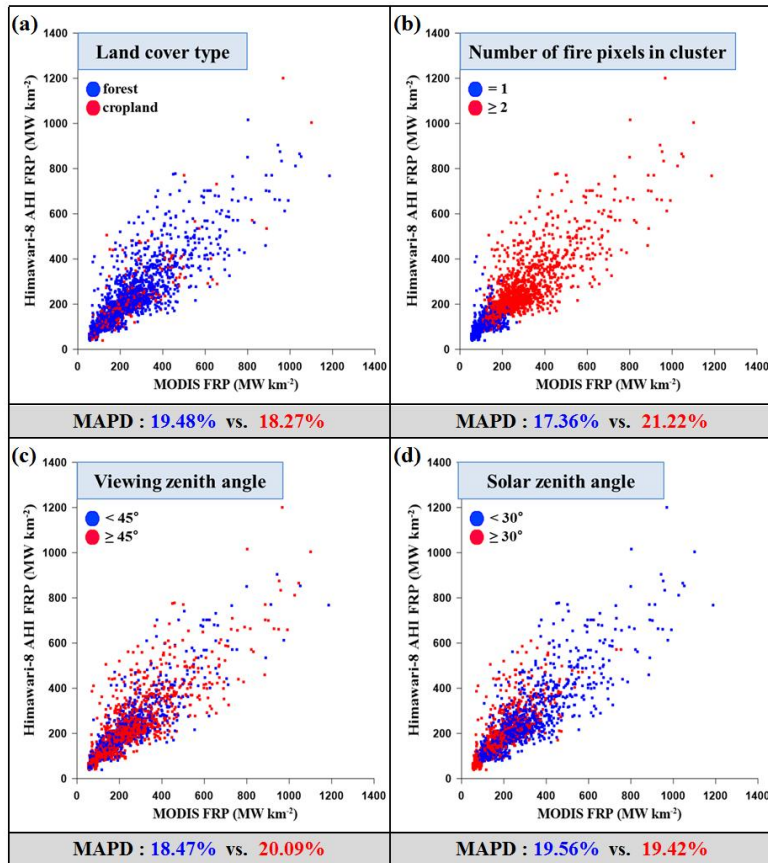


Figure 6. FRP comparisons according to (a) land-cover type, (b) number of fire pixels in cluster, (c) viewing zenith angle and (d) solar zenith angle.

해서 산불의 규모가 고려되어야 할 것이라 판단된다 (Fig. 6(b)). 연구지역의 히마와리 위성관측각(VZA)은 대부분 $30^\circ \sim 50^\circ$ 에 해당한다. 이들 중에서 위성관측 각이 45° 이상에 해당하는 가장자리의 경우에 산불방사열에너지가 다소 큰 오차를 보였다. 이는 위성관측각이 큰 가장자리 부근에서 양호하지 못한 지오메트리로 인하여 복사휘도 값의 불확실성 요소가 커졌기 때문인 것으로 해석될 수 있다(Fig. 6(c)). 주간 산불픽셀 중에서는 태양천정각(SZA)에 의한 산출정확도의 차이를 보이지 않았다. 이는 산불픽셀의 관측 시 태양반사광(sun glint)의 영향은 거의 없었기 때문인 것으로 판단되며 이러한 경우 낮시간대에 태양의 고도와 상관없이 산불방사열에너지를 안정적으로 산출할 수 있을 것으로 사료된다(Fig. 6(d)).

5. 결 론

본 연구에서는 2015년 8월 16일 ~ 31일의 인도네시아 지역을 대상으로 중적외 복사휘도법을 이용한 히마와리 산불방사열에너지(FRP)를 산출하고 MODIS를 통해 정확도를 검증하였다. 연구과정에서는 NDVI와 FVC를 활용하여 지면피복에 따라 중적외 복사휘도법의 중요한자인 지표면 방출률을 산출하였으며, 최적화 실험을 통하여 히마와리 AHI의 센서계수 $a = 3.11$ 을 유도하였다. 연구결과, 산출된 히마와리 산불방사열에너지는 MODIS 대비 약 20% 평균절대백분비오차를 보이는 것을 확인할 수 있었으며 이는 Meteosat SEVIRI와 GOES Imager가 MODIS와의 검증에서 각각 약 30%와 17%의 오차를 나타내었던 것과 비교할 때 유사한 수준의 정확도로 판단된다.

향후에 장기간의 히마와리 중적외 채널자료와 구름 산출물이 축적되면 안정적인고 최적화된 센서계수를 유도하여 산불방사열에너지의 산출정확도 향상을 기대할 수 있을 것이다. 또한 산출정확도 특성분석 결과에서 확인한 위성관측각과 산불크기에 따른 오차는 히마와리 산불방사열에너지를 산출함에 있어 고려되어야 할 요소라 사료된다.

이 연구는 아시아 지역과 오세아니아 지역의 산불방출 온실가스 추정을 위한 자료로 활용될 수 있으며 정지궤도 위성기반의 전지구적 산불방사열에너지 산출에 기여할 수 있을 것이라 사료된다. 또한 차후 발사될 우리나라 차세대 기상위성인 GK-2A(Geostationary Korean Multipurpose Satellite 2A)의 산불방사열에너지 산출에 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 “정지궤도 기상위성 지상국 개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Becker, F. and Li, Z. L., 1990, Towards a local split window method over land surfaces, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11, No. 3, pp. 369–393.
2. Dozier, J., 1981, A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 11, pp. 221–229.
3. Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O. and Kaufman, Y. J., 2003, An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 87, No. 2, pp. 273–282.
4. Giglio, L. and Kendall, J. D., 2001, Application of the Dozier retrieval to wildfire characterization: a sensitivity analysis, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 77, No. 1, pp. 34–49.
5. Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothorn, J. S., Hook, S. J. and Kahle, A. B., 1998, A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36, No. 4, pp. 1113–1126.
6. Kaufman, Y. J., Kleidman, R. G. and King, M. D., 1998, SCAR-B fires in the tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 103, No. D24, pp. 31955–31968.
7. Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P. and Imbernon, J., 1992, Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 41, No. 2, pp. 197–209.
8. Li, Z., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J. A., Wan, Z., Tang, B. and Yan, G., 2013, Land surface emissivity retrieval from satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 34, No. 9–10, pp. 3084–3127.
9. Miller, J. D. and Safford, H. D., 2012, Trend in wildfire severity : 1984 to 2010 in the Sierra Nevada,

- Modoc Plateau, and Southern Cascades, USA, *Fire Ecology*, Vol. 8, No. 3, pp. 41–57.
10. Park, J. H., Cho, A., Kang, J. H. and Suh, M. S., 2011, Detection and correction of noisy pixels embedded in NDVI time series based on the spatio-temporal continuity, *Atmosphere*, Vol. 21, No. 4, pp. 337–347.
 11. Park, K. H. and Suh, M. S., 2013, Inter-comparison of three land surface emissivity data sets (MODIS, CIMSS, KNU) in the Asian-Oceanian regions, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 2, pp. 219–233.
 12. Peterson, D., Wang, J., Ichoku, C., Hyer, E. and Ambrosia, V., 2013, A sub-pixel-based calculation of fire radiative power from MODIS observations: 1 algorithm development and initial assessment, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 129, pp. 262–279.
 13. Roberts, G. J., and Wooster, M. J., 2008, Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 4, pp. 1200–1218.
 14. Roberts, G. J., Wooster, M. J., Perry, G. L. W., Drake, N., Rebelo, L. M. and Dipotso, F., 2005, Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: application to Southern Africa using geostationary SEVIRI imagery, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 110, No. D21, doi:10.1029/2005JD006018.
 15. Sobrino, J. A., Jimenez-Muoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. and Martinez, P., 2008, Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 2, pp. 316–327.
 16. World Meteorological Organization, 2016, Observing Systems Capability Analysis and Review Tool, WMO, <http://www.wmo-sat.info/oscar/gapanalyses?view=61>
 17. Wooster, M. J., Roberts, G. and Perry, G. L. W., 2005, Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 110, No. D24, doi:10.1029/2005JD006318.
 18. Wooster, M. J., Zhukov, B. and Oertel, D., 2003, Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86, No. 1, pp. 83–107.
 19. Xu, W., Wooster, M. J., Roberts, G. and Freeborn, P., 2010, New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 9, pp. 1876–1895.