

국문 ATBD

대기항공(6차년도)

2019. 10

VII. 이산화황 탐지 알고리즘

[약어 정리]

ABI - Advanced Baseline Imager
AHI - Advanced Himawari Imager
AMI - Advanced Meteorological Imager
ATBD - Algorithm Theoretical Basis Document
DBSCAN - Density-based spatial clustering of applications with noise
DU - Dobson Units
EOS - Earth Observing System
GES DISC - Goddard Earth Sciences Data and information Services Center
GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite
GK2A - Geo-KOMPSAT-2
GSFC - Goddard Space Flight Center
JMA - Japan Meteorological Agency
JPSS - Joining Polar Satellite System
LAADS - the Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOTRAN -
NWP - Numerical Weather Prediction
OMI - Ozone Monitoring Instrument
OMPS - Ozone Mapping Profiler Suite
RTTOV - Radiative Transfer for TOVS
SEVIRI - Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SNPP - Suomi National Polar-orbiting Partnership Spacecraft
SRF - Spectral Response Function
SO2D - SO₂ Detection Algorithm
TOA - Top of Atmosphere
UM - Unified Model

요 약

이 문서는 2018년에 런칭한 GEO-KOMPSAT 2A 위성에 탑재된 Advanced Meteorological Imager(AMI) 센서를 이용해 이산화황을 탐지하는 알고리즘(Sulphur dioxide detection, SO2D)을 설명한 것이다. AMI-SO2D를 구성하는 물리적 배경과 알고리즘 소개, 수행 시 주의해야 할 사항과 한계점을 기술하였다. AMI-SO2D의 최종 산출물은 각 화소별로 SO₂의 존재 유무(존재=1, 비존재=0)와 자료의 품질 정보를 포함하고 있다. 이 알고리즘은 적외선 영역인 AMI 채널 8, 10, 11, 14, 15를 사용한다. AMI-SO2D는 크게 이산화황의 존재 가능성이 있는 지역을 정의하는 BTD Object 부분과 군집 분석을 통해 각 집단 별로 이산화황의 존재 유무를 판별하는 Beta Object 부분으로 나눌 수 있다. AMI-SO2D의 검증은 SO₂에 민감하다고 알려져 있는 UV 센서를 가진 OMI, OMPS 위성의 이산화황 자료를 이용한다.

목 차

1. 개요	1
1.1. 목적	1
1.2. 사용자	1
1.3. 내용	1
1.4. 관련 문서	1
1.5. 수정 이력	1
2. 관측시스템 개요	2
2.1. 산출물	2
2.2. 센서특성	2
3. 알고리즘 소개	3
3.1. 개요	3
3.2. 처리 흐름	4
3.3. 입력자료	5
3.3.1 주요 센서 자료	5
3.3.2 보조 자료	5
3.3.3 복사 모형	6
3.4. 이론적 배경 및 수학적 설명	7
3.4.1. 물리학적 원리	7
3.4.2. 구름 복사량, 맑은 날의 대기 상층 복사량과 휘도 온도 정의	9
3.4.3. 개체 분석	9
3.4.4. 군집 분석	10
3.5. 알고리즘 구조	10
3.5.1. BTD Object	11
3.5.2. Beta Object	11
3.6. 알고리즘 산출물	12
3.7. 품질 정보	13
4. 시험자료 및 출력물	13
4.1. 모의/검증 자료	13
4.1.1. Himawari-8 AHI 자료	13
4.1.2. OMI 자료	14
4.1.3. OMPS 자료	15
4.2. 산출결과	16
4.2.1. 2017년 3월 5일	16
4.2.2. 2017년 6월 14일 캄차카 반도 화산 폭발	17
4.2.3. 2018년 1월 9일~10일 캄차카 반도 화산 폭발	18

4.3. 검증	19
5. 알고리즘 수행 시 고려 사항	21
5.1. 계산 수행 시	21
5.2. 보조 자료의 데이터 베이스화	21
5.3. 시간의 불일치	22
6. AMI-SO2D 수행 시 주의 사항 및 한계점	22
6.1. AMI-SO2D 수행 시 주의 사항	22
6.2. 한계점	23
7. 이전 버전과의 차이점	25

표 목 차

표 1 AMI-SO2D 산출물 특징	2
표 2 AMI 채널 특징과 AMI-SO2D가 사용하는 채널	3
표 3 군집 분석 후 산출된 그룹들을 판별하는 조건	12
표 4 GK2A AMI-SO2D의 품질 정보	13
표 5 이산화황 탐지 알고리즘에 사용되는 AHI와 AMI 채널 비교	14
표 6 AMI-SO2D 결과와 OMPS 관측값과의 검증	21

그 림 목 차

그림 1 AMI-SO2D 알고리즘 순서도	4
그림 2 파장별 대기 상층 복사량	7
그림 3 DBSCAN의 이론적 설명	10
그림 4 2017년 3월 5일 03UTC의 동아시아 부근의 가시광선 영상과 한반도 부근의 RGB 영상	14
그림 5 2017년 3월 5일 0400UTC 사례 분석	16
그림 6 2017년 6월 14일 2100UTC 사례 분석	17
그림 7 2018년 1월 10일 OMPS, AIRS, IASI에서 관측한 이산화황 자료	18
그림 8 2018년 1월 9일 2300UTC부터 10일 0400UTC까지 10분 간격으로 산출된 AMI-SO2D 결과	19
그림 9 2017년 3월 5일 0400UTC 검증 사례	20
그림 10 OMPS 격자별 검증 특성	21
그림 11 2017년 6월 14일 2100UTC 관측 결과	23
그림 12 지표면 온도 변화에 대한 AMI-SO2D 민감도 테스트	24
그림 13 대류권계면 기압 변화에 대한 AMI-SO2D 민감도 테스트	24

1. 개요

1.1. 목적

이 문서는 차세대 정지궤도 위성인 GK2A에 탑재된 AMI 센서를 이용하여 이산화황을 탐지하는 알고리즘에 대한 기본 원리를 기술한다. 이산화황 탐지 알고리즘은 각 화소 별로 이산화황 존재 유무를 산출한다.

1.2. 사용자

이 문서는 이산화황 탐지 알고리즘의 물리적 원리를 이해하거나 알고리즘의 결과물을 사용하는 사용자에게 매우 유용하다. 또한 알고리즘을 수정 또는 보완하는데 있어서 유용한 정보를 제공한다.

1.3. 내용

이 문서는 다음과 같이 구성되어 있다.

- 시스템 개요 : AMI 센서에 대한 기본 정보 및 알고리즘의 결과물을 기술
- 알고리즘 설명 : 알고리즘의 물리적 원리, 입력자료, 산출자료에 대한 설명
- 테스트 자료 및 결과물 : 알고리즘을 개발 테스트 하는데 사용한 자료에 대한 상세한 설명과 알고리즘의 산출 결과를 기술

1.4. 관련 문서

-

1.5. 수정 이력

- 2016.1.17. - 이산화황 탐지 알고리즘 ATBD (ver.0)
- 2017.1 - 이산화황 탐지 알고리즘 ATBD (ver.1)
- 2017.12 - 이산화황 탐지 알고리즘 ATBD (ver.2)

2. 관측시스템 개요

이산화황 탐지 알고리즘의 산출물과 이산화황 탐지 알고리즘을 적용하는 AMI 센서의 특징에 대해 기술한다.

2.1. 산출물

AMI-SO₂는 각 화소별로 SO₂ 존재 유무(예/아니오)를 탐지한다. SO₂는 순수 기체 상태에서는 탐지되기 어려우므로 이 자료에는 자연적·인위적으로 발생한 오염 물질인 SO₂를 탐지한다. 표 1은 AMI-SO₂D 산출물의 특징을 나타낸다.

표 1. AMI-SO₂D 산출물 특징

Name	User & Priority	Geographic Coverage	Vertical Res.	Horiz. Res.	Range	Accuracy	Coverage Time Option
SO ₂ Detection	GK2A	Full Disk	Total Column	pixel	yes(=1) /no(=0) from 8DU	70% Correct Detection	10min

2.2. 센서특성

표 2는 AMI-SO₂D를 사용하는 AMI 센서의 대략적인 개요이다. AMI-SO₂D는 적외선 파장으로 구성되어 있으며, SO₂ 흡수 파장대인 채널 10(7.3 μ m)과 11(8.7 μ m), SO₂에 민감하지는 않으나 수증기 존재에 민감한 채널 8(6.3 μ m), 채널 14(11.2 μ m)와 15(12.3 μ m)을 사용한다. 적외선 파장 영역을 사용하므로 낮과 밤 구분 없이 같은 알고리즘으로 산출한다.

표 2. AMI 채널 특징과 AMI-SO2D가 사용하는 채널

Bands		Band Name	Center Wavelength		Band Width (Max, μm)	Resolution (km)	Used in AMI-SO2
			Min (μm)	Max (μm)			
VNIR	1	VIS0.4	0.431	0.479	0.075	1	
	2	VIS0.5	0.5025	0.5175	0.0625	1	
	3	VIS0.6	0.625	0.66	0.125	0.5	
	4	VIS0.8	0.8495	0.8705	0.0875	1	
	5	NIR1.3	1.373	1.383	0.03	2	
	6	NIR1.6	1.601	1.619	0.075	2	
MWIR	7	IR3.8	3.74	3.96	0.5	2	
	8	IR6.3	6.061	6.425	1.038	2	✓
	9	IR6.9	6.89	7.01	0.5	2	
	10	IR7.3	7.258	7.433	0.688	2	✓
	11	IR8.7	8.44	8.76	0.5	2	✓
LWIR	12	IR9.6	9.543	9.717	0.475	2	
	13	IR10.5	10.25	10.61	0.875	2	
	14	IR11.2	11.08	11.32	1.0	2	✓
	15	IR12.3	12.15	12.45	1.25	2	✓
	16	IR13.3	13.21	13.39	0.75	2	

3. 알고리즘 소개

현재까지 개발된 알고리즘에 대한 설명과 입력 자료 및 보조 자료, 사용한 복사 모형을 포함한 알고리즘의 물리적 배경을 제공한다.

3.1. 개요

대기 오염 물질인 SO₂은 시정 거리 확보, 인체 건강 문제 등 생활에 직접적으로 영향을 미치며 기후 인자로써 기후학적 측면에서도 중요한 역할을 한다. 발생 원인으로는 화산 폭발 등 자연 현상에 의해 대기 중 유입이 되거나 산업 활동의 부산물, 화재 등의 연소에 의해 발생한다. 특히 아시아 지역은 SO₂ 발생이 많이 발생하는 지역이며 우리나라는 특히 겨울부터 봄철까지 중국에서 유입된다. 그러므로 정지궤도 위성을 이용한 지속적인 이산화황의 모니터링은 매우 중요하다. AMI-SO2D는 다음과 같은 자료를 생산한다.

- SO₂ 탐지 플래그 [예/아니오]
- 자료 질 플래그

3.2. 처리 흐름

그림 1은 AMI-SO₂D의 순서도 이다. 알고리즘은 격자 기반으로 이루어져 있으며 이산화황 존재 가능성이 있는 지역을 산출하는 과정(BTD Object)와 군집 분석을 통해 이산화황이 존재 유무를 판별(Beta Object), 마지막으로 산출된 자료의 신뢰성을 계산(Data quality control)하는 과정으로 나눌 수 있다. 각각의 과정들은 3.4와 3.5에 걸쳐 설명되어 있다.

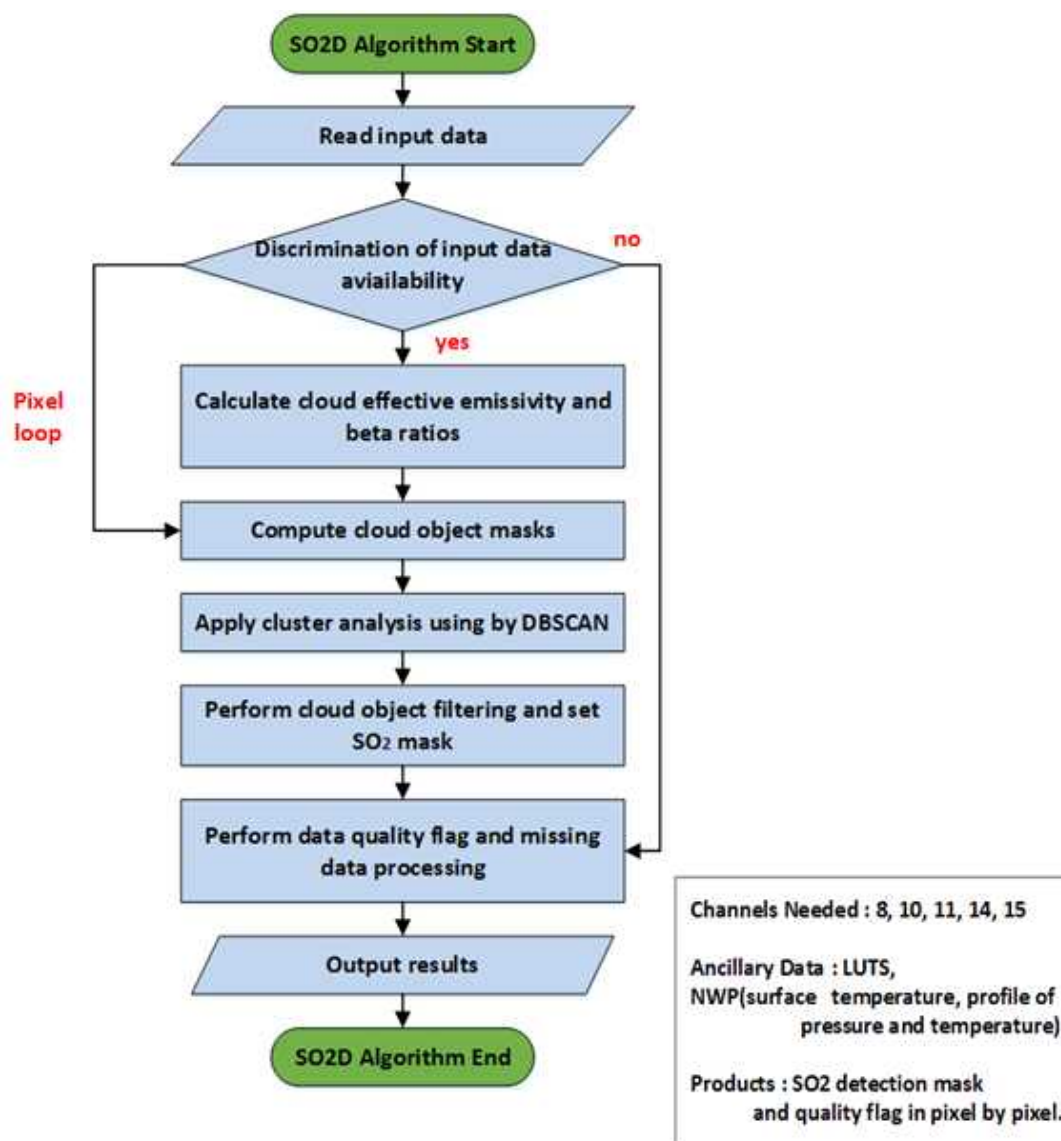


그림 1 AMI-SO₂D 알고리즘 순서도

3.3. 입력자료

이 장에서는 AMI-SO2D에 사용되는 입력 자료 및 입력된 자료를 처리하는 과정을 기술한다. 주요 관측 자료는 센서의 Level 1 자료를 사용하며, 보조 자료들은 AMI의 원시 자료의 격자에 맞게 재산출하는 것을 기본으로 한다.

3.3.1. 주요 센서 자료

AMI-SO2D를 적용할 기본 센서의 자료이다. 관측 자료인 각 채널의 복사량과 휘도 온도 및 보조 자료인 LUTS를 사용하기 위한 위성 천정각을 포함하고 있다. 사용하는 적외선 채널의 격자는 2km 간격이므로 총 5500×5500 의 크기를 가진다.

- AMI 채널 10($7.3\mu\text{m}$), 11($8.7\mu\text{m}$), 14($11.2\mu\text{m}$) 과 15($12.3\mu\text{m}$)의 복사량
- AMI 채널 8($6.3\mu\text{m}$), 10($7.3\mu\text{m}$), 11($8.7\mu\text{m}$), 14($11.2\mu\text{m}$)와 15($12.3\mu\text{m}$)의 휘도 온도
- AMI 센서 천정각
- AMI 채널 8, 10, 11, 14와 15에 대한 L1b 품질 정보

3.3.2. 보조 자료

AMI-SO2D를 수행 위해서는 다음과 같은 보조 자료들이 필요하다.

- 지표 온도와 대류권계면 기압 자료 (NWP)

구름의 특성을 정의할 수 있는 구름의 유효 방출율(cloud effective emissivity)과 베타 비율(β -ratios)을 계산하기 위해서 지표면 온도와 대류권계면 기압 자료가 필요하다. 이 자료는 우리나라의 NWP(Numerical Weather Prediction) 모델인 UM(Unified Model)으로부터 가져온다. 현재 UM 모델은 하루 4번(00, 06, 12, 18UTC) 수행되며 위성 산출물을 위해 1시간 간격으로 예보장을 생산한다. UM 모델은 지표면 온도 자료는 산출하고 있지만 대류권계면 기압 자료는 산출하고 있지 않으므로 대기 온도 프로파일 자료를 이용하여 대류권계면 기압 고도를 산출한다. 각 화소별로 기압과 온도 프로파일을 이용해 단열 감률이 $2^\circ\text{C}/\text{km}$ 이하로 떨어지는 최저 고도를 대류권계면으로 정의하고 그 고도의 기압 자료를 대류권계면 기압 자료로 정의한다(Reichler et al., 2003). GK2A의 AMI 위성의 수평 격자는 2km 간격인데 반해 NWP 모델의 자료는 $0.23 \times 0.15^\circ$ 간격이므로 NWP 자료를 내삽하여 GK2A와 같은 격자의 자료를 생산한다. 이 과정은 GK2A 위성의 대기/항공 분야 알고리즘 개발의 공통 모듈을 이용하였다.

3.3.3. 복사 모형

AMI-SO₂D 수행 시 격자별로 각 채널에 대한 복사 모형을 수행하는 것은 효율성이 떨어지므로 필요한 복사 모형의 결과를 LUTS로 구성해 놓았다. AMI-SO₂D에서 사용한 복사 모형은 GK2A의 알고리즘에 공통으로 사용하는 RTTOV이다. RTTOV는 가시광선 및 적외선, 자외선뿐만 아니라 마이크로웨이브 센서까지 다양한 센서의 복사량을 빠르게 계산한다는 장점이 있다(Saunders et al., 2013). 계산할 수 있는 채널의 범위는 0.4~50 μ m이며 에어로졸 및 구름의 특성을 포함하여 모의할 수 있는 포트란 90 코드이다. 이 복사 모형을 이용해 AMI-SO₂D를 수행하기 위한 LUTS를 구성하였다. LUTS는 각 채널의 SRF를 고려하여 구성되어 있으며 지표면 온도와 대류권계면 기압을 변수로 이용해 LUTS를 정의하고 있다. AMI-SO₂D에서 사용하는 LUTS는 다음과 같다.

- 채널 10, 11, 14, 15에 대한 구름 복사량

AMI-SO₂D를 구성하고 있는 구름의 유효 방출율을 계산하기 위해서는 구름이 존재할 때 대기 상층에서 관측되는 복사량이 필요하다(자세한 사항은 3.4.1 참고). 각 채널별 구름 복사량은 구름 방출율을 1로 가정하고 복사 모형을 이용해 이론적으로 계산한 후 LUTS를 만들었다. LUTS는 구름이 존재하는 고도의 기압과 위성 천정각의 함수로 구성되어 있다.

- 채널 10, 11, 14, 15에 대한 맑은 날 대기 상층 복사량

앞서 설명한 구름 복사량과 같이 구름의 유효 방출율을 계산하기 위해 맑은 날의 대기 상층 복사량이 필요하다(자세한 사항 3.4.1 참고). 대기 오염이 없는 맑은 날의 대기 상층 복사량을 계산하기 때문에 지표면 온도와 방출율이 주요 계산 인자가 된다. 지표면 방출율은 1로 가정하고 지표면 온도와 위성 천정각의 함수로 LUTS를 구성하였다.

- 채널 8, 10, 11, 14에 대한 맑은 날 휘도 온도

AMI-SO₂D를 구성하는 알고리즘 중에서 각 채널별 휘도 온도 차를 이용하여 SO₂를 탐지하는 BTD Object 부분이 있다. 각 채널들간의 BTD를 계산하기 위해서 대기오염이 없다고 가정한 맑은 날의 휘도 온도가 필요하다(자세한 사항은 3.5 참고). 지표면 방출율은 1로 가정하고 지표면 온도와 위성 천정각의 함수로 LUTS를 구성하였다.

3.4. 이론적 배경 및 수학적 설명

이 챕터의 내용은 Pavolonis (2010)의 물리적 개념을 기반으로 한다.

3.4.1. 물리학적 원리

그림 2는 SO₂가 존재하지 않을 때 파장별 대기 상층의 복사량(background)과 SO₂가 존재할 때 파장별 대기 상층의 복사량(SO₂ plume, SO₂ and ash plume)을 복사 모형인 MODTRAN RTM을 이용해 계산한 것이다(Corradini et al., 2009). 지표면 온도가 292K, 지표면 방출율을 0.99, 이산화황의 고도는 5km, 두께는 1km로 가정하고 모의하였다. 그림에서도 알 수 있듯이 순수 이산화황은 중적외선 파장(6.25–9.09 μ m)에서 흡수가 일어나며 그 외 파장에서는 흡수가 일어나지 않는다. 8.0 μ m~9.0 μ m 사이에서 강한 흡수가 일어나며 7.2 μ m~7.5 μ m 부근에서 약한 흡수가 일어난다. 그러므로 SO₂에 대해 흡수가 일어나는 파장과 흡수가 일어나지 않는 파장들의 간의 차이를 이용하여 SO₂ 탐지에 이용한다. 예를 들어 Prata 등 (2003)과 Prata와 Kermann (2007)은 6.2 μ m와 11 μ m, 7.4 μ m을 이용해, 복사 휘도와 휘도 차이를 산출하여 SO₂를 탐지하고자 하였다. Doutriaux-Boucher과 Dubuisson (2008)의 경험식 방법은 고농도의 SO₂를 산출하는데 매우 적합하다는 것을 보여준다. 또 다른 방법으로는 구름의 기상학적 특징을 이용해 SO₂를 정의하는 것으로 SO₂에 민감한 파장의 구름 유효 방출율과 SO₂에 민감하지 않는 파장의 구름 유효 방출율을 비교 분석하는 것으로 구름의 미세 물리적 특징을 확인 할 수 있다. AMI-SO2D에서는 각 파장별로 구름의 유효 방출율을 산출하고 나아가 파장들간의 β -비율을 산출하여 SO₂ 구름의 특성을 정의한다. 자세한 내용은 다음 장에서 다루도록 한다.

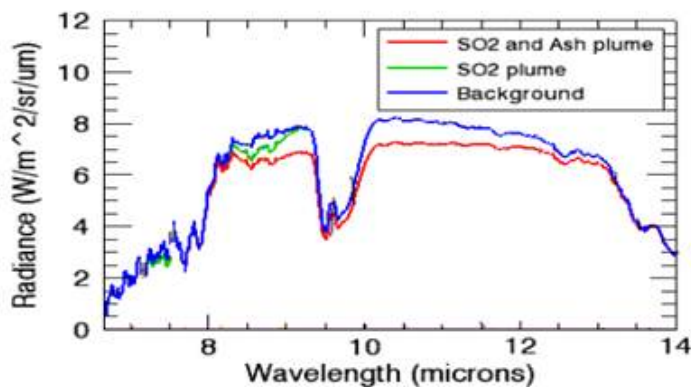


그림 2 파장별 대기 상층 복사량(Corradini et al., 2009).

구름이 있을 때 적외선 파장에서의 복사 전달식은 다음과 같다 (Heidinger and Pavolonis,, 2009; Pavolonis, 2010).

$$R_{obs}(\lambda) = \varepsilon(\lambda)R_{ac}(\lambda) + t_{ac}(\lambda)\varepsilon(\lambda)B(\lambda, T_{eff}) + R_{clr}(\lambda)(1 - \varepsilon(\lambda)) \quad \text{식 1}$$

식 1에서, λ 는 파장, R_{obs} 는 대기권 상층에서 관측된 복사량, R_{clr} 는 대기 오염이 없는 맑은 날 대류권 상층에서 관측되는 복사량을 의미한다. R_{ac} 와 t_{ac} 는 구름으로부터 대기 상층에 도달하는 복사량과 투과율을 나타낸다. B 는 플랑크 곡선, T_{eff} 는 유효한 구름 온도이다. 구름의 유효 방출율 (Cox, 1976)은 ε 로 나타낸다.

식 1을 이용해 구름 유효 방출율을 다음과 같이 풀어낼 수 있다.

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{R_{obs}(\lambda) - R_{clr}(\lambda)}{[B(\lambda, T_{eff})t_{ac}(\lambda) + R_{ac}(\lambda)] - R_{clr}(\lambda)} \quad \text{식 2}$$

이렇게 산출된 구름 유효 방출율은 하나의 파장이 아닌 다양한 파장의 구름 유효 방출율을 비교 분석하여 구름의 기상학적 특징을 정의할 수 있다. 식 3은 두 개의 파장의 구름 유효 방출율을 β -비율이라고 잘 알려진 유효한 흡수 광두께 비율로 계산한 것이다 (Inoue 1987; Parol et al., 1991; and Heidinger and Pavolonis, 2009). 주어진 파장에 대해서 ($\varepsilon(\lambda_1)$ and $\varepsilon(\lambda_2)$):

$$\beta_{obs} = \frac{\ln[1 - \varepsilon(\lambda_1)]}{\ln[1 - \varepsilon(\lambda_2)]} = \frac{\tau_{obs}(\lambda_1)}{\tau_{obs}(\lambda_2)} \quad \text{식 3}$$

$7.3\mu\text{m}$, $8.7\mu\text{m}$, $11.2\mu\text{m}$, and $12.3\mu\text{m}$ 의 관측 복사량, 대기 오염이 없는 맑은 날의 복사량과 투과율 계산, 그리고 온도 프로파일이 주어진다면 식 2와 3으로 β 를 계산한다. 윈도우 채널에 해당하는 $11.2\mu\text{m}$ 의 방출율을 기준으로 각각의 파장과 비교한다: $\beta(8.7/11.2\mu\text{m})$, $\beta(12.3/11.2\mu\text{m})$, $\beta(7.3/11.2\mu\text{m})$. Pavolonis (2010)에 의하면 윈도우 채널을 이용한다면 β -비율은 구름의 연직 고도에 대해 거의 변화하지 않으므로 구름의 유효 고도는 무시할 수 있다고 하였다. 그러나 β 비율을 계산 할 때에 구름의 고도 정보는 필요하므로 구름의 유효 고도를 대류권계면이라고 가정 한다. 대류권계면 자료는 NWP 자료로부터 제공 받는다. 식 4-10는 앞서 설명한 가정을 바탕으로 식 2와 3에 적용하여 AMI-SO₂D알고리즘에 사용되는 채널로 나타낸 것이다.

$$\varepsilon_{stropo}(7.3\mu\text{m}) = \frac{R_{obs}(7.3\mu\text{m}) - R_{clr}(7.3\mu\text{m})}{[B(7.3\mu\text{m}, T_{tropo})t_{tropo}(7.3\mu\text{m}) + R_{tropo}(7.3\mu\text{m})] - R_{clr}(7.3\mu\text{m})} \quad \text{식 4}$$

$$\epsilon_{stropo}(8.7\mu\text{m}) = \frac{R_{obs}(8.7\mu\text{m}) - R_{clr}(8.7\mu\text{m})}{[B(8.7\mu\text{m}, T_{tropo})t_{tropo}(8.7\mu\text{m}) + R_{tropo}(8.7\mu\text{m})] - R_{clr}(8.7\mu\text{m})} \quad \text{식 5}$$

$$\epsilon_{stropo}(11.2\mu\text{m}) = \frac{R_{obs}(11.2\mu\text{m}) - R_{clr}(11.2\mu\text{m})}{[B(11.2\mu\text{m}, T_{tropo})t_{tropo}(11.2\mu\text{m}) + R_{tropo}(11.2\mu\text{m})] - R_{clr}(11.2\mu\text{m})} \quad \text{식 6}$$

$$\epsilon_{stropo}(12.3\mu\text{m}) = \frac{R_{obs}(12.3\mu\text{m}) - R_{clr}(12.3\mu\text{m})}{[B(12.3\mu\text{m}, T_{tropo})t_{tropo}(12.3\mu\text{m}) + R_{tropo}(12.3\mu\text{m})] - R_{clr}(12.3\mu\text{m})} \quad \text{식 7}$$

$$\beta_{stropo}(8.7/11.2\mu\text{m}) = \frac{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(8.7\mu\text{m})]}{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(11.2\mu\text{m})]} = \frac{\tau_{stropo}(8.7\mu\text{m})}{\tau_{stropo}(11.2\mu\text{m})} \quad \text{식 8}$$

$$\beta_{stropo}(12.3/11.2\mu\text{m}) = \frac{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(12.3\mu\text{m})]}{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(11.2\mu\text{m})]} = \frac{\tau_{stropo}(12.3\mu\text{m})}{\tau_{stropo}(11.2\mu\text{m})} \quad \text{식 9}$$

$$\beta_{stropo}(7.3/11.2\mu\text{m}) = \frac{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(7.3\mu\text{m})]}{\ln[1 - \epsilon_{stropo}(11.2\mu\text{m})]} = \frac{\tau_{stropo}(7.3\mu\text{m})}{\tau_{stropo}(11.2\mu\text{m})} \quad \text{식 10}$$

이 방정식들에서, $\epsilon_{stropo}(\lambda)$ 는 대류권계면을 고려해 계산한 파장별 구름 유효 방출율, $\epsilon_{stropo}(\lambda_1/\lambda_2)$ 는 구름 유효 방출율로부터 계산된 β 를 표현한다. T_{tropo} 는 대류권계면의 온도, $R_{tropo}(\lambda)$ 와 $t_{tropo}(\lambda)$ 는 대류권계면에서 대기 상층에 도달하는 맑은 날의 복사량과 투과율을 의미한다.

3.4.2. 구름 복사량, 맑은 날의 대기 상층 복사량과 휘도 온도 정의

AMI-SO2D에서 사용하는 구름 유효 방출율과 β -비율을 계산하기 위해서는 구름 복사량(R_{dd}), 맑은 날의 대기 상층 복사량(R_{clr})과 맑은 날의 휘도 온도(BT_{dd})는 복사 모형을 이용해 이론적으로 계산한다. GK2A에서 사용하는 복사 모형은 RTTOV를 이용해 계산하며 각각의 변수들은 구름의 유효 고도, 지표 온도, 위성 천정각에 의해 복사 모형의 계산 결과가 변화한다.

3.4.3. 개체 분석

AMI-SO2D는 개체 분석에 기반을 둔다. 개체는 물리적 특징으로 인해 비슷한 특성을 보이는 격자들의 모임으로 정의된다. Wielick 와 Welch (1986)이 처음으로 소규모적인 구름의 특성을 연구하기 위해 구름 개체 분석을 위성 자료에 사용하였다. AMI-SO2D에서 개체 분석은 이산화황이라는 특별한 정보를 포함하고 있는 격자들의 모임을 나타낸 것이며 이산화황이 존재할 가능성이 있는 지역으로 정의할 수 있다. 구름 개체 분석의 구체적인 방법은 3.5에서 설명한다.

3.4.4. 군집 분석

개체 분석을 한 후 이산화황이 존재할 가능성이 있는 지역을 분석하여 이산화황인지 아닌지를 판별하는 과정이 필요하다. 이 과정에서 많은 자료 안에서 비슷한 개체 집합을 그룹화 하는 작업이 필요하며 이것을 군집 분석이라고 한다. 이는 기계학습, 패턴 인식, 이미지 분석, 정보 검색, 데이터 압축 및 컴퓨터 그래픽을 비롯한 많은 분야에서 사용되는 데이터 분석에서 사용되는 주요 작업이며 통계 분석을 위한 일반적인 기술이다(Wikipedia). 군집 분석에는 여러 가지 방법이 있는데 여기에서는 DBSCAN을 이용한다. DBSCAN은 밀도를 기반으로 하는 군집 분석으로 Ester 등(1996)이 제안하였다. 일부 공간에 점들의 집합이 주어지면 밀집한 점을 그룹화 하여 분리하며 희소 영역의 개체는 노이즈로 제거할 수 있다는 장점이 있다. 그림 3는 DBSCAN을 가장 잘 보여주는 그림이다. 그림 3에서 격자 주변의 반경 안에 들어가는 최소 지점은 4개라고 가정하였다. 점 A와 다른 빨간색을 가진 점들은 정해진 반경 안에서 본인을 포함하여 4개의 점을 가지고 있기 때문에 같은 군집에 포함 된다. B와 C는 중심점은 아니지만 군집으로 묶여진 다른 점들의 반경 안에 포함되어 있으므로 군집에 포함 시킨다. N은 군집에 속할 수 없으므로 노이즈로 정의된다. DBSCAN은 가장 일반적인 군집 분석 방법 중의 하나이며 과학 문헌에서 가장 많이 인용되고 있다. AMI-SO₂D에서 사용한 군집 분석의 구체적인 방법은 3.5에서 설명한다.

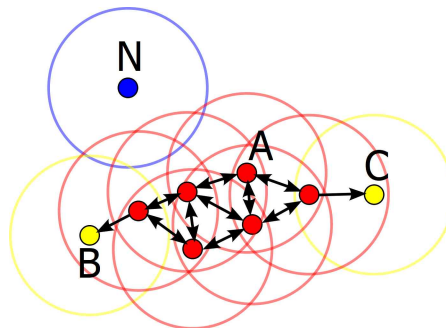


그림 3 DBSCAN의 이론적 설명

3.5. 알고리즘 구조

3.4에서는 AMI-SO₂D를 구성하는 물리적인 원리를 설명하였다면 3.5에서는 AMI-SO₂D의 구조를 설명한다. AMI-SO₂D는 이산화황 존재 가능성이 있는 지역을 산출하는 과정(BTD Object)와 군집 분석을 통해 이산화황이 존재 유무를 판별하는 과정(Beta Object)으로 나눌 수 있다.

3.5.1. BTD Object

BTD Object는 SO₂ 흡수가 잘 일어나는 파장에서의 휘도 온도와 SO₂ 흡수가 잘 일어나지 않는 파장의 휘도 온도 차이를 이용하여 이산화황이 존재할 가능성이 있는 지역을 산출한다. BTD Object 는 총 4개의 조건으로 만들어져 있고 다음과 같다.

조건 1. $\epsilon_{stropo}(7.3\mu m) > 0$ 이고 $\epsilon_{stropo}(8.6\mu m) > 0$

조건 2. $BTD(8.7-11.2\mu m) \leq -3.0$

조건 3. $BTD(7.3-6.3\mu m) \leq BTD^e(7.3-6.3\mu m) - 2.0$

조건 4. $BTD(8.7-11.2\mu m) \leq BTD^e(8.7-11.2\mu m) - 0.5$

BTD 개체는 이 네 가지 조건을 모두 만족할 때 성립된다.

여기서,

$BTD(8.7-11.2\mu m)$: 관측된 8.7 μm -11.2 μm 휘도 온도 차

$BTD^e(8.7-11.2\mu m)$: 대기 오염이 없는 맑은 날 계산된 8.7 μm -11.2 μm 휘도 온도 차

$BTD(7.3-6.3\mu m)$: 관측된 7.3 μm -6.3 μm 휘도 온도 차

$BTD^e(7.3-6.3\mu m)$: 대기 오염이 없는 맑은 날 계산된 7.3 μm -6.3 μm 휘도 온도 차

를 의미한다. 대기 오염이 없는 맑은 날의 휘도 온도는 복사 모형을 이용해 각 화소별로 계산하며 구름 흡수율과 β -ratio 와 마찬가지로 LUTS을 이용한다. 각각의 문턱값은 이산화황이 탐지된 사례일을 중심으로 AHI 관측자료를 이용해 설정하였다.

3.5.2. Beta Object

BTD 개체 분석 후 산출된 자료를 군집 분석을 통해 군집을 형성한 후 그 군집 별로 이산화황 존재 유무를 판별하는 구간이다. AMI-SO2D에서 사용하는 군집 분석은 격자들간의 반경이 1°, 반경에 들어가는 최소 지점들이 50개로 가정하였다. 이러한 조건은 BTD Object와 같이 이산화황이 탐지된 사례일을 중심으로 테스트를 실시하였을 때 이산화황을 가장 잘 표현하는 조건을 선정한 것이다. 군집 분석을 통해 구름 개체 분석의 자료가 그룹화하면 각각의 그룹들의 특징을 분석하여 이산화황의 존재 유무를 판별하는 필터 작업을 수행한다. 필터 작업의 조건은 표 1과 같다. $\epsilon(7.3\mu m)_{p10}$ 은 7.3 μm 파장의 구름 유효 방출율의 10%, $\epsilon(8.6\mu m)_{p80}$ 은 8.6 μm 파장의 구름 유효 방출율의 80%, $\beta(8.6/11\mu m)_{p80}$ 은 산출된 $\beta(8.6/11\mu m)$ 의 값들의 80%, $\beta(7.3/11\mu m)_{min}$ 은 $\beta(7.3/11\mu m)$ 값의 최소값, $BTD(8.6/11\mu m)_{p80}$ 은 $BTD(8.6/11\mu m)$ 값의 80%를 의미한다. 표 3의 조건들은 모의 자료

인 AHI 자료를 기반으로 고농도 이산화황이 존재하는 사례를 분석하여 설정하였다.

표 3. 군집 분석 후 산출된 그룹들을 판별하는 조건

TEST Number	Test Logic
1	$\epsilon(7.3\mu\text{m})_{p20} \geq 0.3$
2	$\epsilon(8.6\mu\text{m})_{p20} \geq 0.3$
3	$\beta(8.6/11\mu\text{m})_{p40} \geq 1.5$
4	$(\beta(7.3/11\mu\text{m})_{\min} > 0.5 \text{ 이고 } BTD(8.6/11\mu\text{m})_{p70} \geq -3.5)$ 또는 $(BTD(8.6/11\mu\text{m})_{p60} \leq -5.0)$

3.6. 알고리즘 산출물

이러한 작업을 거쳐 다음과 같은 결과가 산출된다.

- 이산화황 탐지 플래그 [예/아니오]
- 자료 질 플래그

3.7. 품질 정보

AMI-SO2D는 품질 정보도 함께 생산한다. 표 4는 품질 정보를 설명한 것이다.

표 4. GK2A AMI-SO2D의 품질 정보

산출 변수		속성	
변수 명	타입	이름	값
so2d_quality_flag	byte	long name	GK2A Sulfur Dioxide Quality Flag
		short name	SO2D_Flag
		_FillValue	-999
		units	none
		valid range	1-5 1 : satellite input data missing 2 : NWP input data missing 3 : calculated factor missing 4 : BTM object pixel 5 : cluster analysis pixel

4. 시험자료 및 출력물

4.1. 모의/검증 자료

4.1.1. Himawari-8 AHI 자료

AMI의 관측 자료가 입수되기 전에는 AMI와 가장 비슷한 특성을 가진 Himawari AHI 센서 자료를 이용하여 알고리즘을 구성하였다. AHI는 10분 간격으로 0.5km~2km의 해상도를 가진 16개의 채널을 제공한다. 총 5개의 지역을 나누어 관측하며 전지구 영역, 일본 근처, 목표 영역, 육지 목표 영역으로 구분되어 있다. AHI는 AMI와 매우 비슷한 채널 영역을 가지고 있으며 동아시아를 중심으로 관측하고 있으므로 AMI-SO2D를 개발하기 위한 매우 좋은 자료이다. 표 5은 이산화황 탐지 알고리즘에 사용되는 AHI와 AMI 채널 비교이다. AHI 자료는 일본 JMA에서 관리하고 있다. 그림 4는 2017년 3월 5일 03UTC 동아시아 부근의 가시광선 영상(왼쪽)과 한반도 부근의 RGB 영상(오른쪽)을 나타낸 것이다.

표 5. 이산화황 탐지 알고리즘에 사용되는 AHI와 AMI 채널 비교

AHI			AMI		
Band Number	Central Wavelength(μm)	Spatial resolution at SSP(km)	Band Number	Central Wavelength(μm)	Spatial resolution at SSP(km)
8	6.243	2	8	6.241	2
10	7.347	2	10	7.344	2
11	8.592	2	11	8.592	2
14	11.240	2	14	11.212	2
15	12.381	2	15	12.364	2

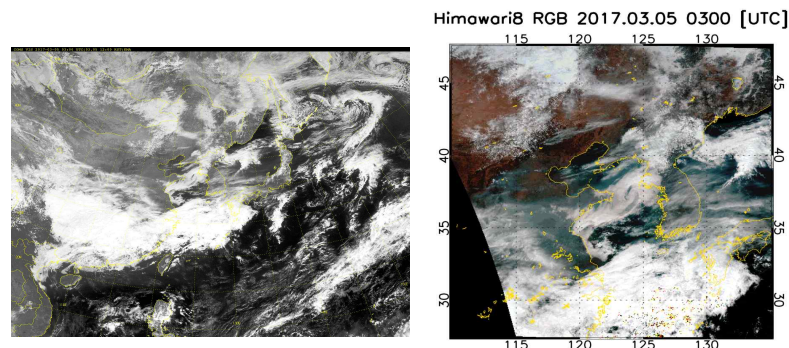


그림 4 2017년 3월 5일 03UTC의 동아시아 부근의 가시광선 영상(왼쪽)과 한반도 부근의 RGB 영상(오른쪽)

4.1.2. OMI 자료

UV는 비록 낮은 농도의 대류권 오존과 SO_2 에 가시광선이나 자외선보다 민감하게 반응한다는 장점이 있다. UV 센서를 가진 대표적인 위성으로 OMI가 있다. OMI는 2004년 EOS Aura 극궤도 위성 탑재되어 전 지구를 모니터링 하고 있다. AMI- SO_2 D의 산출물을 검증하기 위해 OMI 자료를 이용하였다. 운영 시간이 오래 되어 자료의 질이 조금 떨어진다는 단점이 있지만 현재 전지구를 관측하는 UV 센서를 가진 위성이라는 장점은 무시할 수 없다. OMI의 SO_2 자료도 농도(DU)로 산출되고 있으므로 SO_2 탐지 자료로 전환하여 사용한다(6DU 이상일 때 이산화황이 존재한다고 가정). OMI에서는 여러 버전의 이산화황 농도 자료를 생산하고 있으나 본 알고리즘에서는 격자 간격이 $13 \times 24 \text{ km}$ 인 OMSO2 (OMI/Aura Sulphur Dioxide Total Column 1-orbit L2 Swath v3) 자료를 검증에 이용하였으며 이 자료들은 GES DISC에서 제공하고 있다(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)

4.1.3. OMPS 자료

GK2A 이산화황 탐지 산출물을 검증하기 위해 OMI 뿐만 아니라 OMPS의 Level 2 자료도 함께 사용한다. OMPS는 NOAA의 the Joint Polar Satellite System (JPSS)의 일부분으로 지구를 모니터링하는 극궤도 위성이다. 2011년 10월에 JPSS의 첫 번째 프로그램인 SNPP에 탑재되어 런칭하였다. OMI와 같이 UV 파장(300–380nm)을 가지고 있으며 오존과 오존 프로파일 뿐만 아니라 이산화황, 질소 등 미량 기체들도 산출한다. OMPS도 OMI와 같이 이산화황을 농도(DU)로 산출되고 있으므로 이산화황 탐지 자료로 전환하여 사용한다(6DU 이상일 때 이산화황이 존재한다고 가정). OMPS 자료는 날씨 예보, 기후 모델, 지구 환경 모니터링 등 다양한 곳에서 사용하고 있다. NASA/GFSC에서는 OMPS 이산화황의 일일자료와 한달 평균 자료를 비롯해 여러 가지 버전의 자료를 제공하고 있으나 본 알고리즘에서는 OMI와 같이 궤적(obit)에 따른 이산화황 관측 자료를 이용하였다(<https://avdc.gsfc.nasa.gov/>).

OMI 자료는 운영 시간이 오래 되어 자료의 질이 조금 떨어진다는 단점이 있지만 현재 전지구를 관측하는 UV 센서를 가진 위성이라는 장점은 무시할 수 없다. OMPS는 OMI보다 최근에 운영되었으나 격자 간격이 50km×50km로 공간 분해능이 떨어진다는 단점이 있다. 각각의 위성들의 장·단점이 존재하므로 OMI, OMPS를 모두 검증에 사용하였다.

4.2. 산출결과

4.2.1. 2017년 3월 5일

우리나라 서해안 지역에서 이산화황이 탐지된 사례로 중국에서부터 오염물질의 유입으로 한반도 부근에 고농도의 이산화황이 존재한다. 겨울철부터 봄철까지 중국에서부터 한반도에 고농도 이산화황이 유입되는 사례가 빈번히 관측되며 화산 폭발로 인한 이산화황과는 달리 넓은 지역에 걸쳐 나타나는 것이 특징이다. 그림 6의 위쪽 왼편에서부터 OMI 이산화황 농도, AMI-SO2D 알고리즘에서 BTD Object의 결과, 아래쪽 왼편에서부터 Himawari RGB 영상, AMI-SO2D 결과이다. BTD Object 결과 이산화황 존재 가능성이 있는 지역들이 동아시아 전반에 걸쳐 산발적으로 나타나고 있다. 이 결과를 군집 분석과 Beta Object를 수행한 결과 이산화황 시그널만 남고 다른 시그널들은 다 제거된 것을 알 수 있다(그림 6 AMI-SO2D 결과). AMI-SO2D 최종 산출물은 OMI 이산화황 농도 자료와 매우 유사하다.

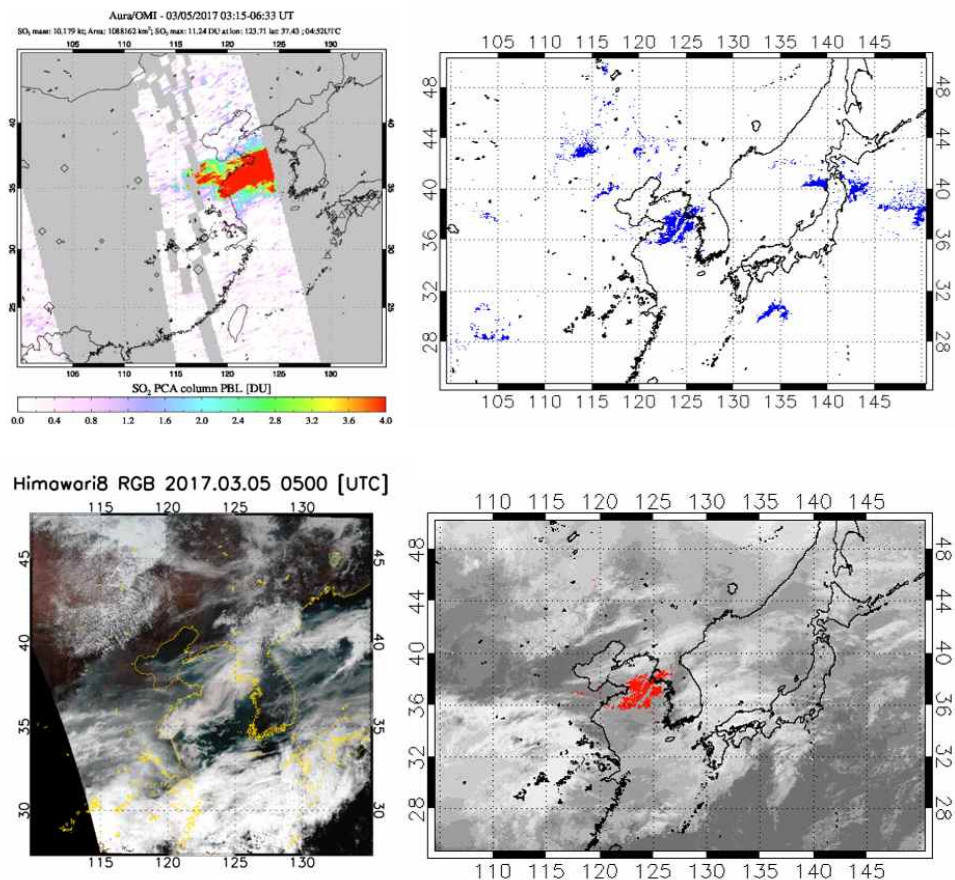


그림 5 2017년 3월 5일 0400UTC 사례 분석. 위쪽 왼편부터 시계방향으로 OMI 이산화황 농도, BTD Object 결과, AMI-SO2D 결과, Himawari RGB

4.2.2. 2017년 6월 14일 캄차카 반도 화산 폭발

2017년 6월 14일 21UTC 캄차카 반도에서 화산 폭발로 인해 이산화황이 분출되었을 때 AMI-SO2D를 수행한 결과이다(그림 6). 그림 6의 위쪽 왼쪽은 IASI의 이산화황 휘도 온도 지수, 오른쪽은 AMI-SO2D 결과, 아래쪽 왼쪽은 Himawari RGB 영상, 오른쪽은 BTD Object 결과이다. RGB 영상의 ▲이 화산이 분출한 지역이며 그 주위로 화산 분출에 의해 주변 구름의 모습이 변화된 것을 알 수 있다. IASI 자료를 살펴보면 화산 폭발이 있었던 캄차카 주변에 이산화황 농도가 높게 나타날 뿐 다른 지역에서는 고농도의 이산화황은 나타나지 않는다. 휘도 온도 개체 분석의 결과는 캄차카 지역뿐만 아니라 다른 지역에서도 이산화황이 존재하는 것처럼 보이나 군집 분석 및 필터링 작업을 거친 후 이 부분 들은 대부분 제거되어 캄차카 부분의 시그널만 남은 것을 알 수 있다. 캄차카 지역에서의 이산화황 시그널뿐만 아니라 해양 지역에서 노이즈 시그널 또한 나타나고 있다. 현재 이산화황 탐지 알고리즘에서 노이즈 시그널은 구름의 가장 자리에서 주로 나타나고 있으며 향후 알고리즘의 정확도를 높이기 위해 제거해 나갈 예정이다.

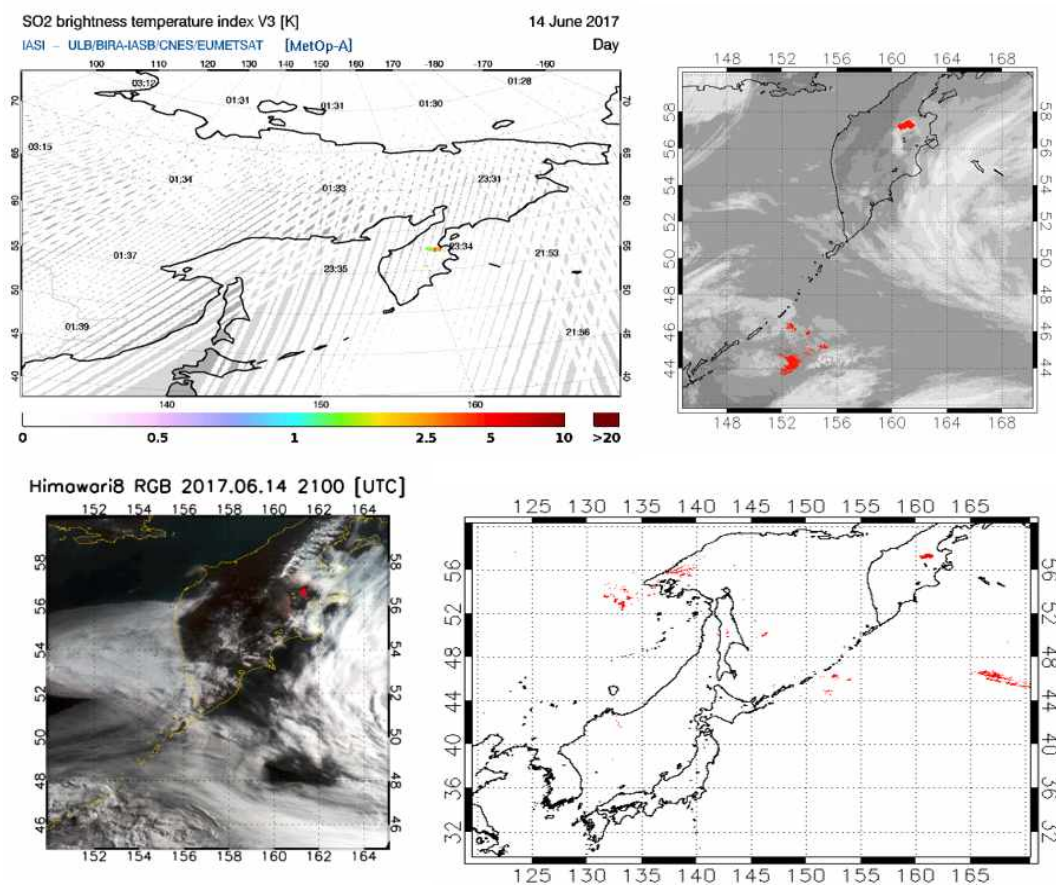


그림 6 2017년 6월 14일 2100UTC 사례 분석. 위쪽 왼쪽부터 시계방향으로 IASI 이산화황 휘도 온도 지수, AMI-SO2D 결과, BTD Object 결과, Himawari RGB

4.2.3. 2018년 1월 9일~10일 캄차카 반도 화산 폭발

2018년 1월 9일 2310UTC와 10일 0115UTC 약 2차례에 걸쳐 큰 화산 폭발이 캄차카 반도에서 발생하였다. 화산 구름의 고도는 약 8km~11km까지 관측 되었고 화산재는 약 10km~15km정도 이동하였으며 화산 폭발로 인해 생성된 구름은 약 230km까지 이동하였다고 한다. **그림 7**는 다른 위성에서 사례일을 관측한 결과로 각각 OMPS와 AIRS, IASI에서 관측한 이산화황 자료이다. OMPS 에서는 이산화황이 관측되지 않았으나 AIRS, IASI 에서는 캄차카 반도 근처 해양 지역에서 이산화황이 관측되고 있다. OMPS, AIRS, IASI 위성은 이산화황 측정에 매우 효율적이거나 극궤도 위성의 단점으로 시간 분해능이 좋지 않다. 반대로 본 알고리즘은 시간 분해능이 좋은 정지궤도 위성에 적용하여 화산 폭발 후 이산화황의 변화를 살펴볼 수 있다는 장점이 있다. **그림 8**은 2018년 1월 9일 2300UTC 부터 10일 0450UTC 까지 10분 간격으로 산출된 이산화황 탐지 알고리즘 결과이다(위성 자료가 없는 시간은 제외). 이산화황 시그널은 화산 폭발 후 약 1시간 후인 10일 0000UTC부터 관측이 되었다. 이렇게 관측된 이산화황 시그널은 0030UTC 이후로 사라지지만 2차 화산 폭발 후 0140UTC에 다시 나타나 0440UTC 까지 유지된다. 이산화황 시그널은 **그림 7**의 AIRS, IASI 의 이산화황 자료의 패턴과 매우 유사한 모습을 보인다. 현재 경험에 의하면 이산화황 탐지 알고리즘은 이산화황의 농도가 낮을 때는 시그널을 탐지하지 못한다(GOES-R ABI 알고리즘의 경우 이산화황 농도가 10DU 이상일 때 이산화황 시그널을 탐지함). 그러므로 화산 폭발 후 이산화황 시그널이 관측될 때까지 시간적인 오차가 존재하는 것으로 사료된다.

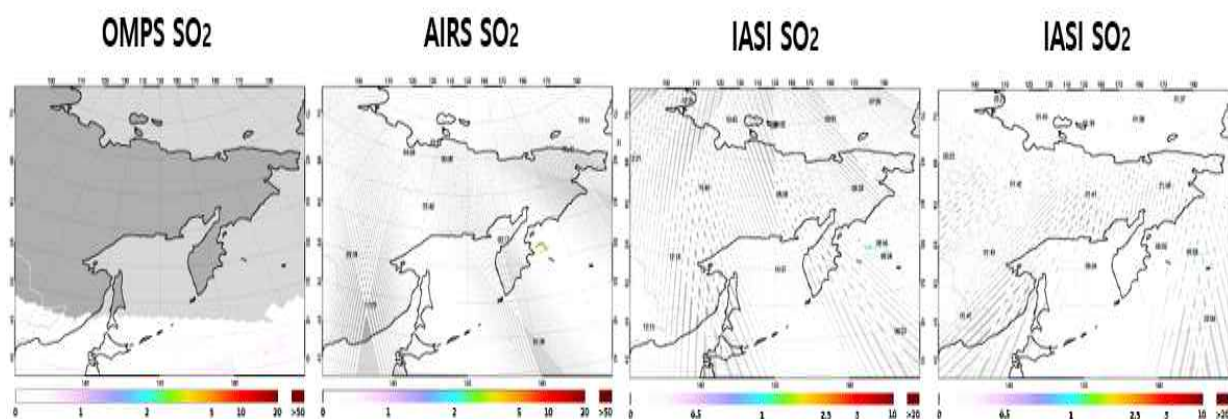


그림 7 2018년 1월 10일 OMPS, AIRS, IASI에서 관측한 이산화황 자료

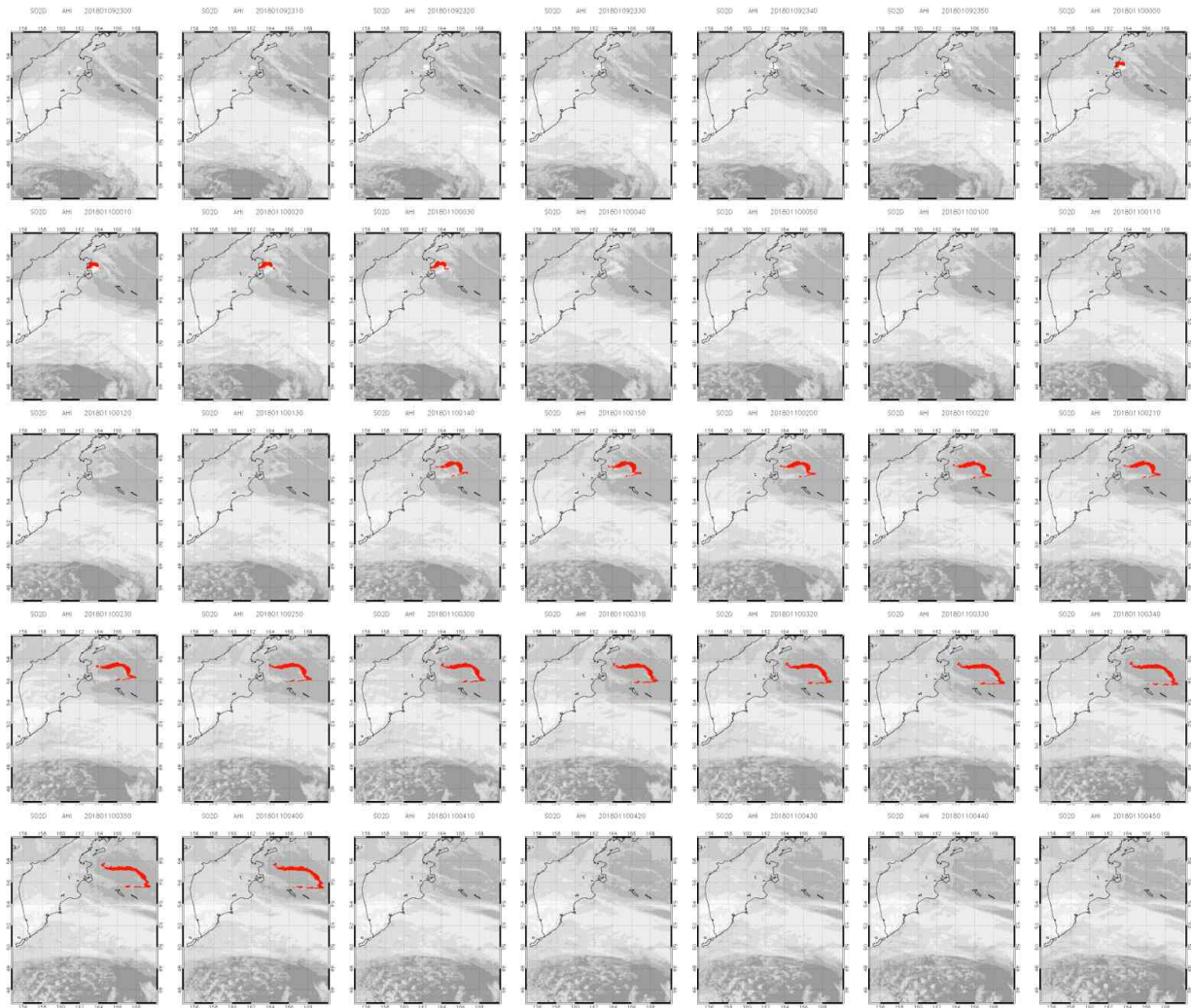


그림 8 2018년 1월 9일 2300UTC부터 10일 0440UTC까지 10분 간격으로 산출된 AMI-SO2D 결과

4.3. 검증

AMI-SO2D 결과를 OMPS 자료와 검증해 보았다. 검증에 사용한 날짜는 그림 5의 2017년 3월 5일 0400UTC로 대륙에서부터 이산화황이 유입되어 우리나라 서해안 부근에 이산화황이 탐지된 사례이다. 그림 9의 위의 왼쪽은 OMPS SO2 농도, 오른쪽은 검증에 사용한 OMPS 이산화황 탐지 자료, 아래의 오른쪽은 HIMAWARI RGB, 왼쪽은 AMI-SO2D의 결과이다. OMPS에서는 이산화황 농도 자료를 산출하고 있으므로 7DU 이상인 지역을 이산화황이 존재하는 1로 7DU 이하인 지역을 0으로 전환하여 재산출하여 검증에 사용하였다(그림 9의 OMPS 이산화황 탐지 자료).

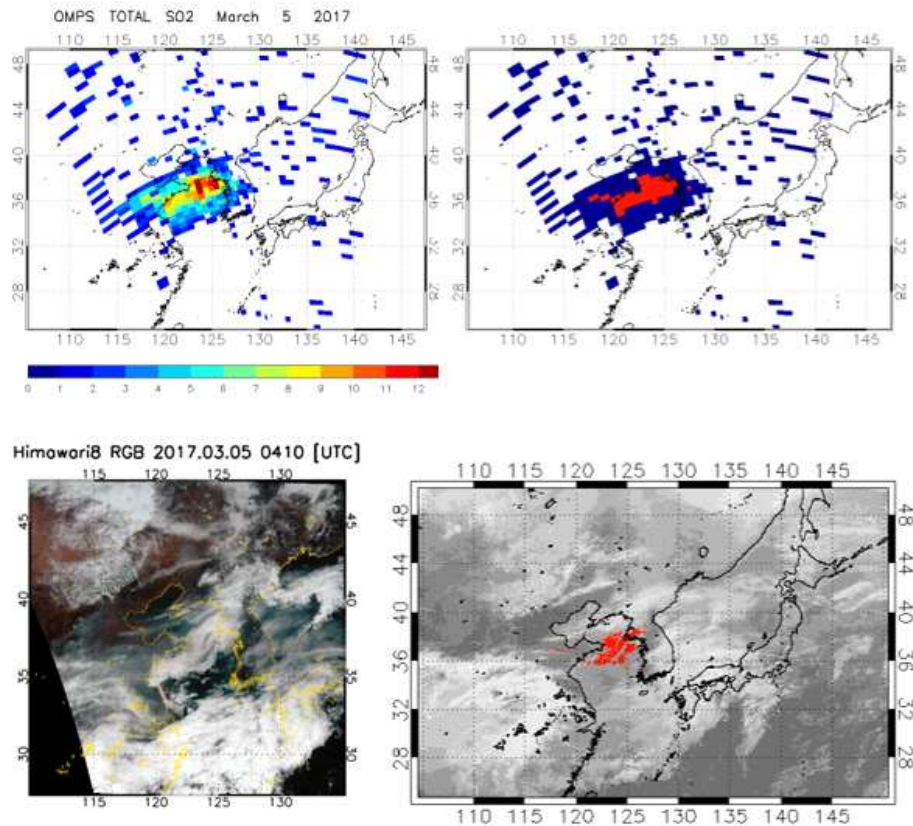


그림 9 2017년 3월 5일 0400UTC 검증사례. 위쪽 왼쪽부터 시계 방향으로 OMPS에서 관측한 이산화황 농도, 검증에 사용한 OMPS 이산화황 탐지 자료, AMI-SO2D의 결과, HIMAWARI RGB 영상

검증 지수는 표 5를 기준으로 계산하였으며 OMPS 자료와 검증하였을 때 정확도 (Percent Correct)는 약 0.9, 이산화황이 존재하는 격자만 검증한 POD는 약 0.5, FAR는 약 0.17 이다. 표 6의 ()의 숫자가 관측된 화소의 개수들이다. 그림 10는 OMPS 격자별 검증 특성을 나타낸 것으로 오차(Miss와 False Alarm)가 많이 발생하는 지역은 이산화황이 존재하는 것으로 추정된 지역의 가장자리 부근이며 이산화황의 존재 지역의 중심 부근은 HIT 지역으로 잘 탐지하고 있다. 오차가 나타나는 지역의 이산화황의 농도를 평균해 보면 약 7.2DU 정도로 OMPS 이산화황 농도를 이산화황 존재 유무로 전환한 기준이 되는 6DU와 크게 다르지 않으므로 위성 자료간의 공간 분해능이 불일치함으로 생기는 오차로 사료된다. 표 6에서 알 수 있듯이 이산화황이 존재하는 화소보다 존재하지 않는 화소가 약 6배 정도 많다. 이산화황이 존재하는 검증 자료 수의 부족과 위성 자료간의 사-공간 분해능의 불일치로 인해 POD의 지수가 낮게 나타나는 것으로 사료된다.

표 6 AMI-SO2D 결과와 OMPS 관측값과의 검증

		OMPS 관측값		
		Yes	No	
AMI SO2D	Yes	Hit (19)	False Alarm (4)	23
	No	Miss (19)	Negative Correct (190)	209

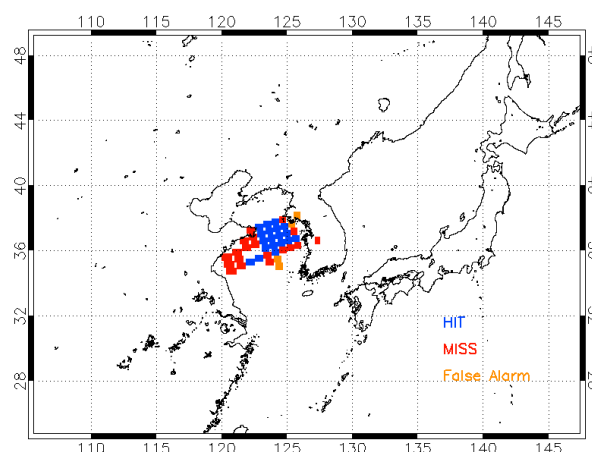


그림 10 OMPS 격자별 검증 특성

5. 알고리즘 수행 시 고려 사항

5.1. 계산 수행 시

각 채널별 구름 유효 방출율(ϵ)을 유효 광학 두께(β)로 전환하기 전에 구름 유효 방출율은 0에서 1.0의 값을 가지도록 설정한다. 광학 두께 또한 0 이상의 값을 가지도록 설정한다. 각 채널별로 계산된 구름의 유효 방출율과 β -비율의 값들에서 신뢰할 수 없는 구간의 자료가 나온다면 그 화소에서는 알고리즘 수행을 멈추고 missing 처리를 한 다음 품질 관리 부분에서 input data missing 으로 표기한다. 또한 위성의 위치 정보를 포함한 입력 자료에서도 신뢰할 수 없는 범위의 자료가 입수 되면 그 화소는 missing 처리를 한 다음 품질 관리 부분에서 input data missing 으로 표기한다.

5.2. 보조 자료의 데이터 베이스화

AMI-SO2D를 수행하기 위해 필요한 구름 유효 방출율과 유효 광학 두께를 계산하고, 휘도 온도 차를 계산하기 위해서는 복사 모형의 결과가 필요하다. 알고리즘을 수행할

때 마다 각 채널별, 화소별로 복사 모형을 수행할 수는 없기 때문에 AMI-SO2D가 현업에서 운영되기 전에 미리 계산되어진 LUTS를 만들어 데이터 베이스화하여 사용한다.

5.3. 시간의 불일치

현재 AMI 위성의 관측 주기와 NWP 모델의 산출 주기가 일치하지 않는다. AMI-SO2D는 10분 간격으로 자료를 산출하나 NWP 모델은 1시간 간격의 예보장을 산출하므로 AMI-SO2D에서는 한 시간 동안 같은 NWP 모델의 자료를 사용한다.

검증 부분 또한 같은 문제를 가지고 있다. 검증 자료로 사용하는 OMI와 OMPS의 자료와 AMI-SO2D의 산출물이 시·공간적으로 완벽하게 일치 할 수는 없다. 그러므로 검증 시 위성간의 시·공간 오차가 포함 되어 있음을 고려한다.

6. AMI-SO2D 수행 시 주의사항 및 한계점

AMI-SO2D를 수행할 때 필요한 가정과 현재 버전의 한계점을 설명한다.

6.1. AMI-SO2D 수행 시 주의사항

AMI-SO2D가 수행되기 위해서는 다음과 같은 가정과 준비가 필요하다.

1. NWP 모델은 6시간 간격으로 수행되는 UM 예보 모델을 이용한다(00UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC 기준으로 UM 예보 모델 수행). 위성 자료 산출을 위해 1시간 간격으로 예보장을 생성한다.

2. NWP 모델인 UM에서는 대류권계면 기압 자료를 산출하고 있지 않으므로 각 격자별로 기압과 온도 프로파일을 이용해 단열 감률이 $2^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 이하로 떨어지는 최저 고도를 대류권계면으로 정의하고 그 고도의 기압 자료를 대류권계면 기압 자료로 정의한다 (Reichler et al., 2003).

3. NWP 모델은 UM의 격자 간격은 $0.23^{\circ} \times 0.17^{\circ}$ 로 AMI 센서의 2km 간격보다 매우 넓다. 그러므로 AMI 센서와 UM의 공간 분포가 일치하는 재분석장을 만드는 과정이 필요하다. NWP 모델의 재분석장은 GK2A 알고리즘에서 공통적으로 사용하는 모듈에 따라 산출한다.

4. 복사 모형을 수행할 때 대기 상층의 복사량과 휘도 온도에 영향을 미치는 지표 방출율은 1로, 구름 상층 복사량에 영향을 미치는 구름 방출율도 1로 가정하여 수행하였다.

2번과 3번은 각 채널별 구름의 유효 방출율을 계산하기 전에 완료하여야 한다.

6.2. 한계점

이산화황 탐지 알고리즘은 NWP의 지표면 온도와 대류권계면 기압을 보조 입력 자료로 사용한다. NWP 모델의 지표면 온도의 경우 $\pm 5K$ 정도의 오차를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 이 자료들에 대한 이산화황 탐지 알고리즘의 민감도를 분석하고자 하였다. 이산화황 탐지 알고리즘은 여러 가지 조건문과 문턱값으로 이루어져 있으므로 복사 모형을 이용해 입력 자료에 대한 오차 범위를 계산하는 것은 불가능하다. 그러므로 직접 사례를 이용해 NWP 모델에 대한 민감도를 분석하였다. **그림 6**은 2017년 6월 14일 21UTC 캄차카 반도의 화산 폭발로 인해 이산화황이 탐지 된 사례이다. 왼쪽부터 IASI에서 관측된 이산화황 BT, OMI에서 관측된 이산화황 농도, Himawari RGB, 이산화황 탐지 알고리즘 산출 결과이다. 이산화황 탐지 알고리즘의 결과에서 캄차카 반도에서 탐지된 시그널은 이산화황이 맞으나 그림의 왼쪽 밑의 시그널은 이산화황이 아닌 구름 가장 자리에서 나타난 노이즈 시그널이다.

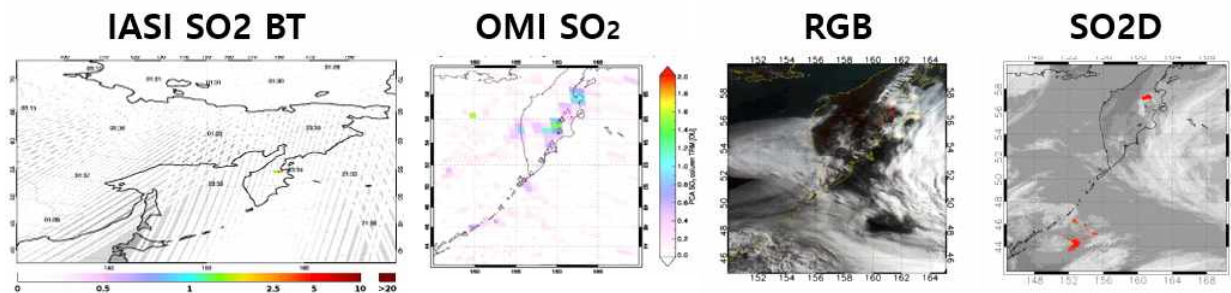


그림 11 2017년 6월 14일 21UTC 관측 결과. 왼쪽부터 IASI SO2 BT, OMI SO2, Himawari RGB, 이산화황 탐지 알고리즘 결과

이 사례를 바탕으로 먼저 지표면 온도를 $\pm 5K$ 를 변화시켜 수행한 결과 지표면 온도가 변화하여도 이산화황 시그널이 변함없이 존재하는 것을 알 수 있었다(**그림 7**). 그러나 온도 변화가 클수록 이산화황 시그널이 아닌 다른 곳에서 노이즈 시그널 또한 증가하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 현상은 지표면 온도가 증가할 때보다 감소하였을 때가 노이즈 시그널이 증가하는 양상을 보였다.

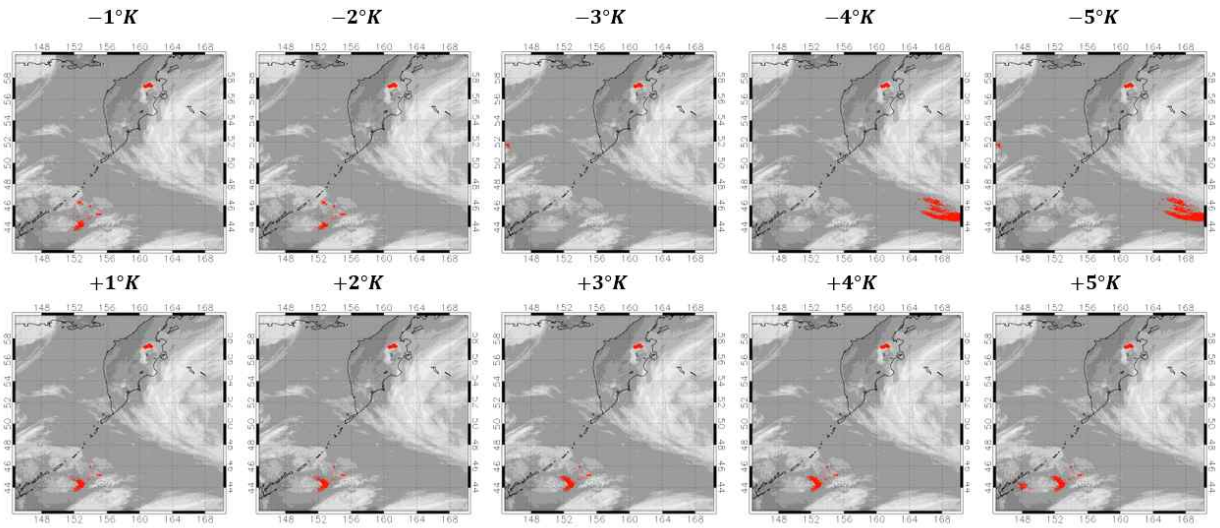


그림 12 지표면 온도 변화에 대한 AMI-SO2D 민감도 테스트

그림 8은 대류권계면 기압에 변화에 대한 이산화황 탐지 알고리즘의 민감도 테스트 결과이다. 지표면 온도와는 달리 대류권계면 기압이 $\pm 20\%$ 변화하여도 이산화황 시그널과 노이즈 시그널 모두 변화가 없다. 그러므로 이산화황 탐지 알고리즘은 대류권계면의 변화에 대해서는 민감도가 낮은 것으로 사료된다.

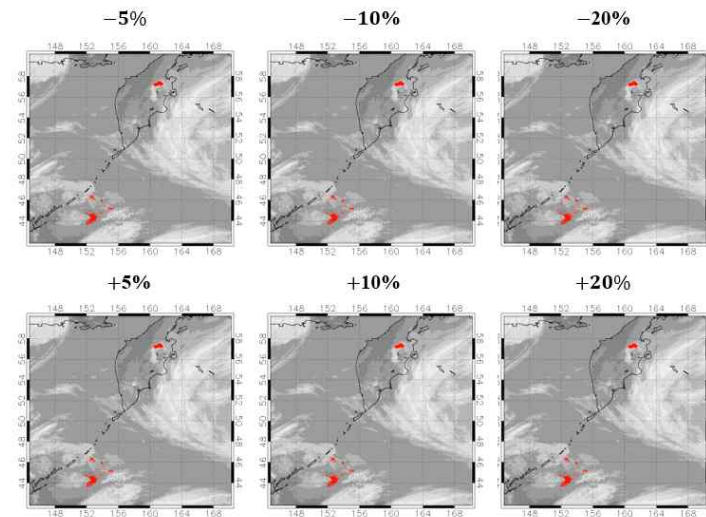


그림 13 대류권계면 기압 변화에 대한 AMI-SO2D 민감도 테스트

입력 자료인 NWP 모델의 오차가 존재하더라도 이산화황 탐지 시그널은 잘 나타나지만 노이즈 시그널 또한 증가하는 양상을 보인다. 특히 대류권계면 보다 지표면 온도가 민감하게 변화하며 지표면 온도가 낮아질수록 노이즈 시그널이 더 증가하는 모습이다. 그러므로 지표면 온도가 정확할수록 신뢰성이 높은 이산화황 탐지 자료가 생산된다.

AMI-SO2D의 주요 과정인 BTD Object와 Beta Object는 모두 조건문과 문턱값을 이용해 정의하고 있다. 현재 문턱값들은 Himawari 위성의 AHI 센서의 과거 관측 자료를 바탕으로 산출하였다. 그러므로 AMI-SO2D의 문턱값을 그대로 AMI 센서에 적용한다면 채널들간의 SRF 차이로 인해 오차를 유발하여 정확도를 낮추는 요인이 된다. 그러므로 AMI가 일정 기간 운영하여 자료가 축적되면 AMI-SO2D의 문턱값을 재산출하는 작업이 필요할 것으로 예상된다.

7. 이전 버전과의 차이점

초기 이산화황 탐지 알고리즘은 GOES-R ABI 알고리즘을 기반으로 구성하였다. ABI 알고리즘과 비슷한 구조와 같은 조건문 및 문턱값을 사용하였지만 현재에는 서로 다른 알고리즘의 구조와 조건문 및 문턱값을 가지고 있다. 알고리즘 구조를 간편화하였으며 조건문 및 문턱값은 모의 관측 자료인 AHI 자료를 기반으로 재구성, 재산출하여 동아시아 지역에 적합한 이산화황 탐지 알고리즘을 구축하게 되었다. 뿐만 아니라 AMI 관측 자료를 이용하여 알고리즘을 재구성함으로써 AMI에 적합한 이산화황 탐지 알고리즘을 구축하게 되었다.

* 참고문헌

- Han, H., Lee, S., Im, J., Kim, M., Lee, M. I., Ahn, M. H., & Chung, S. R. (2015). Detection of convective initiation using Meteorological Imager onboard Communication, Ocean, and Meteorological satellite based on machine learning approaches. *Remote Sensing*, **7**(7), 9184–9204.
- Mecikalski, J.R.; MacKenzie Jr, W.M.; Koenig, M.; Muller, S. Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by Meteosat second generation. Part I: Infrared fields. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2010, **49**, 521–534.
- Mecikalski, J.R.; MacKenzie Jr, W.M.; Koenig, M.; Muller, S. Cloud-top properties of growing cumulus prior to convective initiation as measured by Meteosat second generation. Part II: Use of visible reflectance. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2010, **49**, 2544–2558.
- Walker, J.R.; MacKenzie, W.M.; Mecikalski, J.R.; Jewett, C.P. An enhanced geostationary satellite-based convective initiation algorithm for 0-2-h nowcasting with object tracking. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2012, **51**, 1931–1949.
- MacKenzie, W.M., Jr.; Walker, J.R.; Mecikalski, J.R. Algorithm Theoretical Basis Document: Convective Initiation; NOAA NESDIS Center for Satellite

Applications and Research: College Park, MD, USA, 2010.

