

GK2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

FF (Forest Fire)

정형섭 서울시립대학교

Version 1.1

2024. 05. 13.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	테스트 버전의 알고리즘 개발	0.1.0.0	2015. 3. 30.	정형섭 박승환
0.2	테스트버전의 알고리즘 수정	0.2.0.0	2017. 1. 30.	정형섭 박승환
0.3	고도영향 저감 알고리즘 추가	0.4.2.1	2017. 10. 29.	정형섭 박승환
0.4	산불탐지 경계값 결정	0.5.6.1	2018. 1. 31.	정형섭 박승환
0.5	산불탐지 경계값 조정 및 오탐지 화소 제거 알고리즘 수정	0.5.6.8	2019. 4. 15.	정형섭 박승환
1.0	ATBD 오탈자 검수	0.5.6.8	2019. 4. 26.	정형섭 박승환
1.1	상습 오탐지역(산업열지역) 분류 내용 추가(p.39)	1.2022.01.3	2022. 4. 12.	이승희 임한철
	2 분 탐지 내용 추가(p.40)	1.2022.02.3	2022. 4. 25.	
	2 분 자료 활용을 통한 신뢰도 판단 알고리즘 추가(p.40)	1.2023.01.3	2023. 2. 20.	
	2 분 자료를 이용한 조기탐지 사례(p.48) 및 2023 년도 정량검증 결과(p.49) 추가 산불탐지 경계값 리스트 추가(p.52) 오탈자 검수	1.2024.01.3	2024. 5. 13.	

<목차>

1. 개요.....	11
1.1 목적.....	11
1.2 사용자.....	11
1.3 내용.....	11
1.4 관련 문서.....	11
2. 알고리즘 소개.....	12
2.1 개요.....	12
2.2 알고리즘 흐름도.....	13
2.3 입력자료.....	14
2.3.1 L1B.....	14
2.3.2 L2.....	16
2.3.3 보조 자료.....	16
2.4 이론적 배경.....	17
2.4.1 복사전달 모델.....	17
2.4.2 주간영역에서 태양반사신호에 의한 영향.....	18
2.4.3 고도에 의한 영향 저감.....	19
2.4.4 산불탐지 임계값.....	21
2.4.5 주변영역의 정의.....	24
2.4.6 오탐지 제외 알고리즘.....	24
2.5 수학적 설명.....	27
2.5.1 경계값 결정을 위한 테스트 화소 선정.....	27
2.5.2 고도영향 저감 결과.....	28
2.5.3 주야간 구분을 위한 태양천정각 결정결과.....	30
2.5.4 절대온도 임계값 결정 결과.....	31
2.5.5 산불후보화소 선정을 위한 임계값 결정 결과.....	32
2.5.6 상대적인 온도 임계값 결정 결과.....	33
2.5.7 나대지, 도심지 및 해안가 영역 제외 임계값 결정 결과.....	36
2.5.8 임계값 요약.....	38
2.6 산업열 탐지 지역 구별 알고리즘.....	39
2.6.1 산업열 지역 선정 방법.....	39

2.6.2. 산업열 지역 선정 결과	39
2.7 이전영상을 활용한 안정성 테스트	40
2.8 산출물	41
3. 모의자료 및 검증	43
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	43
3.1.1 모의 입력자료	43
3.1.2 검증자료	44
3.2 검증 방법	44
3.3 검증 결과	44
3.3.1 2 분 간격 산불 탐지를 이용한 산불탐지 사례	48
3.3.2 2023 년 산불사례 정량 검증 결과	49
4. 현업운영 시 고려사항	50
4.1 수치계산 고려사항	50
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	50
4.3 품질 평가 및 진단	50
4.4 예외사항 처리	50
4.5 검증 알고리즘	50
5. 가정 및 제한	51
5.1 성능	51
5.2 예상 센서 성능	51
5.3 개선을 위한 사전 계획	51
6. 산불 탐지 산출에 사용된 상숫값 리스트(ELA 영역 기준)	52
7. 참고문헌	53

<표 목차>

표 2.1 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 유무	15
표 2.2 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 설명	16
표 2.3 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 사용 목적	16
표 2.4 임곱값 결정을 위한 조건 및 임곱값 결정범위	23
표 2.5 상대온도 평가에 결정된 임곱값	36
표 2.6 천리안위성 2A 호 산불탐지 알고리즘 임곱값 요약	38
표 2.7 상승 고온 열탐지 지역(산업열지역) 분류 및 위치	40
표 2.8 산불탐지 결과 파일에 대한 설명	42
표 2.9 산불탐지 결과가 나타내는 수치와 설명	42
표 3.1 모의자료로 사용한 Himawari-8 AHI 자료 설명	43
표 3.2 야간영역 검증결과	46
표 3.3 주간영역 검증결과	46
표 3.4 검증결과 종합	46

〈그림 목차〉

그림 2.1 산불탐지 흐름도	14
그림 2.2 인공위성 적외선 관측센서의 복사전달 모델	18
그림 2.3 산악지역과 평지에서의 온도 특성 모식도	19
그림 2.4 고도영향 추정을 위한 참조화소와 고도영향추정쌍 생성 과정	20
그림 2.5 고도영향 저감(Topo effect Mitigation) 모식도	20
그림 2.6 채널온도차이 영상과 해당영상의 온도기본도	21
그림 2.7 산불픽셀과 주변영역에서의 온도특성	22
그림 2.8 산불탐지를 위한 주변영역 확장에 대한 모식도	24
그림 2.9 구름영향으로 인한 오탐지 제외 알고리즘 모식도	25
그림 2.10 도심지에서 나타나는 단파적외선 채널온도의 특성	26
그림 2.11 산불탐지 경계값 결정에 활용된 지역 중 일부	27
그림 2.12 단파적외선과 열적외선에서의 온도감률 추정 결과 예시	29
그림 2.13 한반도지역 고도영향 저감 전후 비교	29
그림 2.14 강원도지역 실제산불 영역 고도영향 저감 전후 비교	30
그림 2.15 고도영향 저감 효과	30
그림 2.16 테스트 자료 대상 태양천정각 변화에 따른 단파적외선 채널온도 및 열적외선과의 채널온도 차이	31
그림 2.17 야간영역과 주간영역에서 절대산불결정을 위한 채널온도 임계값	32
그림 2.18 산불후보화소 결정을 위한 채널온도 임계값	33
그림 2.19 산불후보화소 결정을 위한 근적외선 반사율 임계값	33
그림 2.20 야간영역에서 주변영역 대비 온도비교 결과	34
그림 2.21 주간영역에서 주변영역 대비 온도비교 결과	34
그림 2.22 정탐지율과 오탐지율의 관계	35
그림 2.23 정탐지율과 임계성공지수의 관계	36
그림 2.24 나대지, 도심지 및 수계영역의 산불 및 비산불 화소 분포와 결정된 경계값	37
그림 2.25 2020 년~2021 년 사이 각각의 화소가 산불로 탐지된 횟수	39

그림 2.26 상습 고온 열탐지 지역(산업열지역) 위치	40
그림 3.1 실제 산불에서의 시간별 온도변화	44
그림 3.2 2019 년 고성/강릉 산불탐지 결과	47
그림 3.3 2019 년 강릉/옥계 산불탐지 결과	47
그림 3.4 2022 년 경북 울진군 산불탐지 결과	48
그림 3.5 2023 년 전북 고창군 산불탐지 결과	48

약어표

AMI	Advanced M eteorological I mager
AHI	Advanced H imawari I mager
CLD	Cloud mask
CSI	Critical S uccess I ndex
DEM	Digital E levation M odel
DN	Digital N umber
FAR	False A larm R atio
FF	Forest F ire
GK2A	Geo K ompsat 2A
GOES	Geostationary O perational E nvironmental S atellite
LST	Land S urface T emperature
MODIS	M ODerate-resolution I maging S pectroradiometer
NBR	Normalized B urn R atio
NDVI	Normalized D ifference V egetation I ndex
NMSC	National M eteorological S atellite C enter
POD	Probability O f D etection
RMSD	Root M ean S quare D eviation
SWIR	Short W avelength I nfra R ed
SZA	Solar Z enith A ngle
TOA	Top O f A tmosphere
TIR	Thermal wavelength I nfra R ed
VIIRS	Visible I nfrared I maging R adiometer S uite

1. 개요

1.1 목적

산불탐지 기술분석서의 목적은 천리안위성(GeoKompsat) 2A 호의 Advanced Meteorological Imager(AMI)로 획득한 영상자료를 이용하여, 산불화소(forest fire pixel)를 탐지하는 방법에 대한 자세한 설명과 산출물에 대한 설명을 제공하는데 그 목적이 있다.

1.2 사용자

사용자는 천리안위성 2A 호를 활용하여 산불을 탐지하는 목적을 지닌 모든 사용자를 대상으로 한다.

1.3 내용

산불탐지 기술분석서의 주요 내용은 다음과 같다.

알고리즘 소개 부분에서는 알고리즘의 전체적인 흐름 및 배경, 수학적 설명과 입·출력자료에 대한 설명을 포함한다.

시험자료 및 출력물 부분에서는 모의자료로 활용한 Himawari-8 AHI 자료를 사용한 출력물에 대한 설명을 포함한다.

현업운영시 고려사항 부분에서는 알고리즘 사용 시 고려사항 및 예외사항 처리, 검증결과에 대한 설명을 포함한다.

Version 1.1 에서는 천리안위성 2A 호를 이용한 정규 운영 이후 산출 결과와 2분간격 산출 결과, 산업열지역 분류 및 이전영상을 활용한 안정성 테스트 방법 등의 설명을 추가하였다.

가정 및 제한 부분에서는 알고리즘을 활용하기 위한 가정과 제한점에 대한 설명을 포함한다.

1.4 관련 문서

- 국가기상위성센터, 2015, '영상 장면분석 표면분야 알고리즘 개발(1)' 최종보고서
- 국가기상위성센터, 2016, '영상 장면분석 표면분야 알고리즘 개발(2)' 최종보고서
- 국가기상위성센터, 2017, '영상 장면분석 표면분야 알고리즘 개발(3)' 최종보고서
- 국가기상위성센터, 2018, '영상 장면분석 표면분야 알고리즘 개발(4)' 최종보고서

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

산불탐지 알고리즘의 기본 개념은 고온에 민감한 단파적외선(Short Wave InfraRed, SWIR)과 열적외선(Thermal InfraRed, TIR) 채널을 이용하여 산불에 대한 다음과 같은 세 가지의 영상특성을 활용해 탐지하게 된다(Dozier, 1981; Matson and Dozier, 1981; Prins and Menzel, 1992; Kaufman and Remer, 1994; Kaufman et al., 1998; Justice et al., 2002; Giglio et al., 2003; Zhukov et al., 2006; Schroeder et al., 2014). 촬영된 영상에 대해 아래의 세 가지 조건에 대한 테스트를 수행하여 이를 만족하는 화소(pixel)를 산불화소로 탐지한다. 이후 탐지된 산불을 대상으로 구름, 나대지, 도심지 및 해안가 등 다른 외부 영향과 지표의 특성으로 위 조건을 만족하여 나타날 수 있는 오류들을 제거하는 과정을 통해 최종적으로 산불을 탐지하게 된다.

- 1) 대형산불은 단파적외선에서 온도가 절대적으로 높게 나타난다.
- 2) 산불은 주변 화소들보다 온도가 상대적으로 높게 나타난다.
- 3) 산불은 단파적외선과 열적외선에서의 온도차이가 크게 나타난다.

위에 설명된 산불의 특징을 바탕으로 목표로 하는 화소가 산불화소임을 판단하기 위해서는 각 조건에 대한 임계값을 설정하게 된다. 산불탐지 알고리즘에 활용하는 임계값은 밝기온도(brightness temperature) 값을 활용한다(Giglio et al., 2003). 임계값의 설정은 센서마다 그 특성에 따라 조금씩 차이가 나게 된다(Justice et al., 2002; Giglio et al., 2003; Zhukov et al., 2006; Schroeder et al., 2014). 따라서, 천리안위성 2A 호에 대한 산불탐지 알고리즘을 구성할 때, 임계값에 대한 최적화 과정이 필요하다. 임계값의 설정은 기본적으로 산불탐지 알고리즘을 구성하는데 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있는데, 임계값을 너무 높게 설정할 경우 실제 산불을 탐지하기가 어려워지며, 임계값이 너무 낮을 경우 산불을 잘 탐지할 수 있지만, 실제 산불이 아닌 화소까지 산불화소로 탐지할 수 있게 된다. 따라서 위성영상을 이용한 산불탐지 알고리즘의 핵심은 임계값이 적절히 결정되었는지 여부라 할 수 있다(Becker and Li, 1990).

따라서 산불탐지 알고리즘 개발의 기본 개념은 산불을 탐지하기 위한 최적의 임계값을 결정하는 것이며, 임계값 결정에 영향을 줄 수 있는 1) 위도에 따른 온도변화, 2) 시간에 따른 온도의 일변화, 3) 고도에 따른 온도변화 등이 고려되어야 한다. 뿐만 아니라 주간시간대에 도심지, 나대지 및 해안가 영역은 복사율(emissivity)이 낮은 지표특성으로 인하여 주변대비 온도가 매우 높게 나타날 수 있기 때문에, 최종산불탐지 과정에서 해당 지표를 제거할 수 있는 오탐지 제외 알고리즘이 필수적으로 요구된다(Li and Becker, 1993; Valor and Caselles, 1996).

2.2 알고리즘 흐름도

그림 2.1은 산불탐지 알고리즘의 전체적인 영상자료 처리 흐름도이다. 해당 영상자료처리 흐름도는 MODIS 산불탐지 흐름도를 기본으로 하며, 본 알고리즘을 통해 변경 수정된 단계는 별도로 표기한 것이다. 영상자료가 입력되면 전처리 과정으로 영상의 수치값(digital number, DN)를 복사량(radiance)로의 변환을 거치며, 복사량을 기반으로 밝기온도값의 변환을 거치게 된다. 이후 수계지역(water area)과 구름영역(cloud area)는 보조자료 및 선행 구름탐지 알고리즘 결과로부터 마스킹을 수행한다. 마스킹 되지 않은 육지영역을 대상으로 수치표고모델(digital elevation model, DEM)을 활용하여 고도영향이 저감된 단파적외선과 열적외선 밝기온도영상을 획득한다. 이후 단파적외선과 열적외선 영상을 대상으로 중앙값 필터(median filter)를 적용하여 온도 기본도(base plane)을 제작하는 과정까지 수행함으로써 산불탐지를 위한 전처리 과정을 완료한다.

산불탐지 과정에서는 절대산불탐지 조건(absolute fire test)을 통해 산불화소를 탐지하고, 온도기본도보다 특정이상 온도가 높은 화소를 산불후보화소(potential fire pixel)로 정의하게 된다. 선정된 산불후보화소를 대상으로 주변영역 대비 온도 비교(context test)를 수행하게 된다. 마지막으로 두 조건을 모두 통과한 산불화소를 대상으로 오탐지 제외 알고리즘(urban/baresoil rejection test, cloud rejection test, costal rejection test)을 추가적으로 적용함으로써 산불화소를 확정한다. 이후 산업열지역에 해당하는지를 확인한 후 산업열지역이 아닌 화소에 대해 산불화소로 최종 확정한다. 산불화소로 최종 확정되어도 이전 시각(2분 전) 산출물과의 비교를 통해 연속적으로 산불로 확정된 화소에 대해서만 산불 화소로 표출한다.

산불 탐지 산출물은 netCDF에 산불지점과 산불정보를 저장하고, 산불이 있었던 지점은 text 파일로 정보를 출력한다.

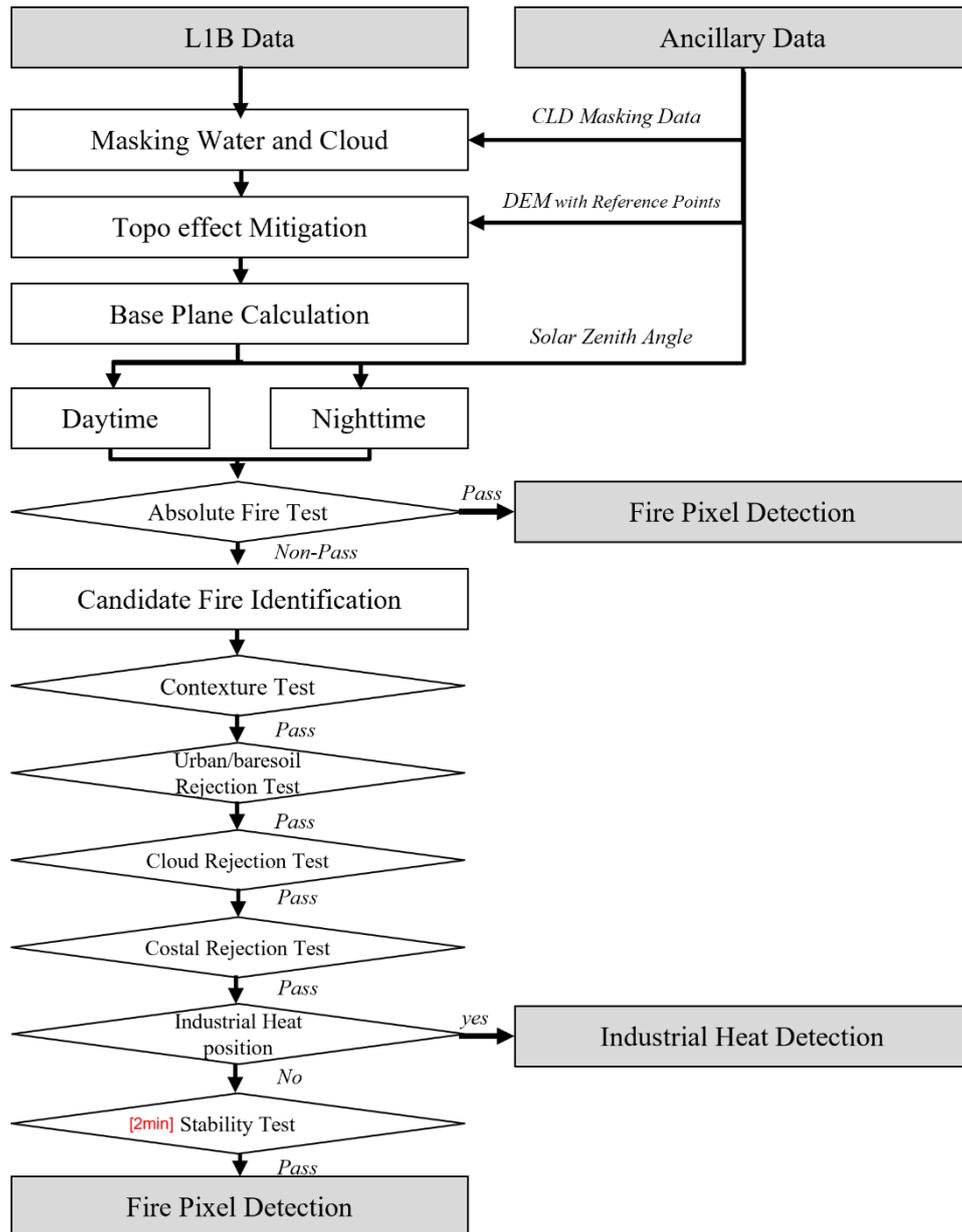


그림 2.1 산불탐지 알고리즘 흐름도

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

산불탐지에 활용되는 L1B 채널자료는 표 2.1 과 같다. 표 2.2 는 각 채널에서 사용하는 자료를 설명하며, 표 2.3 은 각 채널의 사용용도를 나타낸다.

표 2.1 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 유무

Band	Central Wavelength (μm)	Band Width (μm)	Spatial Resolution (km)	Usage
1	0.47	0.431-0.479	1	
2	0.51	0.5025-0.5175	1	
3	0.64	0.625-0.660	0.5	O
4	0.86	0.8495-0.8705	1	O
5	1.38	1.373-1.383	2	
6	1.61	1.601-1.619	2	
7	3.83	3.74-3.96	2	O
8	6.241	6.061-6.425	2	
9	6.952	6.89-7.01	2	
10	7.344	7.258-7.433	2	
11	8.592	8.44-8.76	2	
12	9.625	9.543-9.717	2	
13	10.403	10.25-10.61	2	
14	11.212	11.08-11.32	2	O
15	12.364	12.15-12.45	2	
16	13.31	13.21-13.39	2	

표 2.2 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 설명

Sensor	Data
AMI sensor	Ch 03 TOA Reflectance
	Ch 04 TOA Reflectance
	Ch 07 Brightness Temperature
	Ch 14 Brightness Temperature

표 2.3 산불탐지에 활용하는 L1B 채널자료 사용 목적

Data	Description
Ch 03 TOA Reflectance	Rejection for baresoil, urban and coastal area
Ch 04 TOA Reflectance	Rejection for baresoil, urban and coastal area
Ch 07 Brightness Temperature	Detection for forest fire
Ch 14 Brightness Temperature	Detection for forest fire

2.3.2 L2

산불탐지에 활용되는 L2 채널자료는 국가기상위성센터에서 제공하는 구름탐지 산출물(Cloud Mask)에 해당하며, 'clear'의 수치로 표현된 영역에 한정한다.

2.3.3 보조 자료

산불탐지에 활용하는 보조자료는 위도(latitude), 경도(longitude), 육지/바다 구분도(land/sea masking), 토지피복도(landcover map) 및 고도영향 저감을 위해 기록된 참조화소의 영상좌표가 포함된 테이블 자료를 활용한다.

2.4 이론적 배경

2.4.1 복사전달 모델

위성에서 관측하는 단파적외선 파장대역(3–5 μm) 및 열적외선 파장대역(8–13 μm) 채널 영상은 지표의 온도에서 발생하는 복사신호 및 대기효과에 의한 영향이 혼합되어 나타난다.

지표의 온도에서 발생하는 복사에너지는 플랑크 함수(planck's law)로부터 정의할 수 있으며 이를 이용해 관측 파장대역 및 온도에 따른 복사량을 계산할 수 있다. 플랑크 함수는 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (1)$$

여기서, C_1 및 C_2 는 물리적 상수로 Planck's constant, Boltzmann's constant, 빛의 속도(speed of light)로부터 계산되며 그 값은 각각 $C_1 = 1.19 \times 10^8 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$,

$C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m}$ 에 해당한다(Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003).

플랑크 함수에 의하여 타겟에서 발생한 신호가 위성 센서에 도달하는 과정에서 대기에 의한 영향을 받게 되며, 이는 복사전달모델에 의해 다음 그림 2.2, 수식 (2) 및 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

주간인 경우,

$$L_{sat,\lambda} = [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{\downarrow}] \cdot \tau(\theta_s)_{\lambda}^{\uparrow} + L_{\lambda}^{\uparrow} + E_{sun,\lambda} \quad (2)$$

야간인 경우,

$$L_{sat,\lambda} = [\varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{\downarrow}] \cdot \tau(\theta_s)_{\lambda}^{\uparrow} + L_{\lambda}^{\uparrow} \quad (3)$$

여기서, $L_{sat,\lambda}$ 는 위성센서에서 관측하는 지표의 복사량, ε_{λ} 는 지표의 복사율, L_{λ}^{\downarrow} 는 대기의 하향 복사량(down-welling atmospheric emission), $B_{\lambda}(T_s)$ 는 지표온도가 T_s 인 지표에서 방출하는 복사에너지, L_{λ}^{\uparrow} 와 L_{λ}^{\downarrow} 는 각각 대기의 상향 복사량(up-welling atmospheric emission)과 하향 복사량(down-welling atmospheric emission), $\tau(\theta_s)_{\lambda}^{\uparrow}$ 는 각도 θ_s 대기의 상향 투과율(upward atmospheric transmittance)을 나타낸다. $E_{sun,\lambda}$ 는 태양복사에 의한 반사신호이다(Nelly et al., 1998).

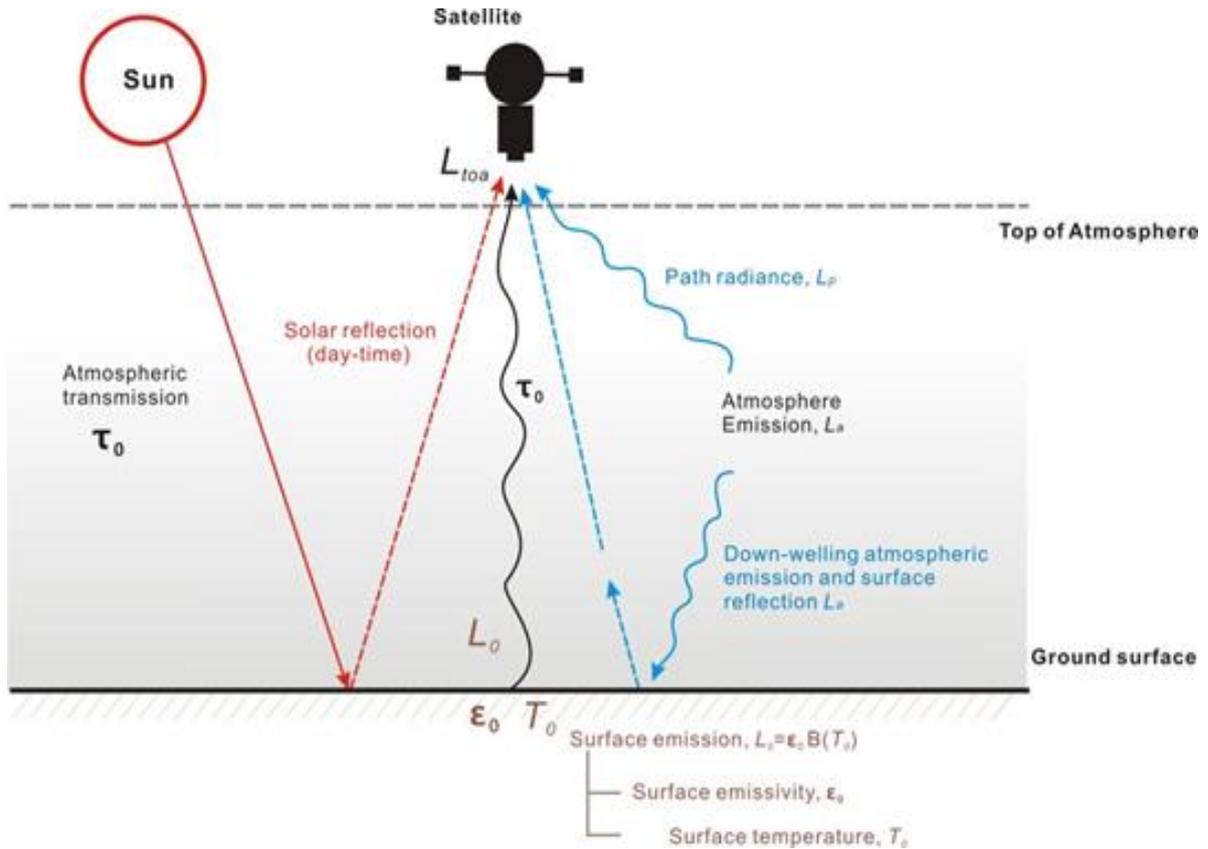


그림 2.2 인공위성 적외선 관측 센서의 복사전달 모델

2.4.2 주간영역에서 태양반사신호에 의한 영향

단파적외선 채널영상의 주간영상은 태양복사에 의한 반사신호의 영향을 강하게 받는다(Boyd et al., 1999). 3~5 μm 파장대역에서 약 1%의 반사도 값은 약 0.7K의 온도상승을 나타낼 수 있다. 단파적외선에서의 지표 반사도는 자연물에서도 약 1~25% 정도의 반사도를 가지고 있으며, 인공물의 경우 50% 이상의 반사도를 갖는 경우도 많기 때문에 밝기온도 값을 산출할 때 실제 지표가 지니는 온도보다 높게 나타나는 원인이 된다(He and Li 2011; He and Li 2012). 따라서 주간 영역에서는 나대지, 도심지 및 해안가 등 높은반사도를 지니는 지표가 온도가 높게 관측되어 산불로 오탐지될 수 있는 가능성이 높다(Snyder et al. 1998; Petitcolin and Vermote, 2002). 이는 MODIS, VIIRS 및 GOES 등 다른 위성에 적용된 산불탐지 알고리즘에서도 오탐지(false alarm)가 발생하는 주요한 원인 중 하나로 알려져 있다(Zhukov et al., 2006; Schroeder et al., 2008; Schroeder et al., 2014; Oliva and Schroeder, 2015).

따라서 MODIS, VIIRS 및 GOES에 탑재된 산불탐지 알고리즘은 태양천정각(solar zenith angle, SZA)을 이용하여 주간과 야간을 구분하며, 산불탐지 임계값은 주간과 야간을 구분하여 적용하고 있다. 본 산불탐지 알고리즘 역시 기존 산불탐지 알고리즘과 마찬가지로 태양천정각을 이용하여 주간과 야간을 구분 후, 각각의 임계값을 다르게 적용하는 과정을 수행한다.

2.4.3 고도에 의한 영향 저감

대부분의 산림이 분포하는 산악지역에서는 고도변화로 인하여 지표온도가 영향을 받게된다. 그림 2.3은 산악지역과 평지에서 나타나는 산불화소를 설명하는 모식도를 나타낸다. 그림 2.3(a)는 산악지역을 대상으로 산불화소를 탐지하기 위한 주변화소들과의 상대적인 온도 비교를 수행하는 과정을 나타낸다. 일반적으로 고도가 증가할수록 지표의 온도는 감소하게 되며, 고도가 평탄하지 않은 산악지역에서는 온도 또한 균일하게 나타나지 않게 된다. 이러한 환경에서 산불화소의 온도에 대한 상대적인 비교를 수행할 때, 주변영역에서 발생하는 온도의 분산(variance)가 크게 나타나기 때문에 상대적으로 산불화소를 이상치로 가정하기 어렵게 된다. 반면 그림 2.3(b)와 같이 고도의 변화가 심하지 않은 평지영역에서는 주변영역 온도의 분산이 낮게 나타나기 때문에 상대적으로 산불화소를 이상치로 가정할 가능성이 높다.

따라서 산악지역에서 산불화소 탐지 성능을 향상시키기 위해서는 고도의 변화에 따른 온도변화 영향을 저감하여야 하며, 본 산불탐지 알고리즘에서는 천리안위성 2A 호의 촬영범위에 대한 고도영향을 선형으로 추정하고, 이를 저감하는 고도영향 저감 알고리즘을 추가하고자 하였다.

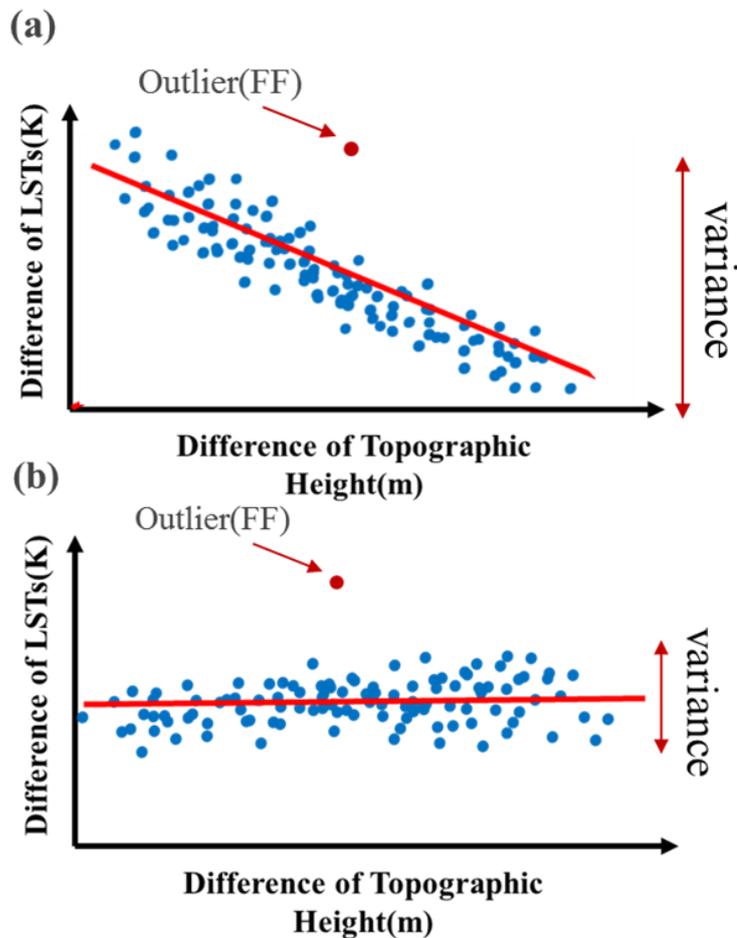


그림 2.3 산악지역과 평지에서의 온도 특성 모식도 (a) 산악지역 (b) 평지

고도영향 저감은 고도영향을 선형관계식을 이용하여 추정함으로써 수행되며, 고도영향을 추정하기 위해서는 고도변화가 심한 지역을 선정하는 과정이 요구된다. 그림 2.4는 고도영향을 추정하기 위한 모식도로서, 총 771 개의 참조화소로부터 200~400 km 거리에 위치한 화소를 각 100 개씩 선정하여 총 77,100 개의 고도영향추정 쌍을 생성하는 과정을 나타낸다. 이때 구름으로 마스킹 된 쌍은 제외하여 고도영향을 추정한다.

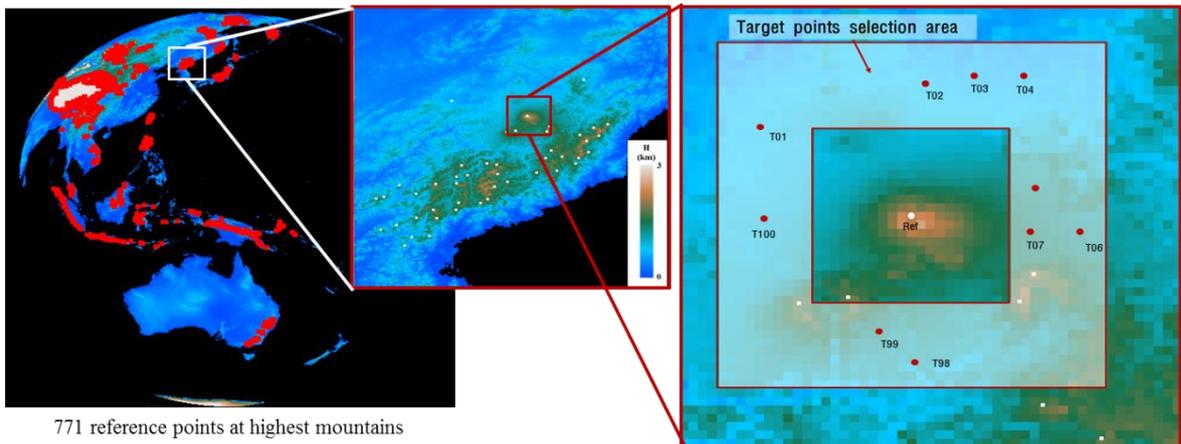


그림 2.4 고도영향 추정을 위한 참조화소와 고도영향추정쌍 생성 과정

각 고도영향추정쌍으로부터 고도의 차이와 단파적외선 및 열적외선에서의 온도차이를 계산하게 되며, 계산된 결과로부터 온도감률을 선형식을 이용하여 추정한다. 이후 추정된 온도감률을 이용하여 다시 적용함으로써 고도영향을 저감하게 되며, 수식 (4)가 이에 해당한다. 그림 2.5는 고도영향 저감과정을 설명하는 모식도이다.

$$LST_{corr}(i, j) = LST(i, j) - a * (DEM(i, j) - 100) \quad (4)$$

여기서, LST_{corr} 는 고도영향이 저감된 채널온도, LST 는 고도영향 저감 전 채널온도를 나타내며, a 는 영상촬영시각의 온도감률을 의미한다.

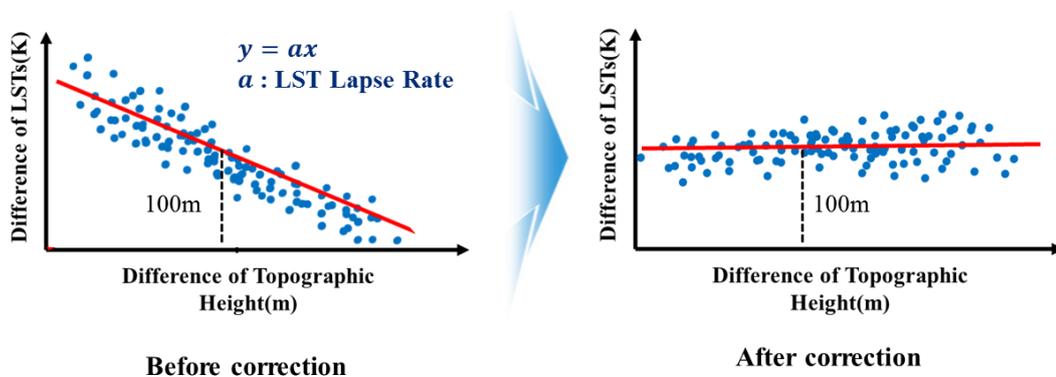


그림 2.5 고도영향 저감(Topo effect Mitigation) 모식도

2.4.4 산불탐지 임계값

전술한 바와 같이, 산불화소의 온도는 단파적외선 채널에서 매우 높게 나타나며, 산불탐지는 이러한 특성을 이용하여 단파적외선과 열적외선에서 나타나는 온도를 이용하여 탐지를 하게 된다.

산불탐지에 활용하는 첫번째 단계의 임계값은 절대산불화소에 대한 임계값으로, 절대산불화소란 온도가 매우 높은 산불화소를 의미한다(Wright et al., 2002; Wright et al., 2004). 절대산불화소로 선정된 산불화소는 다른 조건식의 적용없이 산불화소로 확정하며, 주간영역에 대한 절대산불화소 선정 임계값 (수식 (5))과 야간영역에 대한 절대산불화소 선정 임계값(수식 (6))으로 구분하게 된다.

$$T_{\text{SWIR}} > \psi_1 \quad (5)$$

$$T_{\text{SWIR}} > \psi_2 \quad (6)$$

위 수식에서 T_{SWIR} 는 단파적외선 채널에서의 온도를 나타내며, ψ_1 는 주간영역에 대한 절대산불화소 선정 임계값을, ψ_2 는 야간영역에 대한 절대산불화소 선정 임계값을 의미한다.

산불탐지에 활용하는 두번째 단계의 임계값은 온도기본도와의 온도차이에 대한 것으로 이에 대한 모식도는 그림 2.6 과 같다. 그림 2.6 은 단파적외선채널 온도와 열적외선채널 온도의 차이영상과 차이영상에 대한 온도기본도를 나타낸다. 온도기본도는 차이영상에 15×15 크기의 중앙값필터를 적용하여 제작한다. 그림 2.6 으로부터 온도기본도와의 온도 차이를 계산하게 되며, 아래 수식 (7) 및 수식 (8)에 나타나는 임계값을 동시에 만족할 때, 산불후보화소로 선정하게 된다.

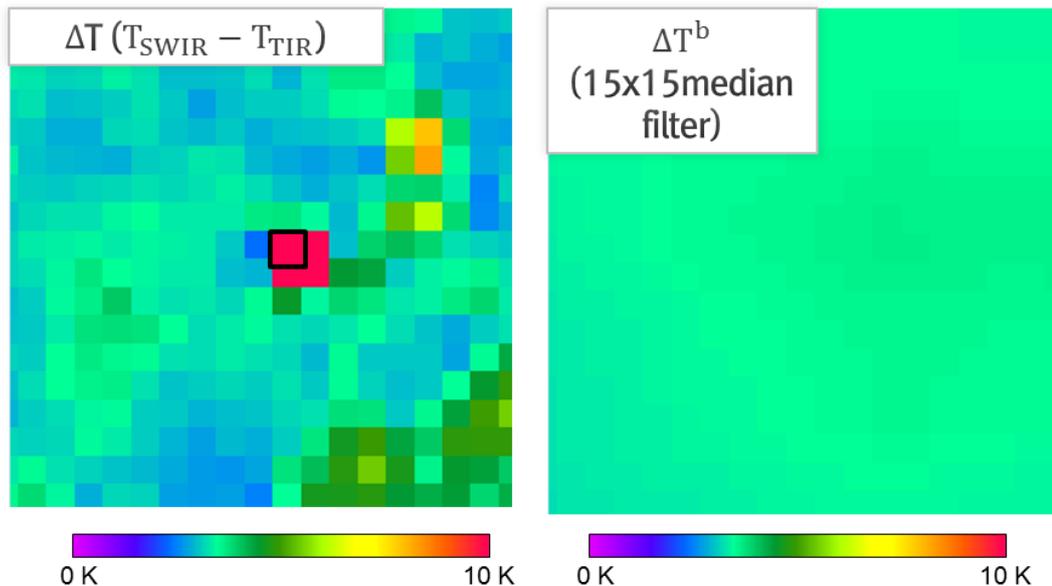


그림 2.6 채널온도차이 영상과 해당 영상의 온도 기본도

$$T_{SWIR} > T_{SWIR}^B + c_1 \quad (7)$$

$$\Delta T > \Delta T^{Base} + c_2 \quad (8)$$

위 수식에서 ΔT 는 단파적외선 채널온도와 열적외선 채널온도의 차이를, T_{SWIR}^B 는 단파적외선 채널에 대한 온도기본도를, ΔT^{Base} 는 채널온도차이에 대한 온도기본도를 의미한다. c_1 은 단파적외선 채널에 대한 산불후보화소 임곗값을, c_2 는 채널온도차이에 대한 산불후보 화소 임곗값을 의미한다.

세번째 단계의 임곗값은 산불후보로 선정된 화소를 대상으로 적용되며, 주변영역의 온도와 상대적인 비교로부터 산불을 탐지하는 과정이다. 각 임곗값은 수식 (9)부터 수식 (12)에 해당하며, 각각의 임곗값은 주간영역과 야간영역에서의 임곗값으로 구분된다. 그림 2.7은 수식 (9)과 수식 (10)에 대한 모식도로서, 선정된 산불후보화소와 그 주변영역의 온도를 나타낸다. 그림 2.7과 같이, 실제 산불화소는 주변영역의 온도에 비하여 상대적으로 매우 높게 나타나기 때문에 이러한 특징을 이용하여 산불화소를 결정하게 된다.

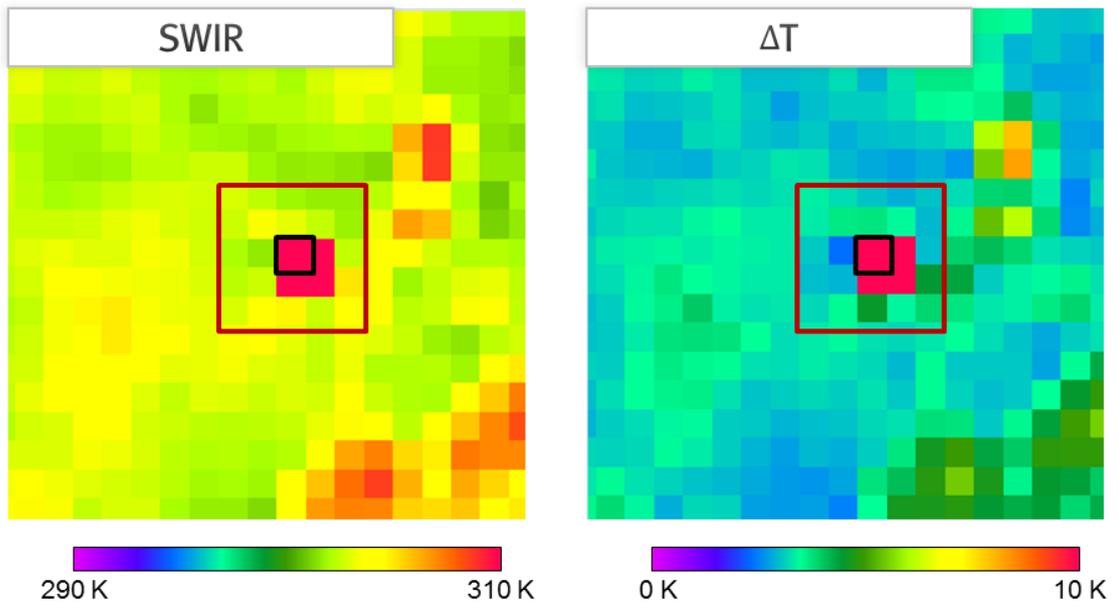


그림 2.7 산불 픽셀과 주변영역에서의 온도특성

$$(T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR})/RMSD_{SWIR} > \alpha \quad (9)$$

$$(\Delta T - \dot{\Delta T})/RMSD_{\Delta T} > \beta \quad (10)$$

$$T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR} > \gamma \quad (11)$$

$$\Delta T - \Delta \dot{T} > \tau \quad (12)$$

위 수식에서 \dot{T}_{SWIR} 는 주변영역에 대한 단파적외선 채널온도의 중앙값, $RMSD_{SWIR}$ 는 단파적외선 채널온도와 단파적외선 온도기본도 간의 평균제곱근편차(root mean square deviation, RMSD)를 나타내며, $\Delta \dot{T}$ 는 주변영역에 대한 단파적외선 채널온도와 열적외선 채널온도 차이의 중앙값 $RMSD_{\Delta T}$ 는 채널온도차이와 채널온도차이에 대한 온도기본도 간의 평균제곱근편차를 나타낸다.

최적의 경계값을 결정하기 위하여 본 연구에서는 각 α , β , γ 및 τ 에 대한 임계값에 변화를 주어 산불탐지 결과에 대한 정탐지율(probability of detection, POD), 오탐지율(false alarm ratio, FAR) 및 임계성공지수(critical success index, CSI)를 평가하였다(Csiszar et al., 2006). 각 실험과정은 아래 표 2.4 와 같다.

표 2.4 임계값 결정을 위한 조건 및 임계값 결정범위

Equation	Index	range (interval)
$\log_{10} \frac{T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}}{RMSD_{SWIR}}$	$> \alpha$	0 – 2.0 (0.1)
$\log_{10} \frac{\Delta T - \Delta \dot{T}}{RMSD_{\Delta T}}$	$> \beta$	0 – 2.0 (0.1)
$\log_{10}(T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR})$	$> \gamma$	0 – 2.0 (0.1)
$\log_{10}(\Delta T - \Delta \dot{T})$	$> \tau$	0 – 2.0 (0.1)

$$POD = \frac{hit}{hit+missed} \quad (13)$$

$$FAR = \frac{false\ alarm}{hit+false\ alarm} \quad (14)$$

$$CSI = \frac{hit}{hit+missed+false\ alarm} \quad (15)$$

위 수식에서, *hit*은 실제 산불을 탐지한 경우의 수, *false alarm*은 오탐지한 경우의 수, *missed*는 산불을 탐지하지 못한 경우의 수를 의미한다(Tang and Li, 2014).

위 수식 (5)부터 (12)까지는 산불의 온도에 대한 임계값으로서, 산불의 절대온도, 주변영역대비 상대온도로부터 고온의 산불을 탐지하게 된다.

2.4.5 주변영역의 정의

위 수식 (9)부터 수식 (12)까지의 임계값을 만족하기 위해서는 산불화소와 주변영역의 중앙값 및 평균제곱근편차에 대한 통계량이 요구된다. 이때, 통계량을 계산하기 위해서는 산불후보화소를 기준으로 주변영역의 정의가 요구된다. MODIS, VIIRS 및 GOES 등의 기존 산불탐지 알고리즘은 초기 주변영역을 산불후보화소 주변 3×3 의 범위로 정의하고, 산불후보화소와 구름영역 및 수계영역을 제외한 화소에서 통계량을 계산한다. 그러나 이때, 구름영역 및 수계영역으로 인하여 최소 8개의 화소가 만족되지 못할 경우, 통계량의 신뢰성이 낮다고 판단하여 주변영역을 5×5 , 7×7 , 9×9 등으로 주변영역을 확장하게 된다. 다음 그림 2.8은 주변영역의 정의를 설명하는 모식도로서, 초기 3×3 형태의 주변영역에 마스킹된 화소가 포함되어있기 때문에 단계적으로 주변영역을 확장하는 과정을 설명한다.

그러나 3×3 형태의 주변영역은 산불의 영향을 직접적으로 받을 가능성이 높기 때문에, 본 탐지 알고리즘에서는 초기 주변영역을 7×7 로 설정하고, 통계량 계산에 유효한 화소의 비율(proportion of valid pixel, P_v)가 25% 이하이거나, 유효한 화소의 개수(number of valid pixel, N_v)가 8개 이하인 경우 주변영역을 한 칸씩 확장하여 최대 15×15 로 한정하고자 하였다.

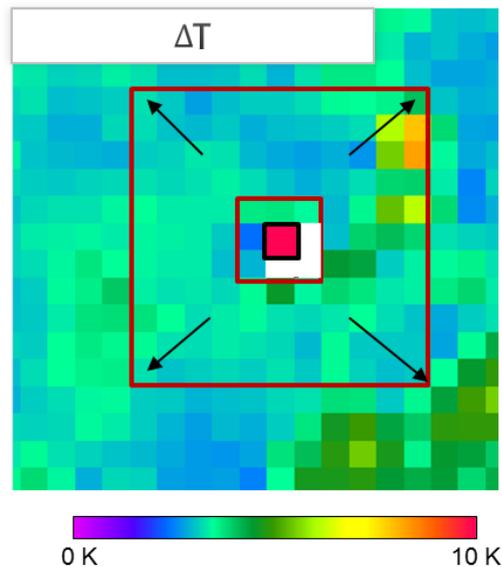


그림 2.8 산불탐지를 위한 주변영역 확장에 대한 모식도

2.4.6 오탐지 제외 알고리즘

산불의 온도를 이용하여 탐지하는 산불탐지 알고리즘에는 한계점이 존재한다. 보다 상세히 설명하면, 지표면이 구름의 영향을 받거나, 지표면의 특성이 나대지, 도심지 및

해안가 등과 같이 일반적으로 온도가 높은 지표가 산불로 감지되는 것이 한계점에 해당된다.

다음 그림 2.9는 구름에 의해 오탐지되는 경우에 대한 모식도를 나타낸다. 그림 2.9(a)는 구름의 영향을 받는 실제 산불화소를 설명하며, 그림 2.9(b)는 구름의 영향으로 인하여 산불후보화소로 선정되었으나, 실제 비산불화소를 나타낸다. 이 두 경우에는 주변영역의 온도가 구름화소로 인하여 낮게 나타나며, 상대적으로 산불후보화소가 주변영역 대비 매우 높은 온도를 나타내기 때문에 모든 임곗값을 통과할 가능성이 높다. 따라서 구름영역을 고려한 오탐지 제외 알고리즘이 추가되어야 한다. 본 알고리즘에서는 주변영역에 구름영역이 존재할 경우, 그림 2.9(c)와 같이 주변영역을 15×15 까지 확장하고 7×7 영역은 제외한 후, 통계량을 다시 계산하여 임곗값을 검사하는 알고리즘을 추가하였다.

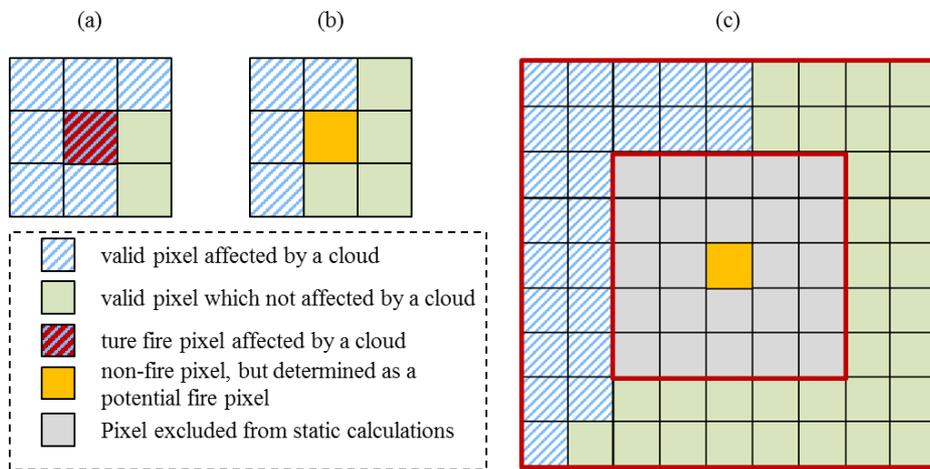


그림 2.9 구름영향으로 인한 오탐지 제외 알고리즘 모식도

다음으로 오탐지 되는 유형은 나대지, 도심지 및 해안가의 높은 온도가 산불로 탐지되는 유형이다. 그림 2.10은 우리나라를 대상으로 실제 지형과 각 지형에서 나타나는 단파적외선 채널온도를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 주간영역에서 도심지는 태양반사신호로 인하여 높은 반사율을 가지게 되며, 이는 단파적외선 채널온도의 상승을 야기시켜 주변영역대비 매우 높은 온도를 가지는 것을 확인할 수 있다.

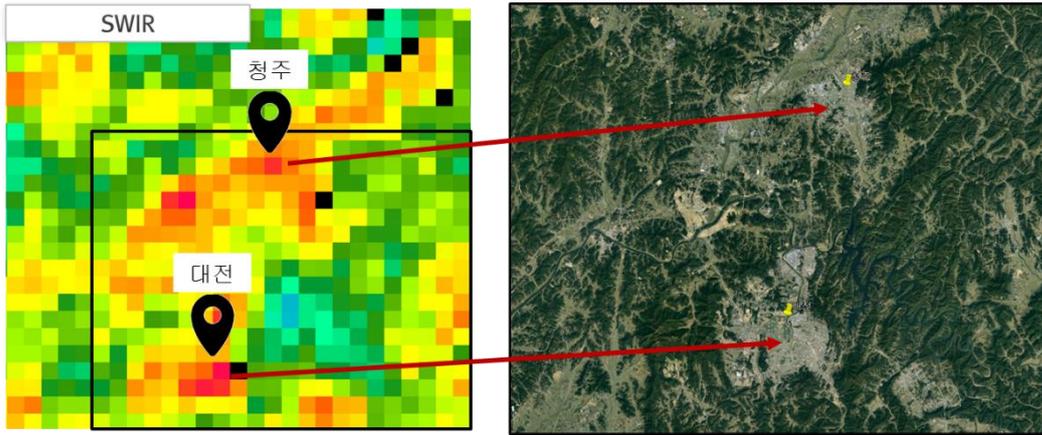


그림 2.10 도심지에서 나타나는 단파적외선 채널온도의 특성

이와 같은 특성을 지닌 나대지, 도심지 및 해안가 영역은 주간영역에서 산불로 탐지될 가능성이 크기 때문에, 본 연구에서는 이러한 영역의 특성을 고려한 오탐지 제외 알고리즘을 적용하였다.

적용된 오탐지 제외 알고리즘은 산불후보픽셀의 비율(proportion of fire pixel, P_f)가 10%이상일 경우에 수행하게 되며 정규식생지수(normalized difference vegetation index, NDVI) 및 정규화상지수(normalized burn ratio, NBR)가 주변영역 대비 특정 값 이하인 경우 산불에서 제외하는 알고리즘을 활용한다.

$$\frac{NDVI - \dot{NDVI}}{RMSD_{NDVI}} > \omega_1 \quad (16)$$

$$\frac{NBR - \dot{NBR}}{RMSD_{NBR}} > \omega_2 \quad (17)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{0.86} - \rho_{0.64}}{\rho_{0.86} + \rho_{0.64}} \quad (18)$$

$$NBR = \frac{\rho_{0.86} - \rho_{1.38}}{\rho_{0.86} + \rho_{1.38}} \quad (19)$$

위 수식에서 \dot{NDVI} 및 \dot{NBR} 은 주변영역의 정규식생지수 및 정규화상지수의 중앙값을 의미하며, $RMSD_{NDVI}$ 및 $RMSD_{NBR}$ 는 각각 정규식생지수와 정규식생지수기본도 간의 평균제곱근편차, 정규화상지수와 정규화상지수기본도 간의 평균제곱근편차를 나타낸다. $\rho_{0.64}$, $\rho_{0.86}$, 및 $\rho_{1.38}$ 는 각각 적색채널, 근적외선 채널 및 단파적외선 채널의 반사도를 의미한다. ω_1 및 ω_2 는 각각 산불후보화소로 선정된 나대지, 도심지 및 해안가 화소를 산불탐지 결과에서 제외하기 위한 임계값을 나타낸다.

이와 같은 특성을 지닌 나대지, 도심지 및 해안가 영역은 주간영역에서 산불로 탐지될 가능성이 크기 때문에, 본 연구에서는 이러한 영역의 특성을 고려한 오탐지 제외 알고리즘을 적용하였다.

NDVI 및 NBR 을 이용한 오탐지 제외 알고리즘은 도심지, 나대지, 해안가 등의 지역에서 발생하는 고온(화재) 탐지를 위해 현업 버전에서는 수행하지 않고 있다.

2.5 수학적 설명

해당 부분에서는 본 산불탐지 알고리즘에서 결정된 수치적 경계값을 설명한다.

2.5.1 경계값 결정을 위한 테스트 화소 선정

본 산불탐지 알고리즘에 적용된 경계값은 총 60 개 지점에서 획득한 산불화소와 비산불화소를 대상으로 결정하였다. 다양한 지역적 특성과 일변화 및 계절변화를 고려하기 위하여 1 시간단위 각 화소들의 온도값을 4 일동안 2 개월 간격으로 획득하여 약 32,000 화소를 이용하여 결정하였다. 경계값 결정에 활용한 모의자료는 Himawari-8 AHI 로부터 획득하였다.

그림 2.11 은 60 개 지점의 일부를 나타내며, 호주, 한반도, 일본, 몽골, 러시아 및 미얀마 등 다양한 지역에서 육안으로 산불연기가 식별가능하거나, 채널온도에서 열점으로 관측된 경우 실제 산불화소로 분류하였으며, 그렇지 않은 경우는 비산불화소로 분류하여 경계값을 결정하였다.

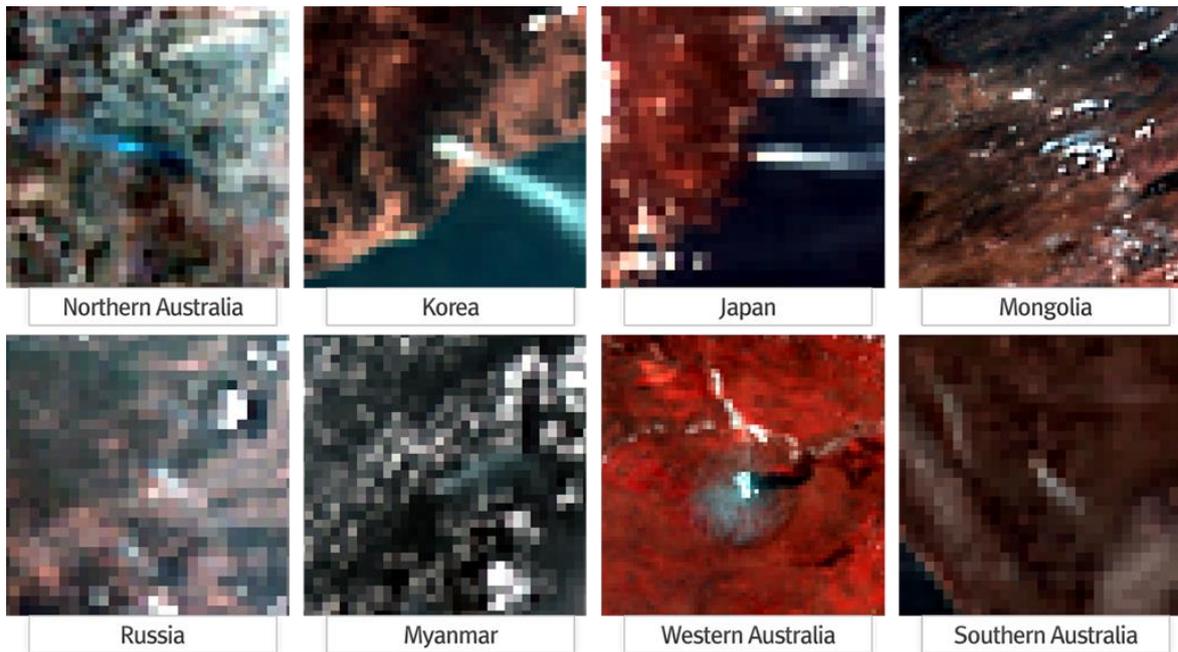


그림 2.11 산불탐지 경계값 결정에 활용한 지역 중 일부

2.5.2 고도영향 저감 결과

그림 2.12는 2017년 5월 5일 06:00 영상을 대상으로 온도감률을 추정한 결과를 나타낸다. 그림 2.12로부터 확인할 수 있듯이, 고도가 상승할수록 온도는 감소하게 되며 해당 촬영시각에서 단파적외선 채널온도는 약 7(K/km)를, 열적외선 채널온도는 약 6(K/km)의 온도감소율을 보이고 있다.

그림 2.13은 단파적외선 채널온도를 대상으로 수식 (4)를 이용하여 추정된 온도감률로부터 고도영향을 저감한 결과 중 한반도영역만을 도시한 것이다. 그림 2.13으로부터 낮은 지표온도를 나타낸 백두산 영역과 강원도 산간지역의 온도가 상승한 것을 확인할 수 있다. 그림 2.14는 이를 더 자세히 확인하기 위해 강원도 영역을 확대한 것으로, 해당 시각에서는 산불로 인한 열점이 관측되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이때 열점 주변의 온도변화는 매우 불규칙하여 높은 분산을 가지고 있으나, 고도영향 저감 후 주변영역의 온도변화가 감소하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.

그림 2.15는 고도영향 저감결과를 정량적으로 평가하기 위하여, 선정된 32,000개의 테스트 화소를 대상으로 고도영향 저감 전과 저감 후의 고도에 따른 단파적외선 채널온도의 변화를 나타낸다. 그림 2.15와 같이 고도영향 저감 후 고도의 영향이 감소하여 기울기가 상대적으로 0에 가까워진 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 알고리즘에 탑재한 고도영향 저감 알고리즘은 산악지역에서 발생하는 높은 온도분산을 저감하는 효과가 있으며, 이에 따라 산악지역에서의 산불탐지 성능을 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

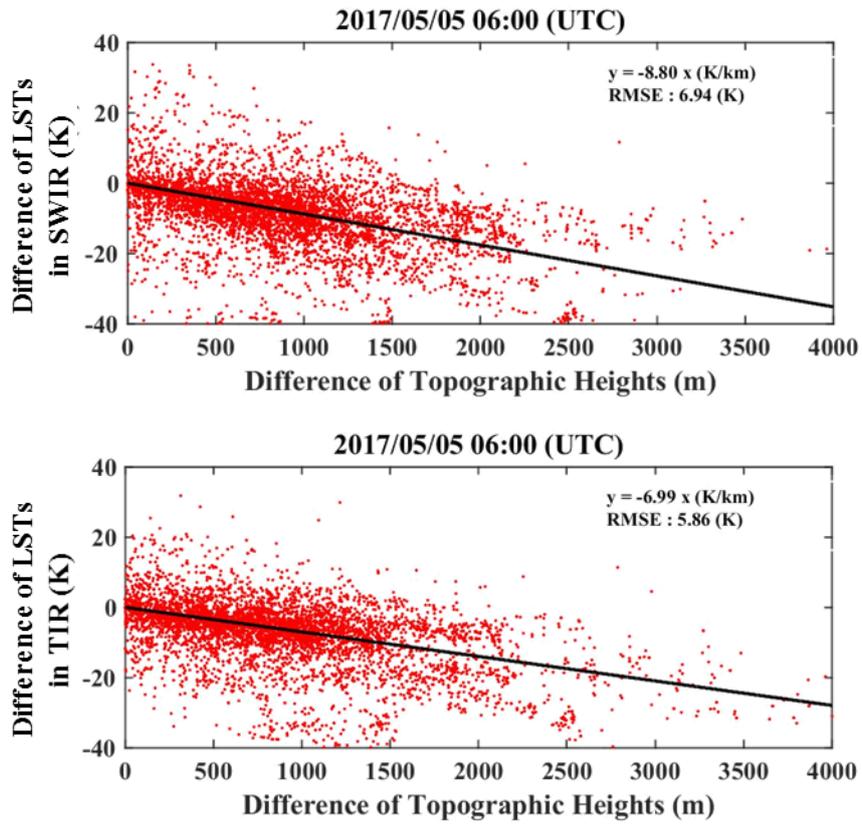


그림 2.12 단파적외선과 열적외선에서의 온도감을 추정 결과 예시

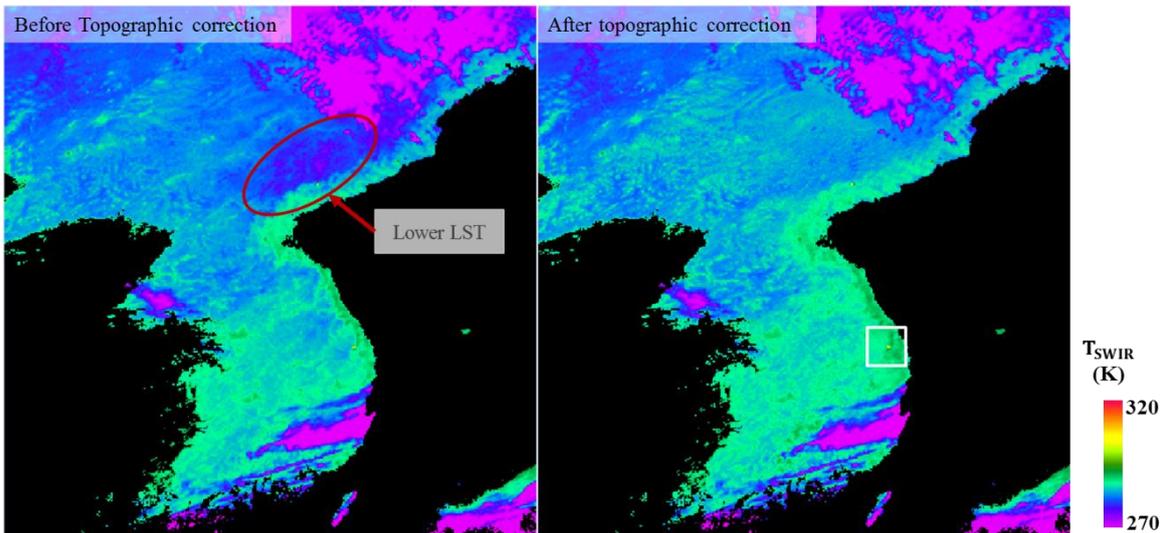


그림 2.13 한반도지역 고도영향 저감 전후 비교

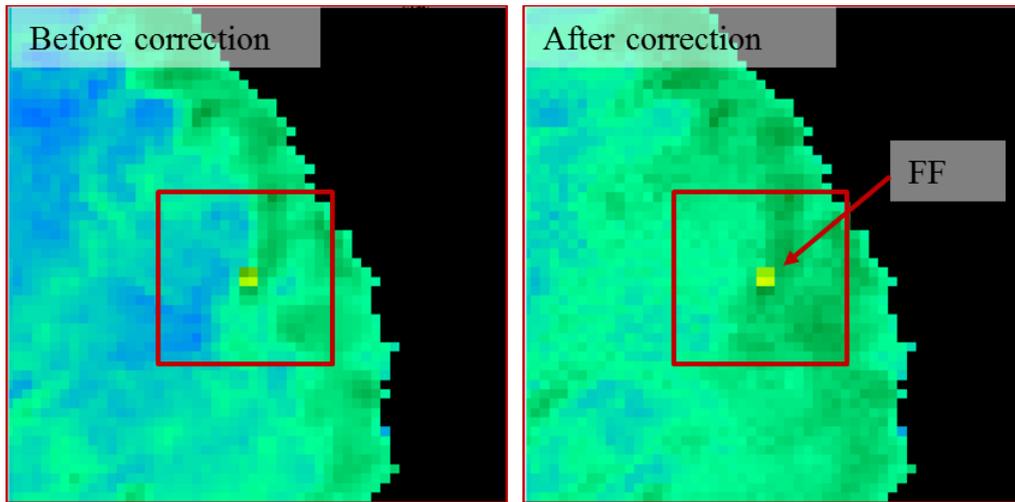


그림 2.14 강원도지역 실제산불 영역 고도영향 저감 전후 비교

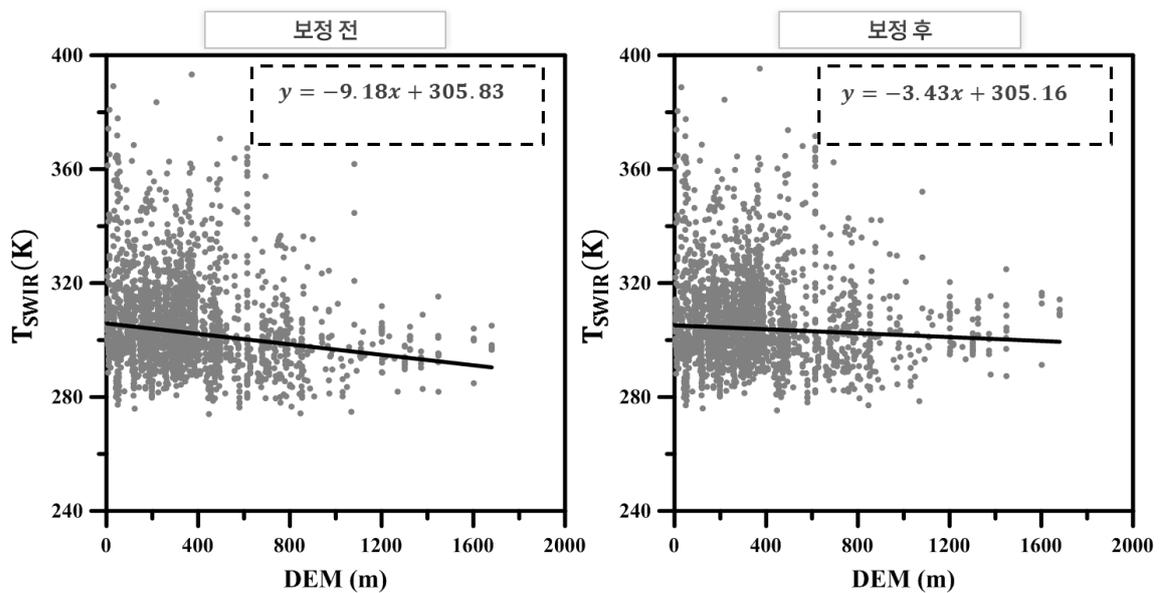


그림 2.15 고도영향 저감 효과

2.5.3 주야간 구분을 위한 태양천정각 결정결과

약 32,000 개의 테스트 화소를 대상으로 태양천정각과 단파적외선 채널온도 및 단파적외선과 열적외선의 채널온도 차이를 분석하였다. 그림 2.16은 태양천정각에 따른 단파적외선 채널온도 및 단파적외선과 열적외선의 채널온도차이를 나타낸다. 분석결과

태양천정각 85도 이상인 지역에서는 단파적외선 채널온도와 채널온도 차이 모두 일관성을 나타냈으나, 85도 이하로 갈수록 두 영역 모두 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 산불탐지 알고리즘은 태양천정각 85도를 기준으로 85도 이하인 경우 주간영역으로, 85도 이상인 경우 야간영역으로 결정하였다.

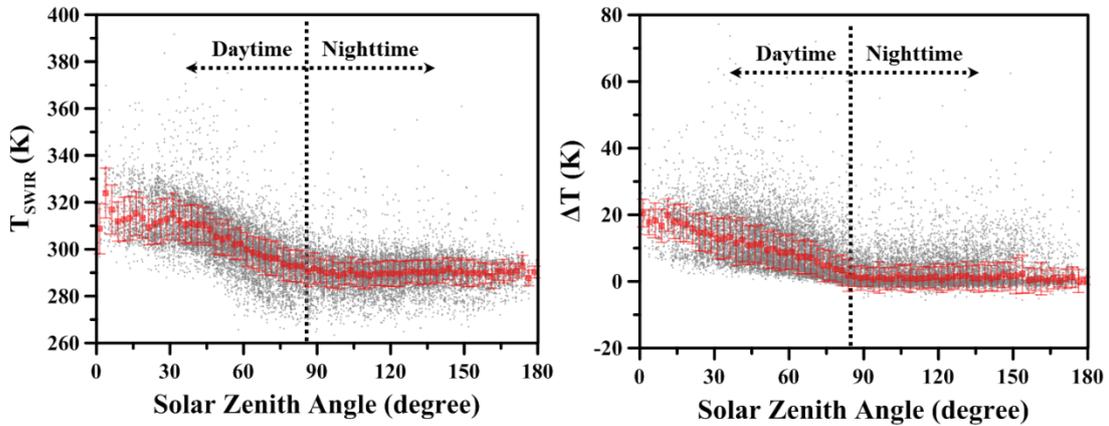


그림 2.16 테스트 자료 대상 태양천정각 변화에 따른 단파적외선 채널온도 및 열적외선과의 채널온도 차이

2.5.4 절대온도 임곗값 결정 결과

그림 2.17은 야간영역과 주간영역에서 산불화소와 비산불화소에 대한 단파적외선 채널온도를 나타낸다. 그림 2.17로부터 야간영역의 경우 320K 이상인 화소는 절대산불화소로 가정하였으며, 주간영역의 경우 350K 이상인 화소를 절대산불화소로 가정하여 이후의 임곗값 적용없이 산불화소로 확정한다. 해당 임곗값은 비산불 기준 Z 점수(Z-score)가 0.00003에 해당하므로 통계적으로 비산불일 확률이 매우 낮음을 의미한다.

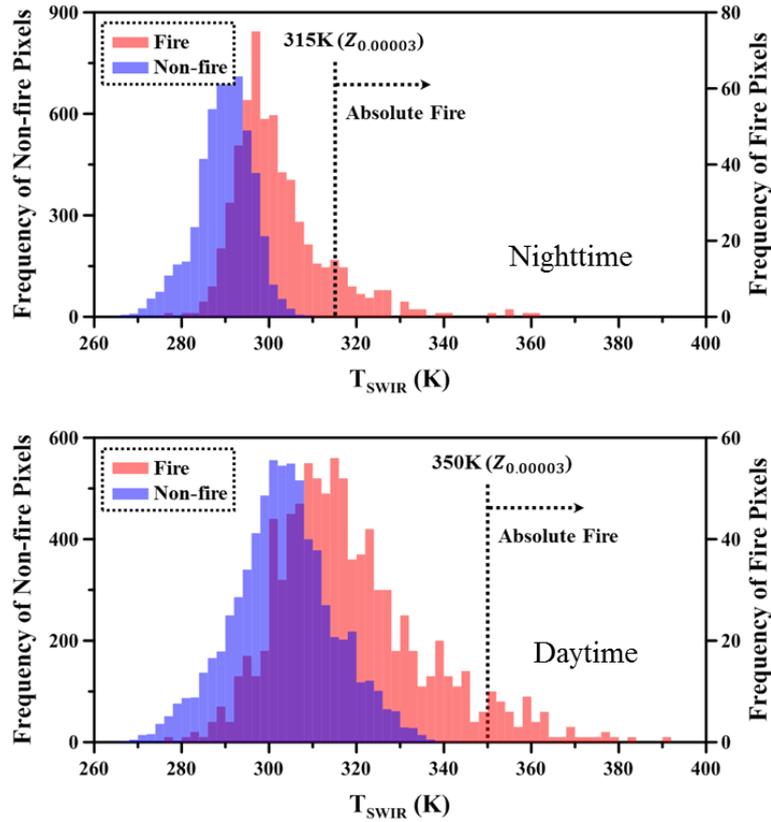


그림 2.17 야간영역과 주간영역에서 절대산불결정을 위한 채널온도 임계값

2.5.5 산불후보화소 선정을 위한 임계값 결정 결과

그림 2.18 은 산불후보화소 선정을 위한 임계값 결정 결과를 나타낸다. 주야간 모두 동일한 임계값을 적용하며, 단파적외선 채널온도와 단파적외선 채널기본도의 차이가 2 K 이상이고, 단파적외선과 열적외선 채널온도의 차이와 차이기본도의 차이가 2K 이상일 경우 산불후보화소로 선정하게된다. 주간영역의 경우 근적외선 채널에서의 반사율을 추가적으로 고려하며, 근적외선 채널의 반사율이 0.35 이하까지 만족하였을 때, 산불화소로 결정한다(그림 2.19).

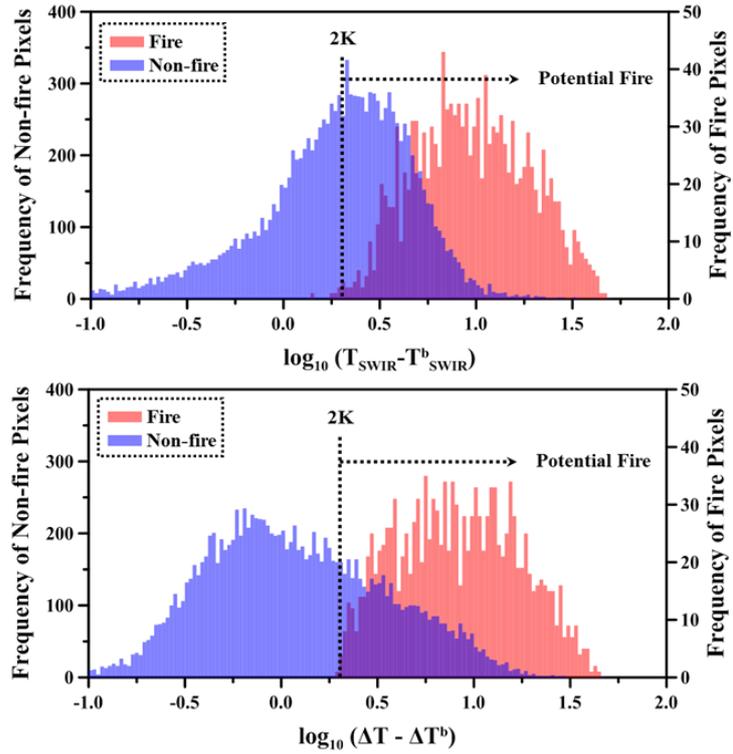


그림 2.18 산불후보화소 결정을 위한 채널온도 임계값

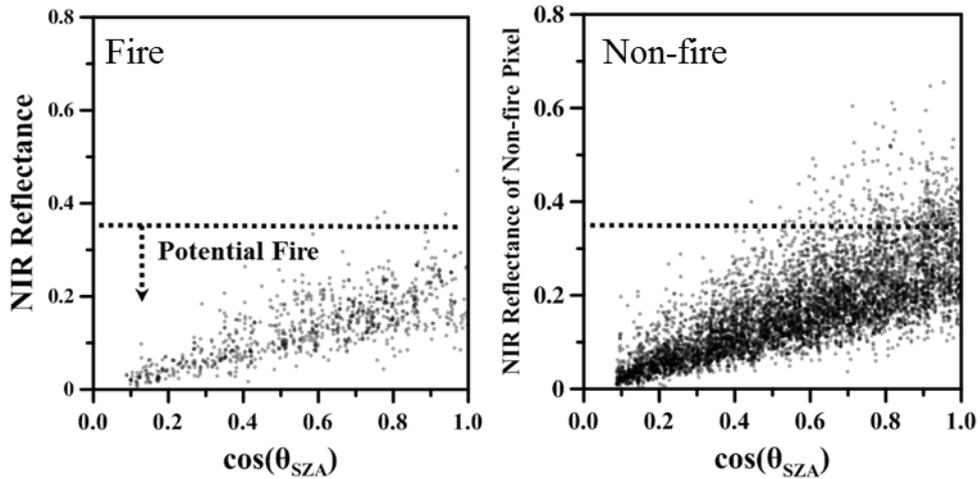


그림 2.19 산불후보화소 결정을 위한 근적외선 반사율 임계값

2.5.6 상대적인 온도 임계값 결정 결과

그림 2.20 은 야간영역에서 α , β , γ 및 τ 를 결정하기 위한 수식 (9)부터 수식 (12)까지 적용한 단계를 나타낸다. 또한 그림 2.15 는 주간영역에서 α , β , γ 및 τ 를 결정하기 위한 수식 (9)부터 수식 (12)까지 적용한 단계를 나타낸다. 해당 그림에 활용된 산불화소는 모두 산불후보화소를 대상으로 하였다. 그림 2.20 및 그림 2.21 과

같이 산불화소와 비산불화소에서 차이가 나타나나 두 히스토그램이 겹치는 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 임곗값에 따라 실제 산불이 탐지되지 못하는 경우가 발생하거나, 비산불화소가 산불로 탐지되는 경우가 발생하게 된다.

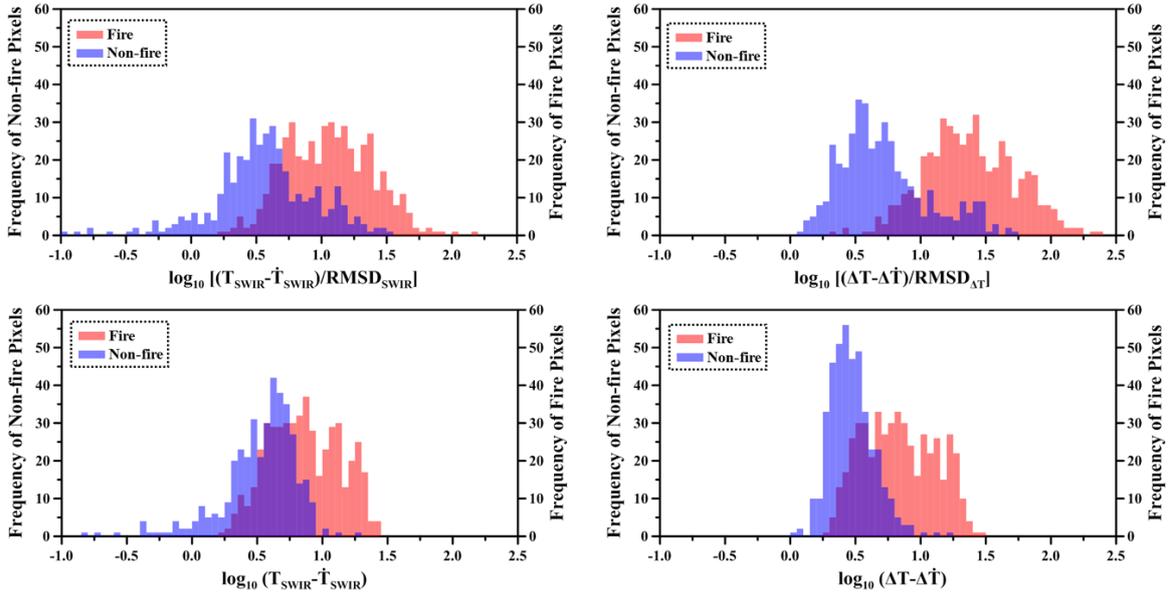


그림 2.20 야간영역에서 주변영역 대비 온도비교 결과

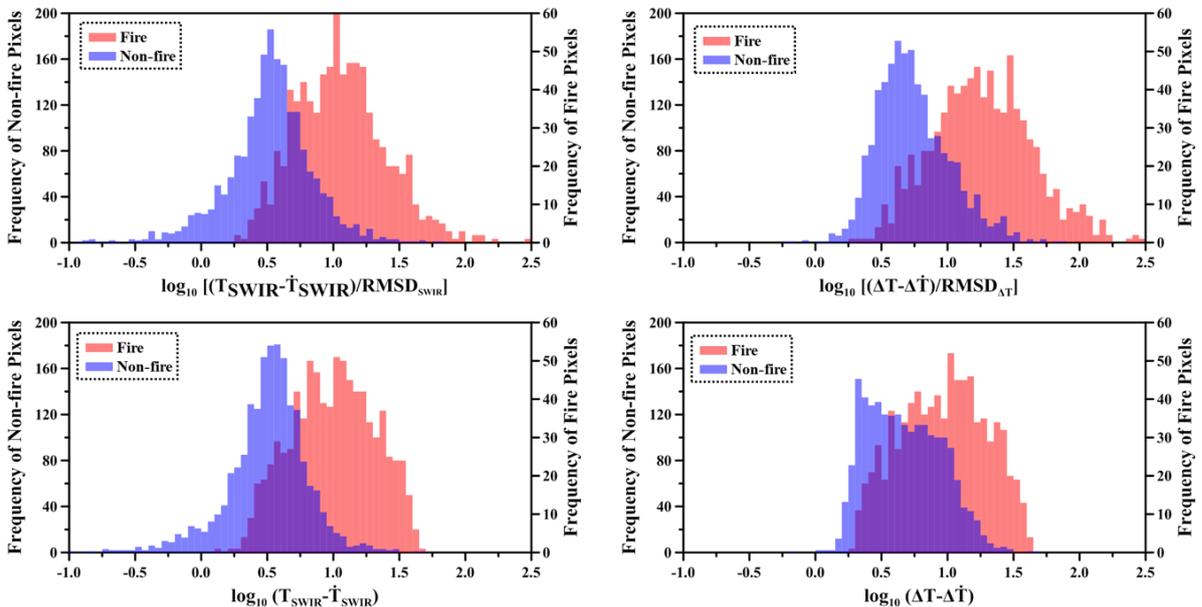


그림 2.21 주간영역에서 주변영역 대비 온도비교 결과

최적의 임곗값은 실제산불이 탐지되지 못하는 경우를 최소화하며 동시에 비산불화소가 산불로 탐지되는 경우 역시 최소화 될 때의 임곗값을 의미한다. 본 산불탐지

알고리즘에서는 임계값의 변화를 통해 정탐지율과 오탐지율 및 임계성공지수를 확인하였으며, 임계성공지수가 가장 높을때의 임계값을 최적의 임계값으로 결정하였다.

그림 2.22는 각 임계값 변화에 따른 야간영역과 주간영역에서의 정탐지율과 오탐지율의 관계를 나타낸다. 그림 2.22와 같이, 정탐지율과 오탐지율은 반비례 관계를 지니게 된다. 이는 임계값과 관련이 되며, 낮은 임계값일 경우 모든 산불화소를 탐지하여 정탐지율이 상승하나, 반대로 비산불화소 역시 산불화소로 탐지하게 됨에 따라 오탐지율 역시 상승하게 된다. 반면에 임계값이 높을 경우 비산불화소를 오탐지하는 경우는 줄어들지만, 반대로 실제 산불화소가 탐지되지 못하는 경우가 발생한다. 또한 오탐지율의 경우 모든 경우에서 주간영역이 야간영역에 비하여 높게 발생하게 되며, 이러한 이유는 주간영역의 태양반사신호 때문에 나대지, 도심지 및 해안가가 산불이 아님에도 온도가 높기 때문이다.

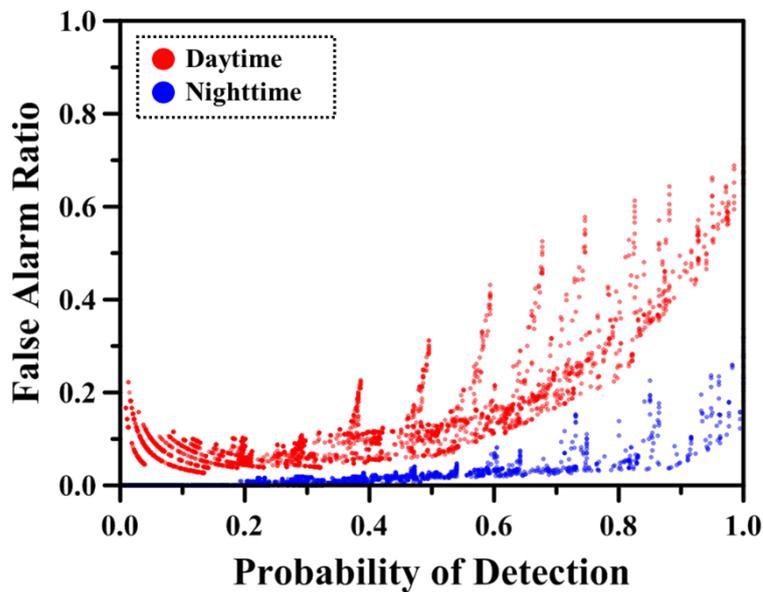


그림 2.22 정탐지율과 오탐지율의 관계

그림 2.23은 각 임계값 변화에 따른 야간영역과 주간영역에서의 임계성공지수와 정탐지율의 관계를 나타낸다. 그림 2.23과 같이, 임계성공지수는 특정영역에서 최대값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 역시 야간영역에서 임계성공지수가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 임계성공지수는 정탐지율과 오탐지율 모두를 고려한 것으로, 해당지점에서는 정탐지율과 오탐지율이 적절히 조화를 이루는 것을 의미한다. 즉 해당지점에서는 최대의 정탐지율은 아니지만, 높은 정탐지율과 낮은 오탐지율을 보이는 것으로 본 알고리즘에서는 이때의 경계값을 사용하였다.

다음 표 2.5는 본 산불탐지 알고리즘에서 활용한 경계값을 나타낸다.

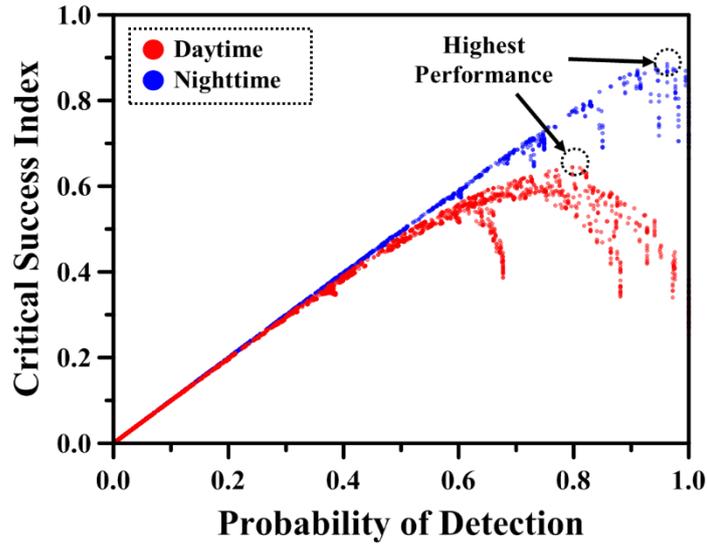


그림 2.23 정탐지율과 임계성공지수의 관계

표 2.5 상대온도 평가에 결정된 임계값

Equation	Thresholds (nighttime)	Thresholds (daytime)
$\frac{T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}}{RMSD_{SWIR}}$	2.0	2.5
$\frac{\Delta T - \Delta \dot{T}}{RMSD_{\Delta T}}$	4.0	6.3
$T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}$	2.0	4.0
$\Delta T - \Delta \dot{T}$	2.0	2.5

2.5.7 나대지, 도심지 및 해안가 영역 제외 임계값 결정 결과

그림 2.24 는 나대지, 도심지 및 해안가 영역을 제외하기 위한 임계값을 결정한 결과를 나타낸다. 그림 2.18 에서 결정된 각각의 임계값은 그림 2.22 및 그림 2.23 과 같이 임계성공지수를 고려하여 결정되었다. 그림 2.24 로부터 확인할 수 있듯이, 나대지, 도심지 및 해안가 영역을 제외하는 과정은 두 단계에 거쳐 수행된다. 첫 번째 단계는 수식 (9)과 수식 (10)에 대한 임계값으로 산불화소가 매우 높은 온도를 보일 때 정규식생지수 및 정규화상지수가 낮게 나타남을 고려한 것이다. 이는 산불이 진행됨에 따라 산림의 영역이 감소하여 정규식생지수 및 정규화상지수가 낮아지는 것을 고려한다(Van de Griend and Owe, 1993). 결정된 임계값은 $\alpha = 12.5$, $\beta = 15.5$ 에 해당한다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 통과하지 못한 화소를 대상으로 수행되며, 정규식생지수와 정규화상지수를 바탕으로 임계값을 적용한다. 결정된 정규식생지수에

대한 임계값은 -3 이고, 정규화상지수에 대한 임계값은 -2 에 해당한다. 두 조건을 모두 만족하는 경우 산불화소로 최종 확정한다.

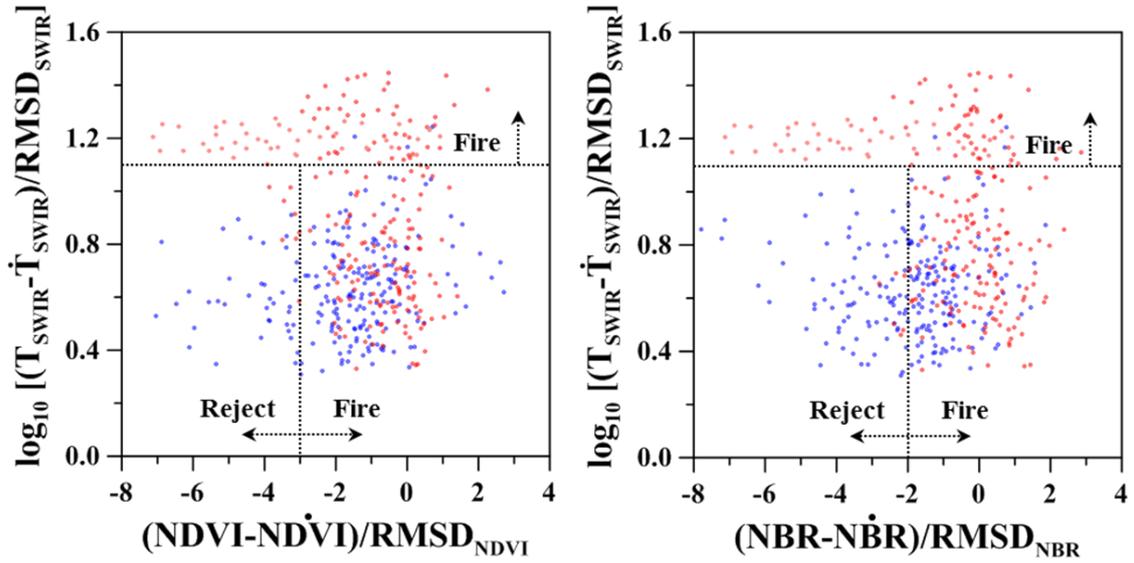


그림 2.24 나대지, 도심지 및 수계영역의 산불 및 비산불 화소 분포와 결정된 경계값

2.5.8 임계값 요약

다음 표 2.6 은 각 단계에서 결정된 임계값을 요약한다.

표 2.6 천리안위성 2A 호 산불탐지 알고리즘 임계값 요약

Processing steps	Criteria and thresholds	
	Daytime	Nighttime
Water masking	Land/sea mask from ancillary data	
Baresoil masking	Landcover map from ancillary data	
Cloud masking	Cloud mask from CLD algorithm (NMSC)	
Daytime and Nighttime test	$\theta_{SZA} < 85$	$\theta_{SZA} \geq 85$
Absolute fire test	$T_{SWIR} > 350K$	$T_{SWIR} > 320K$
Potential fire identification	$(T_{SWIR} - T_{SWIR}^b > 2K)$ and $(\Delta T - \Delta T^b > 2K)$	$(T_{SWIR} - T_{SWIR}^b > 2K)$ and $(\Delta T - \Delta T^b > 2K)$ and $(\rho_{0.86} < 0.35)$
Context test	$\frac{T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}}{RMSD_{SWIR}} > 2.5$ and $\frac{\Delta T - \dot{\Delta T}}{RMSD_{\Delta T}} > 6.2$ and $T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR} > 4.0$ and $\Delta T - \dot{\Delta T} > 2.5$	$\frac{T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}}{RMSD_{SWIR}} > 2.0$ and $\frac{\Delta T - \dot{\Delta T}}{RMSD_{\Delta T}} > 4.0$ and $T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR} > 2.0$ and $\Delta T - \dot{\Delta T} > 2.0$
Cloud rejection	If $P_c > 0.1$, After \dot{T}_{SWIR} , $\dot{\Delta T}$, $RMSD_{SWIR}$ and $RMSD_{\Delta T}$ recalculation in 15×15 window, re-execute context test	
First baresoil, urban and coastal area test	If $P_f > 0.1$, $\frac{T_{SWIR} - \dot{T}_{SWIR}}{RMSD_{SWIR}} > 12.5$ and $\frac{\Delta T - \dot{\Delta T}}{RMSD_{\Delta T}} > 15.5$	
Second baresoil, urban and coastal area test	If first test is failed, $\frac{NDVI - \dot{NDVI}}{RMSD_{NDVI}} > -3$ and $\frac{NBR - \dot{NBR}}{RMSD_{NBR}} > -2$	

2.6 산업열 탐지 지역 구별 알고리즘

산불 탐지 주요 알고리즘은 주변 화소보다 높은 온도를 탐지하여 산불을 탐지하는 것이다. 이 때문에 제철소나 시멘트 공장 등에서 발생한 열을 산불지역으로 오탐지하는 현상이 발생하였다. 이러한 오탐지를 줄이고자 산업열 지역을 조사하여 산불과 구분하여 표출하였다.

2.6.1 산업열 지역 선정 방법

산불로 탐지된 픽셀 중 산불이 아닌 산업열 지역을 구별하기 위하여 한반도 영역을 대상으로 2020년~2021년 2년동안 10분 간격의 산불탐지 산출물을 이용하여 산불탐지 횟수를 분석하였다. 그림 2.25는 2020~2021년 사이에 탐지된 누적 산불탐지 횟수를 나타낸다.

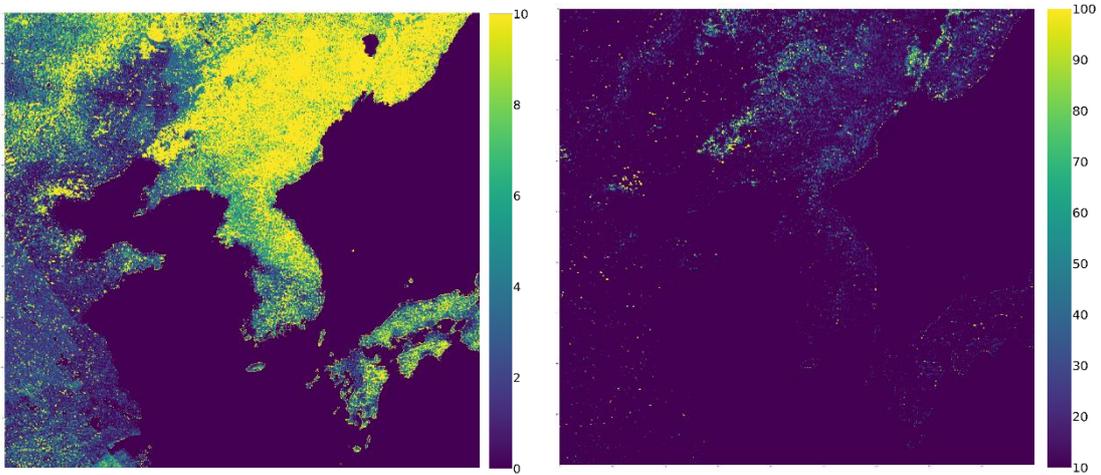


그림 2.25 2020년~2021년 사이 각각의 화소가 산불로 탐지된 횟수. 0~10 번 이상(왼쪽), 10~100 번 이상(오른쪽)

그림 2.25에서 보면 지난 2년간 산불로 탐지된 지역이 내륙 곳곳에 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이 자료를 바탕으로 화소별로 탐지 횟수를 카운트하고 탐지 횟수가 많은 곳중 산업열 지역이 위치하는 화소를 산업열 지역으로 구별하였다,

남한 영역에서 산불로 오탐지된 산업열화소는 제철소, 시멘트공장, 정유공장, 원전 등, 공단, 폐기물처리장 등으로 확인되었고, 이러한 화소에 대해서는 산불이 아닌 산업열지역의 플래그를 부여하고, 주황색으로 표시하도록 변경하였다.

2.6.2. 산업열 지역 선정 결과

산업열 지역은 10개 지점 18개 픽셀이 선정되었으며 그 상세 지점 및 화소개수는 표 2.7과 같다. 이 지역은 산불로 탐지되더라도 빨간색이 아닌 주황색으로 표출한다.

표 2.7 상습 고온 열탐지 지역(산업열지역) 분류

순번	산업열 지역	픽셀수	순번	산업열 지역	픽셀수
①	포항제철소	5	⑥	동해시멘트	2
②	광양제철소	4	⑦	여수공단	1
③	당진제철소	1	⑧	고리원전	1
④	영월시멘트	1	⑨	구미폐기물처리장	1
⑤	단양시멘트	1	⑩	울산정유공장	1

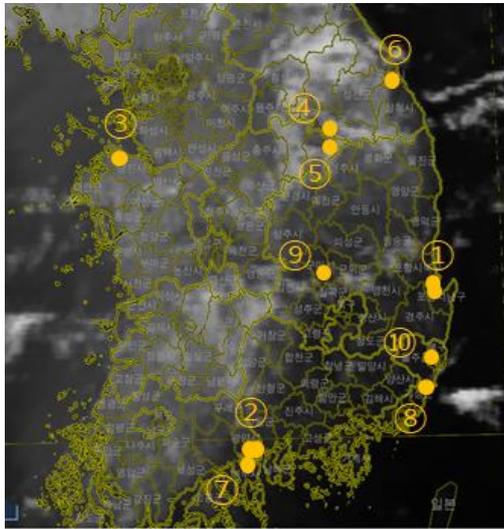


그림 2.26 상습 고온 열탐지 지역(산업열지역) 위치

2.7 이전영상을 활용한 안정성 테스트

국가기상위성센터는 2022년 4월 25일부터 2분 간격의 확장지역영상(Extended Local Area, ELA)을 이용하여 2분 간격의 산불탐지 산출물을 제공하고 있다.

이러한 2분 간격의 산출물에서 산발적으로 나타났다가 2분만에 사라지는 산출경향이 일부 화소에서 나타났다. 산불은 지속시간이 긴 특징이 있으므로, 산발적으로 나타났다가 사라지는 화소를 오탐지 화소로 간주하는 안정성 테스트 과정을 추가하였다.

현재 시각에 산불 화소로 탐지가 되면, 이전 시각(현재시각보다 2분 전) 산출물을 확인하여 현재 시각에 산불 화소로 탐지된 지역 주변 3x3 화소를 탐지하여 이전 시각에도 산불로 탐지된 화소가 있으면 산불 화소로 최종 산출한다. 만약 현재 시각에는 산불로 탐지되었으나 이전 시각에 주변에 산불로 탐지된 화소가 없다면 최종산출물에

산불로 산출은 하지 않고, 데이터 플래그에만 안정성 테스트 플래그를 남겨 다음시각에 안정성 테스트를 수행할 때 활용할 수 있도록 하였다.

2.8 산출물

산불 탐지 알고리즘에서 산출되는 출력자료는 산불탐지화소만을 나타내는 이진값 영상과 text 포맷(*.txt) 형태의 report 및 산불탐지화소에 대한 분류도를 생성한다. 표 2.8 은 이진값영상에 대한 설명을 나타낸다. 산불 report 는 산불이 발생한 위치의 위도, 경도를 텍스트 파일 형태로 출력한다. 산불탐지 분류도에 대한 설명은 표 2.9 과 같다.

표 2.8 산불탐지 결과 파일에 대한 설명

Name of Output	Name of Variable	Description	Valid range
Forest Fire	FF	Forest Fire	0~1
	DQF_FF	Forest Fire data quality flags	0~13

표 2.9 산불탐지 결과가 나타내는 수치와 설명

Name of Variable	Value	Description
FF	0	Fill-value
	1	Forest Fire
DQF_FF	0	Invalid, outside observation range (SZA above 70 degree)
	1	Invalid, masked area or missing input data
	2	Land
	3	Water
	4	Cloud
	5	Rejection by cloud test
	6	Rejection by baresoil, urban and water test
	7	Potential fire
	8	Fire
	9	Absolute fire
	10	Industrial Heat Detection
12	Stability test	
13	Probably Cloud	

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

3.1.1 모의 입력자료

산불탐지를 위한 모의자료로는 Himawari-8 AHI 자료를 사용하였다. Himawari-8 AHI는 총 16개의 채널로 구성되어 있다. 표 3.1은 사용한 모의자료와 함께 천리안위성 2A호의 관계를 설명한다.

표 3.1 모의자료로 사용한 Himawari-8 AHI 자료 설명

Band	Central Wavelength (μm)	Spatial Resolution (km)	Usage
1	0.47	1	
2	0.51	1	
3	0.64	0.5	Alternative data of AMI band No. 3
4	0.86	1	Alternative data of AMI band No. 4
5	1.6	2	
6	2.3	2	
7	3.9	2	Alternative data of AMI band No. 7
8	6.2	2	
9	6.9	2	
10	7.3	2	
11	8.6	2	
12	9.6	2	
13	10.4	2	
14	11.2	2	Alternative data of AMI band No. 14
15	12.4	2	
16	13.3	2	

3.1.2 검증자료

산불탐지 결과 평가를 위한 검증자료로는 임꺽값 결정에 활용된 약 32,000 개의 산불/비산불 화소를 활용하였다. 산불화소의 선정은 산불연기가 관측되는 지역을 대상으로 선정하였으며, 시간변화에 따른 채널온도 변화를 육안분석을 통해 해당 화소가 실제 산불임을 정의하였다. 그림 3.1 은 산불화소를 정의하는 과정을 나타낸다. 그림 3.1 과 같이, 실제 산불이 발생하였을 경우 단파적외선 채널온도는 급격히 상승하여 매우 높은 온도를 지니는 것을 확인할 수 있다. 이후 산불이 진행됨에 따라 온도는 감소하고 다시 증가하는 과정을 반복하게 되며, 산불이 진화된 시각 이후로는 다시 온도가 평상시 수준으로 감소하게 된다. 이는 10 분단위 영상을 촬영할 수 있는 천리안위성 2A 호의 가장 큰 장점으로, 특정시각에 특정영역만을 촬영하는 극궤도 위성과 달리 천리안위성 2A 호에서는 실제 산불을 판별함으로써 보다 신뢰도 있는 임꺽값의 결정이 가능하다.

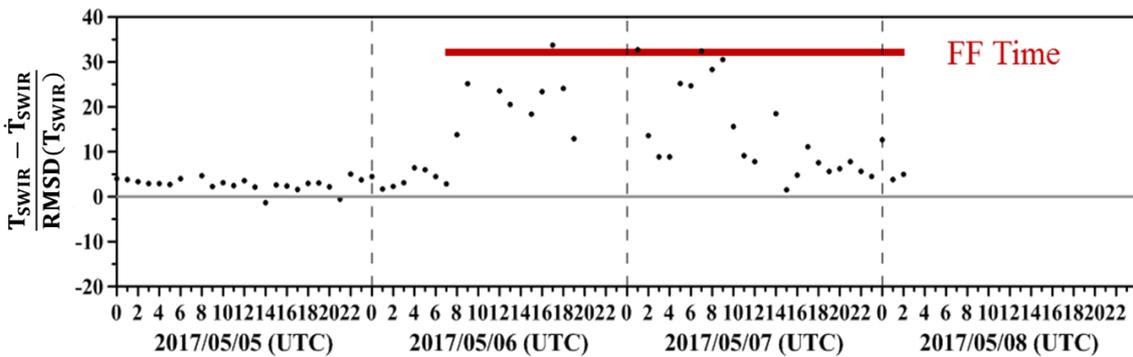


그림 3.1 실제 산불에서의 시간별 온도변화

또한 추가적으로 2019년 4월 4일 발생한 고성 및 강릉에서 발생한 산불을 대상으로 개발한 알고리즘을 적용하여 평가하였다.

3.2 검증 방법

산불탐지 결과의 정량적 정확도 평가는 임꺽값 결정에 활용한 32,000 개의 테스트 화소를 대상으로 다시 임꺽값을 적용하였으며, 정탐지율과 오탐지율을 계산함으로써 알고리즘의 성능을 평가하였다. 또한 2019년 발생한 고성 및 강릉 산불에 적용하여 실제 산불 발생후 탐지되기까지 소요되는 시간을 평가하였다.

3.3 검증 결과

표 3.2, 표 3.3 및 표 3.4 는 각각 야간, 주간 및 종합적인 검증결과를 나타낸다. 표 3.2 와 표 3.3 에서 확인할 수 있듯이, 야간에는 95.40%의 매우 높은 정탐지율과 8.33%의 매우 낮은 오탐지율을 보이는 반면, 주간에는 상대적으로 정탐지율이 감소하여

78.60%의 정탐지율을 기록하였으며, 오탐지율은 상승하여 22.55%로 나타났다. 이를 종합한 결과, 정탐지율은 87.17%에 해당하며, 오탐지율은 15.20%에 해당한다.

표 3.2 야간영역 검증결과

Nighttime		Detected forest fire using proposed algorithm		
		Fire	Non-fire	Total
Reference forest fire	Fire	539	26	565
	Non-fire	49	16,398	16,447
	Total	588	16,424	17,012
POD		95.40%		
FAR		8.33%		

표 3.3 주간영역 검증결과

Daytime		Detected forest fire using proposed algorithm		
		Fire	Non-fire	Total
Reference forest fire	Fire	426	116	542
	Non-fire	124	14,122	14,246
	Total	550	14,238	14,788
POD		78.60%		
FAR		22.55%		

표 3.4 검증결과 종합

Total		Detected forest fire using proposed algorithm		
		Fire	Non-fire	Total
Reference forest fire	Fire	965	142	1,107
	Non-fire	173	30,520	30,693
	Total	1,138	30,662	31,800
POD		87.17%		
FAR		15.20%		

2019년 4월 4일 19:20 ~ 4월 5일 09:00 까지 고성/속초에서 발생한 산불을 대상으로 개발된 알고리즘을 적용한 결과 산불발생 이후 20분 뒤인 4월 4일 19:40 부터 탐지에 성공하였으며, 4월 5일 4:40 까지 9 시간동안 연속적으로 탐지에 성공하였다(그림 3.2). 또한 2019년 4월 4일 23:50 ~ 4월 5일 07:50 까지 강릉/옥계에서 발생한 산불을 대상으로 개발된 알고리즘을 적용한 결과 산불발생 이후 30분 뒤인 4월 5일 00:20 부터 탐지에 성공하였으며, 4월 5일 6:50 까지 6 시간 30분 동안 연속적으로 탐지에 성공하였다(그림 3.3).

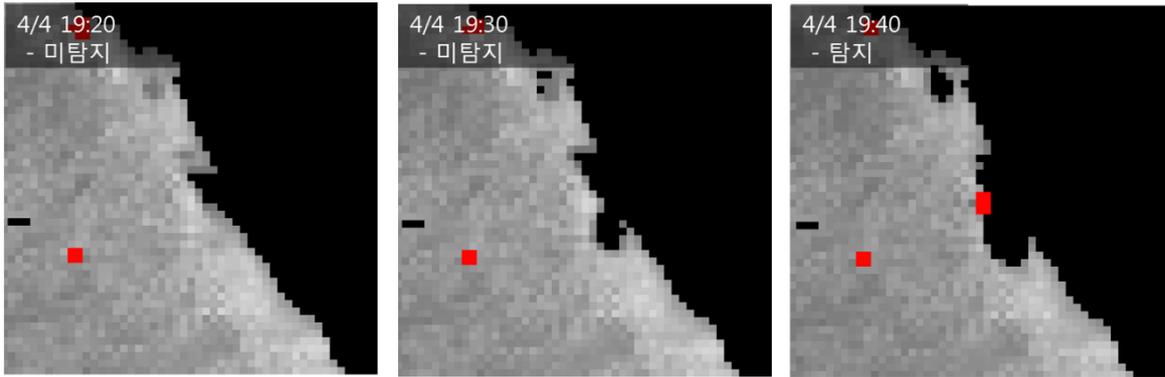


그림 3.2 2019년 고성/강릉 산불탐지 결과

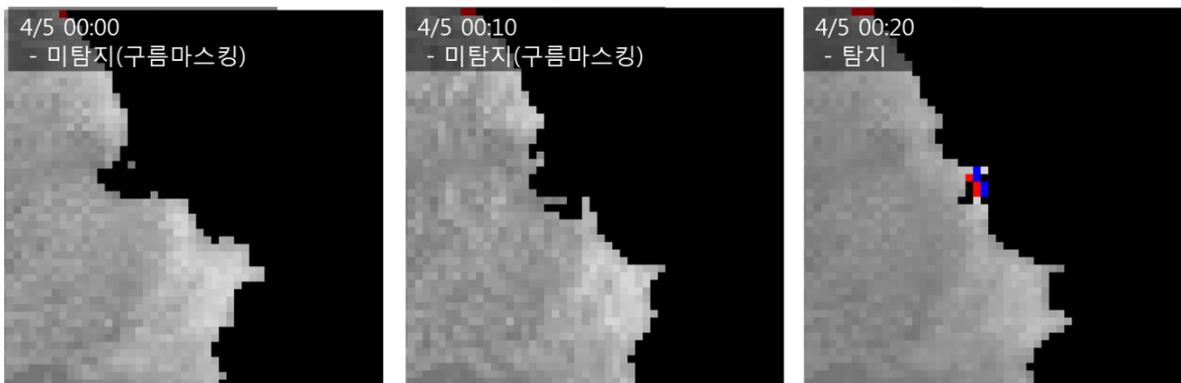


그림 3.3 2019년 강릉/옥계 산불탐지 결과

3.3.1 2분 간격 산불 탐지를 이용한 산불탐지 사례

그림 3.4는 2022년 3월 4일 발생해 약 16300ha의 피해를 입힌 울진 산불의 탐지 결과이다. 11시 17분에 산불신고가 접수 되었고, 2분 간격의 산출물에서는 1분 후인 11시 18분부터 연속적으로 탐지하고 있고, 10분 간격의 산출물에서는 3분 후인 11시 20분에 탐지가 시작된 것을 확인할 수 있다. 이처럼 2분 간격의 산불탐지는 산불을 10분 간격의 산출물보다 신속하게 산출할 수 있음을 확인할 수 있다. (산불 신고시각 출처: 산림청 산불대장(2022))

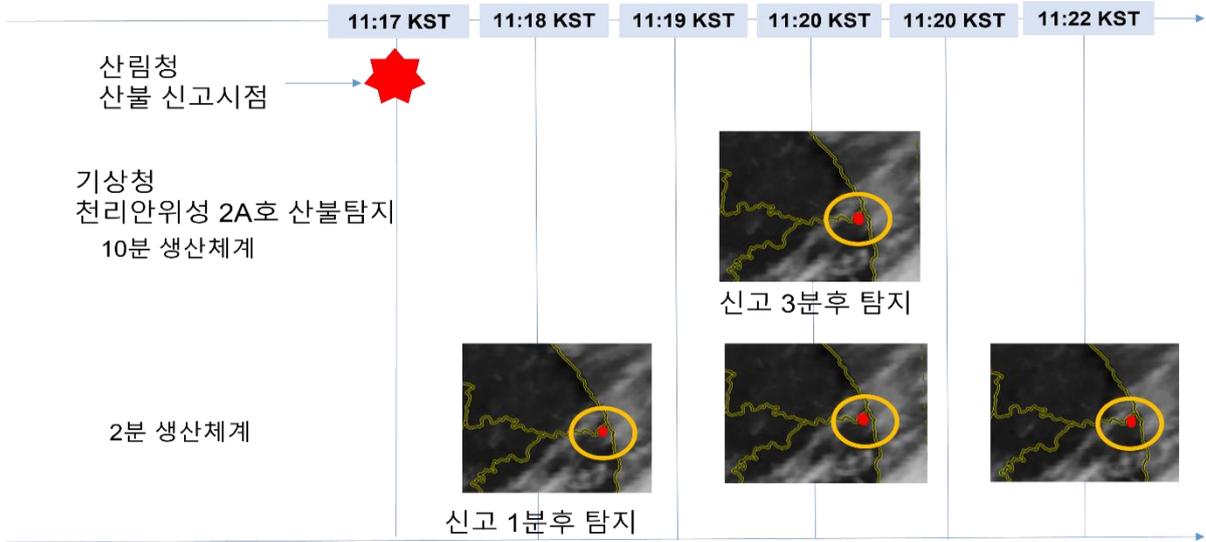


그림 3.4 2022년 경북 울진군 산불탐지 결과

그림 3.5는 2023년 4월 2일 전북 고창군에서 발생한 산불 사례로, 산불신고시점은 15시 28분이었지만 산불탐지 산출물에서는 4분 전부터 탐지하여 산불신고시각 이후로도 연속적으로 탐지에 성공하였다.(산불 신고시각 출처: 산림청 산불대장(2023))



그림 3.5 2023년 전북 고창군 산불탐지 결과

3.3.2 2023 년 산불사례 정량 검증 결과

2023 년 발생한 산불 사례 중 피해면적 100ha 이상의 대형 산불(8 건)에 대해 정량검증을 수행하였다. 2023 년 봄철 산불조심기간(2. 1. ~ 5. 15.)내에 발생한 산불 중 100ha 이상인 산불의 진화소요시각내에 천리안위성 산불탐지 산출물이 산불로 탐지한 횟수를 이용하여 탐지율을 계산하였고, 탐지율은 약 72%로 나타났다.

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

모의자료인 Himawari-8 AHI 영상을 기준으로 임곱값이 결정되었기 때문에, 천리안위성 2A 호에 임곱값 적용시 동일지역을 대상으로 Himawari-8 AHI와 천리안위성 2A 호에서의 단파적외선과 열적외선의 채널온도 비교가 요구된다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

개발된 산불탐지 알고리즘은 선행산출물로 구름탐지(Cloud Mask)를 활용하며, 산출물이 제공되지 않을시 산불탐지 역시 수행하지 않도록 개발되었다.

4.3 품질 평가 및 진단

주간영역에서는 태양반사신호로 인하여 산불탐지율이 저하되며, 동시에 오탐지율이 증가한다. 이러한 현상은 기존 MODIS, VIIRS, GOES 위성에서 제공하는 산불탐지 결과에서도 발견되는 일반적인 현상이며, 탐지된 산불화소가 실제 산불인지, 오탐지된 것인지 평가를 위해서는 여러 시간대에 걸쳐 산불로 탐지된 것인지 리포트를 분석하여 종합적인 판단이 이루어져야 한다.

4.4 예외사항 처리

제철소 및 발전소와 같은 고온을 방출하는 지역의 경우 산불로 감지될 가능성이 높다. 그러나 해당지역들은 고정된 위치에 있으므로 관측지역내의 산불로 꾸준히 탐지되는 지역의 위치 정보는 따로 목차를 만들어 산불탐지 시 예외처리 하는 것을 고려할 수 있다.

4.5 검증 알고리즘

산불탐지 검증 알고리즘은 MODIS에서 제공하는 산불탐지 결과와의 비교를 통해 수행된다. 산불탐지 산출물인 산불분류도에 나타나는 중간신뢰도 및 높은 신뢰도를 가진 산불탐지 결과를 대상으로 검증을 수행한다. 이때, MODIS 산불탐지 결과 역시 주간영역에서는 많은 오탐지율을 보이기 때문에 MODIS 산불탐지를 이용한 검증 외에도 리포트 분석을 통한 탐지시간의 연속성을 고려해야 한다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

초기 버전에서의 산불탐지 알고리즘은 약 87.17%의 정탐지율과 15.20%의 오탐지율을 나타낸다.

5.2 예상 센서 성능

임계값 조정 후 천리안위성 2A 호에 적용시 위 정탐지율과 오탐지율을 유지할 것으로 예상된다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

산출물 개선을 위한 향후 계획은 다음과 같다.

- 천리안위성 2A 호와 Himawari-8 AHI 단파적외선 및 열적외선 채널온도 비교 후 임계값 조정

6. 산불 탐지 산출에 사용된 상숫값 리스트(ELA 영역 기준)

nml_trans_ch07_val	= -0.1445	nml_th_ff_night_alpha	= 2.
nml_trans_ch14_val	= -0.1485	nml_th_ff_night_beta	= 4.
nml_path_ch14_val	= 0.6814	nml_th_ff_night_gamma	= 2.
nml_num_ref_topo_points	= 22630	nml_th_ff_night_tau	= 2.
nml_topo_ref_height	= 100	nml_th_ff_day_alpha	= 2.5
nml_topo_th	= 2.58	nml_th_ff_day_beta	= 6.3
nml_base_med_filt_size	= 7	nml_th_ff_day_gamma	= 4.0
nml_ff_win_size	= 3	nml_th_ff_day_tau	= 2.5
nml_urb_rej_win_size	= 3	nml_rejection_rate	= 0.1
nml_cld_rej_win_size	= 3	nml_th_urban_night_alpha	= 2.
nml_vza_threshold	= 70.	nml_th_urban_night_beta	= 0.
nml_flag_out_range	= 0	nml_th_urban_night_gamma	= 2.
nml_flag_invalid	= 1	nml_th_urban_night_tau	= 0.
nml_flag_cloud	= 4	nml_th_urban_day_alpha	= 2.5
nml_flag_water	= 3	nml_th_urban_day_beta	= 0.
nml_flag_land	= 2	nml_th_urban_day_gamma	= 4.0
nml_flag_abs_fire	= 9	nml_th_urban_day_tau	= 0.
nml_flag_pot_fire	= 7	nml_th_cloud_night_alpha	= 2.
nml_flag_first_fire	= 8	nml_th_cloud_night_beta	= 0.
nml_flag_urban_rej_fire	= 6	nml_th_cloud_night_gamma	= 2.
nml_flag_cloud_rej_fire	= 5	nml_th_cloud_night_tau	= 0.
nml_flag_low_conf_fire	= 7	nml_th_cloud_day_alpha	= 2.5
nml_flag_mid_conf_fire	= 8	nml_th_cloud_day_beta	= 0.
nml_flag_high_conf_fire	= 9	nml_th_cloud_day_gamma	= 4.0
nml_flag_high_temp_mask	= 10	nml_th_cloud_day_tau	= 0.
nml_flag_stability_test	= 12	nml_th_water_night_alpha	= 2.
nml_flag_probably_cloud	= 13	nml_th_water_night_beta	= 0.
nml_sza_threshold	= 85.	nml_th_water_night_gamma	= 2.
nml_th_abs_fire_night	= 320.	nml_th_water_night_tau	= 0.
nml_th_abs_fire_day	= 350.	nml_th_water_day_alpha	= 2.5
nml_th_pot_alpha	= 2.	nml_th_water_day_beta	= 0.
nml_th_pot_beta	= 2.	nml_th_water_day_gamma	= 4.0
nml_th_pot_gamma	= 0.35	nml_th_water_day_tau	= 0.

7. 참고문헌

- 산림청, 2013. 2012 년 산불통계 연보.
- 산림청, 2014. 2013 년 산불통계 연보.
- 산림청, 2015. 2014 년 산불통계 연보.
- 산림청, 2016. 2015 년 산불통계 연보.
- 산림청, 2017. 2016 년 산불통계 연보.
- 산림청, 2018. 2017 년 산불통계 연보.
- Becker, F., and Z.-L. Li, 1990. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 32:17-33.
- Boyd, D. S., G. M. Foody and P. J. Curran, 1999. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths (3.0-5.0 μ m). *International Journal of remote sensing*, 20(5):1017-1023.
- Csiszar, I.A., Morisette, J.T., and Giglio, L., 2006. Validation of active fire detection from moderate-resolution satellite sensors: the MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1757-1764.
- Dozier, J., 1981. A method for satellite identification of surface temperature fields in subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 11, 221-229.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C., O., and Kaufman, Y. J., 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87, 273-282.
- He, L. and Li, Z., 2011. Enhancement of a fire-detection algorithm by eliminating solar contamination effects and atmospheric path radiance: application to MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6273-6293.
- He, L. and Li, Z., 2012. Enhancement of a fire detection algorithm by eliminating solar reflection in the mid-IR band: application to AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 33(22), 7047-7059.
- Jiménez-Muñoz, J.C., and J.A. Sobrino, 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108, D22, 4688, doi:10.1029/2003JD003480.

Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitrs, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., and Kaufman, Y., 2002. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, 83, 244–262.

Matson M. and J. Dozier, 1981, Identification of subresolution high temperature sources using the thermal IR, *Photogrammetric Engineer. and Remote Sens.*, 47, 1311–1318.

Kaufman, Y. J. and Remer, L. A., 1994. Detection of forests using Mid-IR reflectance: An application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3), 672–683.

Kaufman, Y. J., C. O. Justice, L. P. Flynn, J. D. Kendall, E. M. Prins, L. Giglio, D. E. Ward, W. P. Menzel, and A. W. Setzer, 1998. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24), 32215–32238.

Li, Z.-L. and F. Becker, 1993. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data. *Remote sensing of environment*, 43, 67–85.

Nelly, F., F. Petitcolin and M. P. Stoll, 1998. Bidirectional reflectivity in AVHRR channel 3: application to a region in northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 66: 298–316.

Oliva, P., and Schroeder, W., 2015. Assessment of VIIRS 375 m active fire detection product for direct burned area mapping. *Remote Sensing of Environment*, 160, 144–155.

Petitcolin, F., and Vermote, E., 2002. Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 112–134.

Prins, E. M., and W. P. Menzel, 1992: Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. *International Journal of Remote Sensing*, 13, 2783–2799.

Schroeder, W., P. Oliva, L. Giglio, I. A. Csiszar, 2014. The new VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote sensing of environment*, 143: 85–96.

Schroeder, W., Prins, E., Giglio, L., Csiszar, I., Schmidt, C., Morisette, J., and Morton, D., 2008. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 2711–2726.

Sobrino, J.A., J.C. Jiménez–Muñoz, G. Sòria, M. Romaguera, L. Guanter, J. Moreno, A. Plaza, and P. Martínez, 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46:316–327.

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(14): 2753–2774.

Tang H., and Li, Z.L., 2014. Quantitative remote sensing in thermal infrared: theory and applications. *Springer Science & Business Media*.

Valor, E., and V. Caselles, 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American areas. *Remote sensing of environment*, 57:167–184.

Van de Griend, A., and M. Owe, 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of remote sensing*, 14:1119–1131.

Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A., and Pilger, E., 2002. Automated volcanic eruption detection using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 82, 29–49.

Wright, R., Flynn, L., Garbeil, H., Harris, A.J.L., and Pilger, E., 2004. MODVOLC: near–real–time thermal monitoring of global volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 135, 29–49.

Zhukov, B., Lorenz, E., Oertel, D., Wooster, M., and Roberts, G., 2006. Spaceborne detection and characterization of fires during the bi–spectral infrared detection (BIRD) experimental small satellite mission (2001–2004). *Remote Sensing of Environment*, 100, 29–51.