

논문

정지궤도 위성의 적외선 채널 관측을 이용한 산불과 스모크 동시 모니터링

Simultaneous Monitoring of Wildfire and Smoke Using Geostationary Satellite Infrared Channel Observations

이권호^{1),2),*}, 김관철³⁾, 이다솜³⁾, 하중성⁴⁾, 김희섭⁴⁾

¹⁾국립강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립강릉원주대학교 복사-위성연구소, ³⁾차세대융합기술연구원 산불감시실증지원센터, ⁴⁾한국항공우주연구원 위성활용부

Kwon-Ho Lee^{1),2),*}, Kwanchul Kim³⁾, Dasom Lee³⁾, Jong-Sung Ha⁴⁾, Heeseob Kim⁴⁾

¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University (GWNU), Gangneung, Republic of Korea

²⁾Research Institute for Radiation-Satellite, Gangneung-Wonju National University (GWNU), Gangneung, Republic of Korea

³⁾Test-bed & Support Center for Wildfire Monitoring, Advanced Institute of Convergence Technology (AICT), Suwon, Republic of Korea

⁴⁾Satellite Application Division, Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon, Republic of Korea

접수일 2024년 5월 8일
수정일 2024년 6월 5일
채택일 2024년 6월 5일

Received 8 May 2024
Revised 5 June 2024
Accepted 5 June 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)33-640-2319
E-mail : kwonho.lee@gmail.com

Abstract Large wildfires have a significant impact on regional air quality and climate. Active fires and smoke emissions are highly variable, making it difficult to determine their impact on air quality. In this study, we present a methodology to derive temporal location information on active fire and smoke using observations from the Advanced Meteorological Imager (AMI) on Geo-KOMPSAT-2A (GK2A). Comparison of the GK2A/AMI observations with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) fire products confirmed that the location of active fires and the area of smoke plumes were well detected within the observation coverage. In March 2022, two large wildfires in eastern South Korea burned an area of more than 250 square kilometers and sent huge smoke plumes up to 20 kilometers over the East Sea, resulting in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations of up to 910 µg/m³ and 803 µg/m³, respectively, measured at the nearest stations. Therefore, integrated analysis of ground-based and remote sensing observations can play an important role in effectively monitoring wildfire areas and smoke plumes.

Key words: Geostationary satellite, Forest fire, Aerosol, Smoke, Biomass burning

1. 서 론

산불은 자연적 또는 인위적 원인에 의하여 발생하며, 그 과정과 영향은 매우 복잡하게 나타난다 (Kasischke *et al.*, 2010). 최근, 기후 변화로 인한 식생의 성장과 건조 환경 조건의 변화는 산불 활동에 영향을 미치게 되므로, 산불 발생을 촉진하는 중요한 요인으로 보고되고 있다 (Hantson *et al.*, 2022; Rich-

ardson *et al.*, 2022; Abatzoglou and Williams, 2016). 이렇게 발생하는 산불은 대기 중의 탄소입자와 이산화탄소 농도를 증가시키며 생태계, 농경지 및 도시에 영향을 미치는 심각한 환경 및 사회적 영향을 미칠 수 있다 (Bowman *et al.*, 2009). 산불의 연소 과정으로 생성된 에어로솔은 연소의 원료가 되는 지역의 식물, 작물, 폐기물 등과 연소 조건에 따라 다양한 특성을 가지게 되지만, 일반적으로 유기 탄소, 미네랄, 잔여

물질, 이온 및 다른 물질로 구성된 미세입자로 분류된다(Sparks and Wagner, 2021). 산불과 같은 대규모 바이오매스 연소 과정에서 다량으로 생성된 에어로솔은 비교적 높은 고도에서 넓은 지역으로 이동 및 확산되며(Song *et al.*, 2022), 지역 대기질뿐 아니라 인체 유해성 및 기후학적 특성에도 영향을 줄 수 있다(Williams *et al.*, 2019). 따라서, 산불의 현황과 대기질에 미치는 영향에 관한 이해는 이를 예방하고 대응하는데 중요한 역할을 하게 된다.

광범위한 지역에서 발생하는 산불을 기존의 지상 관측 네트워크를 통해 관측하는 것이 어렵다. 대부분의 관측소가 접근성이 좋은 주거지역이나 도시 내부 지점에 위치하고 있으므로, 이 지점과 멀리 떨어진 지역에서 발생하는 산불의 동적인 변화를 관측하기 어렵기 때문이다. 원격탐사 기법은 공간적 제한을 극복할 수 있는 수단이므로, 산불 탐지와 스모크 모니터링에 유용한 인공위성 원격탐사 자료가 널리 사용되고 있다(Sicard *et al.*, 2019). 인공위성은 산불 탐지 및 재난 관리와 같은 다양한 분야에서 중요한 역할을 수행하였으며, 다양한 환경 조건을 관측하고 데이터를 수집하여, 예측 모델에 필요한 정보를 제공하기도 한다(Lee *et al.*, 2022). 또한 위성은 광학적이거나 레이더 기술 등 다양한 센서와 기기를 활용하여 지구의 특정 지점에서 데이터를 수집하고, 이를 지상 국지적인 기상 정보로 변환하여 지구 대기 및 환경의 변화를 관찰하고 분석한다(Lee and Bae, 2023). 위성 관측 자료를 이용하여 산불 발생 지점에 대한 활성 화재 수, 연소 면적, 화재지역에서 발생하는 복사열을 도출할 수 있으며(Li *et al.*, 2019), 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Thickness, AOT), CO 또는 CO₂의 배출물질을 측정할 수 있다. 이를 통해 산불의 현황 및 환경 모니터링에 필요한 정보를 제공하고, 인간의 일상생활과 안전에 도움을 주는 중요한 역할을 한다(Shin and Lee, 2016).

본 연구에서는 정지궤도 위성인 Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A (GK2A) 위성의 탐재센서 Advanced Meteorological Imager (AMI)의 적

외선 채널 관측자료를 사용하여 산불이 발생한 지역에 관한 위치정보와 발화점으로부터 발생한 스모크 탐지 가능성을 평가하였다. 이를 위하여 복사전달 모델을 이용한 민감도 실험을 수행하였으며, 적외선 영역에서 이론적인 복사 관측량이 지표 온도와 대기중의 스모크에 의한 영향을 해석하였다. 이러한 민감도 실험을 통하여 획득한 변수 값의 설정 범위에 따라 산불이 발생한 지리적 위치와 산불 기원의 스모크를 탐지할 수 있는 방법론을 제시하는 것을 목적으로 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 연구 대상 지역

본 연구는 2022년 3월 초순경 강원도 동해와 울진 지역에서 동시에 발생하였던 대형 산불을 대상으로 하였다. 연구 대상 지역은 북위 34도~39도, 동경 125도~135도에 해당하는 영역으로, 한반도와 동해 일부를 포함하고 있다(그림 1). 이 지역은 한반도 동쪽에 위치한 산악 지형과 동해 바다가 인접하고 있어 해양성 기후와 산악성 기후의 영향을 받는 지역으로, 여름은 서늘하고 습도가 높지만 겨울은 상대적으로 비교적 따뜻한 편이다. 태백 산맥이 인접한 동해안을 따라 뻗어 있어 산악지형으로 인한 지역별 기온과 강수량

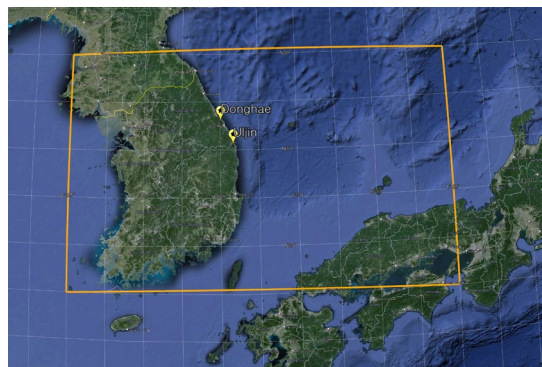


Fig. 1. Map of the study area (34°N~39°N, 125°E~135°E). The locations of the first fire reported (Donghae (39.039°N, 117.737°E) and Uljin (39.039°N, 117.737°E)) are indicated by yellow pin.

Table 1. Geographical locations of the fires reported from KFS (2023).

Location (Lat, Lon)	Start	End	Burned area
Donghae (N37.561°, E129.011°)	4. Mar. 2022 16:08	8. Mar. 2022 10:00	41.90 km ²
Uljin (N37.068°, E129.335°)	4. Mar. 2022 02:15	22. Mar. 2022 10:00	163.01 km ²

Table 2. Specification of measurement instruments used in this study. PM data has been obtained from AirKorea web database (<https://www.airkorea.or.kr>) organized by the Korean Ministry Of Environment (MOE).

Data	Instrument	Parameters	Resolution
Satellite	GK2A/AMI	Level 1b calibrated radiance (16 spectral channels)	Hourly, 1~2 km/pixel
Satellite	MODIS	Active fire position	Daily, 1km/pixel
Satellite	MODIS	Level 2 aerosol	Daily, 10 km/pixel
Ground measurements	Betaguage	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Hourly

에 큰 차이가 있다. 동해와 울진은 모두 동해안에 인접한 지역으로서, 동해 지역의 지난 20년간 (2002년 ~2022년) 평균 기온 $13.0 \pm 8^\circ\text{C}$, 강수량 109.4 ± 121 mm, 풍속은 2.4 ± 0.5 m/s, 울진 지역은 평균 기온 $13.0 \pm 8^\circ\text{C}$, 강수량 100.9 ± 106 mm, 풍속은 2.9 ± 0.6 m/s로 두 지역의 기상 조건은 유사한 범위로 관측되었다.

동해 산불 사례는 2022년 3월 5일 1시경 강릉시 옥계면 남양리에서 방화로 인하여 발생하여 동해시 북부로 진행되었으며, 2022년 3월 8일 오후에 진화되었다(KFS, 2023). 동해에서 발생한 산불로 약 41.90 km²의 피해 면적과 1명의 사망 피해를 입은 것으로 알려졌다. 한편, 울진에서 발생한 산불은 경상북도 울진군 북면 두천리에서 2022년 3월 4일 오전 11시 15분경 방화로 인하여 시작되었으며, 최종 진화는 2022년 3월 13일에 완료되었다. 울진의 산불은 약 163.01 km²의 피해 면적과 6,482명의 대피 인원이 발생한 것으로 보고되었다(KFS, 2023). 표 1에는 두 산불 사례에 관한 지리적 위치, 발생 기간, 피해 면적에 관한 설명을 나열하였다.

2.2 자료

2022년 동해와 울진에서 발생한 산불의 발생지역과 대기중으로 배출된 스모크의 현황과 이동 패턴을

정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 지구관측 인공위성 자료와 지상에서 관측된 Particulate Matter (PM) 농도 자료가 사용되었으며, 표 2에는 각 자료에 대한 목록과 특성을 설명하였다. 산불 위치와 스모크 탐지를 위하여 사용된 인공위성 자료는 국내 정지궤도 위성인 GK2A의 level 1b 원시자료이다. GK2A 위성으로부터 산출된 결과물에 대한 상대적인 비교를 위하여 TERRA와 AQUA 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)의 level 2 공식 산출자료 중 화재 위치 자료와 에어로솔 산출물 자료를 사용하였다. 그리고 산불이 발생한 위치와 가장 인접한 환경부 지상관측망 (<http://www.airkorea.or.kr>)에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 자료를 이용하여 산불 발생기간 동안의 대기질 변화를 분석하였다. 개별 자료에 대한 상세 설명은 다음과 같다.

여러 가지 환경 관측 위성 중 국내 정지궤도 위성인 Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A (GK2A)는 한반도 및 주변 지역에서 연속 기상 및 환경 모니터링을 위한 목적으로 운영되고 있다. GK2A 위성의 탑재 센서인 AMI는 가시광선부터 적외선 영역의 복사에너지를 관측할 수 있는 수동형 원격탐사 기기이다. AMI 가시채널을 사용하여 AOT와 같은 물리량을 측정할 수 있으나, 화재로부터 발생하는 짙은

스모크 때문에 구름으로 오인될 수 있으며 야간에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 또한 AOT는 대기중의 총 입자상 물질의 부하량을 의미하는 물리량이므로 스모크 이외의 입자상물질(오염입자, 먼지, 해염 등)에 의한 영향을 받는다. 그러나, 적외선 채널은 가시광선보다 대기 투과도가 높고 질은 스모크에 대한 관측이 가능하며, 야간에도 산불과 스모크를 동시에 탐지할 수 있다(Lee and Park, 2023).

본 연구에서 사용된 인공위성 자료는 국내 정지궤도 위성인 GK2A/AMI 원시 관측 자료 중 복사 보정(radiometric calibration)된 Level-1B (L1B) 자료를 사용하였다. GK2A 위성의 관측영역은 확장된 동아시아(Extended East Asia (EEA)) 모드이며, 본 연구의 대상 지역인 한반도 동부 지역과 동해를 포함하는 영역만 추출하여 사용하였다. GK2 위성에 탑재된 AMI 센서는 16개 채널(중심 파장 0.47 μm , 0.51 μm , 0.64 μm , 0.86 μm , 1.38 μm , 1.61 μm , 3.8 μm , 6.2 μm , 6.9 μm , 7.3 μm , 8.6 μm , 9.6 μm , 10.4 μm , 11.2 μm , 12.4 μm , 13.3 μm)에서 지구 관측을 수행하며, 약 10분 간격으로 전구 영역을 관측하는 위성 센서이다. AMI의 공간해상도는 0.47 μm , 0.51 μm , 0.86 μm 파장의 가시 채널에서는 약 1 km 해상도를 가지며, 0.64 μm 채널에서는 약 500 m 해상도를 가진다. 그리고 나머지 적외선 채널에서 약 2 km 해상도로 측정 가능하며, 시간해상도는 최대 2.5분에 한 번씩 관측할 수 있다. AMI는 기존의 정지궤도 위성 대비 보다 고해상도의 다중채널에서 관측할 수 있으므로, 보다 상세한 수준의 지구환경변화정보를 생산할 수 있다.

GK2A/AMI를 이용한 산불 지역 및 스모크 탐지 결과에 대한 비교를 위하여, 현재 성공적으로 운영되고 있는 저궤도 인공위성 관측자료를 사용하였다. 산불이 발생한 지점에 관한 상대적인 비교를 위하여, 다양한 저궤도 위성 관측자료 중 전 세계 화재관측 정보를 제공하고 있는 MODIS 화재탐지 산출자료(Active Fire Product (AFP)) (코드명 MOD14 및 MYD14, 버전 061) (Giglio *et al.*, 2016)를 사용하였다. 그리고 산불지역에서 발생한 스모크에 대한 정성적

인 비교를 위하여, MODIS의 에어로솔 산출자료(Aerosol Product) (코드명 MOD04 및 MYD04, 버전 061) (Levy *et al.*, 2013) 중 에어로솔 광학두께(Aerosol Optical Thickness; AOT)를 사용하였다.

MODIS MOD14/MYD14 화재 및 열 이상 알고리즘(Giglio *et al.*, 2016)에 의하여 산출된 MODIS AFP는 위성 영상의 픽셀 내에 하나 이상의 화재를 포함하는 플래그를 의미한다(Giglio and Justice, 2021). 이 산출물은 약 1 km의 공간해상도를 가지며, 0에서 100% 사이의 신뢰도 추정치를 제공한다. 화재 발생 지점을 탐지하기 위하여 MODIS 채널 중 4 μm , 11 μm 및 12 μm 밝기 온도를 사용한다. 그리고 주간 관측의 경우 각각 0.65 μm , 0.86 μm 및 2.1 μm 반사율도 사용한다. MODIS AFP의 정확도 검증 결과는 약 5% 이내의 탐지 정확도를 가지는 것으로 보고되었다(Giglio *et al.*, 2016).

MODIS 에어로솔 산출물은 지구 대기 칼럼에 존재하는 입자상 물질의 상대적인 총량을 의미하는 AOT에 대한 시공간적 정보를 제공한다. MODIS Level 2 에어로솔 산출물(코드명 MOD04, MYD04)은 약 5분 간격으로 관측된 Level 1b 가시광선 대역의 채널 정보로부터 산출되며, 최종 결과는 화소당 약 10 km의 공간해상도를 가지고 있다. MODIS 에어로솔 산출 방법은 주간 동안에 에어로솔에 의하여 산란된 가시광선의 양을 정량적으로 분석하여 입자의 부하량을 정하는 방식이 사용된다. 이를 위하여 복잡한 복사전달 방정식과 역해석 방법(Inversion method)이 적용되며, 보다 상세한 과정은 the National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 에어로솔 연구팀의 연구에 기술되어 있다(Levy *et al.*, 2013).

3. 결과 및 토의

3.1 산불 탐지

산불은 넓은 범위의 지역에서 발생하는 연소활동으로 인하여 강한 적외 복사에너지를 방출하므로, 적

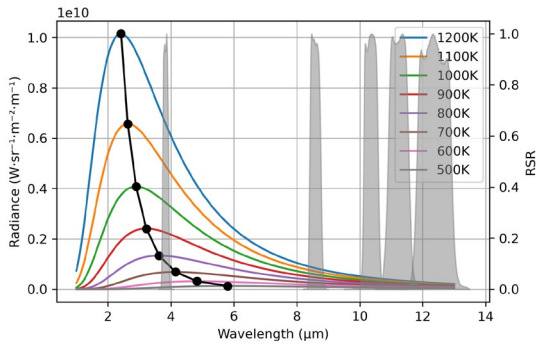


Fig. 2. Changes in spectral radiance as a function of the absolute temperature of the target (black dot: maximum radiance at a given temperature, shade area: relative spectral response functions of the GK2A/AMI bands 7 (3.8 μm), 11 (8.6 μm), 13 (10.4 μm), 14 (11.2 μm), and 15 (12.4 μm)).

외선 채널을 이용한 탐지가 가능한 것으로 알려져 있다 (Filizzola *et al.*, 2017; Giglio and Schroeder, 2014). 그림 2는 흑체 (black body)의 적외 온도 변화에 따라 방출하는 파장별 복사에너지의 변화량을 모의한 결과이며, GK2A/AMI의 적외선 채널 상대반응함수 (relative spectral response function) 영역을 중첩하여 표시하였다. 각 절대온도 값에 대해 최대 복사 에너지를 나타내는 위치는 해당 파장에서 가장 민감한 부분을 의미하므로, 짧은 적외선 파장일수록 높은 절대 온도를 가진 물체를 탐지하는 데 유리함을 알 수 있다.

GK2A/AMI의 적외선 채널을 이용한 산불 발생 지점 탐지 방법론의 핵심은 지상의 목표지점에 대한 온도가 급격히 상승한 지역을 식별하는 것이다. 일반적으로 산불지역에서 발생하는 온도는 주변 지역 온도보다 훨씬 높기 때문에, 산불 탐지의 첫 번째 기준은 특정 지점의 온도가 주변 지역 대비 높은 지점을 평가하는 것이다. 이때 사용되는 기준값은 3.8 μm 채널의 밝기온도값이 300 K보다 큰 화소와, 주변 화소의 온도 차 (ΔT)가 10 K보다 높은 조건을 만족하는 화소로 설정하였다. 산불 탐지의 두 번째 기준은 동일 지점에서 일정 기간 동안 온도가 지속적으로 상승하는 조건을 평가하는 것으로서, 이는 동일 지점에서 이전 시간 대비 현재시간에서 온도가 증가한 조건 ($\Delta T >$

0 K)을 만족하는 화소에 대하여 화재 발생 지점으로 탐지하였다. 이러한 두 가지 조건을 모두 만족하는 화소를 화재 발생 지점으로 설정하였으며, 그 결과는 그림 3과 같이 지리적인 위치 지점으로 표시하였다.

그림 3은 올진 산불이 최초 발화한 이후, 2022년 3월 4일과 3월 5일 기간동안 GK2A/AMI와 MODIS가 동일한 시간에 화재를 탐지한 사례를 비교한 결과이다. 저궤도 위성인 MODIS는 하루 1~2회 정도의 관측만 가능한 반면, 정지궤도 위성인 GK2A/AMI는 연속적인 화재지역 관측 결과를 생산할 수 있는 장점이 있으나, 공간해상도가 MODIS에 비해 2배 정도 큰 단점이 있다. 그림 3의 사례에서는 GK2A/AMI와 MODIS가 탐지한 화재 발생 지점이 지리적으로 동일한 지점인 올진과 동해에서 발생한 것으로 나타나 산불이 잘 탐지되었음을 확인할 수 있다.

GK2A/AMI 화재탐지 결과의 정량적 검증을 위하여 동일 시간대에 MODIS 화재탐지 산출물과 지리적 위치에 대한 차이 정도를 비교하였다. 각 위성이 탐지한 화재 발생 지점에 대한 비교를 위하여 GK2A/AMI와 MODIS에 탐지된 화재 발생 위치에 대한 경위도 좌표값을 x, y 방향 벡터로 변환한 후, 식 (1)을 사용하여 지리적 거리 (d)를 계산하였다.

$$d = \sqrt{((x_{modis} - x_{ami})^2 + (y_{modis} - y_{ami})^2)} \quad (1)$$

위 식에서 GK2A/AMI가 탐지한 화재 위치 지점은 (x_{ami}, y_{ami}) 이고, MODIS가 탐지한 화재 위치 지점은 (x_{modis}, y_{modis}) 이며, 두 지점 간의 거리 d 는 km 단위로 계산된다. 두 위성에서 탐지된 화재 발생 위치 지점이 각 위성의 공간해상도 범위 안에 해당하면 두 위성의 화재 탐지 정확도는 일치하는 것으로 가정한다.

그림 4는 전체 관측 기간 동안 GK2A/AMI와 MODIS가 동시에 관측한 화재 발생 지점 간의 거리 d 에 대한 빈도수를 나타낸 히스토그램과 빈도분포함수곡선을 나타낸다. d 값의 빈도분포식은 1.28 ± 0.79 km이며, 이 범위 안에서 MODIS 화재 탐지 위치와 일치하는 것으로 나타났다. 즉, GK2A/AMI의 적외선 채널 공간해상도가 약 2 km이고, MODIS의 공간해상

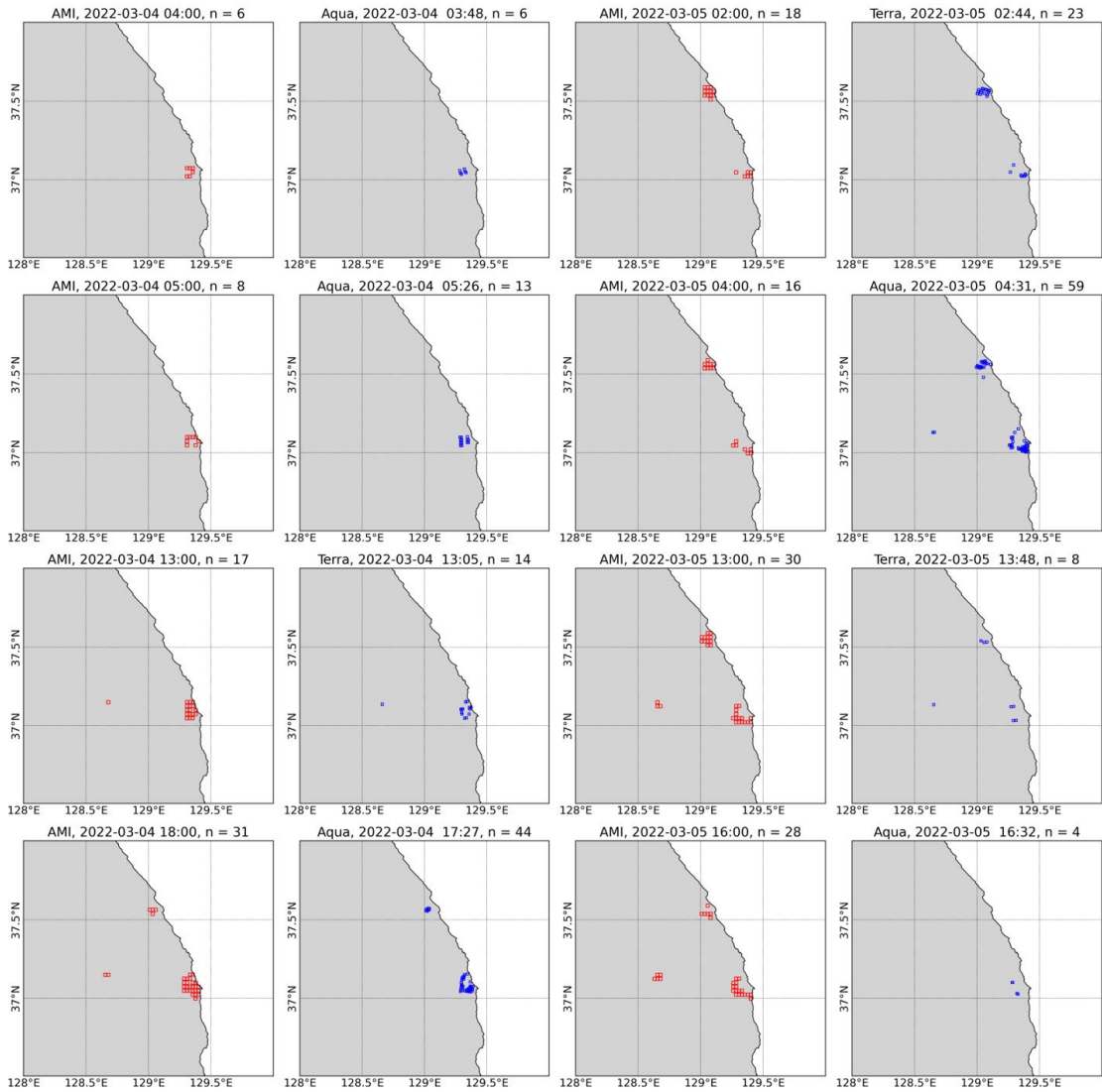


Fig. 3. Fire positions detected from the GK2A/AMI (red) and MODIS (blue) on 4~5 March 2022. Note that AMI fire pixels have a spatial resolution of 2 km and MODIS has a resolution of 1 km.

도가 약 1 km인 것을 고려할 때, 두 산출 결과에 대한 지리적인 거리 차이는 AMI 센서의 공간해상도 내에서 유의미한 것으로 판단된다. 그리고 3 km 이상의 거리차가 발생하는 것은 두 센서 간의 관측 영역이 다르거나, 저궤도와 정지궤도 상에서 바라보는 지표의 대상 지점에 대한 지리적인 오차, 두 산출물 간의 탐지 오차 등이 원인이 될 수 있을 것이다.

3.2 산불 기원 스모크 탐지

산불에서 기원하는 스모크는 주로 탄소성 입자와 다양한 토양의 무기물질이 포함된 것으로 알려져 있다. 이러한 탄소성 입자에 대한 탐지를 위하여 복사 전달 모의가 필요하다. 본 연구에서는 식물체의 연소 생성물에 대한 광학 특성값(Sutherland and Khanna, 1991)을 사용하여 연소 과정에서 발생하는 입자상 물

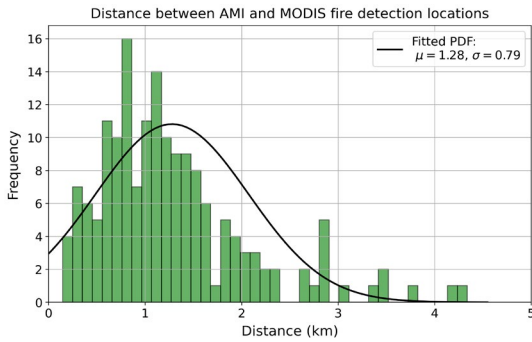


Fig. 4. Distribution of distance differences for GK2A/AMI and MODIS detected fire locations.

질이 적외선 복사전달 과정에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) (Ricchiuzzi *et al.*, 1998) 복사전달모델을 사용하였으며, 이 모델은 Discrete Ordinate Radiative Transfer (DISORT) 알고리즘을 기반으로 하며, 대기권역을 수평적인 층으로 나누어 각 층별로 복사전달 방정식을 풀어 대기와 지표에서의 복사량을 계산한다. 이를 통하여 대기 조성 물질이나 지표의 특성 변화에 따라 각 층별 복사량에 미치는 변화도를 모의할 수 있다. SBDART 모델의 입력 조건으로는 중위도 표준 대기 모델과 식생 지표를 공통 입력자료 조건으로 활용하였으며, GK2A/AMI의 적외선 채널 중 3.8 μm , 8.7 μm , 10.4 μm , 11.2 μm , 12.4 μm 밴드의 상대반응함수와 AOT값(범위: 0~5)에 따라 모의된 위성 관측 복사량을 밝기온도 값으로 환산하였다.

그림 5는 연소성 입자의 부하량 증가에 따른 각 채널별 밝기온도 값의 변화에 대한 관계를 나타낸다. 먼저 3.8 μm 밴드의 경우, AOT의 증가는 이 파장대에서 입자 산란 효과의 증가로 인하여 일정 구간에서 BT값이 상승하게 된다. 동시에 입자수의 증가는 산란 효과보다는 흡수 효과가 더욱 커지게 됨으로써, 오히려 BT값이 감소한다. 따라서, 산불과 같은 바이오매스 연소성 입자의 탐지를 위하여 3.8 μm 밴드를 사용하는 것은 임계 AOT 구간에 대한 사용만이 유효하다는 제약이 따르게 된다. 그러나, 파장이 상대적으

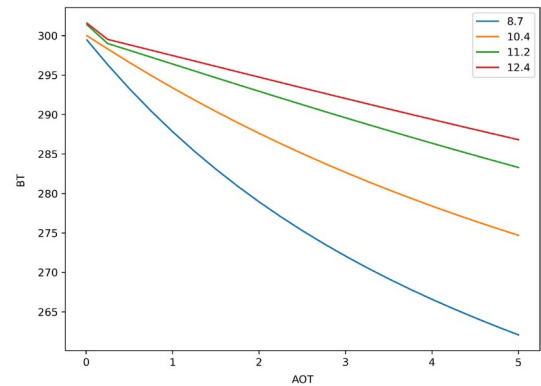
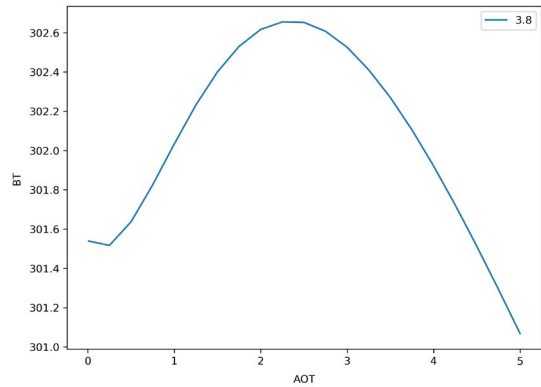


Fig. 5. Brightness temperature values as a function of AOT of smoke particles for GK2A/AMI 3.8 μm channel (top) and 8.7 μm , 10.4 μm , 11.2 μm , 12.4 μm channels (bottom).

로 긴 8.7 μm , 10.4 μm , 11.2 μm , 12.4 μm 밴드의 경우는 AOT의 증가와 BT의 감소가 선형적인 관계를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 열적외선 영역에서는 입자의 산란 효과는 무시할 만한 수준이며, 주로 입자의 광 흡수 효과에 의한 결과이다. 그리고 이 결과에서는 파장이 길어질수록 연소성 입자의 광 흡수 효과도 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 적외 채널별 AOT값에 따른 BT값의 차이 특성을 이용하면, 산불기원의 스모크 영역에 관한 탐지가 가능하다.

본 연구 사례에서는 스모크 입자에 가장 민감하게 반응하는 GK2A/AMI 8.7 μm 밴드와 약하게 반응하는 12.4 μm 밴드의 BT값을 이용하였다. 8.7 μm 밴드는 12.4 밴드와 비교하면 연소성 입자의 흡수 영향이 상대적으로 크게 받는다. 따라서, 연기 플룸의 존재

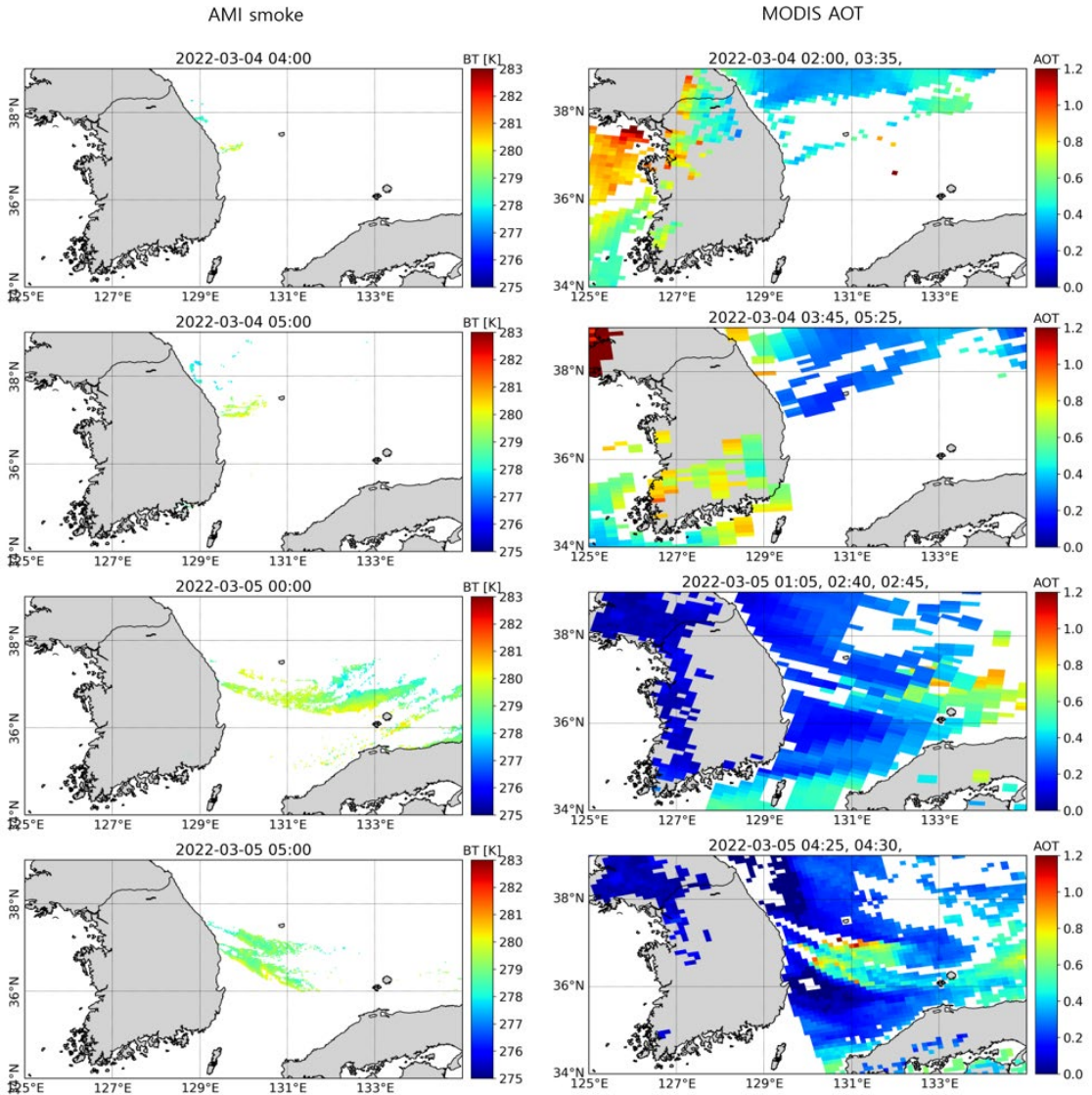


Fig. 6. (left) GK2A/AMI detected smoke images and (right) MODIS AOT for 4 March 2022 04:00UTC~5 March 2022 05:00UTC. Note that the times shown in title of MODIS AOT map are the satellite overpassing times of the individual granules used to create map.

여부를 판별하기 위하여 두 적외 채널 간의 밝기온도 차이 ($\Delta BT = BT_{12.4} - BT_{8.7}$)를 계산하였다. 해당 화소에서 스모크 입자의 영향이 존재하는 경우 $8.7 \mu\text{m}$ 채널의 온도가 연소성 입자에 의해 낮아지므로 두 채널 간의 온도차가 커지며, 반대로 연소성 입자가 없는 경우에는 온도차가 상대적으로 작게 나타나게 된다.

이러한 원리를 이용하여 온도차가 일정 임계값을 초과하면, 해당 지역에 스모크 플룸이 존재하는 것으로 판단한다. 정지궤도 위성은 연속 시간대에 걸친 스모크 플룸의 형성과 확산 과정을 추적할 수 있으므로, 산불의 진행 상황과 그로 인한 대기 오염의 영향을 모니터링하는 데 유용하다.

그림 6은 동해와 울진 산불에서 발생한 스모크의 플룸을 가시적으로 비교할 수 있는 2022년 3월 4일과 5일에 대한 사례를 보인다. GK2A/AMI의 스모크 탐지 결과는 스모크 영역으로 구분된 화소에 대하여 밝기온도 값으로 표시되었으며, 이는 스모크 영역으로 탐지된 지점에서의 열에너지를 나타낸다. 정지궤도 위성인 GK2A/AMI 관측자료는 최대 10분 단위의 영상 정보 제작이 가능하므로 산불에서 배출되는 스모크에 대한 연속적인 이동 및 확산에 관한 변화탐지가 가능하다. 그리고 같은 기간에 TERRA 위성과 AQUA 위성에 탑재된 두 MODIS 센서로 관측된 AOT 결과는 낮 동안에 가시광선 채널을 이용한 에어로솔 관측 결과를 보여준다. GK2A/AMI의 스모크 탐지 결과는 MODIS AOT와 유사한 공간적 분포를 나타내고 있으며, 특히 MODIS보다 높은 시공간 해상도를 갖고 있어 보다 상세한 스모크의 이동이나 확산 정보를 가시화할 수 있다. 더욱이, MODIS AOT가 짙은 스모크 영역은 구름으로 오인되어 제거되거나, 낮 동안에만 관측이 가능한 점이 제한점으로 작용한다. 그러나, 현재 제시된 GK2A/AMI의 스모크 탐지는 지표면 구성 물질에 대한 반사율 변화를 고려하지 않았기 때문에, 육상에서의 불확도가 크게 나타나므로 향후 알고리즘의 개선을 통하여 육상에서도 탐지가 가능하도록 할 계획이다.

3.3 지상관측 결과

그림 7은 동해와 울진의 산불 발생 기간 동안 환경부 지상관측망 중 강원특별자치도 동해시 묵호항과 경상북도 울진군 울진읍 관측소에서 획득한 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 시계열 변화를 보여준다. 묵호항에서는 2022년 3월 5일 12시와 3월 7일 05시에 PM₁₀ 농도 최대값인 762 µg/m³과 848 µg/m³을 기록하였고, 동시에 PM_{2.5} 농도는 719 µg/m³과 701 µg/m³으로 관측되었다. 이러한 수치는 산불 발생 지점에서 배출된 다량의 스모크 입자가 환경관측망 지점에 직접 영향을 미친 결과이며, 주변 대기질에 급변하는 대기질 악화를 초래함을 알 수 있다. 울진읍에서는 2022년 3월 7, 8, 9일에 최고점이 나타나며, 3월 7일 09시에 PM₁₀과

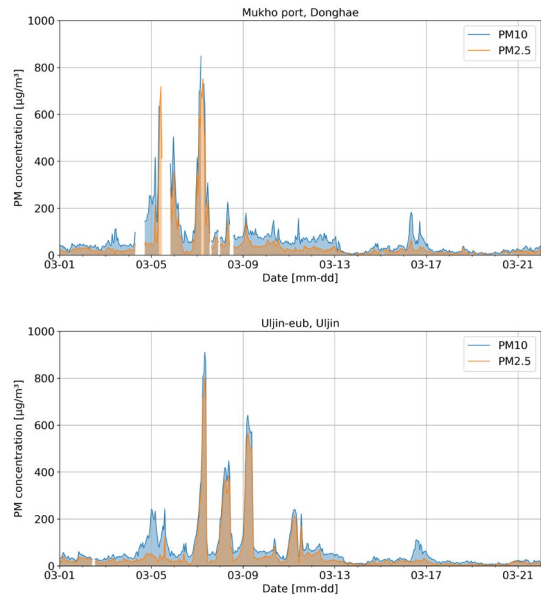


Fig. 7. Hourly mean PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations measured at Mukho port, Donghae and Uljin-eub, Uljin during 1~21 March 2022.

PM_{2.5} 농도는 최대값인 910 µg/m³과 803 µg/m³을 나타내었다. 그리고 3월 8일 10시에 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 448 µg/m³과 385 µg/m³, 3월 9일 06시에 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 642 µg/m³과 566 µg/m³을 기록하였다. 울진의 산불은 최대 규모로 보다 장기간 발생하였으며, 동해 산불보다 대기질에 미치는 영향이 크게 나타났다.

지상에서 관측된 PM 농도는 산불기원의 입자상 물질의 정량적인 농도 수치를 제공함으로써 지역대기질에 미치는 영향을 판단할 수 있는 기준이 된다. 그러나, 산불에서 발생한 스모크는 지역의 기상조건에 따라 이동과 확산이 크게 영향을 받으므로 공간적인 관측이 제한된 지점관측망으로는 지역 대기질에 대한 영향 권역을 파악하기는 불가능하다. 따라서, 산불과 같이 대형 환경 재난으로 인한 피해와 영향을 파악하기 위하여 지점관측망의 확충과 전산 수치 모델링과 원격탐사 자료와의 입체적인 분석결과를 종합적으로 해석해야 할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

대규모 산불은 급격한 연소활동과 다량의 연소성 대기오염물질의 배출로 인하여 지역대기와 환경에 악영향을 미칠 수 있으며, 인적 피해 또는 물적 피해도 유발할 수 있다. 산불의 발생 지점과 진행 과정에서 발생하는 다량의 스모크에 대한 시공간적 탐지는 산불의 현황 및 환경에 미치는 영향에 관한 모니터링에 필요한 정보를 제공하고, 인간의 일상생활과 안전에 도움을 주는 중요한 역할을 담당할 수 있다. 최근에 발사된 정지궤도 인공위성 관측자료는 지점 관측이 가지는 공간적 한계점을 극복할 수 있으며, 준 실시간 산불 모니터링에 보다 효과적으로 활용 가능하다. 본 연구에서는 국내 정지궤도 인공위성 GK2A/AMI 관측자료를 이용하여 2022년에 3월에 동해와 울진 두 지역에서 발생한 대규모 산불을 대상으로 산불 발생 지점과 스모크 탐지 및 지상관측 결과에 대하여 분석하였으며, 주요 연구결과를 아래와 같이 요약하였다.

첫째, GK2A/AMI 적외선 관측 채널 중 3.8 μm 채널은 산불이 발생한 지점에 대한 열적 변화 신호를 탐지함으로써 산불 발생 지점을 탐지할 수 있다. 화재 발생 지점에 대한 지리적 위치는 기존의 저궤도 위성 자료인 MODIS와 비교했을 때 약 1.2 km 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 GK2A/AMI의 개별 화소 범위인 2 km 내에서 정확한 화재 탐지 결과임을 확인하였다.

둘째, 산불 발생 기간 동안 발생된 스모크의 탐지를 위하여 GK2A/AMI 적외선채널 중 8 μm 채널과 12 μm 채널을 이용하여 스모크 입자에 의하여 투과도가 변하는 특징이 반영된 탐지방법을 제안하였다. 이 방법을 이용하여 화재 발생 지점으로부터 배출된 스모크 플룸이 차지하고 있는 영역 분포 정보를 가시화하여 산불기원의 스모크 영역의 시공간적 변화 정보를 획득할 수 있었다. 따라서, 이 방법을 사용하면 인공위성 원격 탐사 자료를 통해 산불기원의 스모크로 인한 위험 정도를 신속하게 평가하고 경보 시스템

으로 활용할 수 있을 것이다.

셋째, 산불 발생 기간 동안 인근에 위치한 지상관측 자료는 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도값의 급격한 증가를 나타냈다. 특히, 스모크 플룸이 관측지점을 경유하여 이동하는 경우에 해당하였다. 특히, 3월 7일 09시에 울진 산불로 인하여 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 최대값인 910 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 803 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냄으로서, 국내 PM₁₀ 24시간 환경기준(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 9배, PM_{2.5} 24시간 환경기준(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 23배의 수치를 기록하였다. 그러나, 이러한 지상관측은 스모크 플룸의 경로상에 위치하지 않은 지역에서의 정보를 제공하지 못하므로, 모델링이나 원격탐사 관측자료와의 통합 분석 방법으로서 시공간적 한계를 극복할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2019R111A3A01062804).

References

- Abatzoglou, J.T., Williams, A.P. (2016) Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 113(42), 11770-11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., Bond, W.J., Carlson, J.M., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R.S., Doyle, J.C., Harrison, S.P., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Marston, J.B., Mortiz, M.A., Prentice, I.C., Roos, C.I., Scott, A.C., Swetnam, T.W., van der Werf, G.R., Pyne, S.J. (2009) Fire in the Earth System, *Science*, 324(5926), 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- Filizzola, C., Corrado, R., Marchese, F., Mazzeo, G., Paciello, R., Pergola, N., Tramutoli, V. (2017) RST-FIRES, an exportable algorithm for early-fire detection and monitoring: Description, implementation, and field vali-

- dation in the case of the MSG-SEVIRI sensor, *Remote Sensing of Environment*, 192, e2-e25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.019>
- Giglio, L., Justice, C. (2021) MODIS/Terra Thermal Anomalies/Fire 5-Min L2 Swath 1 km V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, Accessed 2024-05-06 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14.061>
- Giglio, L., Schroeder, W., Justice, C.O. (2016) The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, *Remote Sensing of Environment*, 178, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>
- Giglio, L., Schroeder, W. (2014) A global feasibility assessment of the bi-spectral fire temperature and area retrieval using MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 152, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.010>
- Hantson, S., Andela, N., Goulden, M.L., James, T.R. (2022) Human-ignited fires result in more extreme fire behavior and ecosystem impacts, *Nature Communications*, 13, 2717. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30030-2>
- Kasischke, E.S., Verbyla, D.L., Rupp, T.S., McGuire, A.D., Murphy, K.A., Jandt, R., Barnes, J.L., Hoy, E.E., Duffy, P.A., Calef, M., Turetsky, M.R. (2010) Alaska's changing fire regime-implications for the vulnerability of its boreal forests, *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 1313-1324. <https://doi.org/10.1139/X10-098>
- Korea Forest Service (KFS) (2023) Wildfire Statistical Yearbook 2022, (in Korean), Publication number 11-1400000-000424-10
- Lee, K.H., Wong, M.S., Li, J. (2022) Review of Atmospheric Environmental Change from Earth Observing Satellites, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 2287-1160. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.147>
- Lee, K.H., Bae, M.S. (2023) Satellite Observation Based Air Quality Study, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 39(5), 571-587, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.5.571>
- Lee, K.H., Park, S.S. (2023) Monitoring and Prediction of Smoke Emitted from the Large Explosion Accident: 2015 Tianjin Explosion Case, *Journal of Korean Society Atmospheric Environment*, 39(2), 178-189, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.2.178>
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Patadia, F., Hsu, N.C. (2013) The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2989-3034. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>
- Li, F., Zhang, X., Roy, D.P., Kondragunta, S. (2019) Estimation of biomass-burning emissions by fusing the fire radiative power retrievals from polar-orbiting and geostationary satellites across the conterminous United States, *Atmospheric Environment*, 211, 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.017>
- Richardson, D., Black, A.S., Irving, D., Matear, R.J., Monselesan, D.P., Risbey, J.S., Squire, D.T., Tozer, C.R. (2022) Global increase in wildfire potential from compound fire weather and drought, *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 23. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00248-4>
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., Sowle, D. (1998) SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2101-2114. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2101:SARATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2)
- Shin, S.-K., Lee, K.H. (2016) Trend analysis of wildland fires and their impacts on atmospheric environment over East Asia, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 10(1), 22-31. <https://doi.org/10.5572/ajae.2016.10.1.022>
- Sicard, M., Granados-Muñoz, M.J., Alados-Arboledas, L., Baragán, R., Bedoya-Velásquez, A.E., Benavent-Oltra, J.A., Bortoli, D., Comerón, A., Córdoba-Jabonero, C., Costa, M.J., delÁguila, A., Fernández, A.J., Guerrero-Rascado, J.L., Jorba, O., Molero, F., Muñoz-Porcari, C., Ortiz-Amezcuca, P., Papagiannopoulos, N., Potes, M., Pujadas, M., Rocadenbosch, F., Rodríguez-Gómez, A., Román, R., Salgado, R., Salgueiro, V., Sola, Y., Yela, M. (2019) Ground/Space, Passive/Active Remote Sensing Observations Coupled with Particle Dispersion Modelling to Understand the Inter-Continental Transport of Wildfire Smoke Plumes, *Remote Sensing Environment*, 232, 111294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111294>
- Song, M., Park, J., Lim, Y., Oh, S.-H., Lee, J.Y., Lee, K.-H., Ro, C.-U., Bae, M.-S. (2022) Long-range transport impacts from biomass burning and secondary pollutant sources based on receptor models during KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 276, 119060. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119060>
- Sparks, T.L., Wagner, J. (2021) Composition of particulate matter during a wildfire smoke episode in an urban area, *Aerosol Science and Technology*, 55(6), 734-

747. <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1895429>

Williams, A.P., Abatzoglou, J.T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D.A., Balch, J.K., Lettenmaier, D.P. (2019) Observed Impacts of Anthropogenic Climate Change on Wildfire in California, *Earth's Future*, 7(8), 892-910. <https://doi:10.1029/2019EF001210>

Authors Information

이권호 (국립강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과 교수) (kwonho.lee@gmail.com)

김관철 (차세대융합기술연구원 산불감시실증지원센터 책임연구원) (fehouse@snu.ac.kr)

이다솜 (차세대융합기술연구원 산불감시실증지원센터 책임연구원) (leedasom@snu.ac.kr)

하중성 (한국항공우주연구원 위성활용부 선임연구원) (jongsung@kari.re.kr)

김희섭 (한국항공우주연구원 위성활용부 책임연구원) (askhs@kari.re.kr)