

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

운정산출물 (Cloud Top Products)

최용상, 김혜실, 권민재

이화여자대학교

한국전자통신연구원 / 국가기상위성센터

Version 1.0
2019. 11. 21.

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	모든 내용	0.1.0.0	2016.03	김혜실
0.2	ATBD 포맷 수정	0.2.0.0	2017.01	김혜실, 권민재
0.3	1. Himawari 모의자료 사용 및 검증 결과 추가 2. 알고리즘 개선 방안 적용 및 결과 3. 현재 버전의 알고리즘 한계점 추가	0.3.0.0	2017.11	김혜실
1.0	ATBD 포맷 수정, 산출기법 업데이트	0.4.0.0	2019.4	김혜실

<목차>

1. 개요	1
1.1. 목적	1
1.2. 사용자	1
1.3. 내용	1
1.4. 관련 문서	1
2. 알고리즘 소개	2
2.1. 개요	2
2.1.1. 산출물의 정의	2
2.1.2. 산출물 목표 정확도	2
2.2. 알고리즘 흐름도	3
2.3. 입력자료	3
2.3.1. Level1B 입력자료	5
2.3.2. Level2 입력자료	6
2.3.3. 보조자료	7
2.4. 이론적 배경	8
2.4.1. 운상	8
2.4.2. 운정온도/기압/고도	8
2.5. 수학적 설명	9
2.5.1. 적외 대기창 영역의 관측 복사량	9
2.5.2. 운상 산출	11
2.5.3. 운정온도/기압/고도 산출	16
2.6. 산출물	23
3. 모의자료 및 검증	26
3.1. 모의 입력자료 및 검증자료	26
3.2. 검증 방법	27
3.2.1. 알고리즘 시험 A	27
3.2.2. 알고리즘 시험 B	28
3.3. 검증 결과	29
3.3.1. 알고리즘 시험 A	29
3.3.2. 알고리즘 시험 B	31
3.3.3. 알고리즘 시험 C: 궤도상 시험 결과	36
4. 현업 운영 시 고려사항	38
4.1. 수치계산 고려사항	38
4.2. 프로그래밍 절차상의 고려사항	38
4.3. 품질 평가 및 진단	38
4.4. 예외사항 처리	40

4.5. 검증 알고리즘	40
5. 가정 및 제한	41
5.1. 성능	41
5.2. 예상 센서 성능	41
5.3. 개선을 위한 사전 계획	41
5.3.1. 운상 산출물 개선	41
5.3.2. 운정온도/기압/고도 산출물 개선	41
5.3.3. 다층운/구름 가장자리 개선	42
6. 참고문헌	44

〈표 차례〉

표 1 GK-2A 운정산출물 목표정확도, 탐지율(PC), 평균 바이어스(mean bias)와 평균제곱근오차(RMSE)는 MODIS 산출물과의 비교로 이루어짐	2
표 2 GK-2A의 운정산출물 알고리즘 입력자료	4
표 3 Hamann et al.(2014)에서 상호비교된 10개의 알고리즘 기법	9
표 4 Cloud conditions for determining BT11.2, BTD[8.6-11.2] test	15
표 5 운상 알고리즘 산출을 위한 경계값	16
표 6 GK-2A의 운정온도에서 운정기압 변환 프로시저	21
표 7 운상(CPH) 출력 구조	23
표 8 운정온도(CTT) 출력 구조	24
표 9 운정기압(CTP) 출력 구조	24
표 10 운정고도(CTH) 출력 구조	25
표 11 ch13에서의 구름방출률 출력 구조	25
표 12 알고리즘 시험 A의 모의입력자료	26
표 13 알고리즘 시험 A의 검증자료	26
표 14 알고리즘 시험 B의 모의입력자료	26
표 15 알고리즘 시험 B의 검증자료	27
표 16 알고리즘 시험 C의 모의입력자료	27
표 17 알고리즘 시험 C의 검증자료	27
표 18 운상 산출물 검증을 위한 분할표(contingency table)	27
표 19 참여기관 및 제공한 구름 산출물	28
표 20 운상 알고리즘 검증 결과	30
표 21 운정온도/기압/고도 알고리즘 검증 결과	31
표 22 운상 알고리즘 검증 결과	36
표 23 운정온도/기압/고도 알고리즘 검증 결과	37
표 24 자료품질: 운상 산출물(CPH) 자료 품질 정보	38
표 25 자료품질: 운정온도 산출물(CTT) 자료 품질 정보	39
표 26 자료품질: 운정기압 산출물(CTP) 자료 품질 정보	39
표 27 자료품질: 운정고도 산출물(CTH) 자료 품질 정보	39
표 28 자료품질: 운정 산출물(CTPS) 자료 품질 정보	40

<그림 목차>

그림 1 GK-2A CTPs 순서도	3
그림 2 단층운이 존재할 때 대기 꼭대기에 도달하는 복사량	10
그림 3 얼음상(주황색 실선)과 액체상(파란색 실선)의 파장별 굴절지수의 허수부분 계수(위성기상학, 148pp)	13
그림 4 BTD[ch11-ch14] 경계값(검은색 점선)을 위한 Streamer 모의 결과. 검은색은 얼음상, 파란색은 액체상을 나타내며, 초록색 숫자는 광학두께, 검은색 숫자는 구름방출률, 원의 사이즈는 구름의 유효입자반경을 나타냄(표 4)	15
그림 5 경계값을 위한 Streamer 모의 결과. 검은색은 얼음상, 파란색은 액체상을 나타내며, 원의 크기는 구름 유효입자반경을 나타냄. 점선은 MODIS에서 정의한 경계값. 빨간색 선은 본 알고리즘에서 사용하는 경계값	16
그림 6 액체상 운정온도 산출 흐름도	18
그림 7 얼음상 운정온도 산출 흐름도	19
그림 8 AMI의 ch13에서의 구름방출률 범위 추정 조건표	20
그림 9 AMI의 ch13, ch14에서의 구름방출률 차이 추정 조건표	20
그림 10 ICWG 상호비교 날짜의 Himawari-8 RGB 이미지. 정성적 비교를 위해 선정된 6개 지역; 1. 태양광 전반사(파랑), 2. 조각 구름(시안), 3. 사막 위 구름(녹색), 4. 권운(노랑), 5. 광경로가 큰 지역의 구름(빨강), 6. 태풍지역	29
그림 11 2017년 7월 24일 0750 UTC의 운상(CPH), 운정온도(CTT), 운정기압(CTP), 운정고도(CTH)	29
그림 12 GK-2A의 얼음상(왼쪽)/액체상(오른쪽) 검증 스코어	30
그림 13 RGB 및 참여 기관 운상 산출물과의 정성적 비교	32
그림 14 RGB 및 참여 기관 운정온도 산출물과의 정성적 비교	34
그림 15 2015년 8월 19일 0010 UTC, 태풍 Atsani. ICWG 참여기관의 운정온도와 MODIS/Aqua(0015-0020 UTC)의 운정온도 비교 결과	35
그림 16 2019년 8월 7일 0450 UTC의 MODIS 운상과 AMI 운상	36
그림 17 2019년 8월 7일 0450 UTC의 MODIS 운정온도/기압/고도(위쪽)와 AMI의 운정온도/기압/고도 산출물(아래쪽)	37
그림 18 MODIS와 AMI의 관측 자료로 개발한 구름방출률 추정 조건표	42
그림 19 관측기반 조건표를 사용하여 재산출한 운정고도	43

약어표

ABI	– Advanced Baseline Imager
AHI	– Advanced Himawari Imager
AMI	– Advanced Meteorological Imager
ATBD	– Algorithm Theoretical Basis Document
BRDF	– Bidirectional Reflectance Distribution Function
BT	– Brightness Temperature
BTD	– Brightness Temperature Difference
CALIOP	– Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CIMSS	– Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)
COMS	– Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
CPH	– Cloud PHase
CTPs	– Cloud Top Properties (Cloud Top Phase, Temperature, Pressure, and Height)
CTH	– Cloud Top Height
CTP	– Cloud Top Pressure
CTT	– Cloud Top Temperature
CTTPH	– Cloud Top Temperature, Pressure, and Height
DCOEW	– Daytime Cloud Optical Thickness, Effective radius, and Water path
ETRI	– Electronics and Telecommunications Research Institute
GK-2A	– GEO-KOMPSAT-2A
IOT	– In Orbit Test
IR	– Infrared
LST	– Local Standard Time
MODIS	– Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NIR	– Near Infrared
NMSC	– National Meteorological Satellite Center
NWP	– Numerical Weather Prediction
PC	– Percent Correct
RMSE	– Root Mean Square Error
RTM	– Radiative Transfer Model
SCE	– Selective Communications Experiment
SEVIRI	– Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SRF	– Spectral Response Function
VIS	– Visible

1. 개요

1.1. 목적

본 문서는 2018년 12월에 발사된 GK-2A의 정지궤도 위성을 위한 운정산출물 산출 방법을 소개한 기술서이다. 본 문서에서의 운정산출물(Cloud Top Properties, CTPs)은 운상(액체상 또는 얼음상), 운정온도, 운정압력, 그리고 운정고도를 포함한다.

1.2. 사용자

본 문서의 사용자는 GK-2A 위성에서 산출된 운정온도 (압력/고도) 또는 운상 자료 활용에 관심이 있는 다양한 분야의 연구자들, 향후 운정산출물을 포함한 다양한 구름 산출 알고리즘 개발에 관계하는 연구자들이다.

1.3. 내용

본 문서는 운정 산출물의 정의, 산출 배경 및 상세한 알고리즘 설명, 운정 산출물의 검증 결과와 향후 개선 방향을 담고 있다.

1.4. 관련 문서

운정 산출물 알고리즘의 입력자료로 활용되는 구름 탐지, 구름 광학두께의 기술 문서는 본 알고리즘을 심도 있게 이해하는 데 도움이 될 것이다. 또한 운정 산출물이 활용되는 야간구름광학두께, 운형 등의 기술 문서도 관련이 있다.

2. 알고리즘 소개

2.1. 개요

2.1.1. 산출물의 정의

운정산출물(Cloud Top Properties, CTPs)는 운상(액체상 또는 얼음상), 운정온도, 운정압력, 그리고 운정고도를 포함한다. 운정산출물은 이름 그대로 해석하면 구름 정상부의 산출물을 의미하지만, 정확히는 구름의 적외방출고도(radiative effective emission level)로 실제 운정보다 약간(수백 미터-수 킬로미터) 낮은 고도를 기준으로 한다. 광학두께가 얇고 기하학적 구름 두께가 큰 권운의 경우 실제 운정과의 차이가 가장 크게 나타난다(Holz et al., 2006).

운상은 구름입자의 열역학적 상태를 나타내는 물리량이다. AMI의 운상은 액체상(water)과 얼음상(ice) 그리고 불확실상(uncertain)으로 분류한다. 단위는 무단위이다. 운정온도/운정기압/운정고도(Cloud Top Temperature, CTT/Cloud Top Pressure, CTP/Cloud Top Height, CTH)는 각각 구름층 복사가 방출되는 높이(emission level)의 유효 온도, 압력, 고도로 정의되며 단위는 K, hPa, km 이다.

2.1.2. 산출물 목표 정확도

운상 산출물의 목표 정확도는 다음 표1과 같다. 검증 결과는 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)와 비교하여 얼음상 및 액체상의 탐지율(PC, Percent Correct)로 나타낸다. 운정온도, 운정기압, 운정고도 산출물의 목표 정확도는 다음 표1과 같다. MODIS 와 비교하여 평균 바이어스(mean bias)와 평균 제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)로 나타낸다.

표 1 GK-2A 운정산출물 목표정확도. 탐지율(PC), 평균 바이어스(mean bias)와 평균제곱근오차(RMSE)는 MODIS 산출물과의 비교로 이루어짐

Product (Abbreviation)	Required accuracy
Cloud Phase (CPH)	PC = 80%
Cloud Top Temperature (CTT)	Bias = ± 5 [K] RMSE = 7 [K]
Cloud Top Pressure (CTP)	Bias = ± 30 [hPa] RMSE = 50[hPa]
Cloud Top Height (CTH)	Bias = ± 0.6 [km] RMSE = 1.0 [km]

2.2. 알고리즘 흐름도

운정산출물의 알고리즘은 그림 1의 순서도와 같다. 실시간 입력자료(그림 1의 빨간색)는 채널별 L1B 자료, UM 모델에서의 온도 프로파일, RTTOV로 생산된 채널별 청천복사량, RTTOV로 생산된 EBBT 복사량이다. 필요한 보조자료는 구름 방출률 정보(2.3.3, 2.4에서 상세 설명)의 조건표(그림 1의 연두색)이다.

운정산출물 산출 과정은 크게 두 부분으로 나뉜다. 첫 번째 과정은 적외채널의 밝기 온도 차이 경계값과 구름방출률 조건표를 활용하여 초기 운상/운정온도/기압(그림 1의 연한 파란색)을 산출하는 과정이다. 초기 운정산출물은 가시 채널의 구름 광학두께와 유효입자반경 산출(여기서부터 DCOEW라고 명명함)의 입력자료로 활용된다. 두 번째 과정은 초기 운상, 운정온도, 기압과 구름광학두께의 물리적 일관성을 보정하는 과정이다. 운정온도가 270 K 보다 높으면 얼음상으로 산출되는 경우, 또는 광학적으로 두꺼운 구름인 경우는 초기 운정온도/기압 산출 방법과 다른 기법으로 운정온도/기압을 재 산출하게 된다. 이때 운정온도/기압은 실시간 수치예보모델의 기온/기압/고도 프로파일을 사용하여 운정고도로 변환한다. 즉, 최종 산출물은 운상/운정온도/기압/고도(그림 4의 파란색)이다.

2.3. 입력자료

운정산출물의 알고리즘에서 사용된 입력자료는 표 2와 같다. 표 2는 정적 입력자료, 동적 입력자료가 모두 기술되어 있으며 2.3.1에서는 Level1B, 2.3.2에서는 Level2, 2.3.3에서는 보조자료에 대하여 상세히 기술한다.

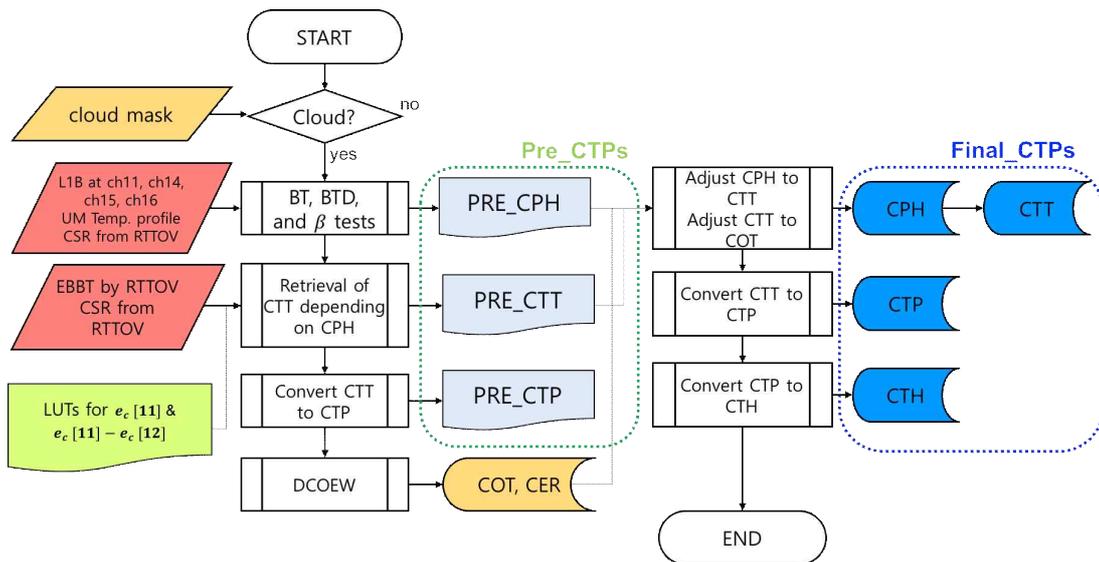


그림 1 GK-2A CTPs 순서도

표 2 GK-2A의 운정산출물 알고리즘 입력자료

Type	Item	Parameter	Usage
Static Data	Surface data	Surface elevation	
	Surface data	Surface type map	
	Spectral properties	Spectral response functions	○
	Spectral properties	Spectral albedo for each surface type	
	Spectral properties	BRDF	
	Thresholds	Thresholds for discerning cloud phase	○
	Look-up tables	Look-up tables for cloud emissivity	○
	Climate data		
	Other satellite data	final parameter	
Dynamic Data	Level 1B for the AMI	Channel 1: VIS0.4(0.47 μm)	
		Channel 2: VIS0.5(0.51 μm)	
		Channel 3: VIS0.6(0.64 μm)	
		Channel 4: VIS0.8(0.856 μm)	
		Channel 5: NIR1.3(1.38 μm)	
		Channel 6: NIR1.6(1.61 μm)	
		Channel 7: IR3.8(3.830 μm)	
		Channel 8: IR6.3(6.241 μm)	
		Channel 9: IR6.9(6.952 μm)	
		Channel 10: IR7.3(7.344 μm)	
		Channel 11: IR8.6(8.592 μm)	○
		Channel 12: IR9.6(9.625 μm)	
		Channel 13: IR10.4(10.403 μm)	○
		Channel 14: IR11.2(11.212 μm)	○
		Channel 15: IR12.4(12.364 μm)	○
		Channel 16: IR13.3(13.31 μm)	○
		start time	
		solar zenith angle	
		satellite viewing angle	○
		relative azimuth angle(sun/satellite)	
	From other AMI information	RTTOV products	○
		Clear sky radiance (from RTTOV)	○
		Cloud detection	○
		Cloud fraction	
		Cloud optical depth	○
		Effective particle radiation	
		Cloud top temperature/pressure/height	
Sea ice/snow detection			
Sea surface temperature			
LST			
TPW			
Relative humidity			
Aerosol optical depth			
NWP data	Temperature profile	○	

2.3.1. Level1B 입력자료

본 알고리즘은 총 5개의 적외채널 복사량을 사용한다. 각 채널을 사용하는 이유는 다음과 같다.

2.3.1.1 IR8.6 채널

중심파장이 8.592 μm 으로 AMI 센서의 channel 11(본 문서에서 ch11으로 표기함)인 이 채널은 먼지(dust), 화산재(volcanic ash), 그리고 얼음상(ice phase)과 액체상(water phase)을 분별하는데 널리 사용되는 적외채널이다(Prata, 1985; Pavolonis et al., 2005, Baum et al., 2012). 일반적으로 11, 12 μm 근처의 적외채널과 함께 사용된다. 이 적외채널이 어떤 물리적 특성을 분별해내는지는 2.4 단원에서 자세히 설명한다.

2.3.1.2 IR10.4 채널

중심파장이 10.403 μm 으로 AMI 센서의 channel 13(본 문서에서 ch13으로 표기함)인 이 채널은 AMI의 16개 채널 중 대기의 오존과 수증기의 흡수가 가장 적은 대기창 적외채널이다(longwave window channel). 따라서 적외채널 중 휘도온도가 가장 높은 채널이기도 하다. 이 채널의 휘도온도는 지면(운정)의 특성, 입자의 특성 등을 밝히는데 널리 쓰인다(Schmit et al., 2005; Lindsey et al., 2012). 본 연구에서는 운정온도를 산출하는데 이 채널이 사용된다.

2.3.1.3 IR11.2 채널

중심파장이 11.2 μm 으로 AMI 센서의 channel 14(본 문서에서 ch14으로 표기함)인 이 채널은 기상위성분야에서 지속적이고 다양한 분야로 활용되어 온 대기창 적외채널이다. 이 대기창 채널은 다양한 위성 산출물을 개발할 때 활용된다. 강수 추정, 구름의 움직임, 허리케인 강도와 궤도 분석, 구름의 운정온도와 운상, 그리고 안개탐지 등에 활용되어 왔다(Schmit et al., 2005; ABI Weather Event Simulator (WES) Guide by CIMSS). 그러나 10.4 μm 에 비교하여 수증기의 흡수가 상대적으로 크다. 본 연구에서는 운상 산출 및 운정온도 산출에 활용되는 채널이다.

2.3.1.4 IR12.3 복사량

중심파장이 12.3 μm 로 AMI 센서의 channel 15(본 문서에서 ch15으로 표기함)인

이 채널은 10.4, 11.2 μm 에 비교하여 대기 중 수증기 및 이산화탄소에 의한 흡수가 상대적으로 크게 발생하는 채널이다. 이 채널은 단독으로 사용되기보다는, 자신보다 대기 영향을 덜 받는 대기창 채널(일반적으로 IR11.2)과의 차이를 통해(split window difference) 다양한 위성산출물을 개발하는데 활용되어 왔다(Heidinger and Pavolonis, 2009). 예를 들면, 화산재, 모래, 해양 표면 온도, 구름의 입자 크기, 운상, 운정온도 등이 있다. 본 연구에서는 운정온도 개발 시 사용되고 있다.

2.3.1.5 IR13.3 복사량

중심파장이 13.3 μm 으로 AMI 센서의 channel 16(본 문서에서 ch16으로 표기함)인 이 채널은 이산화탄소 흡수 밴드로 널리 알려진 채널 중 하나이다. 평균 대류권 온도 추정 및 대류권계면고도 추정으로 활용되며, 구름의 광학두께 추정, 운정고도 할당, 대기 운동 벡터 산출 등에 활용된다. 특히, 정지궤도 위성의 센서로 운정온도를 산출할 때 이산화탄소 흡수채널을 반영하는 것이 정확도 향상에 도움이 된다고 보고한 바 있다 (Heidinger et al., 2010). 본 연구에서는 구름의 방출률을 추정하는 단계에서 활용되었으며 (2.4 단원에서 설명), 이것은 본 문서에서 소개하는 운정온도 추정 기법의 핵심 요소이다.

2.3.2. Level2 입력자료

본 알고리즘에서 사용되는 위성 산출물 자료는 구름 탐지 자료와 가시채널 구름광학두께자료이다.

2.3.2.1 GK-2A 구름 탐지(Cloud detection) 자료

운정 산출물 알고리즘은 구름 화소에서만 작동한다. 이를 위해 구름의 유무를 판단해야 한다. 이때, GK-2A 관측으로 산출된 구름 탐지 자료를 사용한다(GK-2A 구름 탐지 기술개발서 참고). 구름 탐지 자료는 청천 화소, 구름 화소, 구름일 가능성이 있는 화소(probable cloudy pixel)로 이루어진다. 본 운정 산출물의 구동은 청천 화소를 제외한 화소에서 이루어지며, 구름일 가능성이 있는 화소의 경우 본 알고리즘 산출물의 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 quality flag에 반영한다.

2.3.2.2 GK-2A 구름광학두께(Cloud optical thickness) 자료

운정 산출물을 보정하는 두 번째 과정에서 구름광학두께가 사용된다(GK-2A 구름광학두께 기술개발서 참고). GK-2A의 구름광학두께는 가시채널 반사도를 입력자

료로 하여 최신의 optimal estimation 기법을 통해 산출된다. 본 알고리즘에서는 광학적으로 두꺼운 구름과 얇은 구름을 분별할 때 사용된다. 광학적으로 두꺼운 구름의 경우 RTTOV 모의자료를 활용한 복사보정법(radiance fitting)으로 온정온도가 계산되며, 광학적으로 얇은 구름일 경우 본 문서에서 처음으로 제시되는 emissivity 범위 보정을 통해 온정온도가 산출된다(2.5 단원에서 상세 설명).

2.3.3. 보조자료

본 알고리즘에서 사용되는 보조자료는 청천복사량, 온도 프로파일, 온정 산출물을 위한 조건표이다.

2.3.3.1 Clear-sky radiance

청천 복사량은 구름 방출률을 계산할 때 사용된다. 참고로 구름 방출률은 온상, 온정온도/기압/고도 산출시 모두 활용되는 값이다. 본 알고리즘에서는 수치예보모델의 실시간 대기 프로파일을 입력자료로, 복사전달모델인 RTTOV로 모의된 청천복사량을 활용하고 있다.

2.3.3.2 온도 프로파일

온정 산출물 알고리즘에서는 온정온도/기압을 고도로 변환할 때 온도 프로파일을 사용한다. 현재 버전의 알고리즘에는 실시간 수치예보 모델(UM)로부터 받은 온도 프로파일을 적용한다. UM 자료와 GK-2A의 관측영역의 시공간이 일치하지 않으므로, 가장 가까운 시간대의 자료를 공간적 내삽을 통하여 GK-2A의 관측영역에 맞추어 각 화소당 온도 프로파일이 할당된다. 이를 활용하여 온정온도/기압을 고도로 바꾸는 방법은 2.5에서 자세히 기술한다.

2.3.3.3 구름방출률 범위 생산을 위한 조건표

온정 산출물 알고리즘에서는 온정온도를 산출 시 구름방출률을 고려한다. 이때, 각 구름 화소의 구름 물리적 특성에 맞는 구름방출률 정보가 필요하다. 현재 버전에서 사용하는 조건표의 입력자료는 ch13, ch14, ch16이며 각 입력자료의 입력온도/기압을 고도로 변환할 때 온도 프로파일을 사용한다. 현재 버전의 알고리즘에는 실시간 수치예보 모델(UM)로부터 받은 온도 프로파일을 적용한다. UM 자료와 GK-2A의 관측영역의 시공간이 일치하지 않으므로, 가장 가까운 시간대의 자료를 공간적 내삽을 통하여 GK-2A의 관측영역에 맞추어 각 화소당 온도 프로파일이 할당된다. 이를

활용하여 온도/기압을 고도로 바꾸는 방법은 2.5에서 자세히 기술한다.

2.4. 이론적 배경

2.4.1. 운상

운상은 강한 대류운의 성장과정을 예측하는데 사용되며 구름 복사 특성을 결정짓는 핵심 요소(key and Intrieri, 2000)이다. 따라서 정확한 운상 산출은 기상 예보 뿐만 아니라 기후 변화 예측 및 진단의 정확도를 높인다. 또한, GK-2A 위성 산출물 개발 관점에서는, 여러 구름 산출물들 중 최초 단계 산출물으로써 온도/고도/기압, 광학두께, 운형 등의 산출의 정확도를 결정짓는 요소이기도 하다.

현존하는 대부분의 기상위성(MODIS, SEVIRI, AHI, ABI 센서가 탑재된 위성)은 주/야간 연속성을 위하여 적외채널로 운상을 산출하는 기법을 사용해왔다. 이론적으로 얼음상과 액체상의 구조적 특징의 차이는 파장에 따른 굴절지수의 차이로 뚜렷하게 표현된다. 이 굴절지수의 차이는 파장대별 흡수율 차이를 가져온다(Strabala et al., 1994). 가장 큰 차이는 8-9 μm 영역과 11-12 μm 영역에서 나타나므로(그림 2 참고), 대부분의 운상 탐지 알고리즘은 (8.6, 10.8, 12.0 μm)의 밝기온도 차이를 기반으로 한다. 우리나라 첫 번째 기상위성인 COMS은 8.6 μm 채널을 보유하지 못했다. 따라서 운상을 정확히 분별하는 데 한계가 있었다. 그러나 GK-2A는 8.6 μm 채널을 보유하였기 때문에, 첫 번째 기상위성보다 정확도가 높은 운상 산출이 보장되어 있다.

적외채널의 밝기 온도 차이로 운상을 분별하는 이 기법은 반투명 구름에서 대기 배경 복사와 지면 복사의 영향으로 산출물의 정확도가 떨어진다는 한계가 있다. Pavolonis (2010)는 채널별 구름 방출률의 비율(또는 소산계수의 비율)이 입자의 반경과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 이 구름방출률 비율 경계값 테스트는 최신의 MODIS Collection 6 버전의 운상 알고리즘 개선에 활용되었으며, Baum et al. (2012)에서는 구름 방출률 비율을 사용하지 않았을 때(MODIS Collection 5)보다 운상산출물의 정확도가 향상되었음을 보였다.

따라서 GK-2A의 운상 알고리즘은 AMI의 ch11, ch14의 밝기온도 차이 경계값 테스트와 ch11, ch14, ch15의 구름 방출률 비율 경계값 테스트를 기반으로 운상을 분별한다. 구체적인 경계값 테스트는 2.5에서 설명한다.

2.4.2. 온도/기압/고도

온도/기압/고도는 기상 예보에 입력자료로 활용되며, 지구 복사량을 결정하는 핵심 요소이다. 또한, 대기운동벡터 등 다른 위성 산출물의 선행 입력자료로 활용되는 주요한 산출물이다.

운정온도/기압/고도 알고리즘도 운상 알고리즘과 같이 주/야간 연속성을 보장하기 위하여 적외관측 기반의 산출 기법이 개발되어 왔다. Hamann et al. (2014)에서는 각 국제 기관에서 운용 중인 각기 다른 10개의 운정온도/기압/고도 산출 알고리즘 성능을 비교/분석하여 보고한 바 있다. 10개의 참여기관과 알고리즘 기법은 표2에 요약하였다. 10개 기관의 알고리즘 기법 안에는 전통적으로 사용된 복사비율법, 복사보정법 외에도 최신의 optimal estimation 기법으로 개발한 유럽과 미국의 알고리즘이 포함되어 있다. 실제의 운정을 가장 가깝게 산출한다고 알려진 CALIOP/CALIPSO, L/CLOUDSAT과 검증한 결과, 10개의 모든 알고리즘에서 얇은 권운과 다층운 구름이 실제 운정고도와 큰 바이어스를 보였다.

기존의 권운 산출 기법은 구름방출률을 가정한다. 각 구름 입자의 미세물리적 정보가 없으면 입자의 구름방출률을 계산할 방도가 없기 때문이다. 대부분 널리 사용되는 가정은 가까운 적외영역에서는 두 채널의 구름방출률이 같다는 가정이다. 이 가정은 두꺼운 권운의 경우에는 합리적인 가정이다. 그러나 얇은 권운의 경우, 두 채널의 구름방출률의 차이(혹은 비율)은 입자의 반경과 깊은 연관성이 있다(Inoue, 1985). Menzel et al. (2002)에서는 실제의 구름방출률을 고려하는 것이 권운의 기압 산출물을 개선하는데 효과적임을 밝혔다. 또한 미국의 최신 정지궤도위성인 GOES-16/ABI에서도 운형별 구름방출률 비율을 최적화시키는 운정온도를 추정하는 알고리즘을 개발한 바 있다. 이러한 추세에 따라, 본 알고리즘에서는 권운의 운정온도 정확도를 향상시키기 위하여, 구름방출률을 고려한 운정온도 추정에 초점을 맞추었다. 이를 위해, 먼저 적외채널 밝기온도차이를 사용하여 각 구름입자에 따른 구름방출률 범위를 추정방법을 개발하였다. 그리고 그 구름방출률범위에 대응하는 운정온도 산출 알고리즘을 개발하였다.

2.5. 수학적 설명

2.5.1. 적외 대기창 영역의 관측 복사량

임의의 단층운을 가정할 때, 대기 꼭대기에 도달하는 적외채널 복사량 (I_{λ}^{obs})은 그림 2와 같이 총 4개의 성분으로 이루어져 있다. 지면 방출 복사 (I_{λ}^{sc}), 구름층 방출 복사 (I_{λ}^{cd}), 구름 아래층 대기 복사 (I_{λ}^b), 구름 위층 대기 복사 (I_{λ}^a)이다.

표 3 Hamann et al.(2014)에서 상호비교된 10개의 알고리즘 기법

Acro.	Method	Channels (μm)	Aux. data	Citations
AWG	optimal estimation	10.8, 12.0, 13.4	NCEP	Menzel et al. (2008); Heidinger and Pavolonis (2009); Heidinger et al. (2010); Baum et al. (2012)
CMS	(1) radiance fitting (2) intersection method (3) radiance ratioing	10.8 6.2, 7.3, 10.8, 13.4 6.2, 7.3, 10.8, 13.4	ERA interim	Derrien and Le Gléau (2005, 2010, 2013); Schmetz et al. (1993); Appendix C; Menzel et al. (1983)
DLR	(1) radiance fitting (2) radiance ratioing	10.8 10.8, 13.4	ECMWF	Meerkötter and Bugliaro (2009); Bugliaro et al. (2011); Ewald et al. (2013)
EUM	(1) radiance fitting (2) radiance ratioing	10.8 6.2, 7.3, 10.8, 12.0, 13.4	ECMWF	Lutz et al. (2011)
GSF	(1) optimal estimation (2) radiance fitting	3.9, 8.7, 10.8, 12.0, 13.4 10.8	ECMWF	Platnick et al. (2003); King et al. (2006); Seemann et al. (2008); Heidinger and Pavolonis (2009); Wind et al. (2010)
LAR	(1) optimal estimation (2) radiance ratioing	0.6, 3.9, 10.8, 12.0 10.8, 13.4	NOAA GFS	Minnis et al. (2008b, 2010, 2011); Chang et al. (2010)
MFR	(1) radiance fitting (2) intersection method (3) radiance ratioing	10.8 6.2, 7.3, 10.8, 13.4 6.2, 7.3, 10.8, 13.4	ECMWF	Derrien and Le Gléau (2005, 2010, 2013); Schmetz et al. (1993); Appendix C; Menzel et al. (1983)
MPF	(1) radiance fitting (2) radiance ratioing	10.8 6.2, 7.3, 10.8, 12.0, 13.4	ECMWF	Lutz et al. (2011)
OCA	optimal estimation	all, but 3.9, 9.6	ECMWF	Watts et al. (2011)
UKM	(1) radiance ratioing (2) radiance fitting	10.8, 12.0, 13.4 10.8	MetOffice	Eyre and Menzel (1989); Moseley (2003); Saunders et al. (2006); Francis et al. (2008)

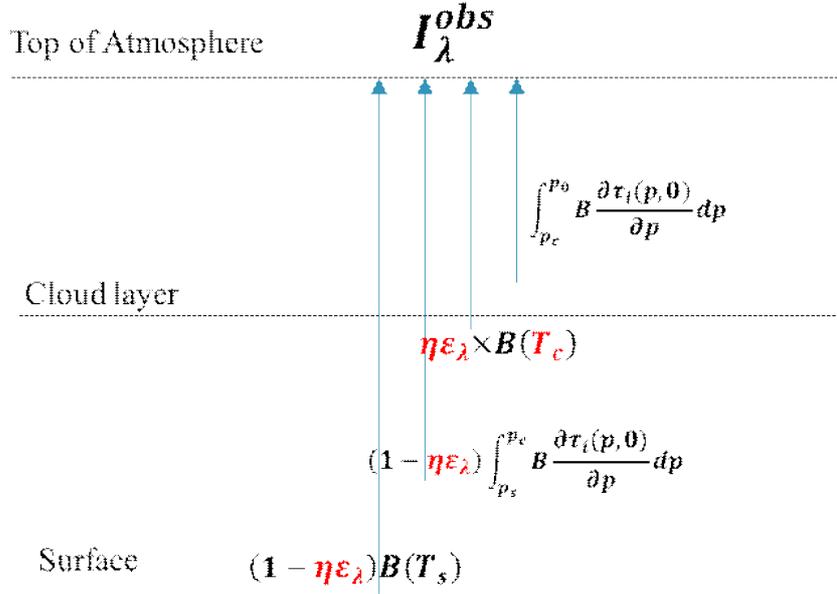


그림 2 단층운이 존재할 때 대기 꼭대기에 도달하는 복사량

$$I_{\lambda}^{obs} = I_{\lambda}^{sfc} + I_{\lambda}^b + I_{\lambda}^{cl} + I_{\lambda}^a \quad (1)$$

구름 온도를 T_c , 구름 방출률을 ϵ_{λ} , 지면 온도를 T_s , 대기층 투과율을 $\tau(p_1, p_2)$,

그리고 플랑크 함수를 $B(T)$ 로 표현할 때 관측 복사량을 결정하는 4개의 성분은 다음과 같이 정의된다.

$$I_{\lambda}^{sfc} = (1 - \epsilon_{\lambda})B(T_s) \quad (2)$$

$$I_{\lambda}^b = (1 - \epsilon_{\lambda}) \int_{p_s}^{p_c} B(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp \quad (3)$$

$$I_{\lambda}^{cl} = \epsilon_{\lambda} B(T_c) \quad (4)$$

$$I_{\lambda}^a = \int_{p_c}^0 B(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp \quad (5)$$

반면 구름이 없는 경우 관측 복사량은 (청천복사, I_{λ}^{clr}) 다음과 같이 정의된다.

$$I_{\lambda}^{clr} = B(T_s) + \int_{p_s}^{p_0} B(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp \quad (6)$$

이때 구름이 있는 경우의 복사량에서 청천 복사량을 빼면 다음과 같다.

$$I_{\lambda}^{obs} - I_{\lambda}^{clr} = \epsilon_{\lambda} B(T_c) - \epsilon_{\lambda} (B(T_s) + \int_{p_s}^{p_c} B(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp) \quad (7)$$

이다. 이 식을 구름 방출률 (ϵ_{λ})에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}^{obs} - I_{\lambda}^{clr}}{B(T_c) - B(T_s) - \int_{p_s}^{p_c} B(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp} \quad (8)$$

분모의 두 번째, 세 번째 항을 I_{λ}^{clr} 정의 (식 (6))을 사용하면 식 (8)은 다음과 같이 변환된다.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}^{obs} - I_{\lambda}^{clr}}{B_{\lambda}(T_c) - I_{\lambda}^{clr} + \int_{p_c}^{p_0} B_{\lambda}(T(p)) \frac{\partial \tau_i(p, 0)}{\partial p} dp} \quad (9)$$

본 알고리즘에서의 운정온도는 이 파장별 구름방출률 (ϵ_{λ})을 고려한 값이다. ϵ_{λ} 는 운상에 따라 달라지는 값이기 때문에 (2.3.2 단락) 식 (2)–(9)의 모든 과정은 운상이 결정된 이후에 사용하도록 한다.

2.5.2. 운상 산출

2.5.2.1. 이중스펙트럼 IR 검사

Strabala et al. (1994)은 얼음상과 액체상의 파장에 따른 흡수율 (absorptivity) 차이를 이용하여 적외 파장(8.6, 11, 12.0 μm)에서의 운상 산출 방법을 제시하였다. 이 방법은 대부분 위성 (MODIS, SEVIRI, ABI)의 구름상 알고리즘의 원형으로 가장 널리 쓰이고 있다. 사용하는 적외 파장은 위성의 사양에 따라 다르다. 구름에 의한 흡수와 방출은 구름의 입자와 사이즈에 의한 굴절지수 (refractive index)로 표현된다. 그림 2는 파장에 대한 (x축) 운상별 굴절지수의 허수부 (y축), 즉 흡수율을 계산한 결과이다. 운상에 따른 흡수율의 차이는 7.3, 11, 12.0 μm 에서 뚜렷하게 나타나나 8.6 μm 영역에서는 흡수율의 차이가 없다. 따라서 얼음상과 액체상에서 8.6 μm , 11 μm 의 휘도온도차이 (BTD(8.6-11))가 필연적으로 유발된다. 이 경계값을 사용하여 운상을 분류할 수 있다. 이것이 바로 이중스펙트럼 IR 검사의 원리이다. 실제로 그림 18은 Angola 지역에서 BTD(8.6-11)를 이용하여 얼음상 구름을 탐지한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 적색은 양수 (얼음상), 청색은 음수(액체상)이며, 두 색의 경계가 뚜렷하게 나타난다. 그러나 이 방법은 광학적으로 매우 얇은 권운이나 얼음상과 액체상이 혼재된 구름에 대해서 오차가 크다. 또한 단일 구름층을 가정하여 경계값을 결정하였다면 다중 구름층의 경우는 운상 분류가 정확하지 않을 수 있다. 이중스펙트럼 IR검사 기법으로 운상을 산출할 때 가장 중요한 것은 액체상과 얼음상 그리고 불확실상을 결정짓는 BTD(8.6-11) 경계값을 결정하는 것이다. 액체상과 얼음상의 복사적 특성의 차이가 확연하게 보여지는 BTD 값은 운상 뿐 아니라 대기의 미량기체 분포, 지면방출률 등에도 영향을 받는다. 따라서 운상을 결정짓는 경계값은 지면의 특성에 따라, 미량기체 분포에 따라 지역적으로 다를 수 있다.

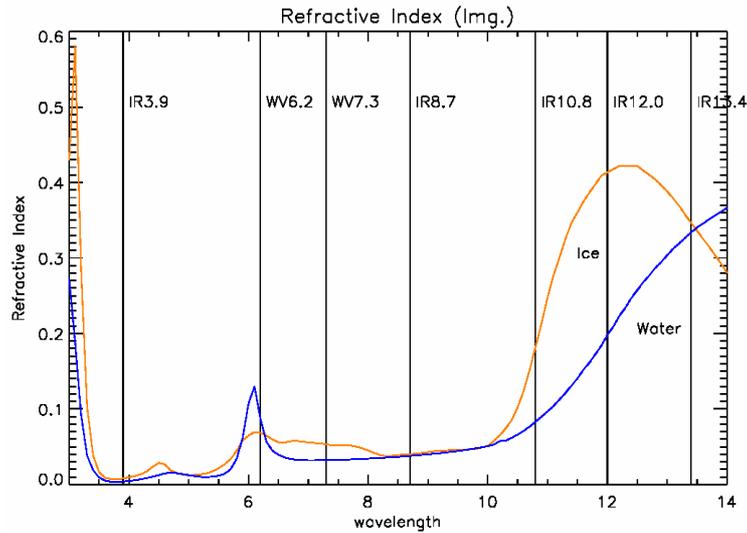


그림 3 얼음상(주황색 실선)과 액체상(파란색 실선)의 파장별 굴절지수의 허수부분 계수(위성기상학, 148p)

2.5.2.2. 구름방출률 비율(β) 경계값 검사

이중 스펙트럼 IR 검사로 운상을 산출하는 기법은 두 가지 한계를 갖는다. (1) 광학 두께가 얇은 권운은 얼음상으로 분류되지 않는다. (2) 과냉각 액체상 또는 혼합상을 정의하는데 어려움이 있다. 첫 번째 문제는 구름 광학두께가 얇은 경우 대기배경복사와 지면복사가 관측된 적외 영역 휘도온도에 영향을 미치기 때문에 발생하는 문제이다. 따라서 관측된 복사량에서 얼음상 정보를 방해하는 복사량을 고려하기 위해 구름방출률 비율(β)을 도입하였다 (Heidinger and Pavolonis, 2009, Heidinger et al., 2010, Pavolonis, 2010). 이 β 경계값 테스트의 역할에 대하여 Baum et al. (2012)는 다음과 같이 기술하고 있다.

“The importance of the β parameter is that it merges measured satellite radiances with clear-sky radiances provided by either a radiative transfer model or from pixels determined to be clear sky through use of a cloud-clearing approach. By accounting for the clear sky radiance, the influence of the surface is decreased from the found in the measured BTDs employed in the Collection-5 (and earlier) thermodynamic-phase method.”

β 값은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{\ln(1 - \epsilon_y)}{\ln(1 - \epsilon_x)} \quad (10)$$

여기서 ϵ_x , ϵ_y 는 x 채널의 구름방출률이다. 특히 본 알고리즘에서 x 와 y 는 적외 대기창 채널로, 대기에서의 흡수가 없기 때문에 대기에서 방출하는 항을 무시할 수

있다. 따라서 앞서 구름방출률에 대해 풀이된 식 (8)을 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}^{obs} - I_{\lambda}^{clr}}{B(T_c) - I_{\lambda}^{clr}} \quad (11)$$

운상을 산출할 시점에는 운정온도 T_c 는 미지수이다. 따라서 β 경계값 테스트로 운상을 산출하는 기존의 알고리즘들은 T_c 를 대류권계면 고도의 온도로 가정하여 계산하였다. 이는 반투명 구름의 경우 방출률 값이 운정온도의 변화에 민감하지 않다고 밝힌 cox(1975)와 Pavolonis (2010) 연구에 근거하였으며, β 경계값 테스트는 주로 상층의 권운 운상 분류를 위한 테스트이므로 구름이 이론적으로 존재할 수 있는 가장 높은 고도의 온도를 운정온도로 가정한 것이다.

2.5.2.3. GK-2A 운상 산출 기법

GK-2A의 운상 산출 알고리즘은 이중스펙트럼 IR 검사와 구름방출률 비율(β) 경계값 검사를 통합한 알고리즘이다. 구체적인 검사 및 경계값은 다음과 같다.

- 11.2 μm 휘도 온도 검사 (BT(ch14) 검사)

청천 화소가 아님이 결정되면 가장 먼저 BT(ch14) 검사를 받게 된다. 이 시험을 위한 경계값은 다음의 연구를 근거로 결정하였다.

Hogan et al. (2003), using ground-based lidar observations at Chilbolton, showed that the supercooled water occurrence frequency decreases from 27% toward 0% at temperatures between 268 and 238 K [Wolters et al. 2008].

- 8.6 μm 과 11.2 μm 휘도 온도 차이 검사 (BTD[ch11-ch14] 검사)

두 번째로 BTD(ch11-ch14) 검사를 하게 된다. 이 경계값을 결정하기 위하여 복사전달모델인 Streamer 모델 사용하였다. 상층 얼음상 구름은 300 hPa, 하층 액체상 구름은 500 hPa로 가정하였다. 구름입자의 산란은 입자의 구성에 관계없이 구면으로 가정하였고, 미산란을 이용하여 계산되었다. 액체상 구름의 입자밀도는 0.2 gm^{-3} , 얼음상 구름의 입자밀도는 0.02 gm^{-3} 을 갖도록 설정하였다. 복사전달모델의 모의조건은 표 4에 정리되어 있다. 그림 4는 복사전달모델 모의 결과를 보여준다. 다양한 얼음상(그림 4, 검은색 동그라미), 액체상(그림 4, 파란색 동그라미)의 구름이 BTD(ch11-ch14)의 값이 0.5을(그림5, 검은색 점선) 기준으로 분리되고 있다.

- 8.6, 11.2, 12.4 μm 에서의 구름방출률 비율(β) 경계값 검사(β [ch11/ch14], β

[ch14/ch15] 경계값 검사

세 번째로 $\beta[\text{ch11}/\text{ch14}]$, $\beta[\text{ch14}/\text{ch15}]$ 검사를 한다. 얼음상과 액체상의 조건은 위와 동일하다. 8.6, 11.2, 12.4 μm 중심파장의 모의된 복사값으로 식(9)를 이용하여 채널별 구름 방출률을 먼저 계산하고, $\beta[\text{ch11}/\text{ch14}]$, $\beta[\text{ch14}/\text{ch15}]$ 을 계산한다. 다양한 구름의 미세물리적 조건(표4)에서 산출된 얼음상(검은색), 액체상(파란색)의 β 값을 $\beta[\text{ch14}/\text{ch15}]$ (x축), $\beta[\text{ch11}/\text{ch14}]$ (y축) 평면에 나타내면 그림 5와 같다. 빨간색 실선을 경계값으로 얼음상과 액체상이 분별됨을 알 수 있다.

표 4 Cloud conditions for determining BT11.2, BTD[8.6-11.2] test

	Water phase	Ice phase
CTP, hPa	500	200
CER, μm	10, 15, 30	10, 15, 30
COT	0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 8.0, 10.0, 13.0	0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 8.0, 10.0, 13.0
LWC/IWC, gm^{-3}	0.2	0.02

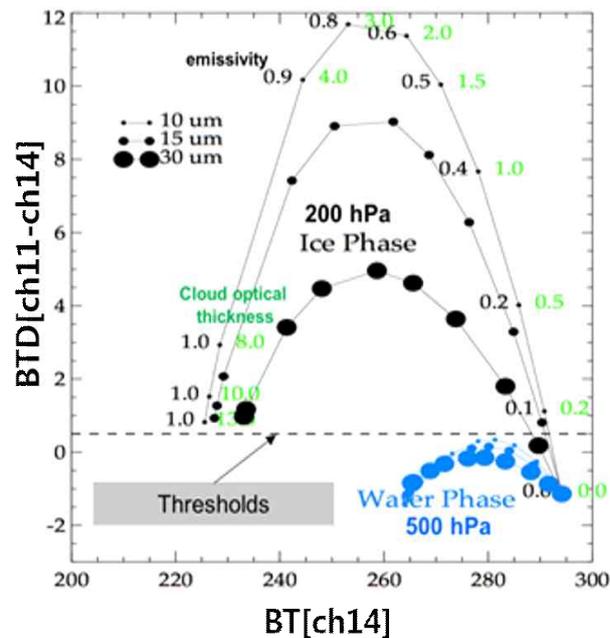


그림 4 BTD[ch11-ch14] 경계값(검은색 점선)을 위한 Streamer 모의 결과. 검은색은 얼음상, 파란색은 액체상을 나타내며, 초록색 숫자는 광학두께, 검은색 숫자는 구름방출률, 원의 사이즈는 구름의 유효입자반경을 나타냄(표 4)

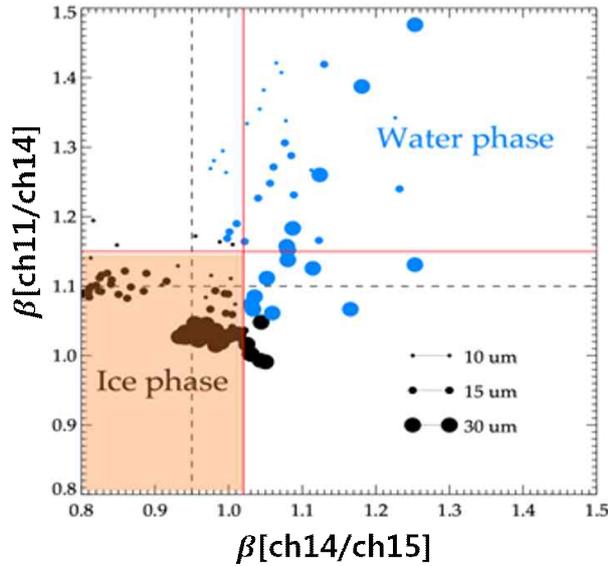


그림 5 β 경계값을 위한 Streamer 모의 결과. 검은색은 얼음상, 파란색은 액체상을 나타내며, 원의 크기는 구름 유효입자반경을 나타냄. 점선은 MODIS에서 정의한 경계값. 빨간색 선은 본 알고리즘에서 사용하는 경계값

표 5 운상 알고리즘 산출을 위한 경계값

Required tests for cloud phase		
Ice	Uncertain	Water
$BT[ch14] \leq 238 \text{ K}$ or $BTD[ch11-ch14] \geq 1.9 \text{ K}$ or $\beta[ch14/ch15] \geq 0.95 \text{ K} \ \& \ \beta[ch11/ch14] < 1.1 \text{ K} \ \& \ BTD[ch11-ch14] \geq 1.9 \text{ K}$	For no ice $238 \text{ K} < BT[ch14] < 268 \text{ K} \ \& \ -1.2 \text{ K} \leq BTD[ch11-ch14] < 1.9 \text{ K}$	For no ice/mixed $BT[ch14] > 285 \text{ K} \ \& \ BTD[ch11-ch14] \leq -1.2 \text{ K}$

2.5.3. 운정온도/기압/고도 산출

본 알고리즘에서는 운상이 산출된 후 운상 정보를 입력자료로 하여 운정온도가 결정되고, 순차적으로 운정기압과 고도로 변환된다.

운정온도는 구름방출률을 고려하여 산출된다. 여기서부터는, 식(1)-(11)의 λ 의 자리에 관측 파장 정보가 아닌 AMI 채널 정보를 넣어 식을 정리한다. 먼저 AMI의 16개 채널 중 대기 중 오존, 이산화탄소, 수증기의 흡수가 가장 적은 ch13(10.4 μm)의 구름 방출률은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{ch13} = \frac{I_{ch13}^{obs} - I_{ch13}^{clr}}{B(T_c) - I_{ch13}^{clr}} \quad (12)$$

식(12)에서 I_{ch13}^{obs} 는 채널 13의 복사량이고 I_{ch13}^{clr} 은 채널 13의 청천 복사량이다. 이 때, 구름방출률의 물리적 정의는 다음 식과 같다.

$$\epsilon_{ch13} = 1 - e^{-\kappa_{ch13}z/\mu} \quad (13)$$

여기서 κ_{ch13} 은 ch13 영역에서의 흡수계수를, z 는 구름의 두께, μ 는 위성천정각 (satellite viewing angle)을 나타낸다. 즉, 구름 방출률은 구름광학두께 (=흡수계수와 구름의 두께의 곱)의 함수이다. 만약, 구름의 구름광학두께 추정이 가능하다면, 식 (13)에 의하여 구름방출률을 계산할 수 있고, 식 (12)에 의하여 운정온도 추정이 가능해진다.

적외대기창 채널 관측을 하나 더 추가하여 보자. ch14(11.2 μ m)의 구름 방출률은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{ch14} = \frac{I_{ch14}^{obs} - I_{ch14}^{clr}}{B(T_c) - I_{ch14}^{clr}} \quad (14)$$

ch14의 구름방출률 또한 식 (13)과 동일하게 정의할 수 있다. 따라서 두 채널의 구름방출률 차이는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{ch13} - \epsilon_{ch14} = e^{-\kappa_{ch14}z/\mu} - e^{-\kappa_{ch13}z/\mu} \quad (15)$$

기존의 여러 알고리즘에서는 두 채널의 구름방출률 차이를 무시하거나, 상수로 간주하였다. 그러나 식 (15)에 의하면 두 채널의 구름방출률 차이는 두 채널의 흡수계수의 차이와 구름의 두께에 비례한다. 곧 구름 입자의 수직적 분포에 따라 각기 다른 값을 갖는다는 것을 예상할 수 있다. 특히, 권운의 경우 얼음입자의 수직적 분포가 다양하므로 물방울로 이루어진 하층운에 비교하여 훨씬 다양한 구름방출률 차이 값을 보일 것이다.

GK-2A 운정온도 산출은 운상에 따라 다르게 적용되었다. 액체상의 경우 구름 방출률을 1로 가정, 식 (12)를 사용한다. 이때 미세하지만 계절 및 지역에 따라 다르게 나타나는 대기 효과를 보정하기 위해 복사보정법을 사용하였다 (2.5.3.1에서 상세 기술). 또한 얼음상/불확실상에서는 구름 방출률을 먼저 추정된 후, 식 (12)-(15)를 사용하여 추정된 구름방출률에 대응하는 운정온도 산출기법(2.5.3.2에서 상세 기술)을 개발하였다.

2.5.3.1. 액체상 운정온도 산출 기법

액체상 온정온도는 복사보정법으로 산출된다. 복사보정법에서는 구름을 흑체복사로 가정한다. 이 가정은 방출률이 다양한 얼음상/불확실상에서는 적용될 수 없기 때문에 액체상의 경우에만 복사보정법을 적용하였다. 산출 기법은 다음 흐름도(그림 6)와 같다.

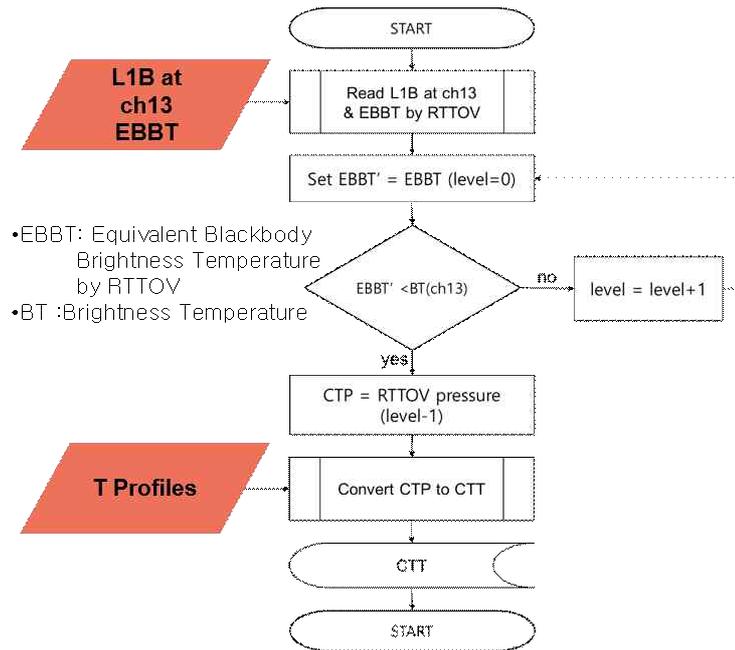


그림 6 액체상 온정온도 산출 흐름도

산출 흐름을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

- 1단계. ch13의 관측복사량을 읽기 및 밝기 온도로 전환하기
전구 영역의 ch13의 관측 복사량을 읽어 밝기 온도로 전환한다.
- 2단계. RTTOV에서 생산한 EBBT 읽기
실시간 온습도 프로파일을 RTTOV에 입력, RTTOV에서 모의하는 각 층마다 두꺼운 구름이 있다고 가정한다. 각 층마다 구름이 존재할 시 위성에서 관측하게 될 AMI ch13의 복사량이 모의된다. 이때 각 층은 RTTOV에서 정의된 33개 층의 기압이다. 이렇게 모의된 휘도온도를 EBBT(Equivalent Blackbody Brightness Temperature)라고 부른다. 본 알고리즘에서는 실시간으로 모의된 EBBT를 읽는다.
- 3단계. 실제와 가장 가까운 구름 층 기압 찾기
실시간 온습도 프로파일을 RTTOV에 입력, RTTOV에서 모의하는 각 층마다 두꺼운 구름이 있다고 가정한다. 각 층마다 구름이 존재할 시 위성에서 관측하게 될 AMI ch13의 복사량이 모의된다. 이 모의된 각 층별 휘도온도를

EBBT(Equivalent Blackbody Brightness Temperature)라고 부른다. 본 알고리즘에서는 실시간으로 모의된 EBBT를 읽는다.

- 4단계. **운정온도/고도로 변환**

3단계에서 찾은 RTTOV의 구름층 고도가 실제 구름의 높이로 간주된다. 이것을 2.5.3.3에서 제시되는 수직적 내삽을 통해 운정온도 및 고도가 산출된다.

2.5.3.2. 얼음상/불확실상 운정온도 산출 기법

얼음상/불확실상 운정온도 산출을 위해 먼저 각 구름입자에 적합한 구름방출률 범위가 추정된다. 추정된 구름방출률 범위는 식 (12)–(15)에 의해 운정온도가 추정된다. 산출 흐름도는 다음 그림 7과 같으며, 산출 기법은 단계별로 설명한다.

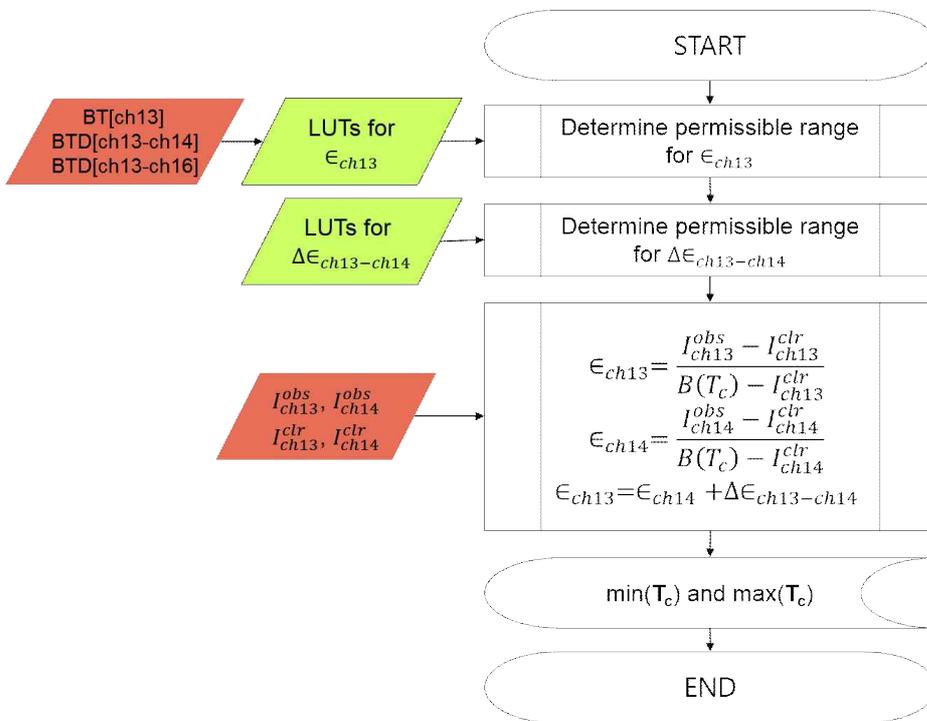


그림 7 얼음상 운정온도 산출 흐름도

- 1단계. **구름방출률 범위 추정하기**

관측하는 화소의 BT[ch13], BTD[ch13-ch16] 값을 구한다. 이 값에 대응하는 ch13의 구름방출률(ϵ_{ch13})의 최대값, 최소값을 구한다. 본 알고리즘 버전에서 사용된 조건표는 Streamer로 모의한 (표 4 참고) 값으로 생성되었으며, 그림 8과 같다.

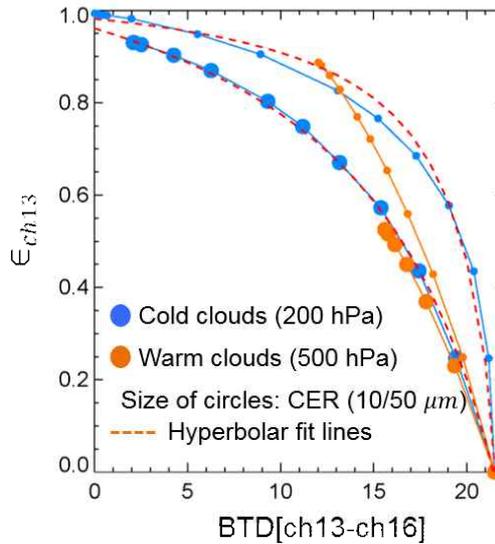


그림 8 AMI의 ch13에서의 구름방출률 범위 추정 조건표

- 2단계. 적외대기창 두 채널에서의 구름방출률 차이 추정하기

관측하는 화소의 BT[ch13], BTD[ch13-ch14], BTD[ch13-ch16] 값을 구한다. 이 값에 대응하는 ch13의 구름방출률($\Delta\epsilon_{ch13-ch14}$)의 최대값, 최소값을 구한다. 본 알고리즘 버전에서 사용된 조건표는 Streamer로 모의한 (표 4 참고) 값으로 생성되었으며, 그림 9와 같다.

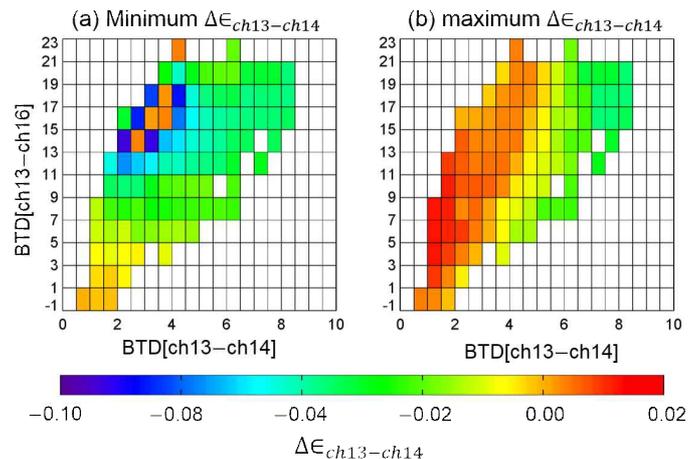


그림 9 AMI의 ch13, ch14에서의 구름방출률 차이 추정 조건표

- 3단계. 운정온도 추정하기

1, 2 단계에서 추정된 ϵ_{ch13} , $\Delta\epsilon_{ch13-ch14}$ 범위로 각 화소에게 허용되는 운정온도 범위를 추정한다. 추정된 최소값 ϵ_{ch13} 부터 최대값 ϵ_{ch13} 범위 안에서, 식(12)와

식(14)의 온정온도가 가까워질 때까지 ϵ_{ch13} 를 0.01씩 증가시켜간다. 이때 ϵ_{ch14} 는 식(15)와 2단계에서 추정된 $\Delta\epsilon_{ch13-ch14}$ 값을 따른다. 이때 $\Delta\epsilon_{ch13-ch14}$ 역시 상수가 아닌, 각 화소에 적합한 범위로 제공되기 때문에, 우리는 단일 온정온도가 아닌, 온정온도 범위를 추정하게 된다.

- 4단계. 최대/최소 온정온도 산출

3단계에서 추정된 온정온도 범위에서 최대값, 최소값을 구한다. 대표 온도값으로 온정온도 범위의 평균값으로 한다.

2.5.3.3. 온정온도/기압/고도 변환

온정온도에서 기압/고도로, 혹은 온정기압에서 온정온도/고도로 변환은 NWP의 온도/기압/고도 프로파일의 수직적 내삽을 통해 이루어진다. 표 6은 온정온도가 기압으로 바뀌는 코드를 설명하고 있다.

표 6 GK-2A의 온정온도에서 온정기압 변환 프로시저

```

DO k = 7, nz -1
  IF (ctt(i,j) < temp_prop(1,1,7)) ctp(i,j) = pres(7)
  IF (ctt(i,j) > temp_prop(1,1,nz)) ctp(i,j) = pres(nz)
  IF (ctt(i,j) >= temp_prop(1,1,k) .AND. ctt(i,j) <=
      temp_prop(1,1,k+1)) THEN
    ratio = (ctt(i,j) - temp_prop(1,1,k)) /
            (temp_prop(1,1,k+1) - temp_prop(1,1,k))
    ctp(i,j) = ratio*pres(k) + (1.-ratio)*pres(k+1)
  ENDIF
ENDDO

```

2.5.3.4. 운상/온정온도/기압/광학두께의 물리적 일관성 유지

본 알고리즘은 크게 두 번 수행된다고 앞서 설명하였다(2.2 절 참고). 초기 과정은 운상 및 온정온도/기압을 산출하는 과정이다. 이것이 입력자료로 활용되어 DCOEW에서 구름광학두께가 산출된다. 구름광학두께를 입력자료로 다시 온정산출물 알고리즘이 구동된다. 이때, 운상/온정온도(기압)/광학두께와의 물리적 일관성을 보완하기 위한 과정이 진행된다.

- 1단계. 운상 - 온정온도

초기에 얼음상으로 산출되었으나 온정온도가 270 K 이상인 경우 액체상으로 교체한다. 액체상으로 바뀐 구름 화소는 그에 따라 온정온도가 재 산출된다. 또한 270 K 아래인데 액체상인 경우, 과냉각상일 가능성이 크기 때문에 온상의 Flag 정보에 반영한다.

- **2단계. 구름광학두께 - 온정온도**

본 알고리즘에서 소개한 권운 산출 기법은 얇은 권운인 경우에 정확도가 더 높다. 아주 두꺼운 구름인 경우 구름 방출률을 고려하기보다는 대기 영향을 보정하여 단일 채널에서 온정온도를 추정하는 것이 정확할 수 있다. 따라서 얼음상에서 구름광학두께가 큰 화소들은 액체상 온정온도 산출 기법인 복사보정법을 적용하여 온정온도를 재 산출한다. 야간인 경우거나, 주간에도 구름광학두께 자료가 없는 구름화소에서는 초기 산출시 중간산출물로 산출되는 구름방출률을 사용하여 구름 방출률이 0.98 이상인 경우는 복사보정법으로 온정온도를 추정한다.

2.6. 산출물

운정 산출물의 주 출력자료는 운상(Cloud PHase, CPH, 표 7), 운정온도(Cloud Top Temperature, CTT, 표 8), 운정기압(Cloud Top Pressure, CTP, 표 9), 운정고도(Cloud Top Height, CTH, 표 10) 이다. 추가로 ch13의 구름방출률(Cloud Emissivity at around 11 μm , CLD_EMIS_11, 표 11) 또한 출력된다.

표 7 운상(CPH) 출력 구조

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CPH	byte	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud phase	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	255	byte
			valid_min	1	byte
			valid_max	6	byte
			units	–	string
			grid_mapping	gk2a_imager_projection	string
			product_meanings	0: Clear 1: Water Phase 2: Ice Phase 6: Uncertain Phase	string
			ancillary_variables	_flag	string

표 8 운정온도(CTT) 출력 구조

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTT	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top temperature	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65335	byte
			valid_min	0	byte
			valid_max	35000	byte
			scale_factor	0.01	string
			add_offset	0	
			units	K	
			grid_mapping	gk2a_imager_projection	string
			product_meanings	-	string
			ancillary_variables	CTT_flag, CTPS_flag	string

표 9 운정기압(CTP) 출력 구조

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTP	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top pressure	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65335	int
			valid_min	0	byte
			valid_max	120000	byte
			scale_factor	0.01	string
			add_offset	0	
			units	hPa	
			grid_mapping	gk2a_imager_projection	string
			product_meanings	-	string
			ancillary_variables	CTP_flag, CTPS_flag	string

표 10 운정고도(CTH) 출력 구조

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTH	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top height	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65335	int
			valid_min	0	byte
			valid_max	1700	byte
			scale_factor	0.01	string
			add_offset	0	
			units	km	
			grid_mapping	gk2a_imager_projection	string
			product_meanings	-	string
			ancillary_variables	CTH_flag, CTPS_flag	string

표 11 Ch13에서의 구름방출률 출력 구조

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CLD_ EMIS_ 11	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud emissivity at ch13	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65335	int
			valid_min	0	byte
			valid_max	1700	byte
			scale_factor	0.01	string
			add_offset	0	
			units	km	
			grid_mapping	gk2a_imager_projection	string
			product_meanings	-	string
			ancillary_variables	CTH_flag, CTPS_flag	string

3. 모의자료 및 검증

3.1. 모의 입력자료 및 검증자료

GK2A 발사 전 알고리즘 시험은 GK2A와 해상도가 같으며 동아시아 및 태평양지역을 관측영역으로 하는 Himwari-8 정지궤도위성 자료를 이용하여 이루어졌다.

본 문서의 알고리즘 시험은 세 가지 버전으로 진행되었다. 알고리즘 시험 A는 2017년 7월 24일-8월 7일 기간동안 Aqua MODIS의 운상, 운정온도/기압/고도와 비교이다. 이때 사용된 모의입력자료 및 검증자료는 각각 표 12와 표 13에 정리되었다.

알고리즘 시험 B는 국제 구름 산출 그룹 회의(International Cloud Working Group, ICWG)의 상호비교이다. 세계 위성 운영 기관들과 공통의 검증 날짜를 결정(2015년 8월 19일), 정성적/정량적 상호비교로 이루어졌다. 이를 위한 모의자료 및 검증자료는 표 14, 표 15에 정리되었다.

알고리즘 시험 C는 GK2A의 궤도상시험(In orbit test) 결과이다. 2019년 8월 1일-8월 31일 기간의 GK2A L1B를 사용하였으며, Aqua MODIS의 운상, 운정온도/기압/고도와 비교이다. 이때 사용된 모의입력자료 및 검증자료는 각각 표 16와 표 17에 정리되었다.

표 12 알고리즘 시험 A의 모의입력자료

시험 기간	입력자료
2017.07.24. 00UTC -2017.08.07. 2350 UTC	himawari8_ahi_le1b_ch11_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch13_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch14_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch15_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch16_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin

표 13 알고리즘 시험 A의 검증자료

시험 기간	검증자료
2017.07.24. 00UTC -2017.08.07. 2350 UTC	MYD03.A2017JULDAY.HHMM.006.2017220072209.hdf
	MYD06.A2017JULDAY.HHMM.006.2017220072209.hdf

표 14 알고리즘 시험 B의 모의입력자료

시험 기간	입력자료
2015.08.19. 00UTC -2015.08.19. 2350 UTC	himawari8_ahi_le1b_ch11_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch13_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch14_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	himawari8_ahi_le1b_ch15_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin

표 15 알고리즘 시험 B의 검증자료

시험 기간	검증자료
2015.08.19. 00UTC	MOD03.A2017JULDAY.HHMM.006.2017220072209.hdf
-2015.08.19. 2350 UTC	MOD06.A2017JULDAY.HHMM.006.2017220072209.hdf

표 16 알고리즘 시험 C의 모의입력자료

시험 기간	입력자료
2019.08.01. 00UTC -2019.08.31. 2350 UTC	gk2a_ami_le1b_ir087_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	gk2a_ami_le1b_ir105_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	gk2a_ami_le1b_ir112_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	gk2a_ami_le1b_ir123_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin
	gk2a_ami_le1b_ir133_fd020ge_YYYYMMDDHHMM.bin

표 17 알고리즘 시험 C의 검증자료

시험 기간	검증자료
2019.08.01. 00UTC	MYD03.A2019JULDAY.HHMM.006.YYYYJUL*****.hdf
-2019.08.31. 2350 UTC	MYD06.A2019JULDAY.HHMM.006.YYYYJUL*****.hdf

3.2. 검증 방법

3.2.1. 알고리즘 시험 A

검증은 MODIS 데이터 중 주변부 (5×5) 화소가 모두 구름인 경우에 대해서만 검증을 진행하였다. 시간은 동시간대 관측자료와 공간은 AHI와 MODIS가 1km 차이 이내에 해당하는 화소를 선택하였다. 검증 통겅값은 산출물마다 차이가 있다. 먼저 운상은 불연속값이므로 Proportion Correct (PC)를 검증 스코어로 이용하였다. 이 통겅값은 표 18에서 정의된 분할표의 각 요소들로 계산된다. 검증 스코어의 정의는 식(16)을 따른다. PC는 0과 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 산출 결과가 참값이라 여기는 관측값과 일치도가 높음을 의미한다.

표 18 운상 산출물 검증을 위한 분할표(contingency table)

	Reference (MODIS)	
	Yes	No
GK-2A Products		
Yes	a	b
No	c	d

$$PC = \frac{(a+d)}{n}$$

(16)

운정온도/기압/고도의 경우는 평균 바이어스(mean bias)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE) 값을 사용하였으며, 계산 식은 다음과 같다.

$$\text{mean bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (17)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (18)$$

3.2.2. 알고리즘 시험 B

2018년 국제 구름 산출 그룹 회의에 참여한 기관은 총 네 그룹이다(표 19). 먼저 정성적 분석으로 각 산출결과장면은 Himawari-8 RGB 트루컬러 이미지와 비교하였다. 정성적 분석을 위한 장면은 운상/운정온도 산출이 어렵다고 알려진 다섯 가지 지역을 다음과 같이 선정하였다 - 1. 태양광 전반사(Sun glint), 2. 조각 구름(Fractional cloud), 3. 사막 위 구름(Cloud over desert), 4. 권운(Cirrus), 5. 광경로가 큰 지역의 구름(Slaint view)(그림 10). 운정온도의 경우 다양한 구름이 분포하는 태풍 지역(6, 그림 10)에서 각 기관의 산출물과 MODIS와의 정량적 검사를 추가적으로 진행하였다. 이때 알고리즘 시험 A와 동일하게 MODIS 데이터 중 주변부 (5×5) 화소가 모두 구름인 경우에 대해서만 검증을 진행하였다. 시간은 동시간대 관측자료와 공간은 AHI와 MODIS가 1km 차이 이내에 해당하는 화소를 선택하였다.

표 19 참여기관 및 제공한 구름 산출물

참여기관	운상	운정온도
JMA	○	○
KMA	○	○
NWCSAF	○	○
UKMET	○	○

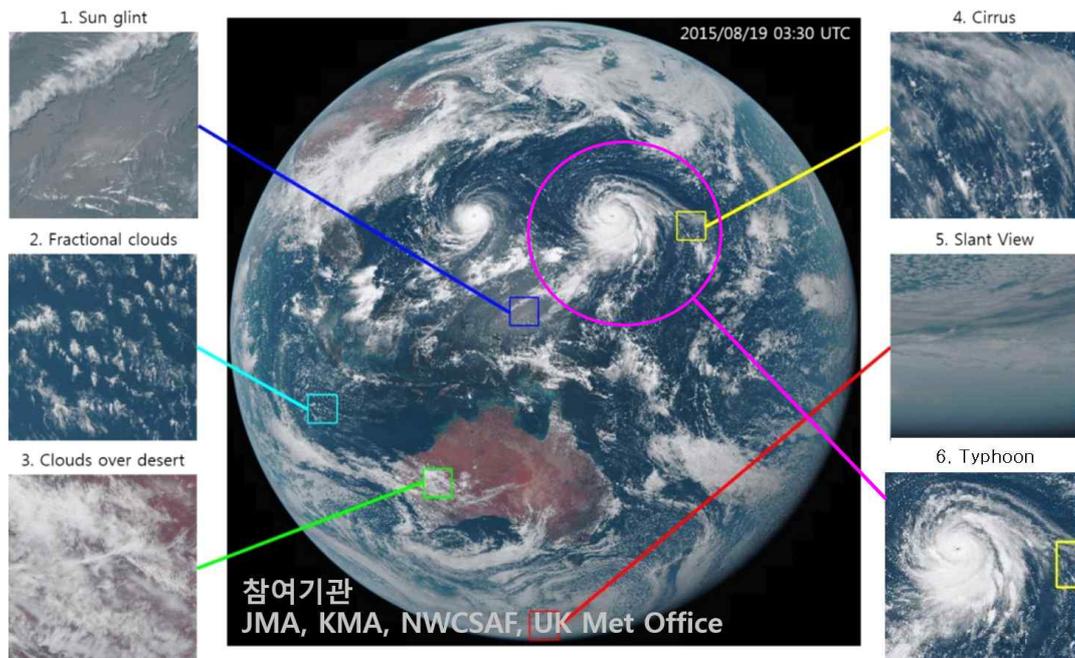


그림 10 ICWG 상호비교 날짜의 Himawari-8 RGB 이미지. 정성적 비교를 위해 선정된 6개 지역; 1. 태양광 전반사(파랑), 2. 조각 구름(시안), 3. 사막 위 구름(녹색), 4. 권운(노랑), 5. 광경로가 큰 지역의 구름(빨강), 6. 태풍지역

3.3. 검증 결과

3.3.1. 알고리즘 시험 A

그림 11은 알고리즘 시험(1)의 운상(CPH), 운정온도(CTT), 운정기압(CTP), 그리고 운정고도(CTH) 전구 영역 결과를 보이고 있다. 관측 시간은 2017년 7월 24일 0750 UTC이다. 운상의 경우 하늘색, 파란색, 노란색은 각각 얼음상, 액체상, 불확실상을 나타낸다. 운정온도(운정고도)는 빨간색으로 갈수록 300 K (1000 hPa)에 가까운 높은 온도(기압)이며 운정기압은 빨간색으로 갈수록 16 km에 다다른 상층운에 해당한다.

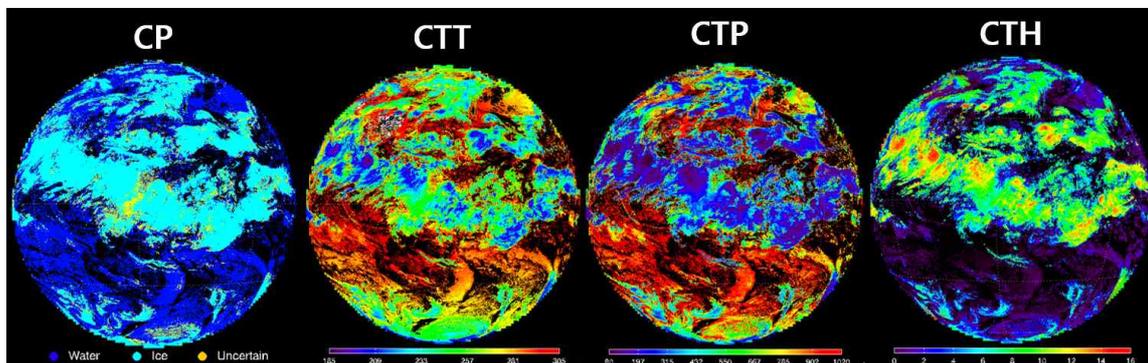


그림 11 2017년 7월 24일 0750 UTC의 운상(CPH), 운정온도(CTT), 운정기압(CTP), 운정고도(CTH)

3.3.1.1. 운상

알고리즘 시험 기간 동안 검증 결과는 표 20과 같다. MODIS와의 검증 결과를 지역에 따라 나타내면 그림 12와 같다. 즉, GK-2A의 관측영역 안에서 MODIS의 적외탐지 운상 산출물이 80% 이상의 일치율을 보인다.

표 20 운상 알고리즘 검증 결과

산출물	목표정확도	전체기간 통갯값
액체상	80%	88.99%
얼음상		88.44%

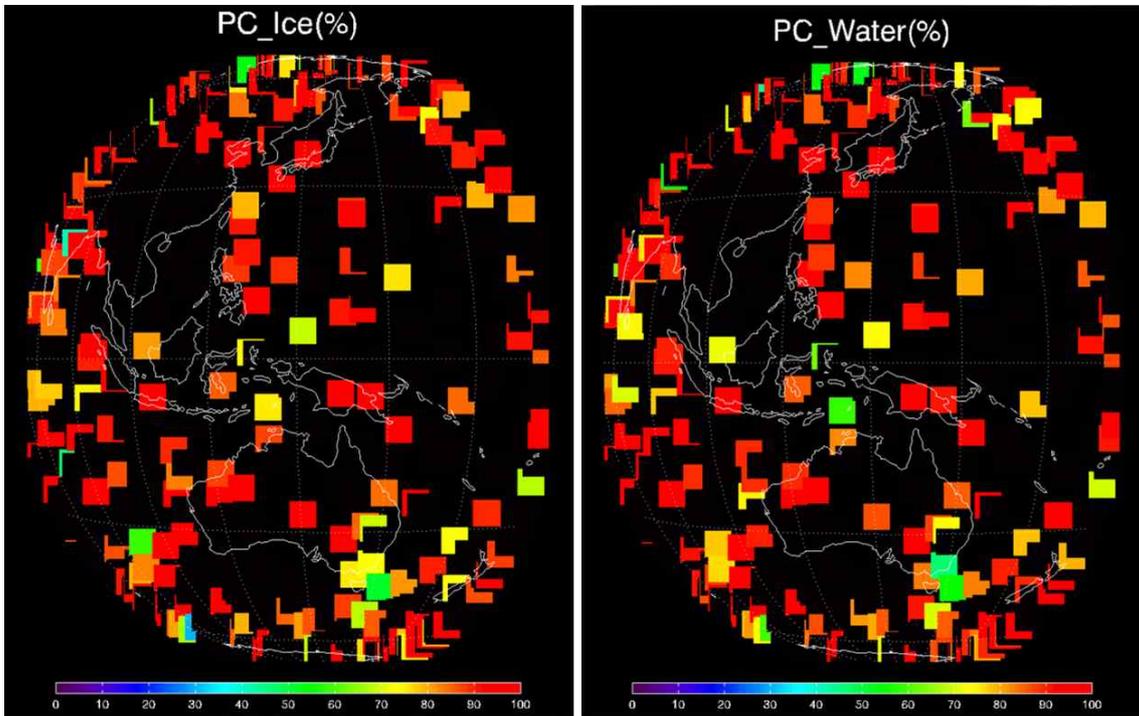


그림 12 GK-2A의 얼음상(왼쪽)/액체상(오른쪽) 검증 스코어

3.3.1.2. 운정온도/기압/고도

운정온도/기압/고도 산출물에 대한 검증 결과는 표 21와 같다. 현재 버전에서는 목표정확도에 도달하지 못한 수준이나, IOT(In Orbit Test) 기간을 통해 구름방출률 추정 조건표를 개선하여 목표정확도에 상응하는 성능을 보일 것이라 기대한다(5단원 상세 설명).

표 21 운정온도/기압/고도 알고리즘 검증 결과

산출물	목표정확도	전체기간 통갯값
운정온도 (K)	Bias = ± 5 [K] RMSE = 7 [K]	Bias = 11.04 [K] RMSE = 26.54 [K]
운정기압 (hPa)	Bias = ± 50 [hPa] RMSE = 150 [hPa]	Bias = 78 [hPa] RMSE = 208 [hPa]
운정고도 (m)	Bias = ± 0.6 [km] RMSE = 1.5 [km]	Bias = -1.78 [km] RMSE = 3.98 [km]

3.3.2. 알고리즘 시험 B

3.3.2.1. 운상

그림 11에서 선정된 5가지 지역에 대하여 Himawari RGB와 각 기관별 운상을 상호비교한 결과는 그림 13과 같다. 그림 13에서 가장 왼쪽 열은 RGB 이미지이다. 차례로 NWCSAF, JMA, KMA, UKMET 산출물이며, 각 행은 5가지 지역에 대한 결과이다. 연두색은 액체상, 파란색은 얼음상이며, 본 검증에서 혼합상과 불확실상은 액체상으로 정의하였다.

- 광경로가 큰 지역(Slant view): FOV가 큰 지역에서 KMA를 제외한 다른 산출물은 구름 탐지에 제한을 두고 있다. KMA는 이 지역에서 구름이 과대모의되며, 이때의 구름을 얼음상으로 정의한다. UKMET는 나머지 기관에 비교하여 얼음을 과대모의한다.
- 권운(Cirrus): 네 기관 모두 일관되게 권운의 운상을 얼음상으로 잘 탐지하고 있다. 다만 구름 가장자리에서 기관별 구름 탐지의 차이가 보인다.
- 사막 위 구름(Cloud over desert): 지면이 밝은 경우 BTD[ch11-ch14]에 영향을 준다. KMA는 대부분의 구름을 액체상으로, UKMET은 얼음상으로 탐지하고 있다.
- 조각 구름(Fractional cloud): 각 산출물이 모두 액체상으로 잘 산출하고 있으나, 구름 탐지가 각 기관별로 차이가 있다. NWCSAF가 구름 탐지를 과소모의하는 경향을 보인다.
- 태양 전반사(Sun glint): KMA의 경우 태양 전반사가 있는 지역을 구름으로 산출하며, 액체상으로 산출하고 있다.

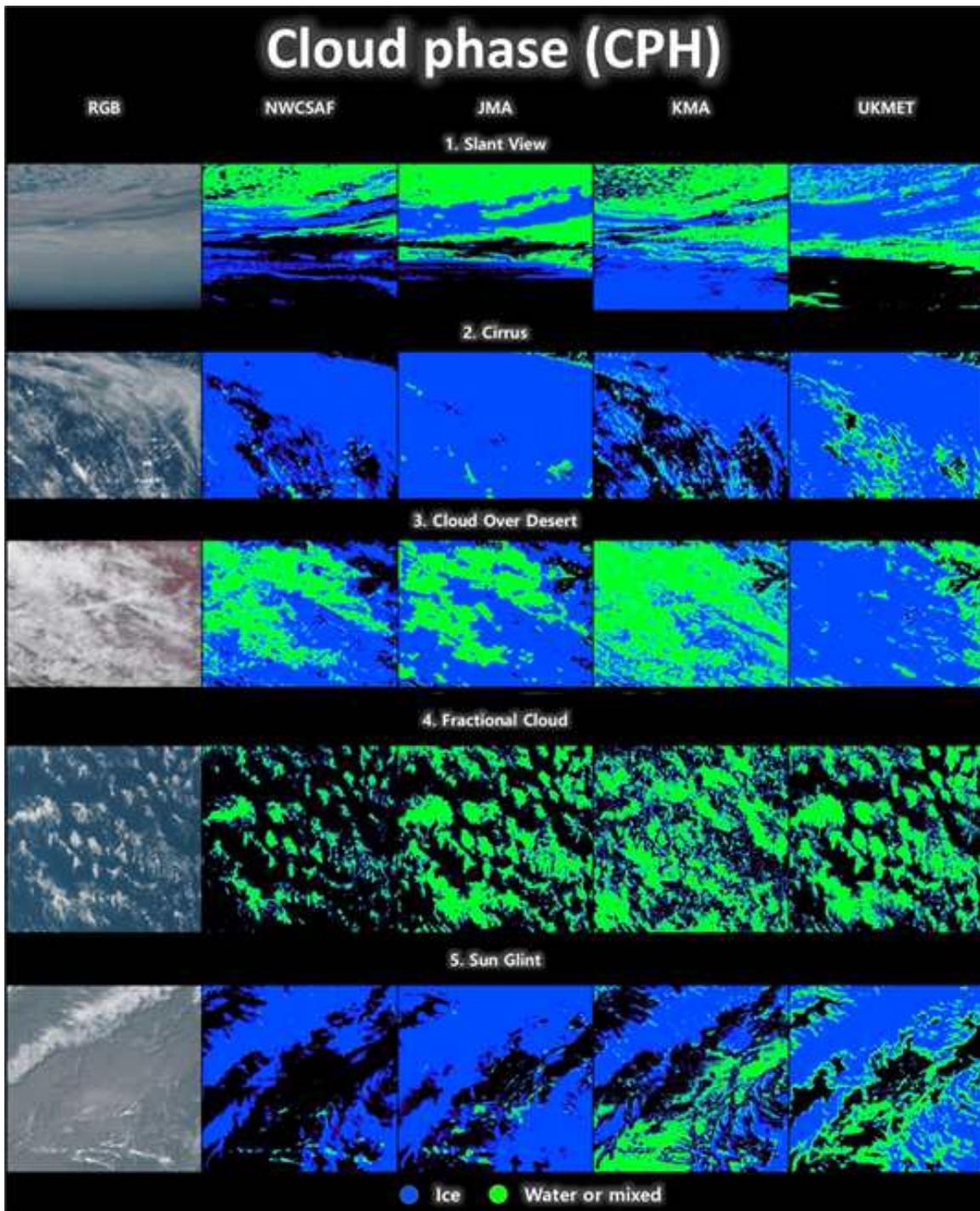


그림 13 RGB 및 참여 기관 운상 산출물과의 정성적 비교. 얼음상은 파란색, 액체상(혼합상 및 불확실상 포함)은 연두색으로 표현함

3.3.2.2. 운정온도/운정온도/기압/고도

그림 11에서 선정된 5가지 지역에 대하여 Himawari RGB와 각 기관별 운정온도를 상호비교한 결과는 그림 14과 같다. 그림 14에서 가장 왼쪽 열은 RGB 이미지이다. 차례로 NWCSAF, JMA, KMA, UKMET 산출물이며, 각 행은 5가지 지역에 대한 결과이다. 운정온도 산출물의 범위는 190-310 K 으로 하단의 컬러 바(color bar)의 색으로 표현하였다.

- 광경로가 큰 지역(Slant view): FOV가 큰 지역에서 KMA를 제외한 다른 산출물은 구름 탐지에 제한을 두고 있다. KMA는 이 지역에서 구름이 과대모의되며, 산출된 운정온도는 네 기관이 유사한 분포를 보이고 있다.
- 권운(Cirrus): 권운에서의 운정온도는 기관별 차이가 크게 나타난다. NWCSAF는 운정온도가 구름의 중심부터 가장자리까지 연속성있게 분포하고 있다. JMA는 다른 기관에 비하여 과소모의 하는 편이며, KMA와 UKMET은 구름의 가장자리와 구름 중심과의 온도차이가 크다.
- 사막 위 구름(Cloud over desert): 운상의 결과는 큰 차이가 났던 지역인데, 운정온도 분포는 비슷한 양상을 보이고 있다. UKMET은 대부분이 얼음상으로 탐지한 지역인데, 약 270 K(연두색 계열)에 가까운 구름이 다소 많이 보인다. 이는 물리적 일관성이 잘 유지되지 않아 보인다.
- 조각 구름(Fractional cloud): KMA의 경우 운정온도의 범위가 다른 기관에 비해 높게 나타난다. 자세히 살펴보면, 이것은 구름탐지에서 원인을 찾을 수 있다. RGB와 비교했을 때 구름이 아닌 지역들을 구름으로 탐지하였고, 이때 산출된 값은 지면에 가까운 온도일 것이다.
- 태양 전반사(Sun glint): 권운 장면 관찰과 비슷하게, NWCSAF는 운정온도가 구름 가장자리까지 매끄럽게 이어진다. JMA의 경우는 다소 과소모의되는 경향을 보이며, KMA와 UKMET는 전반사 지역을 구름으로 인식, 지면에 가까운 온도를 나타내고 있다. 또한 구름의 중심부와 가장자리의 차이가 크다.

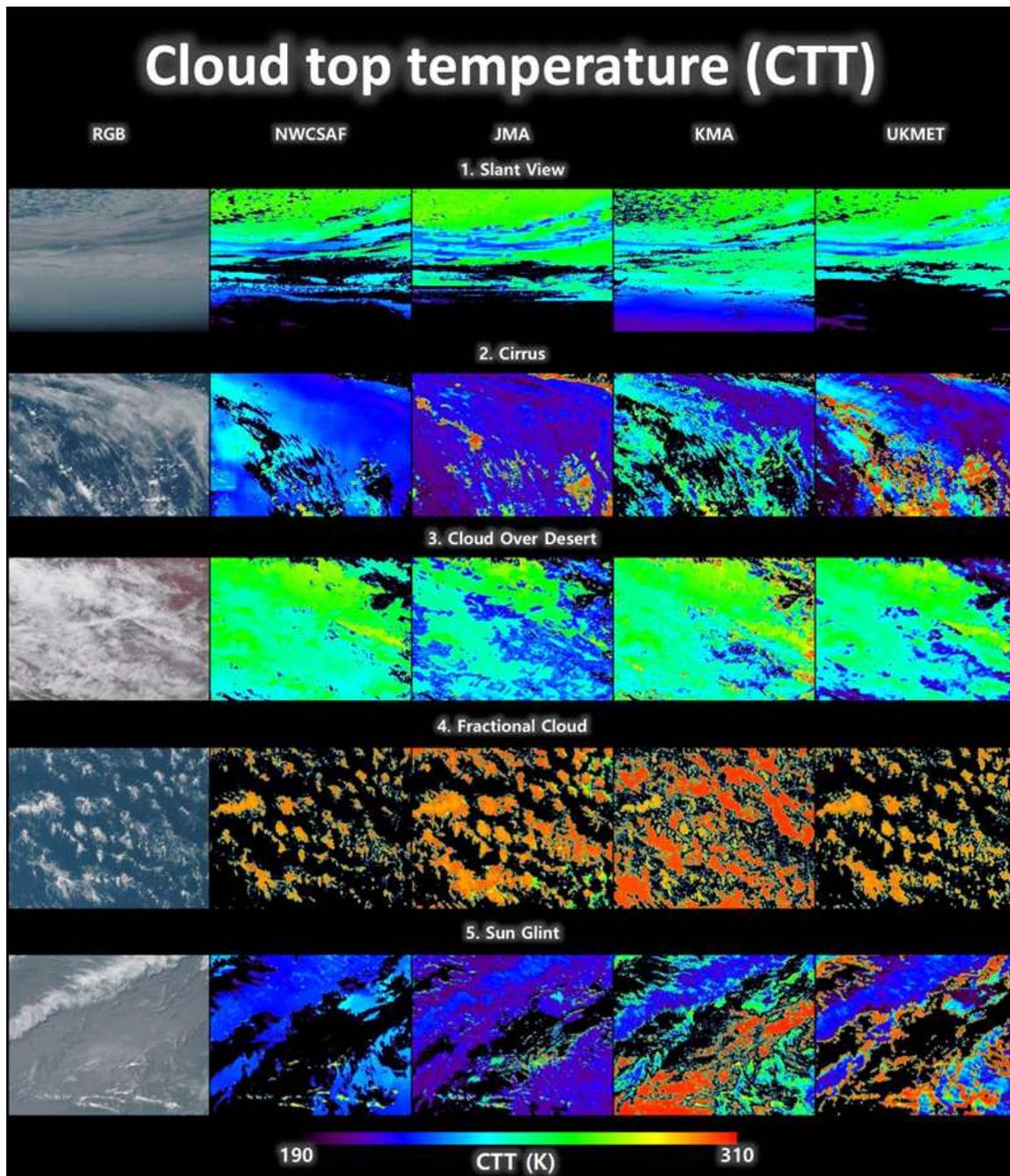


그림 14 RGB 및 참여 기관 운정온도 산출물과의 정성적 비교. 운정온도(190-310 K)는 그림 13의 하단에 있는 컬러 바의 색깔로 표현됨

추가로 2015년 8월 19일 0010 UTC, 태풍(지역은 그림 11의 6번째 장면)에서 4기관과 MODIS와의 정량적 검증을 진행하였다. 그림 15의 왼쪽 네 개의 그림이 각 기관에서 산출된 태풍 장면 위에서의 운정온도이며, 맨 오른쪽 그림이 MODIS 운정온도 결과이다. 검증 스코어로(상관계수 R; 바이어스 Bias; 평균 제곱근 오차 RMSE)는 NWCSAF가 가장 높았으며, JMA는 MODIS를 포함한 타 기관과 비교해 볼 때 과소모의 경향이 있다. KMA의 운정온도 분포는 MODIS 및 NWCSAF와 견줄만한 결과를 보이고 있다.

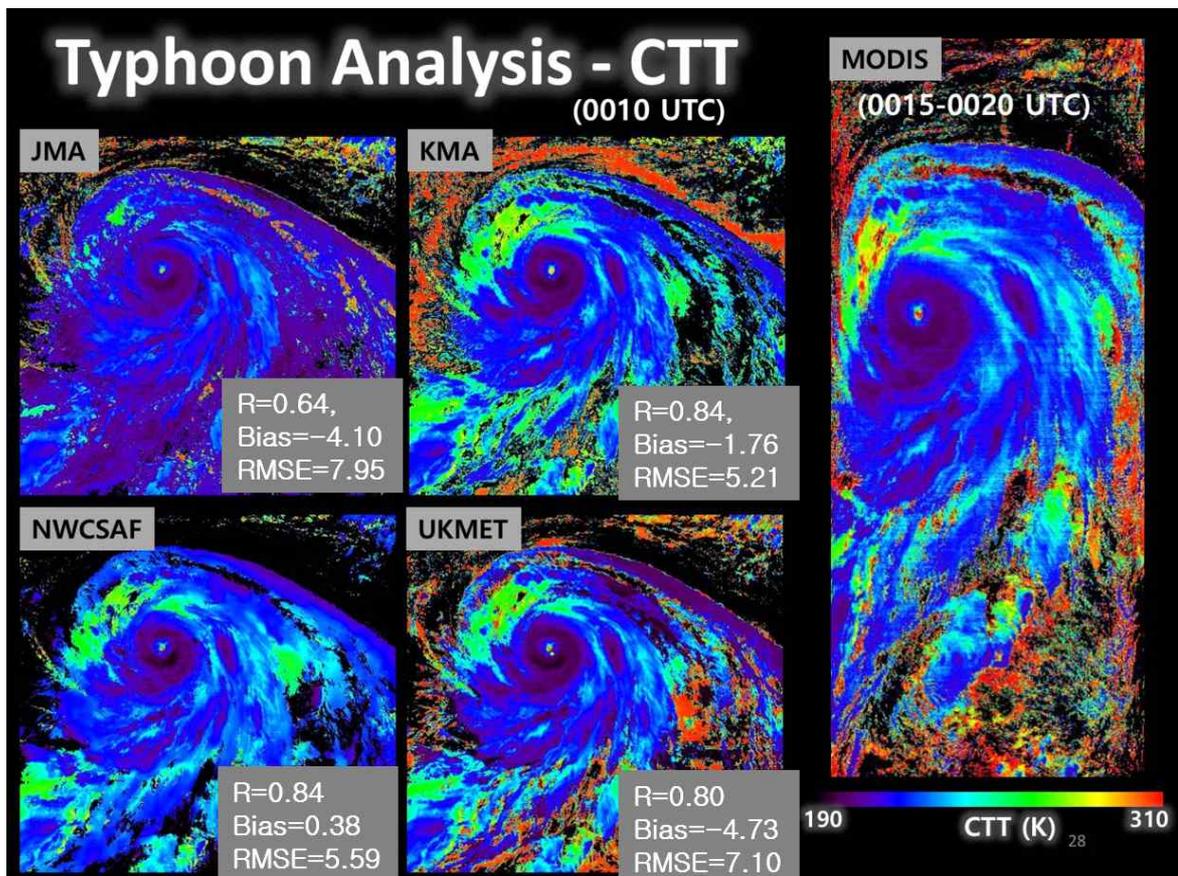


그림 15 2015년 8월 19일 0010 UTC, 태풍 Atsani. ICWG 참여기관의 운정온도와 MODIS/Aqua(0015-0020 UTC)의 운정온도 비교 결과. 상관계수(R), 편차(Bias), 평균 제곱근 오차(RMSE)를 나타냄

3.3.3. 알고리즘 시험 C: 궤도상 시험 결과

2019년 7월부터 9월까지 AMI/GK2A의 궤도상 시험(in orbit test)가 진행되었다. 그림 16은 2019년 8월 7일 MODIS 운상 산출물(왼쪽)과 AMI 운상 산출물(오른쪽)을 비교하는 장면 그림이다. 파란색, 하늘색, 연두색은 각각 액체상, 얼음상, 불확실상을 나타낸다. 태풍과 주변의 권운을 얼음상으로 잘 탐지하고 있으며, 액체상과 얼음상의 경계, 구름 가장자리에서 불확실상을 보인다. MODIS에 비교하여 AMI가 불확실상을 과소탐지하는 경향을 보인다. 8월 한달 기간 검증값은 표 22와 같이 PC 값이 91%이며 이는 본 알고리즘의 목표정확도를 달성한 값이다.

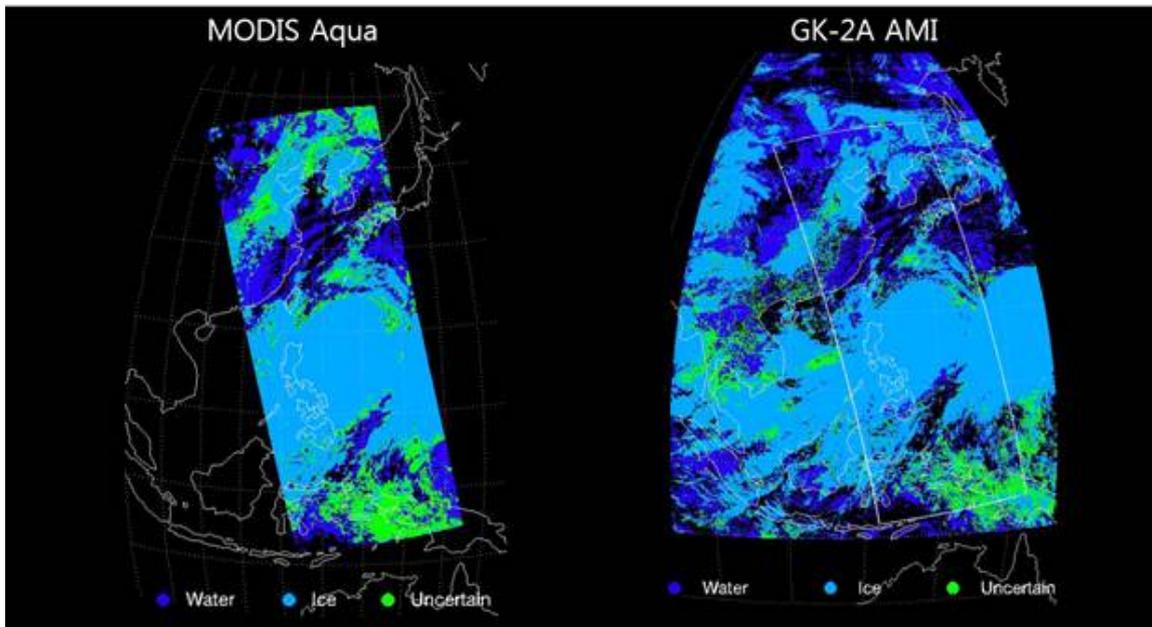


그림 16 2019년 8월 7일 0450 UTC의 MODIS 운상과 AMI 운상. 파란색, 하늘색, 연두색은 각각 액체상, 얼음상, 불확실상을 나타냄

표 22 운상 알고리즘 검증 결과

산출물	목표정확도	전체기간 통겅값
운상	80%	91%

그림 17은 2019년 8월 7일 MODIS 운정온도, 기압, 고도 산출물(위쪽)과 AMI 운정온도, 기압, 고도 산출물(아래쪽)을 비교하는 장면 그림이다. 전반적인 구름 온도 패턴은 비슷하나, MODIS 구름온도(고도)에 비교하여 본 알고리즘 산출물의 구름온도(고도)가 양의 바이어스(음의 바이어스)를 나타내고 있다. 특히나 그 차이가 태풍의 주변에 존재하는 권운에서 두드러지게 나타내고 있다. 정량적인 비교는 표

23에서 볼 수 있다. 운정온도/기압/고도 모두 Bias 측면에서는 목표정확도를 달성하고 있으나 RMSE는 목표정확도보다 다소 높게 나타난다.

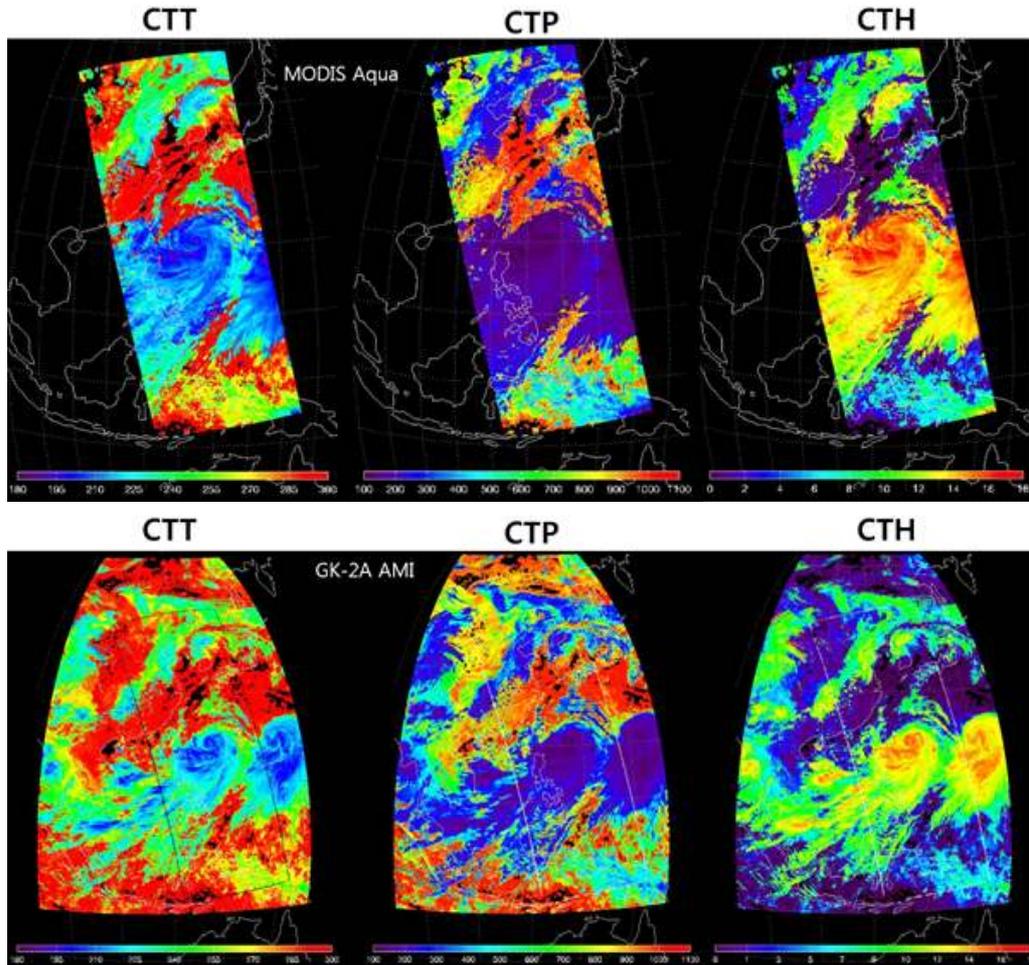


그림 17 2019년 8월 7일 0450 UTC의 MODIS 운정온도/기압/고도(위쪽)와 AMI의 운정온도/기압/고도 산출물(아래쪽)

표 23 운정온도/기압/고도 알고리즘 검증 결과

산출물	목표정확도	검증기간 통갯값
운정온도 (K)	Bias = ± 5 [K] RMSE = 7 [K]	Bias = 4.01 [K] RMSE = 7.89 [K]
운정기압 (hPa)	Bias = ± 30 [hPa] RMSE = 50 [hPa]	Bias = 19.17 [hPa] RMSE = 57.93 [hPa]
운정고도 (m)	Bias = ± 600 [m] RMSE = 1000 [m]	Bias = -580 [m] RMSE = 1180 [m]

4. 현업 운영 시 고려사항

4.1. 수치계산 고려사항

본 알고리즘은 운상, 운정온도/기압/고도를 산출할 때 구름방출률을 사용한다. 운상은 구름방출률 비율을 사용한다. 이때 분모가 0이 되는 경우는 수학적으로 무한대 값이 발생할 수 있다. 운정온도의 경우는 구름방출률 계산 시 분모의 구름 복사와 청천복사 차이가 아주 작은 경우, 역시 수학적으로 무한대에 가까운 값이 발생할 수 있다. 본 알고리즘에서는 이러한 값이 발생할 경우 품질 정보에 기록을 남기도록 하였다.

4.2. 프로그래밍 절차상의 고려사항

본 산출물은 구름탐지가 선행되어야 한다. 또한 NWP 프로파일을 사용한 RTTOV의 EBBT 값, 청천복사량 값이 보조자료로 잘 산출된 이후 작동이 가능하다. 본 알고리즘은 두 차례 구동하도록 설계되었다. 첫 번째는 초기 운상, 운정온도/기압 값을 산출한다. 이 값을 입력자료로 DCOEW 프로그램이 실행되며, DCOEW로부터 구름 광학두께가 생성이 되면 다시 알고리즘이 구동된다. 두 번째 단계에서는 초기 운정 산출물 안의 물리적 일관성을 맞추는 작업이 수행된다. DCOEW는 주간만 산출되므로, 야간일 경우엔 초기값에서 생성된 구름방출률을 대신 사용하여 두 번째 단계가 수행된다.

4.3. 품질 평가 및 진단

운상 flag(표 24)는 과냉각상 정보 반영, 운정온도/기압/고도의 flag(표 25, 26, 27)는 본 알고리즘 기법에서 제공하는 각 화소당 허용가능한 운정온도/기압/고도의 범위, 최종 산출물 flag(표 28)에는 품질 정보를 담고 있다.

표 24 자료품질: 운상 산출물(CPH) 자료 품질 정보

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CPH_flag	byte	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud phase supercooled flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	255	byte
			valid_min	0	byte
			valid_max	1	byte
			units	-	string
			flag_meanings	0:Non-supercooled 1:Supercooled	string

표 25 자료품질: 운정온도 산출물(CTT) 자료 품질 정보

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTT_flag	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top temperature deviation flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65335	short
			valid_min	0	short
			valid_max	35000	short
			scale_factor	0.01	float
			add_offset	0	float
			units	K	string
flag_meanings	-	string			

표 26 자료품질: 운정기압 산출물(CTP) 자료 품질 정보

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTP_flag	int	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top pressure deviation flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	424967295	short
			valid_min	0	short
			valid_max	120000	short
			scale_factor	0.01	float
			add_offset	0	float
			units	hPa	string
flag_meanings	-	string			

표 27 자료품질: 운정고도 산출물(CTH) 자료 품질 정보

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTH_flag	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top height deviation flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	424967295	short
			valid_min	0	short
			valid_max	120000	short
			scale_factor	0.01	float
			add_offset	0	float
			units	hPa	string
flag_meanings	-	string			

표 28 자료품질: 운정 산출물(CTPS) 자료 품질 정보

Variable			Attribute		
Name	Type	Shape	Name	Value	Type
CTPS _flag	byte	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud top properties quality flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	255	byte
			valid_min	0	byte
			valid_max	8	byte
			units	-	string
			flag_meanings	0:Valid, good quality converged retrieval 1:Invalid pixel due to space view 2:Invalid due to cloud mask being clear 3:Errors duet to probable cloudy pixel 4:Invalid due to clear sky radiance 5:Invalid due to missing NWP temperature profile 6:Insignificant retrievals (large errors in CTT) 7:Invalid due to Nan/Infinite cloud emissivity 8:Failed to retrieve	string

4.4. 예외사항 처리

구름방출률이 합리적인 범위(0-1.1) 안에서 추정되지 못할 경우, 혹은 무한대(4.1에서 설명)가 나오는 경우, 복사보정법으로 운정온도를 재산출하도록 알고리즘을 설계하였다.

4.5. 검증 알고리즘

GK-2A의 검증 알고리즘은 (1) MODIS와 시공간 일치 화소 검출, (2) 구름의 가장자리 화소 제외(이를 위해 주변부 (5×5) 화소가 모두 같은 운상 산출물인 경우만 추출) (3) 각 산출물에 적합한 검증 스코어 계산(3단원에서 상세 설명) 로 구성되어 있다.

5. 가정 및 제한

5.1. 성능

GK-2A의 운정 산출물의 첫 번째 입력자료는 구름 탐지이다. 구름 오탐지 화소에서는 구름이 아닌 지면 복사량이 입력이 되어 운상, 운정온도/기압/고도 산출 알고리즘이 구동된다. 이는 산출물의 전체 분포도에 영향을 줄 수 있는 요소이다. 따라서 본 알고리즘 산출물의 성능은 구름 탐지 성능이 보장될 때 더욱 향상된다.

GK-2A 운상 산출물은 MODIS의 적외 탐지 운상 산출물과 80% 이상의 일치율을 보인다. 특히, 한반도를 포함한 동아시아 영역에서는 정확도가 높다. 운상탐지시 가장 큰 역할을 하는 AMI ch11은 사막이나 눈이 덮인 지역과 같이 반사도가 높은 지역에서는 불확실성이 크다는 단점이 있다. 또한 남반구 해안 쪽에서도 검증값이 다른 지역에 비해 다소 떨어지는 경향을 보인다.

GK-2A의 운정온도/기압/고도는 운상에 따라 산출 방법이 다르다. 따라서 운상의 정확도가 영향을 미칠 것이다. 액체상의 경우, 현존하는 기상위성의 대부분의 알고리즘들과 같은 접근 방식을 사용하고 있다. NWP의 정확도가 보장되고, RTTOV가 잘 수행이 된다면, 현존하는 타위성의 산출물과 견줄만한 운정온도 산출이 보장된다. 얼음상의 경우는, 자체적으로 얇은 권운의 운정온도/기압/고도 정확도를 높이는 독창적인 기술을 개발하였다.

5.2. 예상 센서 성능

해당사항 없음

5.3. 개선을 위한 사전 계획

5.3.1. 운상 산출물 개선

운상 산출물을 개선하기 위하여 β 경계값 재설정 필요하다. 구름방출률 모의는 복사전달모델로는 한계가 있기 때문에, IOT 기간에 여러 장면 검증 및 MODIS 또는 CALIOP과의 비교를 통하여 경험치에 근거한 경계값으로 교체하고자 계획한다.

5.3.2. 운정온도/기압/고도 산출물 개선

얼음상의 운정온도 정확도는 구름방출률 추정 조건표에 달려있다. 이 조건표는 광경로의 영향을 받을 수 있으므로, 위성천정각에 따라 다른 조건표가 적용되도록 알고리즘을 개발하였다. 향후 이 조건표에 대한 연구가 지속적으로 필요하다. IOT 기간에는 GK-2A의 관측 복사량과 AMI/MODIS의 시공간 일치된 위치의 MODIS 산출물을 기반으로 다양한 구름 자료를 수집, 경험적 조건표를 개발하려고 한다. 그림 18은 궤도상시험 기간에 개발한 조건표이다. 복사전달모델로 개발한 조건표 (그림 9)에 비교하여 볼 때 훨씬 조밀하다. 즉, 다양한 얼음상 입자가 포함되어 있음을 의

미한다. 그림 19는 경험적 조건표로 산출한 8월 7일 0450 UTC 운정고도 이다. 그림 17과 비교하였을 때 태풍 중심부와 가장자리의 권운 운정고도가 개선되었음을 확인할 수 있다.

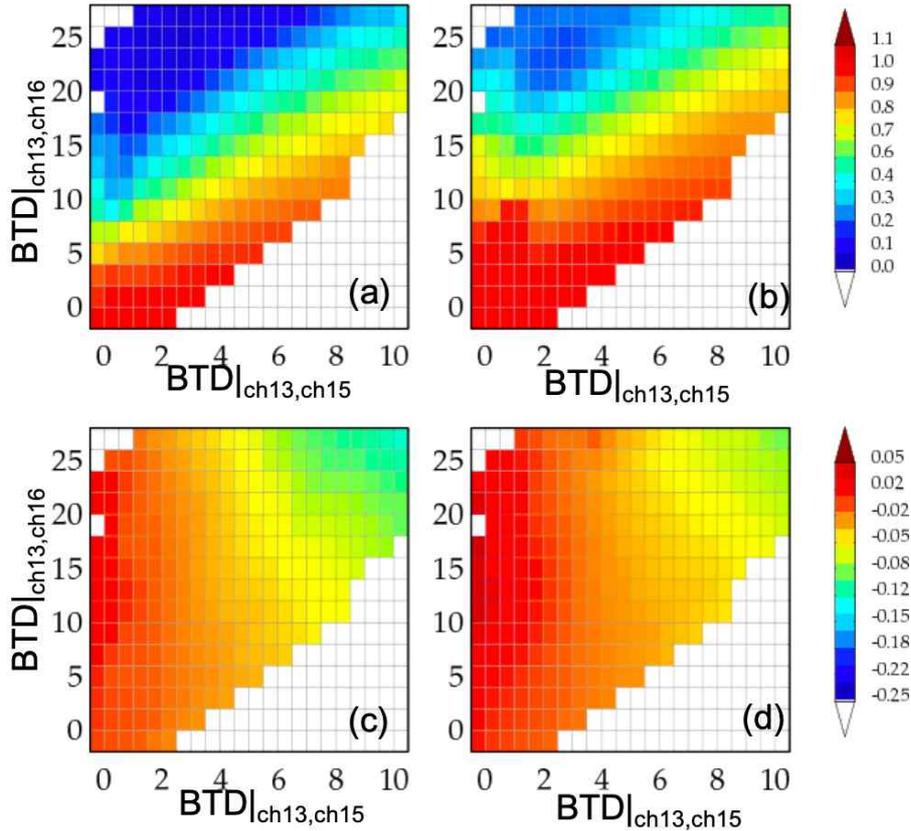


그림 18 MODIS와 AMI의 시공간일치를 통해 개발한 구름방출률 추정 조건표. (a) 구름 방출률 최소값, (b) 구름 방출률 최대값, (c) 구름방출률 차이 최소값, (d) 구름 방출률 차이 최대값 조건표임

5.3.3. 다층운/구름 가장자리 개선

다층운의 이슈는 적외탐지 운정온도의 모든 알고리즘에서 현재까지 극복하지 못한 문제 중 하나이다. 빠른 시일 내에 개선되기 어려운 이슈이나, AMI의 다양한 적외 대기창 채널(ch13, ch14, ch15)을 활용한다면, 다층운을 탐지 및 운정온도를 개선할 수 있는 가능성이 있다.

구름 가장자리 또한 적외 탐지 운정온도의 알고리즘들의 문제이다. 관측 해상도보다 작은 구름이 존재할 경우, 구름에 의한 복사량과 함께 대기로부터 방출되는 복사량이 포함되기 때문에 발생하는 문제이다. 특히, 본 문서에서 소개하고 있는 적외 대기창의 두 채널에서의 구름방출률 차이는 구름 가장자리의 복사량의 불확실성에

영향을 받을 수 있다. ICWG의 비교에서 NWCSAF는 구름 가장자리의 문제를 해결한 듯 보인다. 이는 구름 객체마다 운정온도를 재설정한 것으로 판단된다. 이를 위하여는 구름 객체 탐지 기법 등 지속적인 연구가 수반되어야 할 것이다.

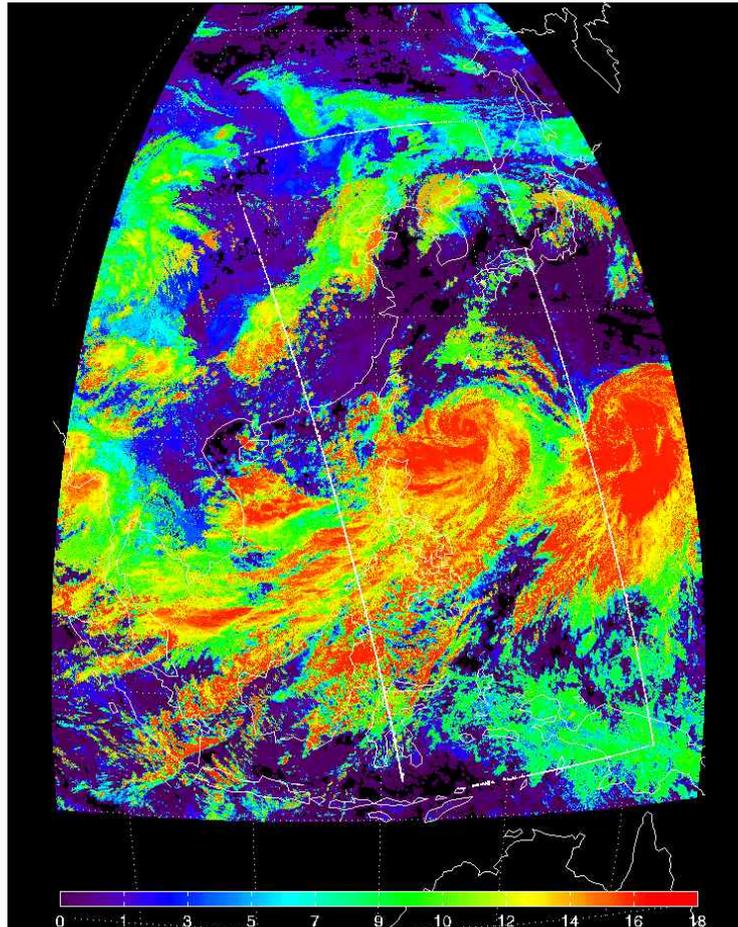


그림 19 관측기반 조건표를 사용하여 재산출한 운정 고도 (2019년 8월 7일 0450 UTC)

6. 참고문헌

- Baum, B. A., W. P. Menzel, R. A. Frey, D. C. Tobin, R. E. Holz, S. A. Ackerman, A. K. Heidinger, and P. Yang: MODIS cloud top property refinements for Collection 6. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 51, 1145–1163, 2012.
- Choi, Y.-S., C.-H. Ho, M.-H. Ahn, and Y.-S. Kim: Enhancement of the consistency of MODIS thin cirrus with cloud phase by adding 1.6- μm reflectance, *Int. J. Remote Sensing*, 20, 4669–4680, 2005
- Cox, K. S.: Observations of cloud infrared effective emissivity. *J. Atmos. Sci.*, 33, 287–289, 1976.
- Ellingson, R. G., J. Ellis, and S. Fels: The intercomparison of radiation codes used in climate models: Long wave results. *J. Geophys. Res.*, 96, 8929–8953, 1991.
- Hamann, U., A. Walther, B. Baum, R. Bennartz, L. Bugliaro, M. Derrien, P. N. Francis, A. Heidinger, S. Joro, A. Kniffka, H. Le Gleau, M. Lockhoff, H. J. Lutz, J. F. Meirink, P. Minnis, R. Palikonda, R. Roebeling, A. Thoss, S. Platnick, P. Watts, and G. Wind: Remote Sensing of cloud top pressure/height from SEVIRI: analysis of ten current retrieval algorithms. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 2839–2867, 2014.
- Heidinger, A. K., and M. J. Pavolonis: Gazing at cirrus clouds for 25 years through a split window. Part I: Methodology. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 1100–1116, 2009.
- Heidinger, A. K., Pavolonis, M. J., Holz, R. E., Baum, B. A., and Berthier, S.: Using CALIPSO to explore the sensitivity to cirrus height in the infrared observations from NPOESS/VIIRS and GOES-R/ABI, *J. Geophys. Res.*, 115, D00H20, 2010.
- Hogan, R. J., P. N. Francis, H. Flentje, A. J. Illingworth, M. Quante, and J. Pelon: Characteristics of mixed-phase clouds. I: Lidar, radar and aircraft observations from CLARE' 98, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129(592), 2089–2116, 2003.
- Holz, R. E., Ackerman, S. A., Antonelli, P., Nagle, F., and Knuteson, R.: An improvement to the High-Spectral-Resolution CO₂-slicing cloud-top altitude retrieval, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 23, 653–670, 2006.
- Inoue, T.: On the temperature and effective emissivity determination of semi-transparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 window region, *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 88–99, DOI:

- 10.2151/jmsj1965.63.1_88, 1985.
- Key, J. R. and A. J. Schweiger: Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet. *Computers & Geosciences*, 24, 443–451, 1998.
- Kim, H.-S., B. Baum, Y.-S. Choi: Use of spectral cloud emissivities and their related uncertainties to infer ice cloud boundaries: methodology and assessment using CALIPSO cloud products, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5039–5054, 2019.
- Liou, K. N.: An introduction to atmospheric radiation, *Academic Process*, 2002.
- Mecikalski, J. R., and K. M. Bedka: Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Mon. Wea. Review*, 134(1), 49–78, 2006.
- Menzel, W. P., Frey, R. A., Zhang, H., Wylie, D. P., Moeller, C. C., Holz, R. E., Maddux, B., Baum, B. A., Strabala, K. I., and Gumley, L. E.: MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1175–1198, 2008.
- Ohring, G., B. Wielick, R. Spencer, B. Emery, R. Datta: Satellite instrument calibration for measuring global climate change. *Bull. Amer. Meteor. Society*, 86, 1303–1313, 2005.
- Pavolonis, M. J.: Advances in extracting cloud composition information from spaceborne infrared radiances—A robust alternative to brightness temperatures. Part I: Theory. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 1992–2012, 2010.
- Prata, A. J.: Observations of volcanic ash clouds in the 10–12 μm window using AVHRR/2 data, *Int. J. Remote Sens.*, 10, 751–761, <https://doi.org/10.1080/01431168908903916>, 1989.
- Realmuto, V. K., A. J. Sutton, and T. Elias: Multispectral imaging of sulfur dioxide plumes from the East Rift Zone of Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 102, 15057–15072, 1997.
- Schmit, T.J., M. M. Gunshor, W. P. Menzel, J. J. Gurka, J. Li, and A. S. Bachmeier: Introducing the next generation advanced baseline imager on GOES-R, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2005, 86, 1079–1096, 2005.
- Strabala, K. I., S. A. Ackerman, and W. P. Menzel: Cloud Properties inferred from 8–12- μm Data. *J. Appl. Meteor.*, 33, 212–229, 1994.
- Wolters, E. L., R. Robeling, and A. Feijt: Evaluation of cloud phase retrieval methods for SEVIRI onboard Meteosat-8 using ground-based lidar and

cloud radar data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47, 1723-1738,
doi:10.1175/2007JAMC1591.1., 2008.

김준, 박경애, 서명석, 안명환, 이권호, 조희구, 최용상, 최형진, 한경수: *위성기상학*,
pp. 128~132, 2014.