

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

대류운발생탐지
(Convective Initiation)

박혜인

국가기상위성센터

Version 1.0

2019. 04. 15.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	<ul style="list-style-type: none"> • 알고리즘 초기 버전 	0.1.0.0	2016.3.11	박은빈, 이병일, 정성래
0.2	<ul style="list-style-type: none"> • 전반적인 알고리즘 방법 수정 • 수정한 세션 <ul style="list-style-type: none"> - 3. 알고리즘 소개 - 5.5 알고리즘 검증 	0.2.0.0	2016.11	김혜실, 이병일, 정성래
0.3	<ul style="list-style-type: none"> • 구름 객체화 기법에 대한 자세한 설명 추가 • 검증 방법 업데이트 • 수정한 세션 <ul style="list-style-type: none"> - 3.4.2 군집화 - 3.4.3 대류운 발생 가능성 판별 시험 - 4.2 알고리즘 시험 결과 - 5. 알고리즘 검증 	0.4.1.0.r1	2017.9.29	박혜인, 이병일, 정성래
0.4	<ul style="list-style-type: none"> • 대기안정도지수 적용(CAPE, LI, KI, SI) • Interest field에 BTD(16-13) 테스트 추가 • 수정한 세션 <ul style="list-style-type: none"> - 3.4 이론적 배경 - 4.3 알고리즘 시험 결과 - 5. 알고리즘 검증 	0.4.2.1	2018.4.24	박혜인, 이병일, 정성래
1.0	<ul style="list-style-type: none"> • 구름 객체화 조건 변경 • 검증결과 수정 • 수정한 세션 <ul style="list-style-type: none"> - 2. 알고리즘 소개 - 3.3 검증결과 - 4.5 검증 알고리즘 	0.6.0.1	2019.4.15	박혜인, 강희정, 정성래

<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
2.2 알고리즘 흐름도	2
2.3 입력자료	3
2.3.1 L1B	3
2.3.2 L2.....	4
2.3.3 보조 자료	4
2.4 이론적 배경	4
2.5 수학적 설명	5
2.5.1 대류운 마스크(Convective Cloud Mask)	5
2.5.2 군집화(Clustering)	13
2.5.3 대류운발생 가능성 판별 시험 (Interest fields tests).....	14
2.5.4 구름 객체 특성 검사	22
2.6. 산출물.....	23
3. 모의자료 및 검증	24
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	24
3.2 검증 방법.....	25
3.3 검증 결과.....	27
4. 현업운영 시 고려사항	32
4.1 수치계산 고려사항	32
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	32
4.3 품질 평가 및 진단	32
4.4 예외사항 처리.....	32
4.5 검증 알고리즘	32
5. 가정 및 제한	34
5.1 성능	34

5.2	예상 센서 성능	34
5.3	개선을 위한 사전 계획	34
6.	참고문헌	35

<표 목차>

표 2.1 대류운발생탐지 알고리즘 단계별 사용되는 채널.....	3
표 2.2 2017년 한반도 대류운 발생 사례	6
표 2.3 BTD [채널13, 채널15] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건	9
표 2.4 BTD [채널8, 채널13] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건	11
표 2.5 대류운 발생 가능성 판별을 위한 적외 채널 휘도온도차 시험(Interest field tests)	16
표 2.6 BTD[채널16, 채널13] 경계값 결정을 위한 SBDART 복사전달모델 모의 조건	17
표 2.7 구름상 경계값을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건	19
표 2.8 BT[채널13], BTD[채널8, 채널13], BTD[채널16, 채널13]의 10분 시간경향 상자 그림 통계 값	22
표 2.9 천리안위성 2A호 대류운발생탐지 산출물 정보.....	24
표 3.1 GK-2A/AMI와 Himawari-8/AHI의 센서 특성.....	25
표 3.2 Z-R 관계식에 따른 단위별 레이더 수치(NOAA NWS).....	26
표 3.3 2017년 8월 2일 대류운발생탐지 알고리즘 검증 통계 값.....	31
표 3.4 2017년 8월 6일 대류운 발생탐지 알고리즘 검증 통계 값.....	31

〈그림 목차〉

그림 2.1 대류운발생탐지 알고리즘 흐름도.....	3
그림 2.2 각 사례별 대류운 발생 6시간 전부터 발생 시각 까지의 (a) KI, (b) LI, (c) SSI 그리고 (d) CAPE 값을 나타낸 상자 그림(Box plot).....	7
그림 2.3 (a) Heidinger and Pavolonis (2009)에서 보고된 $11\mu\text{m}$ 와 $12\mu\text{m}$ 의 휘도온도차가 구름 방출률이 0부터 1까지 바뀔 때를 모의한 결과. 실선은 운정온도 = 220 K, $\beta = 1.05$, 파선은 운정온도 = 240 K, $\beta = 1.05$, 점선은 운정온도 = 240 K, $\beta = 1.20$ 조건임. (b) BTD[채널13, 채널15] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델을 이용한 200 hPa과 400 hPa 고도에서 구름입자유효반경에 따른 13번 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차(BTD[ch13, ch15]) 모의 결과(파란색은 얼음상, 빨간색은 액체상을 의미하며, 검은색 숫자는 구름방출률, 연두색 숫자는 구름광학두께, 심볼(원)의 크기는 3가지 구름입자유효반경(10, 15, 30 μm)에 해당함).....	8
그림 2.4 BTD[채널8, 채널 13] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델을 이용한 구름광학두께(τ)에 따른 운정온도에 대한 휘도온도차(BTD[채널08, 채널13]) 모의 결과(파란색: 구름광학두께가 3 이하인 경우, 녹색: 구름광학두께가 5 이상이 경우).....	10
그림 2.5 대류운 마스크 처리 흐름도	12
그림 2.6 2017년 8월 25일 0300 UTC의 (a) CCM 결과 영상(빨간색: 이미 성숙한 구름, 초록색: 청천 및 권운지역, 하늘색: 미성숙한 구름, 파란색: 불안정한 대기에서의 미성숙한 구름으로 CI 후보영역), (b) Himawari-8 AHI 채널 13번 영상, (c) CAPE 영상.....	13
그림 2.7 2017년 8월 25일 0300 UTC의 (a) 불안정한 대기에서 미성숙한 구름화소의 군집화 결과에 따른 구름객체 영상(각 색깔은 객체 번호), (b) Himawari-8 AHI 채널 13번 영상.....	14
그림 2.8 현재시각과 전 시각의 구름 객체 추적 기법.....	15
그림 2.9 BTD[채널16, 채널13] 경계값 결정을 위해 SBDART 복사전달모델을 이용한 운정고도(청색~녹색)와 구름광학두께(원 심볼 크기)에 따른 $10.4\mu\text{m}$ 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차(BTD13.3-10.4) 모의 결과(모의 조건은 표 2.6에 기술됨).....	18
그림 2.10 (a) Hayashi (2015)에서 보고된 수직운과 빙적운 탐지 (b) BTD[채널11, 채널14] 경계값 결정을 위한 액체상과 얼음상의 방출률과 입자유효반경에 따른 $11.2\mu\text{m}$ 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차(BTD[채널11,채널14])의 STREAMER 모의 결과.....	19
그림 2.11 미발달구름의 미세물리적 특성 변화에 대한 경계값 결정을 위한 판별시험 결과. (a) BT[채널13], (b) BTD[채널8, 채널13], (c) BTD[채널16, 채널13]의 시간에 따른 변동성 및 (d) 각 테스트 별 10분 시간경향 차이의 상자 그림(box plot).....	21
그림 2.12 Hit와 False 객체에 대한 채널 13번 휘도온도 평균값과 최솟값의 차이.....	23
그림 3.1 GK-2A CI 산출물 검증 대상 및 검증 자료 범위	27
그림 3.2 2017년 8월 2일 대류운 발생탐지 알고리즘 시험 결과. 위쪽부터 차례대로 대	

류운 마스크 결과, 구름 객체화 결과, 대류운 발생 가능 객체 결과를 보여주고 있음	28
그림 3.3 2017년 8월 2일 (a) 04:00 UTC, (b) 06:00 UTC 레이더 CAPPI 1.5 km 합 성 영상.....	28
그림 3.4 2017년 8월 6일 대류운 발생탐지 알고리즘 시험 결과. 위쪽부터 차례대로 대 류운 마스크 결과, 구름 객체화 결과, 대류운 발생 가능 객체 결과를 보여주고 있음	30
그림 3.5 2017년 8월 6일 (a) 07:10 UTC, (b) 08:10 UTC 레이더 CAPPI 1.5km 합성 영상.....	30

약어표

AII	Atmospheric Instability Index
AMI	Advanced Meteorological Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
CAPE	Convective Available Potential Energy
CAPPI	Constant Altitude Plane Position Indicator
CI	Convective Initiation
CM	Cloud Mask
CCM	Convective Cloud Mask
CT	Cloud Type
CWG	Convection working group
dBZ	DeciBel relative to Z (Z: equivalent reflectivity factor)
ELA	Extended Local Area
GK-2A	Geo-KOMPSAT-2A
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
JMA	Japan Meteorological Agency
KI	K-Index
L1B	Level 1B
LA	Local Area
LI	Lifted Index
LWIR	Long Wave Infrared
MCSs	Mesoscale Convective System
MSG	Meteosat Second Generation
MWIR	Middle Wave Infrared
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWCSAF	Satellite Application Facility on support to NoWCasting and Very Short-Range Forecasting
NWS	National Weather Services

NWP	Numerical Weather prediction
RDT	Rapid Development Thunderstorms
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SSI	Showalter Stability Index
SST	Sea Surface Temperature
UTC	Coordinated Universal Time
VNIR	Visible and Near Infrared
WSR-88D	Weather Surveillance Radar-1988 Doppler

1. 개요

1.1 목적

본 기술문서는 천리안위성 2A호(GK-2A)에 탑재되는 AMI 센서의 적외 채널 휘도온도 특성을 활용하여 대류운(convective clouds)의 발생을 탐지하기 위한 알고리즘의 상세한 내용과 그 결과까지 포함한다. 대류운발생탐지(CI) 알고리즘은 2시간 이내에 급격히 발달하여 위험기상을 유발할 가능성이 있는 구름을 사전에 탐지하는 것을 목적으로 한다(Mecikalski and Bedka, 2006; Walker and Mecikalski, 2011; Meteo-France, 2013).

1.2 사용자

이 문서는 본 알고리즘의 물리적인 개념에 대한 이해가 필요하거나 CI 산출물을 특정 분야에 응용 또는 활용하기를 원하는 사용자를 위해 작성되었다. 또한 본 알고리즘을 수정하거나 보완하고자 하는 사용자를 위하여 작성되었다.

1.3 내용

본 기술문서의 주요 내용은 다음과 같이 다섯 가지로 분류된다.

- 관측시스템 개요: 대류운발생탐지 산출물 및 AMI 센서 특성 기술
- 알고리즘 소개: 대류운발생탐지 알고리즘 개요 및 연구배경, 이론 및 수학적 설명, 입·출력자료 설명
- 시험자료 및 출력물: 본 알고리즘 개발에 사용된 모의, 보조 자료에 대한 설명과 근사 입력 자료의 출력물에 대한 설명
- 실무적 고려사항: 대류운발생탐지 산출물 이용 시 고려사항
- 가정 및 제한사항: 본 알고리즘의 성능 및 성능 향상 계획

1.4 관련 문서

해당사항 없음

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

GK-2A/AMI 대류운발생탐지는 기본산출물 23종 중 하나로 확장국지영역(ELA)에서 산출된다. 따라서 GK-2A 위성의 2분 간격으로 관측되는 ELA 영역 자료를 이용하여 빠르게 변화하는 구름의 상태를 감시할 수 있다. AMI의 수증기 채널과 적외 채널 5개를 사용하며, 총 3가지 단계를 거쳐 대류운으로 발달할 가능성이 있는 구름을 탐지하는 것을 목적으로 한다.

2.2 알고리즘 흐름도

본 알고리즘은 크게 3가지 단계로 분류되며 그림 2.1과 같은 흐름도를 갖는다. 첫 번째는 대류형 구름분류 단계이다(그림2.1, STEP1A, 1B). 이 과정은 4가지 대기안정도지수(CAPE, LI, KI, SSD)를 활용하여 안정한 대기와 불안정한 대기를 구분하고, 불안정한 대기로 구분된 영역에서 채널 정보를 이용하여 이미 성숙한 구름과 청천 영역, 권운 및 미성숙한 구름 영역으로 구분한다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 산출된 미성숙한 구름 화소를 객체단위로 분류하는 군집화 단계이다(그림2.1, STEP2). 군집화 방법으로는 Region growing 기법을 사용하였다. 군집화 된 각각의 구름 객체는 대류운으로 발달할 가능성이 있는지 판별하는 검사를 받게 된다. 이것이 본 알고리즘의 세 번째 단계로써 전 시간 영상과 현재 시간 영상의 구름 객체를 비교하기 위한 구름 객체 추적(그림 2.1, STEP 3A)과 대류운 가능성 판별시험(Interest fields tests; 그림 2.1, STEP 3B)으로 나뉜다. 이 알고리즘에서는 여러 기관에서 사용하고 있는 판별시험(Mecikalski and Bedka, 2006; Lakshmanan et al. 2009; Izumi et al., 2011; Walker et al., 2012)을 기반으로 총 10개의 시험을 거쳐 대류운 발생가능성을 판별한다. 판별시험은 적외채널 휘도온도, 이중채널 휘도온도 차 및 이 값의 시간변화에 대한 경계값 검사로 이루어져 있다. 판별시험은 2.5.3절에 자세히 기술하였다. 마지막으로 세 단계를 모두 거친 구름 객체에 대해서 추가적인 객체 특성 검사를 실시하여 비대류운 객체를 제거한다.

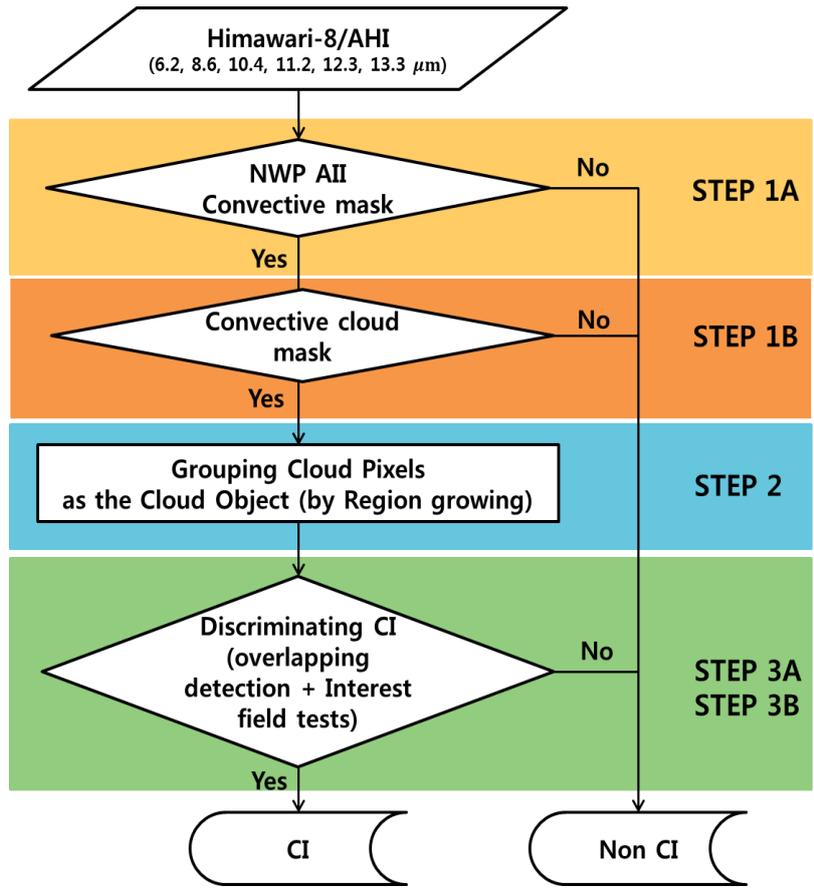


그림 2.1 대류운발생탐지 알고리즘 흐름도

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

이 알고리즘에서 사용되는 주요 입력자료는 GK-2A AMI에서 산출된 L1B 자료이며, 아래 표 2.1과 같이 여러 적외 채널을 사용하였다.

표 2.1 대류운발생탐지 알고리즘 단계별 사용되는 채널

단계	사용되는 채널 (μm)
대류형 구름 분류	6.3, 10.4, 12.3
군집화	10.4
이중채널 경계값 검사	6.3, 8.6, 10.4, 11.2, 13.3

2.3.2 L2

L2 입력자료로서 GK-2A AII의 2분간격 ELA 영역의 대기안정도지수 CAPE, LI, KI, SSI 자료를 이용하며, 불안정한 대기 영역을 구분하는데 활용된다.

2.3.3 보조자료

보조 입력자료는 L2 AII 자료가 산출되지 않거나 정확도가 낮을 경우 대기안정도지수 산출을 위해 기상청 전구 규모 수치예보모델(GDAPS) 1시간 간격 예측 자료(6~11시간 예측자료)를 이용하며, 사용되는 변수는 다음과 같다.

- 온도 프로파일 [K]
- 습도 프로파일(혼합비) [g/kg]
- 지면 기압 [hPa]
- 지면 피복 온도 [K]
- 2m 온도 [K]
- 2m 습도 [g/kg]

2.4 이론적 배경

대류운발생탐지 알고리즘은 짧은 시간 동안 대류성 구름으로 빠르게 성장할 가능성을 판별하는 것이다. 따라서 미성숙한 구름이 해당 시간 동안 얼마만큼 성장하는지를 모니터링하고 그에 따라 대류운이 발생 가능한지 여부를 결정한다. 이를 위하여 본 알고리즘은 이전 시간의 영상자료를 이용하여 채널별 휘도온도 변화를 검사하는 단계가 필수적이다. 대류운 발생 가능성을 탐지하기 위하여 아래와 같은 세 단계를 수행한다. 추가적으로 세 단계를 모두 거친 구름 객체에 대해서 객체 특성 검사를 실시하여 비대류운 객체를 제거한다.

- 1) 대류운 마스크(Convective Cloud Mask; CCM)
- 2) 군집화(Clustering)
- 3) 대류운 발생 가능성 판별 시험(Interest Fields Tests)

2.5 수학적 설명

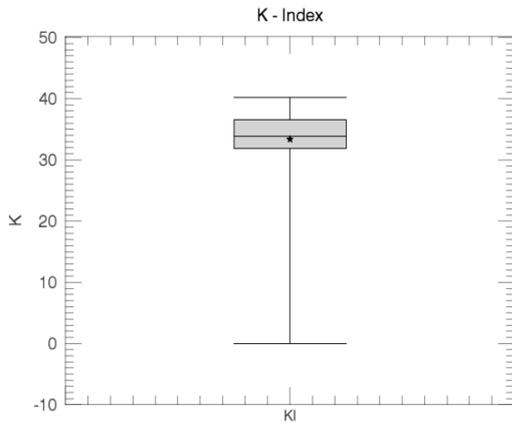
2.5.1 대류운 마스크(Convective Cloud Mask)

대류운 마스크는 Mecikalski and Bedka(2006)가 처음으로 제시한 방법으로써 대류운 발생 탐지를 위한 자체 구름 탐지 및 분류 단계이다. 대류운 마스크는 두 단계로 나누어지며, 첫 번째는 대류가 발생할 가능성이 있는 불안정한 대기 영역을 구분하는 단계이다. 수치예보모델 자료를 통해 계산된 CAPE, LI, KI 및 SSI 지수를 활용하여 불안정한 대기 영역을 구분한다. CAPE는 기온과 수증기의 연직 분포로부터 대류를 발생시킬 수 있는 잠재 에너지를 수치화 한 것으로 호우 및 돌풍 예측에 주로 활용된다(Moncrieff and Miller, 1976). 그리고 SSI는 지면가열에 의한 열적 대기불안정 상태를 진단하는데 유용한 지수이며(Showalter, 1947), LI는 850 hPa을 지나는 역전층 또는 수증기가 급격하게 감소하는 층이 있는 경우 적용하기 위한 값이며 SSI 값보다 약간 작은 경향이 있다(기상청 예보기술분석과, 2014). 마지막으로 KI는 중층 이하의 대기층에서 불안정 요소를 진단하는 지수이며 하층 수렴과 상층 발산의 연직 대기 구조가 잘 갖추어져 있고, 하층 대기가 습윤한 경우 적용이 가능하다(George, 1960). 각 지수의 경계값은 대류운 발생 사례(표 2.2)에 대해 통계 분석하여 설정하였다. 그림 2.2는 각 사례별로 대류운 발생 6시간 전부터 대류운이 발생한 시각(레이더 반사도 35 dBZ 이상이 나타나는 시각)까지의 KI, LI, SSI 및 CAPE 값을 상자 그림(Box plot)으로 나타낸 결과이다. 상자 그림은 총 6개의 값을 표시하고 있으며, 상자 위와 아래에 있는 수염(whisker)은 최댓값과 최솟값을 나타내며 회색 상자의 아래와 위는 25와 75번째 백분위 수를 의미한다. 상자 중간에 표시된 실선은 중간 값을 나타내며 가운데 점은 평균값을 의미한다. KI의 경우 대부분의 값들이 30 K 이상에 분포하고 있는 것을 확인할 수 있으며, LI는 0 K 이하, SSI는 2 K 이하 그리고 CAPE는 500 J/kg 이상에 분포하고 있다. 따라서 이 값을 이용하여 불안정한 대기 영역을 구분하였으며, 대류운으로 성장할 가능성이 있는 영역을 최대한 포함하기 위해 4가지 조건 중 하나라도 만족하는 경우에는 불안정한 영역으로 산출되도록 하였다.

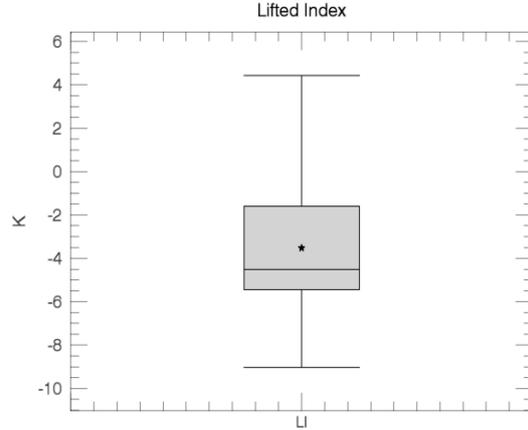
표 2.2 2017년 한반도 대류운 발생 사례

Number	Date	CI events
1	2017.06.01. 00:00–01:00 UTC	2
2	2017.06.26. 02:00–04:00 UTC	2
3	2017.06.27. 07:00–09:00 UTC	5
4	2017.07.02. 00:00–02:00 UTC	1
5	2017.07.05. 01:00–07:00 UTC	6
6	2017.07.14. 03:00–05:00 UTC	2
7	2017.07.24. 10:00–12:00 UTC	2
8	2017.08.02. 00:00–03:00 UTC	3
9	2017.08.06. 08:00–10:00 UTC	3
10	2017.08.07. 00:00–03:00 UTC	1
11	2017.08.11. 03:00–05:00 UTC	3
12	2017.08.21. 02:00–04:00 UTC	1
13	2017.08.25. 03:00–05:00 UTC	1
14	2017.09.19. 02:00–04:00 UTC	1
Total		33

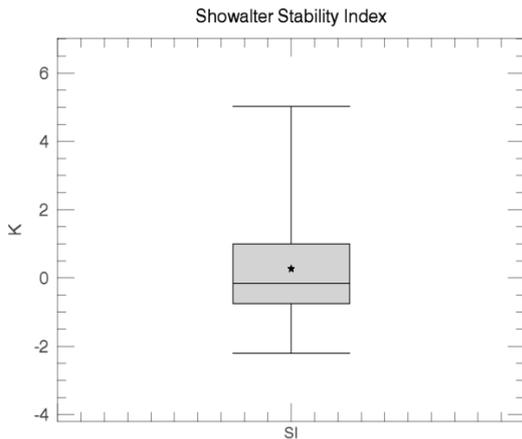
(a) K-index



(b) Lifted index



(c) Showalter stability index



(d) CAPE

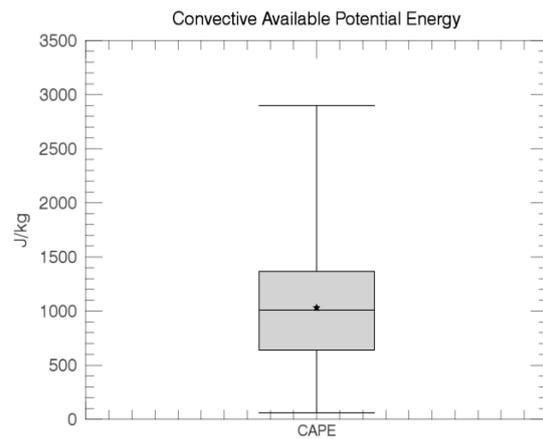


그림 2.2 각 사례별 대류운 발생 6시간 전부터 발생 시각까지의 (a) KI, (b) LI, (c) SSI 그리고 (d) CAPE 값을 나타낸 상자 그림(Box plot)

두 번째로는 이미 발달되어 고도가 높이 올라간 구름을 제거하는 것이다. 이미 발달된 구름인 경우 광학두께가 두껍기 때문에 구름 아래 복사와 지표면 복사의 영향을 거의 받지 않는다. 이러한 경우 적외 대기창 영역의 휘도온도는 실제 구름온도로 간주할 수 있다(Chahine, 1974). 따라서 본 알고리즘에서는 대기창 적외채널 중 가장 수증기 흡수가 적은 10.4 μm 채널의 휘도온도를 구름 온도로 가정하여 이미 발달된 구름을 구분하였다. 구름 온도가 -40°C 아래에서는 물리적으로 액체상(water cloud phase)가 존재할 수 없기 때문에 이것을 발달된 구름 제거를 위한 경계값으로 사용하였다(Hogan et al., 2003;

Wolters et al., 2008).

세 번째로 청천역을 포함한 권운 제거를 위해 10.4 μm 와 12.3 μm 의 휘도온도 차이를 사용하였다. 두 적외채널의 휘도온도차 시험은 ‘Split-window technique’ 라고 불리며 권운 탐지를 위해 오랫동안 사용되어 왔다(Inoue, 1985). 그림 2.3(a)는 300 K의 지면온도 위에서 다양한 구름 방출률(0~1)을 갖는 권운이 존재할 때 BTD[11 μm , 12 μm]가 어떻게 달라지는지 복사전달모델을 통해 보인 결과이다(Heidinger and Pavolonis, 2008). 실선과 점선, 파선은 β 값과 운정온도(T_c)에 따라 구분된다. 여기서 β 값은 11 μm 와 12 μm 의 구름 방출률 비율을 나타내며, 값이 클수록 작은 입자를 의미한다. 실선과 파선을 비교하면 β 값이 같고 운정온도(T_c)가 달랐을 때 BTD[11 μm , 12 μm]의 변화를 알 수 있고, 파선과 점선을 비교해보면 운정온도는 같으나 β 값이 다를 때의 BTD[11 μm , 12 μm] 값의 변화를 알 수 있다. 여러 모의 조건에서 공통적으로 나타나는 특징은 BTD[11 μm , 12 μm] 값은 구름 방출률이 1에 가까울수록 두 채널의 휘도온도 차이가 줄어든다는 것이다.

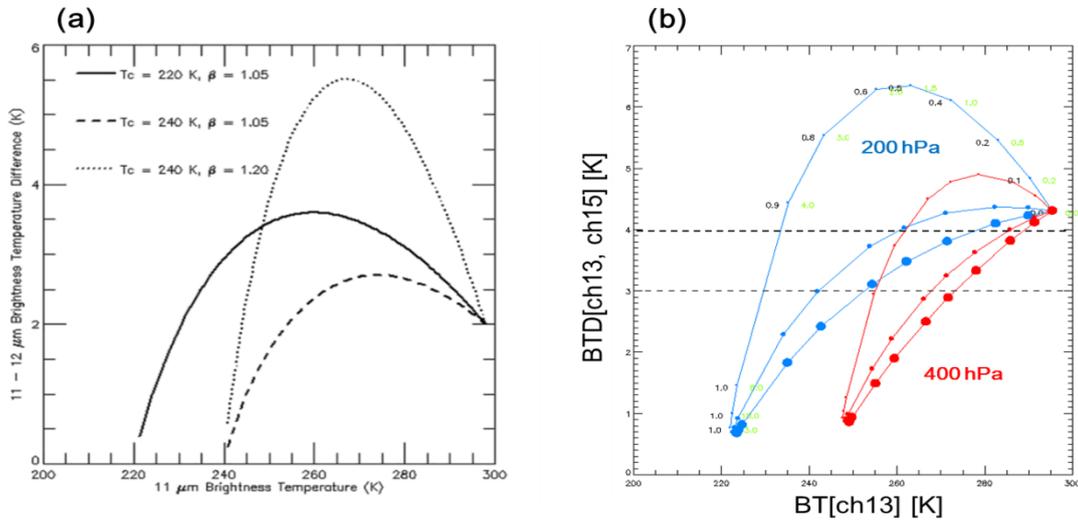


그림 2.3 (a) Heidinger and Pavolonis (2009)에서 보고된 11 μm 와 12 μm 의 휘도온도차가 구름 방출률이 0부터 1까지 바뀔 때를 모의한 결과. 실선은 운정온도 =220 K, $\beta=1.05$, 파선은 운정온도= 240 K, $\beta= 1.05$, 점선은 운정온도= 240 K, $\beta= 1.20$ 조건임. (b) BT D[채널 13, 채널15] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델을 이용한 200 hPa과 400 hPa 고도에서 구름입자유효반경에 따른 13번 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차 BT D[ch13, ch15] 모의 결과(파란색은 얼음상, 빨간색은 액체상을 의미하며, 검은색 숫자는 구름방출률, 연두색 숫자는 구름광학두께, 심볼(원)의 크기는 3가지 구름입자유효 반경(10, 15, 30 μm)에 해당함).

권운에 해당하는 BTD[채널13, 채널15] 경계값을 정의하기 위해 알고리즘 개발의 모의자료 중심파장에 맞도록 STREAMER 복사전달모델로 실험하였다. 모의 조건은 표 2.3과 같다. 그림 2.3(b)에서 파란색은 얼음상, 빨간색은 액체상을 나타내고, 심볼(원)의 크기는 3가지 구름입자유효반경(10, 15, 30 μm)을 나타내고 있다. 모의된 입자반경이 클수록 원 크기를 크게 표시하였다. 검은색으로 표기된 값은 적외 영역에서의 구름 방출률을 나타내고 있다. 모의된 결과를 살펴보면 구름 방출률이 0.8 미만이고 구름입자유효반경이 작거나 구름광학두께가 얇은 경우 BTD[채널13, 채널15]가 4 이상임을 알 수 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 권운 제거 경계값을 $\text{BTD}[\text{채널13, 채널15}] > 4\text{K}$ 로 결정하였다. 또한 구름의 입자유효반경 조건에 따라 두꺼운 구름이 이 경계값에 해당되는 경우를 고려하여(그림 2.3(b)에서 구름입자유효반경 20~30 μm 경우) 구름 표면 특성 조건을 더하였다. 청천과 권운의 경우, 적운에 비교하여 표면이 균질하다는 특성(Mecikalski and Bedka, 2006)을 반영하여 5×5 화소 안에서의 채널 13번 휘도 온도의 표준편차가 2 K보다 작은 경우만 권운 및 청천화소로 정의하도록 하였다. 이 때 사용된 경계값은 경험적으로 결정하였으며 추후 개선될 여지가 있다.

표 2.3 BTD [채널13, 채널15] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건

STREAMER 모의 조건		
profile	mid-latitude summer	
surface temperature (K)	300 K	
cloud phase	ice	water
cloud height (hPa)	200 hPa	400 hPa
cloud optical thickness	0, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 8, 10, 13	
cloud effective radius (μm)	10, 15, 30	
water content (g/m^3)	0.02	0.2

권운 및 청천영역을 제거하기 위하여 BTD[채널8, 채널13]을 추가하였다. 8번 채널은 중심파장이 6.2 μm 로 수증기 흡수 채널이다. 이 채널은 200–300 hPa 고도 층에서 가장 민감하게 반응하는 특징이 있다. 즉 채널 8은 상층 고도의 온도를 반영하기 때문에

구름 고도가 바뀌면 BTD[채널 8, 채널 13]의 값도 변화하게 된다. 이러한 특성을 기반으로 이들 적외채널간 휘도온도 차이는 구름고도를 추정하는 기법으로 사용된다(Szejwach, 1982). 여기서는 구름이 없는 경우 혹은 구름의 광학두께가 아주 얇아서 지면의 정보가 많이 반영될 경우, 이 휘도온도 차이가 가장 크다는 특성을 사용하여 권운 및 청천영역을 제거하고자 하였다.

이를 위하여 STREAMER 복사전달모델을 사용하여 BTD[채널8, 채널 13]의 값을 모의하였다(그림 2.4). 모의조건은 표 2.4와 같다. 결과를 살펴보면, 운정온도가 높을수록 휘도온도 차가 커지는 것을 알 수 있다. 그리고, 광학두께(τ)가 얇은 구름일수록 휘도온도 차가 커지며, 또한 구름 온도(고도)에 따른 휘도온도차 변화가 작다. 청천인 경우 휘도온도 차는 약 -42 K 이다. 따라서 본 알고리즘에서는 아주 얇은 구름($\tau < 1$)과 청천영역은 BTD[채널8, 채널 13] < -40 조건으로 분류하였다.

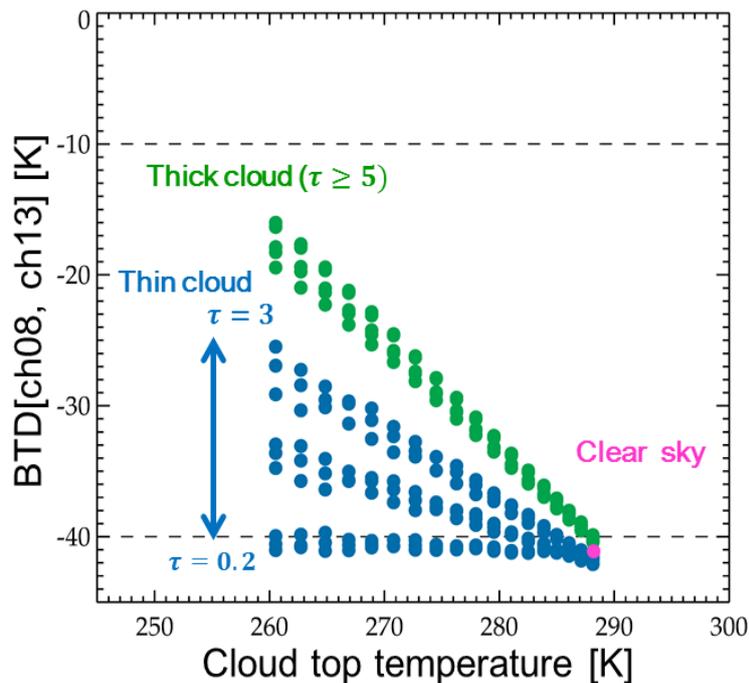


그림 2.4 BTD[채널8, 채널 13] 경계값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델을 이용한 구름광학 두께(τ)에 따른 운정온도에 대한 휘도온도차(BTD[채널08, 채널13]) 모의 결과(파란색: 구름광학두께가 3 이하인 경우, 녹색: 구름광학두께가 5 이상이 경우).

표 2.4 BTD [채널8, 채널13] 경궤값 결정을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건

STREAMER 모의 조건	
atmospheric vertical profile	mid-latitude summer
surface temperature (K)	300 K
cloud phase	water
cloud height (hPa)	500-800 hPa, 20hPa 씩 증가
cloud optical thickness	0, 0.2, 1, 2, 3, 5, 8
cloud effective radius (μm)	10, 15, 20
water content (gm^3)	0.2

정리하면, 대류운발생탐지를 위한 자체 구름 마스크는 그림 2.5의 순서도와 같이 나타낼 수 있다. 적외 영역만 사용하였기 때문에 주야간 연속적으로 활용이 가능하다는 장점이 있다. 처리 속도를 고려하여 알고리즘을 간편화 하였으며 미발달 구름 후보의 화소들이 첫 번째 단계에서부터 사라지지 않을 수 있도록 신뢰성이 높은 경궤값 테스트만을 사용하였다.

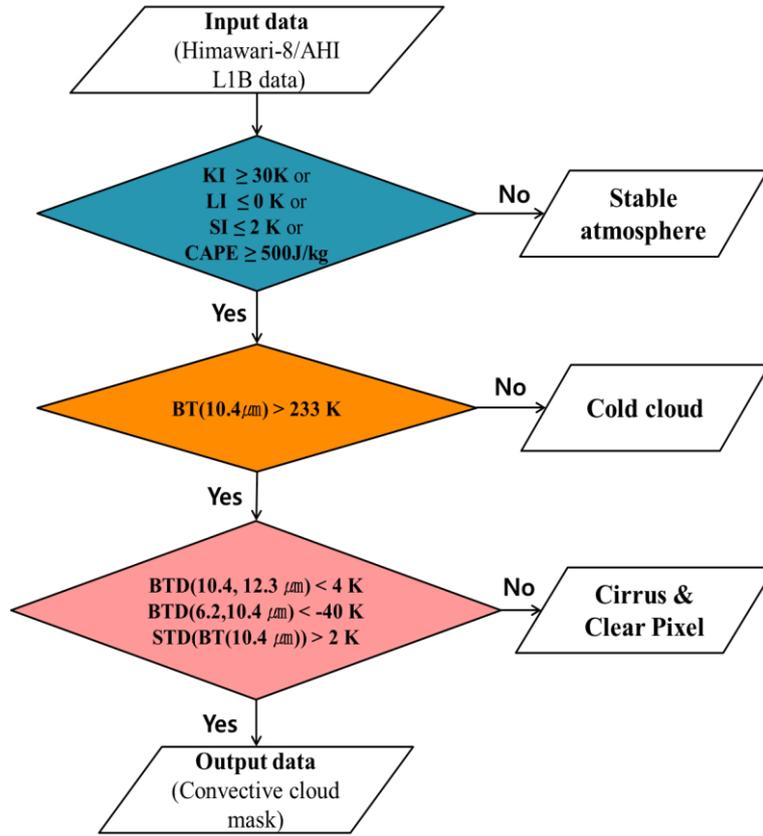


그림 2.5 대류운 마스크 처리 흐름도

그림 2.6(a)는 2017년 8월 25일 0300 UTC의 구름 분류 결과를 보여주고 있다. 빨간색 영역은 발달된 구름이며 초록색 영역은 청천 및 권운 지역을 나타내고 있고, 하늘색 영역은 미발달 구름 영역을 의미하며 파란색 영역은 불안정한 대기 영역에서의 미발달 구름 영역으로 본 알고리즘에서는 파란색 영역에 대해 대류운 탐지를 수행한다. 동시간대의 Himawari-8 AHI 채널 13번 영상(그림 2.6(b))과 CAPE 영상(그림 2.6(c))을 비교하여 볼 때 구름이 잘 분류되었음을 알 수 있다.

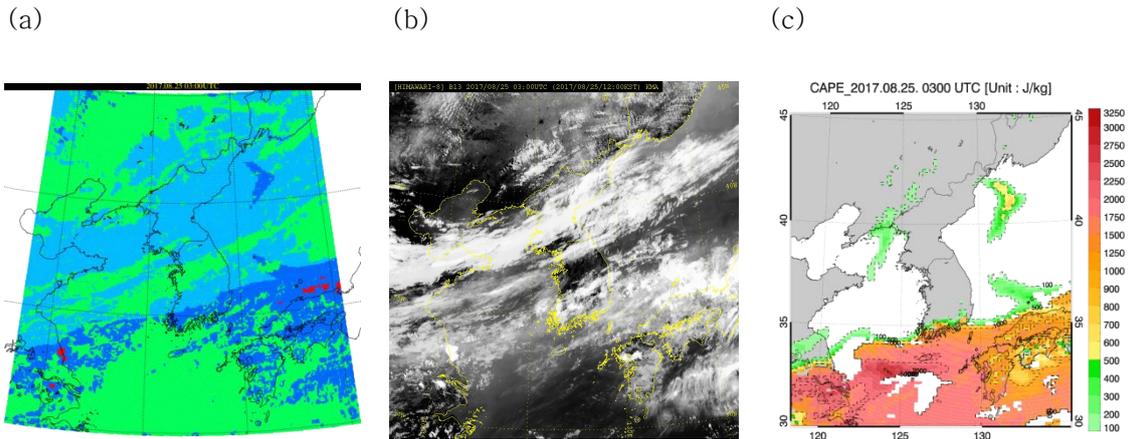


그림 2.6 2017년 8월 25일 0300 UTC의 (a) CCM 결과 영상(빨간색: 이미 성숙한 구름, 초록색: 청천 및 권운 지역, 하늘색: 미성숙한 구름, 파란색: 불안정한 대기에서의 미성숙한 구름으로 CI 후보영역), (b) Himawari-8 AHI 채널 13번 영상, (c) CAPE 영상.

2.5.2 군집화(Clustering)

대류형 구름 분류를 통해 미성숙한 구름으로 분류된 픽셀들은 군집화 과정을 통해 객체(Object)로 분류된다. 군집화의 기법은 여러 가지가 있으나 본 알고리즘에서는 영역 확장(Region growing) 기법이 사용되었다. 이 기법은 인접한 픽셀들을 검사하여 유사한 특성을 가질 경우 픽셀을 병합하여 객체를 만든다. 모든 픽셀이 처리될 때까지 이 과정이 반복되며, 객체화된 픽셀들은 고유의 정수 ID가 부여된다(Bins et al., 1996). 영역 확장 기법의 장점은 군집화 조건을 제한 없이 줄 수 있다는 것이며, 현재 초기 대류운의 규모(meso- γ scale)를 고려하여 다음과 같은 군집화 조건을 주었다.

- 1) 대류형 구름 분류 결과에서 불안정한 대기 영역에서의 미성숙한 구름으로 분류된 픽셀들을 군집화한다.
- 2) 한 구름 객체의 최대 온도와 최소 온도의 차이가 20 K이 되도록 한다.
- 3) 한 구름 객체의 최대 화소수를 100개로 한다.

그림 2.7은 2017년 8월 25일 0300 UTC에 본 알고리즘의 군집화 방법으로 산출된 구름 객체화 결과이다. 그림 2.7(a)는 그림 2.6에서 불안정한 대기에서 미성숙한 구름으로 판정된 화소들을 군집화한 결과이며, 2.7(b)는 Himawari-8 AHI 13번 적외 채널 영상을 보여주고 있다. 이 알고리즘에서는 구름 객체의 이름(ID number)은 매 시간마다

갱신된다. 즉, 전 시간과 현 시간의 같은 구름 객체 번호가 동일한 구름 객체를 의미하지 않는다.

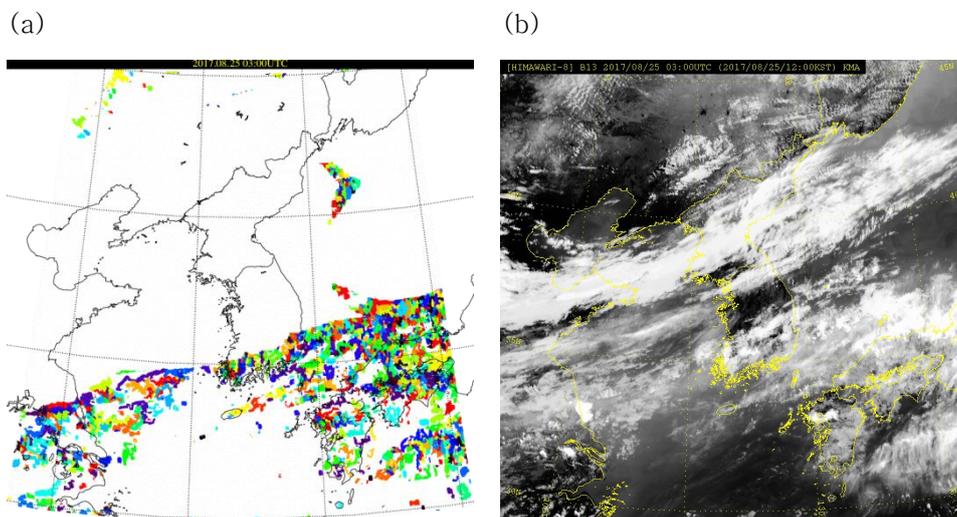


그림 2.7 2017년 8월 25일 0300 UTC의 (a) 불안정한 대기에서 미성숙한 구름화소의 군집화 결과에 따른 구름객체 영상(각 색깔은 객체 번호), (b) Himawari-8 AHI 채널 13번 영상.

현재 대류운발생탐지 알고리즘에서는 구름 객체 내 화소들의 휘도온도 분포에서 하위 25% (coldest 25%)에 해당하는 평균값을 구름의 중심부로 가정하여 객체의 발달 여부를 판단하기 때문에 구름 객체가 어떻게 결정되는가는 최종 결과에 큰 영향을 미친다. 군집화 조건의 2번과 3번에 따라 밀집되어 있는 미성숙한 구름 화소가 여러 개의 객체가 되기도 하고, 물리적으로는 다른 객체이나 하나의 구름으로 군집화 되기도 한다.

2.5.3 대류운발생 가능성 판별 시험 (Interest fields tests)

앞서 결정된 각각의 구름 객체는 앞으로 대류운으로 성장할 가능성이 있는지 판별하는 시험을 거치게 된다. 대류운 발생 가능성 판별 시험을 위해서는 (1) 구름 객체 추적 기법 개발과 (2) 대류운 특성을 탐지할 수 있는 여러 채널별 경계값 검사 개발이 필요하다.

(1) 구름 객체 추적 기법

이 알고리즘에서는 현재 시각의 구름 객체와 겹치는 전 시간대 객체를 찾아 동일한 객체로 추적하는 기법을 사용하였다. 먼저 현재 시간대의 구름 객체 위경도 정보를 파악한다. 파악된 위경도 위치에서 전 시간대 구름 객체 정보를 살펴보면 그림 2.8의 (a)와 같이 전 시간대의 구름 객체가 존재하지 않는 경우, (b)와 같이 하나의 구름 객체가 존재하는 경우 (c)와 같이 두 개 이상의 구름 객체 정보가 존재하는 경우가 있다. (a)의 경우는 현재 시각에서 처음 발생한 구름 객체로 간주하여 구름 객체의 시간적 변화 검사는 거치지 않게 된다. (b)의 경우는 현재 구름 객체와 겹쳐진 하나의 전 시간대 구름 객체 정보를 활용할 수 있으며, (c)의 경우는 현재 구름 객체와 가장 많이 겹쳐진 전 시간대 구름 객체를 동일한 객체로 간주한다.

이러한 추적 기법은 관측 대상이 대류운으로 성장 가능한 미발달 구름이기 때문에 가능하다. 구름의 이동거리는 구름 객체 크기와 비례하는데(Walker and Mecikalski, 2011), 이 알고리즘에서 탐지한 미발달구름은 객체 크기가 작기 때문에 수평이동속도가 이미 발달된 구름에 비교하여 상대적으로 작다. 또한 대류운으로 발달하는 객체들은 대부분 수평이동보다는 수직 상승으로의 변화가 크게 나타난다. 특히 대류운발생탐지 산출 영역에 대한 조밀한 시간 해상도(2분 간격)를 고려할 때 현재 구름 객체와 가장 많이 겹치는 객체가 동일 객체일 확률이 높다. 이러한 방식은 GOES-R에서도 사용하고 있는 방식이다.

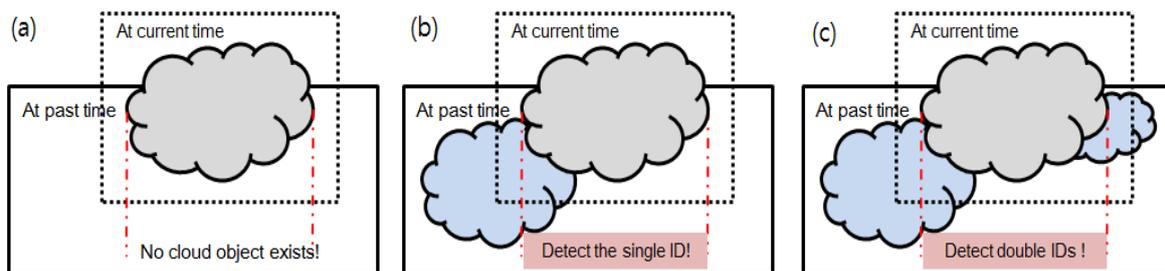


그림 2.8 현재시각과 전 시각의 구름 객체 추적 기법

(2) 대류운 발생 가능성 판별을 위한 채널별 시험

구름 객체의 대류운 발생 가능성 판별은 기존 알고리즘 기법의 방식을 따랐다 (Mecikalski and Bedka, 2006; Lakshmanan et al., 2009; Izumi et al., 2011; Walker et al., 2012). 대류운 발생 가능성 판별 시험은 아래의 표 2.5와 같이 크게 구름의 거시-미세물리적 특성을 판별하는 시험과 시간에 따른 이들 특성의 변화를 살피는 시험으로 나눌 수 있다.

표 2.5 대류운 발생 가능성 판별을 위한 적외 채널 휘도온도차 시험(Interest field tests)

Purpose of tests		BT / BTD Tests	Thresholds	
1	Cloud macro- & micro-physical states	Cloud-top height	BT[channel 13]	> 253 K
2		Cloud-top height	BTD [channel 8, channel 13]	< -10 K
3		Cloud-top height	BTD [channel 16, channel 13]	< -5 K
		Cirrus/non cirrus	BTD [channel 13, channel 15]	< 5 K
4		Ice/water cloud	BTD [channel 11, channel 14]	< 1 K
5	Trends in cloud macro- & micro-physical states	Weak updraft strength	10-min Trend BT [channel 13]	< -0.87 K
6			10-min Trend BTD [channel 8, channel 13]	> 0.74 K
7			10-min Trend BTD [channel 16, channel 13]	> 0.31 K
8		Strong updraft strength	10-min Trend BT [channel 13]	< -3.56 K
9			10-min Trend BTD [channel 8, channel 13]	> 2.89 K
10			10-min Trend BTD [channel 16, channel 13]	> 0.90 K

구름의 거시-미세물리 상태를 평가하는 시험은 구름의 고도, 구름의 상에 관련된 시험이다. 먼저 구름의 고도의 경우, 미발달구름객체 검출을 위해 중·하층 구름 고도와 상층을 분별할 수 있는 경계값이 필요하다. 구름 고도는 2.5.1절에서 설명하였듯이 기본적으로 적외 대기창 채널의 휘도온도를 통해 유추할 수 있다. 이 알고리즘에서는 가장 수증기 흡수에 의한 영향을 적게 받는 채널 13번 10.4 μm 의 휘도온도 시험을 선택하였다. 중위도의 연직 기온 프로파일을 고려해볼 때 253K은 약 300-400 hPa 사이에 해당된다. 또한 이론적으로 253 K 이하에서는 입자가 과냉각액체상으로 존재할 확률이 27% 정도이며 이후부터는 그 확률이 급격하게 줄어든다(Hogan et al., 2003; Wolters et al., 2008).

구름 고도에 대한 정보는 채널 8번(6.2 μm)과 채널 13번(10.4 μm)의 휘도온도 차

이를 통해 얻을 수 있다(Szejwach, 1982). 채널 8번은 상층 수증기량에 민감하므로 두 채널의 차이(BTD[채널8, 채널13])가 양수인 경우는 최소한 300 hPa 위에 위치하는 상층운일 가능성이 높으며 반대로 음수인 경우는 중·하층에 위치하는 구름이다. 이 알고리즘에서는 발달한 구름을 제거하기 위하여 -10K 미만의 경계값을 사용하였으며, 이 조건을 만족하는 구름은 중·하층에 존재함을 의미한다(그림 2.4 참조).

채널 16번(13.3 μm)은 중간 및 하부 대류권에서의 복사량을 탐지하기 때문에 13번 채널(10.4 μm)과의 휘도온도 차이를 이용하면 하층운의 발달 및 중·하층운 탐지에 유용하다. BTD[채널16, 채널13]은 이미 발달한 구름에 대해서는 BTD[채널8, 채널13]과 특성이 유사하나 미성숙한 구름에서는 상당히 다른 특성을 가진다(Mecikalski and Bedka, 2006). 복사전달모델 SBDART를 이용하여 표 2.6에 따라 모의한 결과를 그림 2.9에 나타내었으며 구름의 고도가 높아질수록 BTD[채널16, 채널13]의 변화폭이 크고, 구름 광학두께 및 유효입자 반경이 커질수록 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. 중·하층운의 경우 BTD[채널16, 채널13]의 차이가 -5 K 이하로 나타나기 때문에 경계값을 BTD[채널16, 채널13] < -5K로 설정하였다.

표 2.6 BTD[채널16, 채널13] 경계값 결정을 위한 SBDART 복사전달모델 모의 조건

SBDART 모의 조건	
profile	mid-latitude summer
surface temperature (K)	300 K
cloud phase	water
cloud height (km)	1, 3, 5, 7
cloud optical thickness	0, 2, 4, 8, 16, 32
cloud effective radius (μm)	2, 4, 8, 16, 32

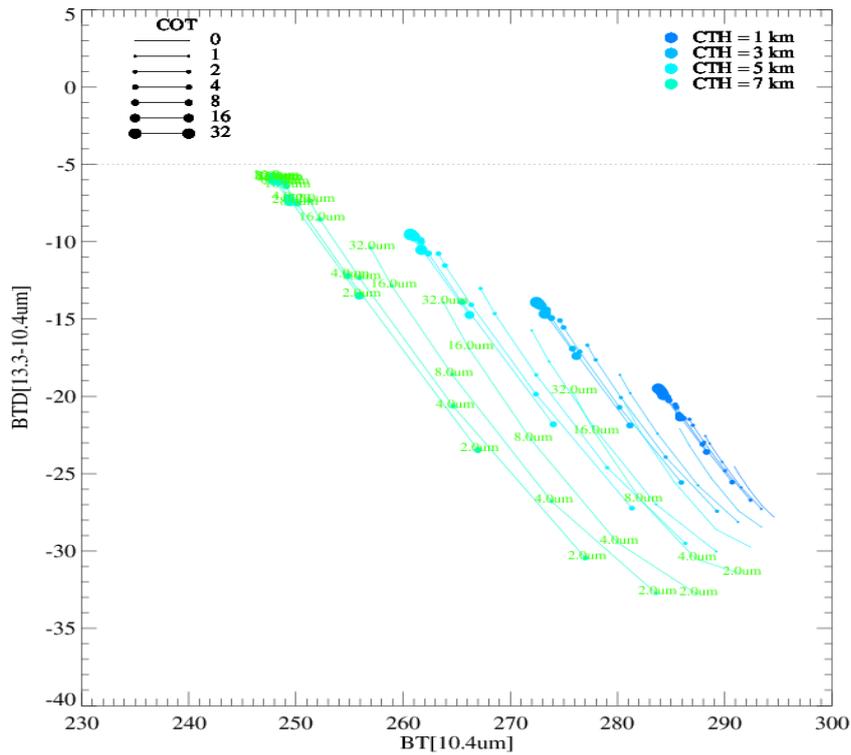


그림 2.9 BTD[채널16, 채널13] 경계값 결정을 위해 SBDART 복사전달모델을 이용한 운정고도(청색~녹색)와 구름광학두께(원 심볼 크기)에 따른 10.4 μm 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차(BTD13.3-10.4) 모의 결과(모의 조건은 표 2.6에 기술됨)

미발달 구름 객체의 또 다른 특징은 구름상이 액체상이라는 것이다. 구름의 상을 분별하기 위해 적외 11 채널(8.6 μm)과 적외 14채널(11.0 μm)의 휘도온도 차이를 사용하였다. 구름 방출률을 결정하는 주된 요소인 굴절지수(refractive index)의 허수부가 구름상에 따라 두 채널에서 흡수가 다르게 나타나는 특성을 이용하여 액체상과 얼음상을 구분할 수 있다(Hayashi, 2015). 그림 2.10은 다양한 구름 광학두께(τ)와 입자유효반경(r_{eff})을 갖는 얼음상(파란색)과 액체상(빨간색)의 BTD[채널11, 채널14] 분포를 보여주고 있다. 얼음상의 경우 대부분 BTD 값이 양수인 반면 액체상은 음수에 속함을 알 수 있다. 정확한 경계값을 결정하기 위해 STREAMER 복사전달모델을 사용하였다. 모의 조건은 표 2.7과 같다. 파란색은 얼음상, 빨간색은 액체상을 나타내고 있으며, 심볼 크기가 클수록 큰 입자반경을 의미한다. 모의실험 결과, $0 < \text{BTD}[\text{채널11, 채널14}] < 1$ 사이에도 액체상이 존재하기 때문에 $\text{BTD}[\text{채널11, 채널14}] < 1$ 을 경계값으로 결정하였다.

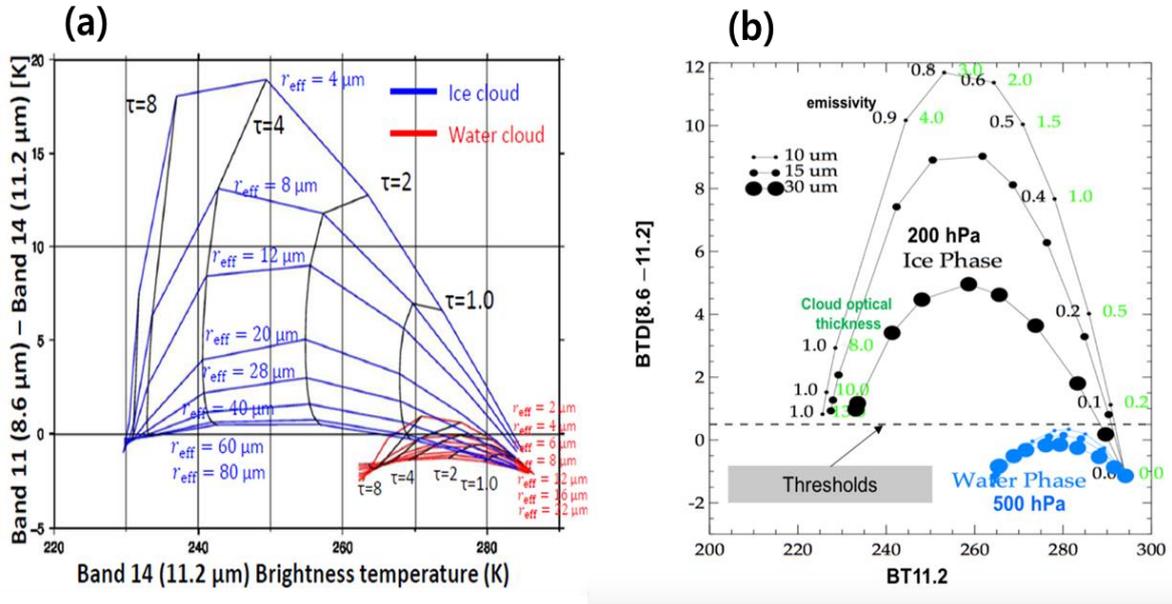


그림 2.10 (a) Hayashi (2015)에서 보고된 수적운과 빙적운 탐지 (b) BTD[채널11, 채널14] 경계값 결정을 위한 액체상과 얼음상의 방출률과 입자유효반경에 따른 11.2 μ m 채널 휘도온도에 대한 휘도온도차(BTD[채널11,채널14])의 STREAMER 모의 결과

표 2.7 구름상 경계값을 위한 STREAMER 복사전달모델 모의 조건

STREAMER 모의 조건		
profile	mid-latitude summer	
surface temperature (K)	300 K	
cloud phase	ice	water
cloud height (hPa)	200 hPa	500 hPa
cloud optical thickness	0, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 8, 10, 13	
cloud effective radius (μ m)	15, 30, 50	
water content (gm^3)	0.02	0.2

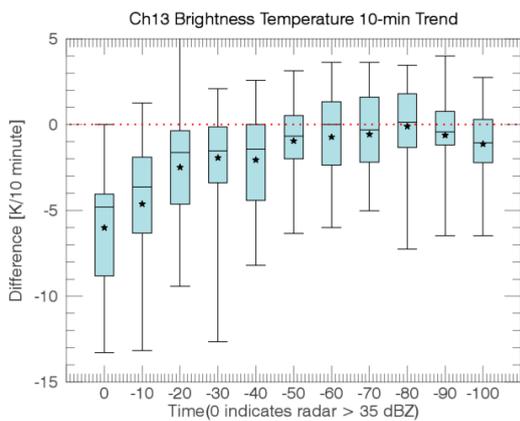
대류운 발생 판별 시험의 두 번째 부분으로 미발달구름의 미세물리적 특성 변화를 살펴보는 시험은 주로 구름객체 상승 속도(cooling rate)로 평가한다. 대류운의 가장 중요한 특징은 빠른 수직적 상승이기 때문에 이 시험은 대류운 발달 판단 여부를 결정하는 주요한 시험이다. 구름객체가 형성된 단계에서는 수직 상승 속도가 상대적으로 약할 수 있기 때문에 본 알고리즘에서는 상승 속도 단계를 둘로 나누었다. 상승 속도는 현재 시간의 구름객체 중심부와 10분 전 구름객체 중심부의 휘도온도 및 휘도온도차의 변화 정도를 이용하여 추정할 수 있다. 표 2.2에 기술된 각 사례에 대해 레이더 반사도 35 dBZ 이상이 나타난 시점으로부터 100분 전까지 10분 동안의 구름객체의 온도 변화를 살펴 보았으며, 그 결과를 그림 2.11에 나타내었다.

그림 2.11(a)는 채널 13번(10.4 μm)의 휘도온도의 변화율을 나타내며 x축은 시간, y축은 10분 전 구름객체와의 온도 차이를 의미한다. 시간은 레이더 반사도 35 dBZ가 나타난 시점을 0으로 두고 각 시각마다 10분전 구름 객체 자료를 이용하여 변화율을 확인 해 보았다. 그 결과 구름이 성장할수록(x축이 0에 가까워질수록) 13번 채널의 휘도온도 변화율이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 2.11(b)의 경우 8번 채널(6.2 μm)과 13번 채널(10.4 μm)의 휘도온도 차의 시간 변동성을 나타낸 결과로 두 채널 차의 시간변동성이 클수록(양수 방향) 구름이 빠르게 발달함을 나타내며, 음수이면 구름의 두께가 감소하거나 운정 고도가 낮아짐을 의미한다(Mecikalski and Bedka, 2006; Walker and Mecikalski, 2011). 16번 채널(13.3 μm)과 13번 채널(10.4 μm)의 휘도온도 차의 시간 변동성은 그림 2.11(c)에 나타내었다. BTD[채널16, 채널13]은 BTD[채널8, 채널13]과 유사한 패턴을 보이고 있으나 변동성이 비교적 작은 것을 확인할 수 있다. 각 테스트에 대해 시간 변동성이 나타나기 시작하는 60분 전부터 발생 시각(0분)까지의 차이를 하나의 상자 그림으로 2.11(d)에 나타내었다.

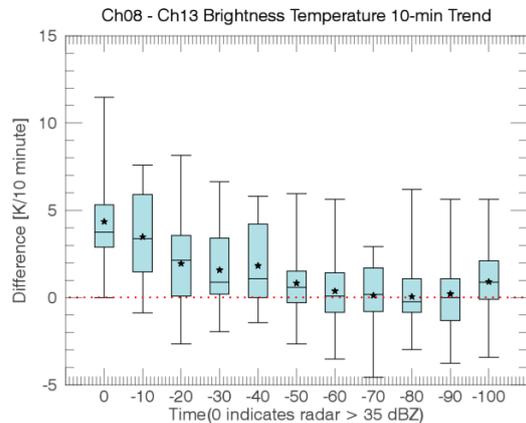
BT[채널13]의 약한 상승속도 변화 경계값은 과거 객체에 비교하여 조금이라도 작아 졌다면(고도가 높아졌다면) 통과할 수 있도록 75번째 백분위 수인 $-0.87 \text{ K}/10\text{min}$ 이하로 설정하였으며, 강한 상승속도 변화 경계값은 중간값인 $-3.56 \text{ K}/10\text{min}$ 이하로 적용하였다(표 2.8). 10분 동안 구름객체의 휘도온도가 약 $3.56 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상 감소했다는 것은 습윤단열감률 기준으로 10분 동안 약 712 m 이상 상승했음을 의미한다. 두 번째 시험인 8번 수증기 채널(6.2 μm)과 13번 적외 채널(10.4 μm) 차의 상승속도 변화는 현재 시간의 구름객체 중심부의 BTD[채널8, 채널13]과 10분전 구름객체 중심부의 BTD[채널 8, 채널 13]을 뺀 값으로 계산된다. 따라서 약한 상승 속도 변화 경계값으로는 25번

째 백분위 수인 0.74 K/10min 이상으로 하였으며 강한 상승의 경우는 BT[채널13] 검사와 마찬가지로 중간값인 2.89 K/10min 이상으로 설정하였다. 마지막으로 16번 채널 (13.3 μm)와 13번 적외채널 (10.4 μm) 차이는 BTD[채널 8, 채널 13]과 마찬가지로 약한 상승의 경우 25번째 백분위 수인 0.31 K/10min 이상, 강한 상승의 경우 중간값인 0.90 K/10min 이상으로 적용하여 알고리즘을 수행하였다. 이 경계값은 지속적인 한반도 대륙운 모니터링을 통해 조정해갈 예정이다.

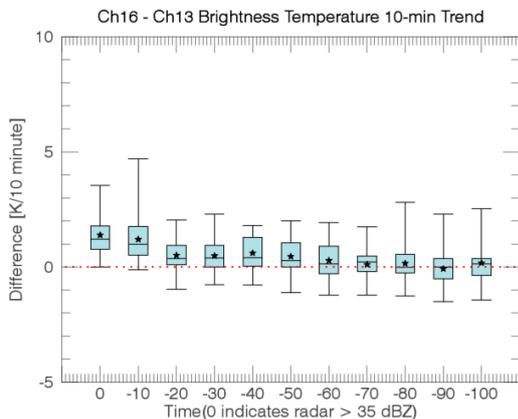
(a)



(b)



(c)



(d)

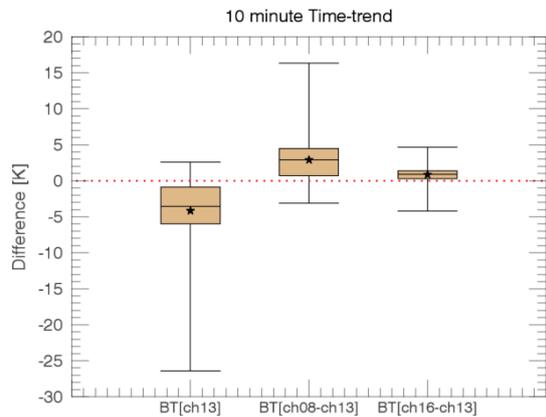


그림 2.11 미발달구름의 미세물리적 특성 변화에 대한 경계값 결정을 위한 판별시험 결과. (a) BT[채널13], (b) BTD[채널8, 채널13], (c) BTD[채널16, 채널13]의 시간에 따른 변동성 및 (d) 각 테스트 별 10분 시간경향 차이의 상자 그림(box plot)

표 2.8 BT[채널13], BTD[채널8, 채널13], BTD[채널16, 채널13]의 10분 시간경향 상자 그림 통계 값

	BT[ch13]	BTD[ch08, ch13]	BTD[ch16, ch13]
Minimum	-26.38	-3.08	-4.20
Maximum	2.61	16.35	4.70
25 th percentiles	-5.98	0.74	0.31
75 th percentiles	-0.87	4.51	1.40
Mean	-4.18	2.89	0.84
Median	-3.56	2.89	0.90

2.5.4 구름객체 특성 검사

대류운발생탐지 산출물은 대류운을 사전에 탐지하기 위해 구름객체가 조금이라도 연속 상승이 있으면 탐지되도록 개발되었다. 이 과정에서 대류운이 아닌 하층운, 구름가장자리 등의 비대류성 구름객체가 탐지되기 때문에 이를 제거하기 위해 구름객체의 휘도온도 변화율, 최솟값 및 평균값 등을 활용한 검사를 실시하였다.

먼저 상승 속도 검사에 사용되는 13번 채널의 휘도온도 변화율이 양수이거나 BTD[채널8, 채널13]과 BTD[채널16, 채널13]의 휘도온도 변화율이 음수인 경우에는 구름의 하강 또는 소멸을 나타내므로 세가지 검사 중 하나라도 이 조건에 만족한다면 CI 객체를 제거하였다. 그리고 13번 채널의 평균값과 최솟값의 차를 활용한 구름 상부 거칠기 테스트를 통해 연속으로 발달하지 않은 구름(하층운 등)에서 탐지되는 CI를 제거하였다. 경계값은 레이더 기반 검증 결과를 활용하여 대류 객체(Hit)와 비대류 객체(False)에 대한 값의 범위를 비교하여 결정하였다. 그림 2.12는 2018년 8월의 검증결과를 활용하여 Hit 객체와 False 객체에 대한 채널 13번의 평균값과 최솟값의 차이를 상자그림(Box plot)으로 나타낸 결과이다. 여기서 Hit는 정확히 예측한 경우이며, False는 예측했지만 실제로 발생하지 않은 경우로 오탐지를 나타낸다. 이 그림에서 False 객체의 경우 평균값과 최솟값의 차이가 8 K 이하로 나타나는 경향이 Hit 객체에 비해 많은 것을 알 수 있다. 이 테스트로 인해 대류 객체가 제거되지 않도록 13번 채널의 휘도온도 평균값과 최솟값의 차이가 6 K 이하인 경우 CI 객체가 제거되도록 결정하였다. 이 테스트는 일본에서 개발된 RDCA (Rapidly Developing Cumulus Area) 산출물과 EUMETSAT에서 개발한 RDT(Rapid Development Thunderstorms)에서도 사용 중에 있다. 추가적으로 검증 결과를 활용하여 2분 또는 10분 등 시간에 따른 휘도온도 변화율, 대기안정도지수 등의 다양한 요소에 대한 특성을 분석하여 알고리즘을 최적화할 것

이다.

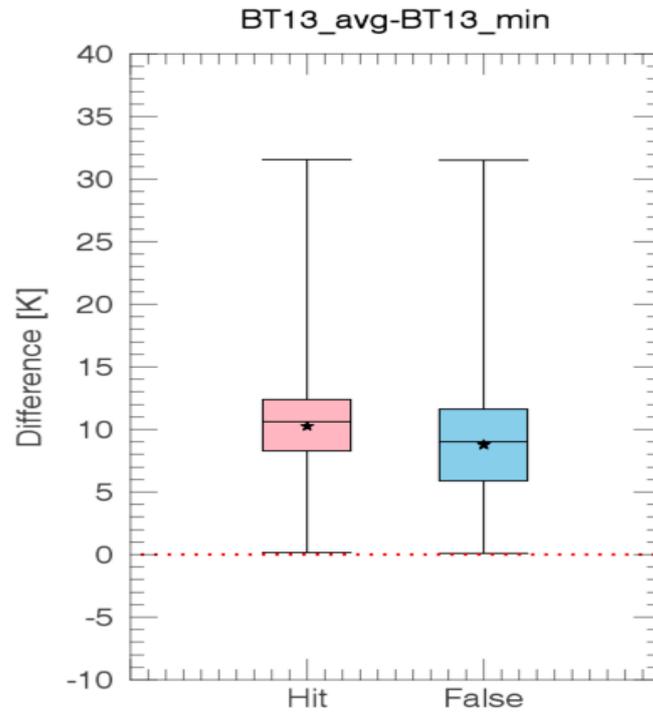


그림 2.12 Hit와 False 객체에 대한 채널 13번 휘도온도 평균값과 최솟값의 차이

2.6. 산출물

이 알고리즘의 출력자료는 GK-2A AMI 적외채널 해상도와 같은 2 km 해상도로 산출된다. 현재 CI 산출 형태는 각 구름 객체가 거친 판별시험(Interest fields)의 통과 개수(0~7)로 표현된다. 또한 중간 산출물인 CCM과 구름객체화 등이 있으며 자세한 산출물 정보는 아래 표 2.9와 같다.

표 2.9 천리안위성 2A호 대류운발생탐지 산출물 정보

Variable name	Information
CI1_CCM	<ul style="list-style-type: none"> • AMI L2 Convective cloud mask - 0: No mask - 1: Thick cloud - 2: Immature cloud (Instability atmosphere) - 3: Cirrus and Clear sky - 4: Immature cloud (Stability atmosphere)
CI1_OBJ	<ul style="list-style-type: none"> • AMI L2 Convective Initiation OBJ • Cloud object ID (Integer)
CI1_BT13_trend	<ul style="list-style-type: none"> • Ch13 Brightness temperature time-trend (Current object BT13 - Previous object BT13)
CI1	<ul style="list-style-type: none"> • AMI L2 Convective Initiation • CI score (Number of interest field tests passed)
CI1_prob	<ul style="list-style-type: none"> • AMI L2 Convective Initiation Probability - 0: Non CI - 1: Cloud microphysical state - 2: Weak updraft strength - 3: Medium updraft strength - 4: Strong updraft strength
DQF_CI1	<ul style="list-style-type: none"> • AMI L2 Convective Initiation data quality flags - 0: No previous object - 1: Previous object

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

이 알고리즘의 모의 입력자료는 GK-2A/AMI와 유사한 특성을 가지고 있는 Himawari-8/AHI를 이용하였다. Himawari-8/AHI 센서는 0.5 ~ 2 km 해상도를 가지는 가시, 근적외, 적외채널로 구성되어 있으며 본 알고리즘에서는 1개의 수증기채널(6.2 μm), 5개의 적외채널(8.6, 10.4, 11.2, 12.3, 13.3 μm)을 사용하였다(표 3.1, 분홍색 박스).

검증자료로는 레이더 CAPPI 1.5 km 합성장을 이용하였다. CAPPI 자료는 일정한 고도의 레이더 반사도 관측 값을 산출하며 지상과 가장 가까운 1.5 km 고도에서의 반사도는 강수가 시작하는 시점과 가장 유사하다고 판단되기 때문에 본 알고리즘의 검증자료로 사용하였다.

표 3.1 GK-2A/AMI와 Himawari-8/AHI의 센서 특성.

GK-2A/AMI			Himawari-8/AHI		
Band	Wavelength (μm)	Resolution (km)	Band	Wavelength (μm)	Resolution (km)
1	0.47	1	1	0.47	1
2	0.51	1	2	0.51	1
3	0.64	0.5	3	0.64	0.5
4	0.86	1	4	0.86	1
5	1.38	2			
6	1.61	2	5	1.6	2
			6	2.3	2
7	3.9	2	7	3.9	2
8	6.19	2	8	6.23	2
9	6.95	2	9	6.94	2
10	7.34	2	10	7.34	2
11	8.5	2	11	8.59	2
12	9.61	2	12	9.63	2
13	10.4	2	13	10.40	2
14	11.2	2	14	11.24	2
15	12.3	2	15	12.38	2
16	13.3	2	16	13.28	2

3.2 검증 방법

Walker and Mecikalski (2011)가 정의한 CI는 구름 발생으로부터 최대 2시간 이내에 레이더 반사도가 35 dBZ 이상 발생하는 지역이다. 35 dBZ는 식(3.1)의 Z-R 관계식 (Marshall and Palmer, 1948; Uijlenhoet, 2001)에 의해 시간당 약 5 mm 이상 강수로 환산된다(표 3.2).

$$\frac{mm}{hr} = \left[\frac{10^{\frac{dBZ}{10}}}{200} \right]^{0.625} \quad \text{식(3.1)}$$

레이더 반사도 35 dBZ가 레이더 검증의 경계값으로 사용되는 것은 이전 연구에서 수많은 검증이 이루어진 바 있다. Roberts and Rutledge (2003)는 GOES를 이용하여

storm initiation nowcast에 대한 검증을 WSR-88D의 35 dBZ로 검증하고, Mueller et al (2003)의 연구에서 천둥을 동반한 폭풍우가 시작될 징후가 있는 픽셀에 대하여 동일하게 검증했으며, Mecikalski and Bedka (2006)와 Walker et al (2012)의 CI 연구에서도 레이더 반사도 35 dBZ로 검증을 수행한 바 있다.

표 3.2 Z-R 관계식에 따른 단위별 레이더 수치(NOAA NWS)

dBZ	mm/hr	Inches/hr
5	0.0749	0.0029
10	0.1538	0.0059
15	0.3158	0.0123
20	0.6484	0.0253
25	1.332	0.0519
30	2.734	0.1066
35	5.615	0.2190
40	11.53	0.4497
45	23.68	0.9235
50	48.62	1.8963
55	99.85	3.8949

따라서 본 알고리즘은 CI 탐지 시각부터 20분 후 ~ 2시간까지의 10분 간격 레이더 반사도 자료 10개를 활용하여 35 dBZ 이상 발생한 지역에 대하여 검증을 수행한다(그림 3.1). 검증 시 CI 산출물의 선행적 탐지 성능을 분석해야 하므로 CI 발생 이후 새롭게 발생한 반사도에 대해서만 적용하고, 현재시간에 이미 발생한 레이더 반사도 35 dBZ 이상 지역은 검증대상에서 제외된다. GK-2A 대류운 발생 탐지 산출물은 구름 객체의 위·경도 최대, 최소지점을 이용하여 박스 내의 레이더 반사도로 해당 구름 객체의 검증을 수행한다. 이 때 박스 내의 레이더 반사도 경곶값이 해당 구름 객체 픽셀 수의 과반수 이상을 차지할 때 Hits로 판단하며, 박스 내에서 레이더 반사도 경곶값 35 dBZ 이상이 한 번도 발생하지 않으면 False로 판단한다. 또한 확장 한반도 영역 내 레이더 반사도가 산출되지 않는 영역은 검증 영역에서 제외된다. 본 알고리즘의 검증은 POD, FAR 결과로 나타낸다.

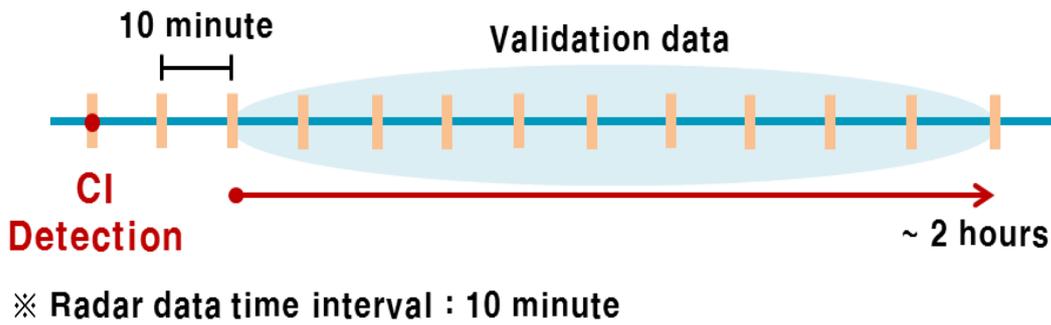


그림 3.1 GK-2A CI 산출물 검증 대상 및 검증 자료 범위

3.3 검증 결과

그림 3.2는 2017년 8월 2일 0400 UTC부터 0430 UTC의 대류운발생탐지 산출 결과를 나타내고 있다. 이 그림의 첫 번째 행은 본 알고리즘의 첫 번째 단계인 대류운 마스크 산출물이다. 여기서 초록색은 청천 및 권운 지역, 빨간색은 이미 발달된 구름 영역, 하늘색은 성장가능성이 있는 중하층운 영역을 나타내고 파란색 영역은 대기안정도 시험을 거쳐 불안정한 대기 영역으로 구분된 중하층운 영역이다. 이 알고리즘에서는 파란색 영역에 대해 대류운 발생 가능성을 산출하였으며 이 영역을 객체화한 결과를 두 번째 행에 나타내었다. 객체 번호는 임의로 부여되며, 각 구름 객체마다 다른 색깔을 적용하여 표출하였다. 마지막 행은 판별시험을 만족하는 구름 객체만을 표출한 결과이다. 3.4.3절에서 설명한 것과 같이 본 알고리즘 시험에서는 총 10가지의 판별시험이 사용되었다. 현재 시각에서 4개의 구름미세물리 조건(1~4번)을 만족하는 객체들 중 이전 영상의 구름 객체와 비교하여 수직적 상승이 있는 객체만을 대류운 발생 가능성이 있는 구름 객체로 간주하였으며, 상승 속도가 큰 객체는 빨간색(판별시험 6~7개 만족), 중간 강도의 객체는 주황색(판별시험 4~5개 만족), 상대적으로 약한 객체는 녹색(판별시험 2~3개 만족)으로 표출하였다.

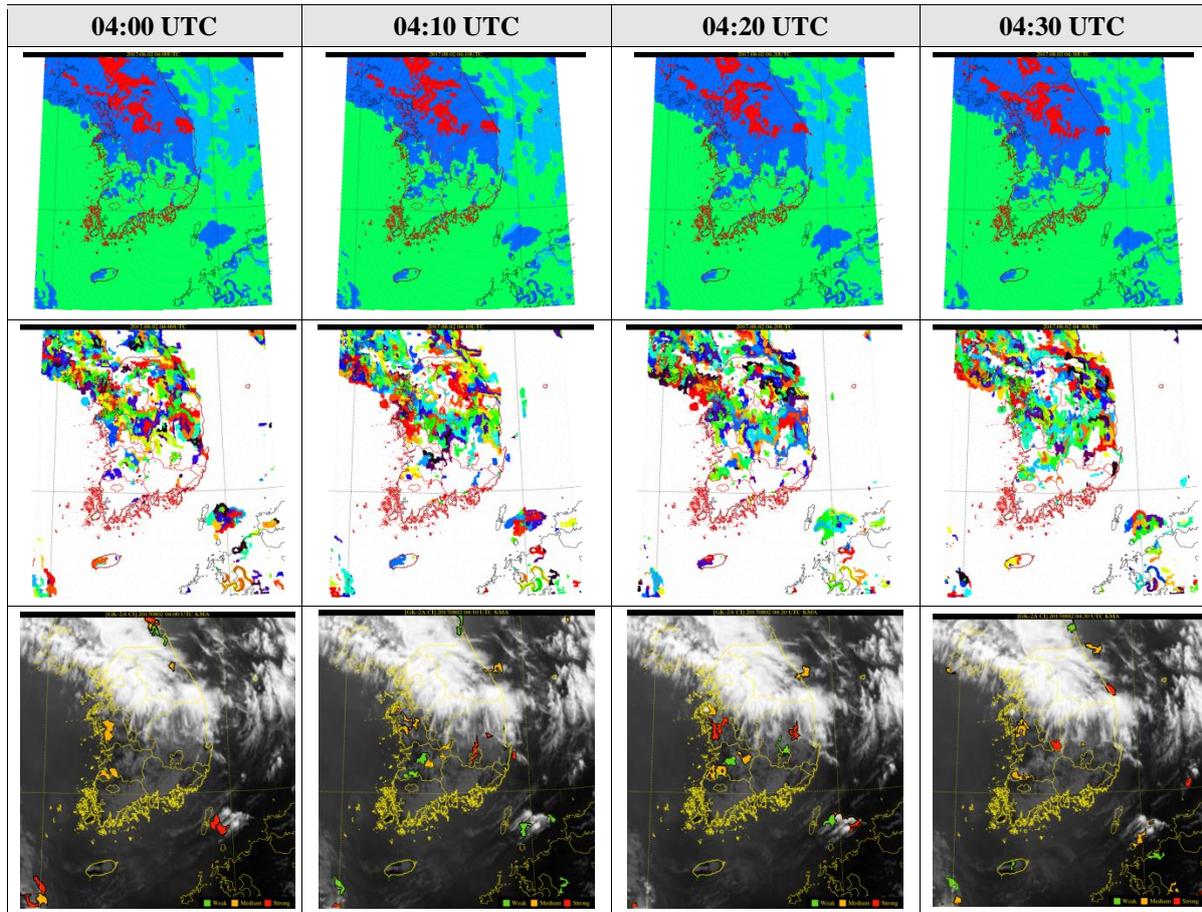
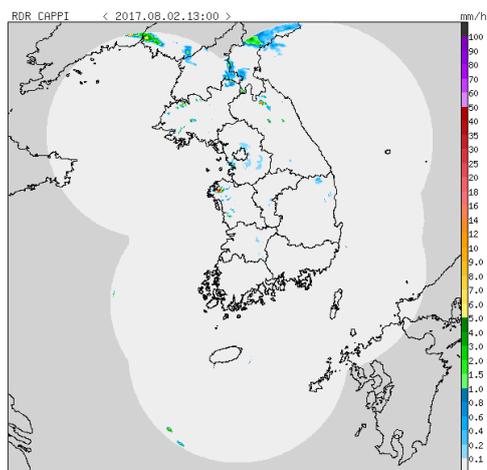


그림 3.2 2017년 8월 2일 대류운 발생탐지 알고리즘 시험 결과. 위쪽부터 차례대로 대류운 마스크 결과, 구름 객체화 결과, 대류운 발생 가능 객체 결과를 보여주고 있음

(a) 04:00 UTC



(b) 06:00 UTC

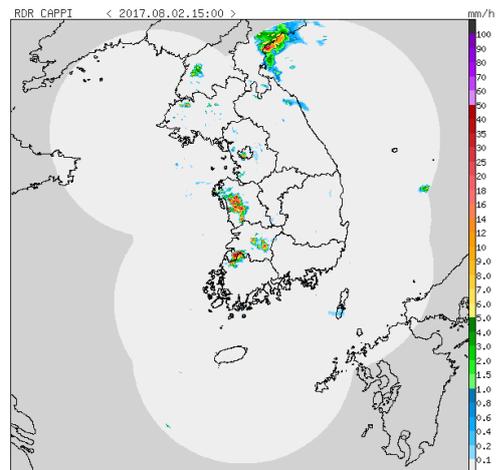


그림 3.3 2017년 8월 2일 (a) 04:00 UTC, (b) 06:00 UTC 레이더 CAPPI 1.5 km 합성 영상

대류운발생탐지 결과를 살펴보면 04:00 UTC에 전라도 및 충남에서 상승하는 구름 객체를 탐지하였으며, 04:30 UTC까지 지속적으로 탐지된 것을 확인할 수 있다. 그림 3.3에는 CI가 탐지된 시각과 2시간 후의 레이더 CAPPI 1.5km 합성장 자료를 나타내었으며, 그림 4.2(b)와 비교하여 보면 CI 탐지 결과와 2시간 후의 레이더 에코 탐지 영역과 유사하다. 따라서 CI 결과가 향후 2시간 이내에 대류운으로 발달하는 객체를 잘 탐지한 것을 확인할 수 있다. 그러나 04:10과 20 UTC에 경북지역에 나타난 객체들은 연속적으로 수직적 상승을 보였음에도 불구하고 강수를 유발하는 대류운으로 성장하지 못하였다. 이러한 오탐지를 줄이기 위하여 먼저는 객체의 시간 변화가 정확히 계산될 수 있도록 객체 추적 기법의 개선이나 CI를 결정하는 경계값 조건들을 조정해야 할 것이다.

그림 3.4는 두 번째 사례의 결과로 2017년 8월 6일 07:10 UTC부터 07:40 UTC의 대류운발생탐지 산출 결과를 나타내고 있다. 이 사례는 상층 북쪽 기압골의 남하와 일본에 위치한 태풍에 의한 기류 수렴으로 인한 대기 불안정 사례이다. 산출물의 결과 표출 방식은 첫 번째 사례와 동일하다. 마지막 행의 결과를 살펴보면 07:10 UTC에 전라도, 충북 및 강원 지역에 상승하는 구름 객체가 탐지되었으며 지속적으로 대류운발생 가능성의 시그널을 주고 있다. 그림 3.5(b)에서 볼 수 있듯이 CI가 탐지된 영역과 레이더에서 탐지된 강수 영역이 대부분 일치하는 것을 알 수 있다. 광주 지역 부근에 위치하는 객체는 07:20 UTC에 사라졌다가 07:30 UTC에 다시 나타나는 것으로 보아 약하게 상승하는 객체임을 알 수 있다. 레이더 에코와 일치하는 객체 외에 구름 가장자리에서의 수직 상승이 탐지된 객체들이 다소 많은 것을 확인할 수 있다. 이러한 객체들은 대류운이 발생한 이후에도 지속적인 발달을 예측하여 발달과정 탐지에 유용하나 대류운이 아닌 구름 유형에도 나타나기 때문에 이에 대한 조율이 필요하다고 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 향후 구름 객체를 위한 군집화 조건을 조정할 것이다.

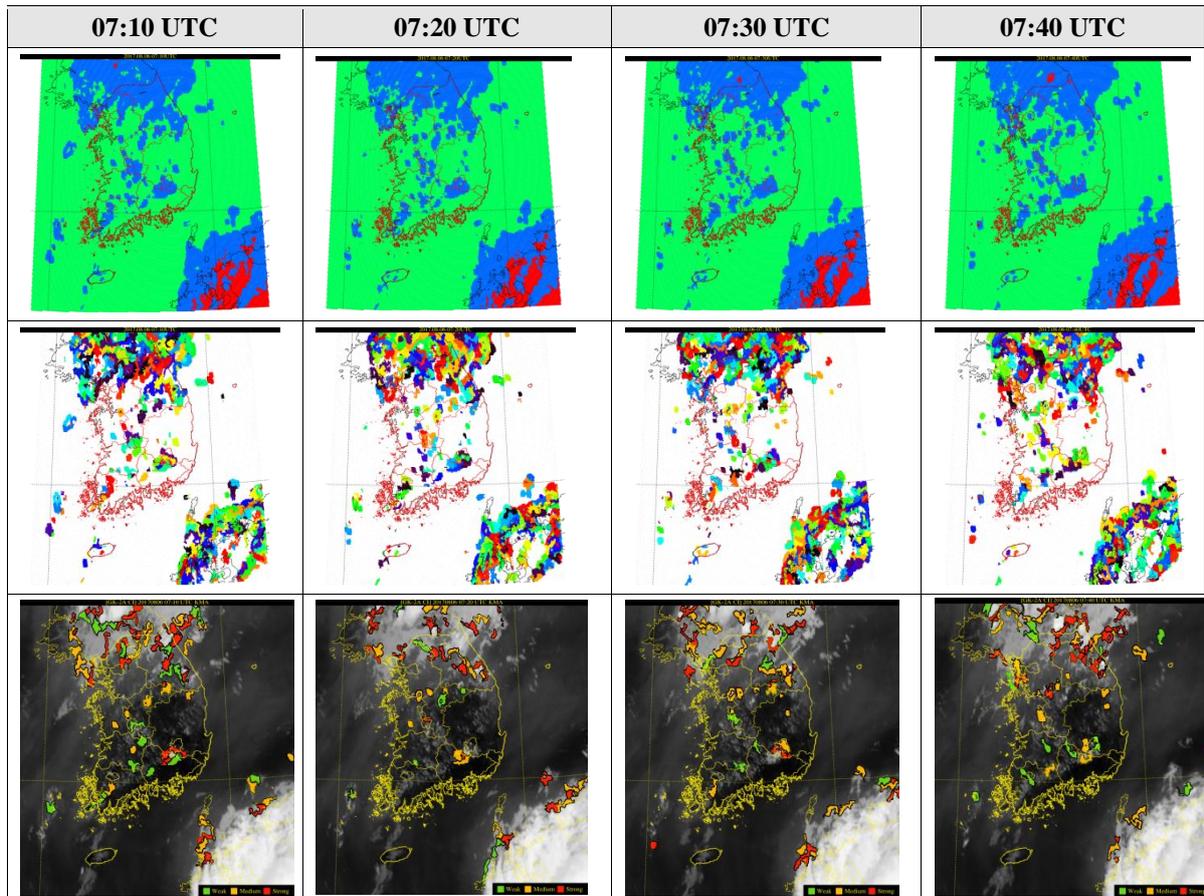
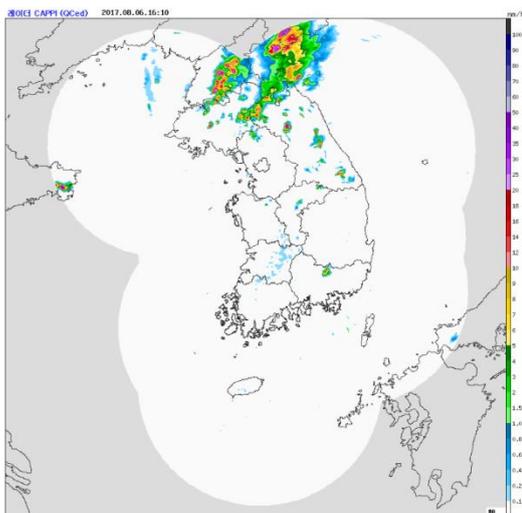


그림 3.4 2017년 8월 6일 대류운 발생탐지 알고리즘 시험 결과. 위쪽부터 차례대로 대류운 마스크 결과, 구름 객체화 결과, 대류운 발생 가능 객체 결과를 보여주고 있음

(a) 07:10 UTC



(b) 08:10 UTC

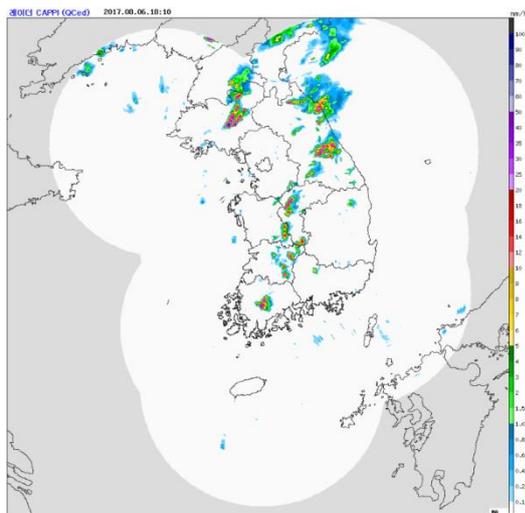


그림 3.5 2017년 8월 6일 (a) 07:10 UTC, (b) 08:10 UTC 레이더 CAPPI 1.5km 합성 영상

앞서 설명한 GK-2A CI 알고리즘 시험 사례에 대하여 정량적 검증 값을 계산하였다. 2017년 8월 우리나라 주변의 2개 사례에 대한 검증결과는 표 3.3, 표 3.4와 같다. 2017년 8월 2일의 경우 평균적으로 0.85의 POD 값과 0.61의 FAR 값을 보이고 있으며, 2017년 8월 6일의 경우 0.90의 POD 값과 0.38의 FAR 값을 보이고 있다. 두 사례 모두 정성적, 정량적으로 대류운 발생을 사전에 잘 탐지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 8월 2일 사례의 경우 FAR 지수가 0.4 이상으로 나타났다. 2017년 8월 한 달에 대한 검증 결과, POD 0.90, FAR 0.67로 오탐지된 객체가 다소 많은 편이다. 이는 오탐지가 존재하더라도 미탐지 객체를 줄이는 방향으로 개발하였기 때문이다. 추후 오탐지를 줄이기 위해 알고리즘을 최적화하는 과정이 필요하다.

표 3.3 2017년 8월 2일 대류운발생탐지 알고리즘 검증 통계 값

	04:00 UTC	04:10 UTC	04:20 UTC	04:30 UTC	Total
POD	0.90	0.86	0.89	0.68	0.85
FAR	0.56	0.57	0.51	0.80	0.61

표 3.4 2017년 8월 6일 대류운 발생탐지 알고리즘 검증 통계 값

	07:10 UTC	07:20 UTC	07:30 UTC	07:40 UTC	Total
POD	0.93	0.86	0.90	0.91	0.90
FAR	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

수치계산을 위해 고려되어야 할 사항으로는 산출주기, 산출영역이다. 본 알고리즘은 한반도에서 발생하는 대류운을 탐지하는 것이 목적이므로 한반도 영역의 자료를 이용하여야 한다. 따라서 GK-2A/AMI 센서를 이용하게 된다면 산출주기도 기존의 Himawari-8/AHI에서 제공하는 전구영역의 주기(10분)와는 상이할 것이라고 판단된다. 또한 산출주기가 변동되면 객체 상승 속도 검사에서 적용되는 경곶값도 수정되어야 할 것이다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

해당사항 없음

4.3 품질 평가 및 진단

대류운 발생 탐지 산출물은 위험기상을 유발하는 구름 객체를 탐지하는 알고리즘이기 때문에 지상관측자료의 강수나 레이더 강수 에코 자료, 혹은 낙뢰 자료로 검증해야 한다. 따라서 본 연구는 레이더 CAPPI 1.5 km 합성장을 이용하여 검증을 수행하였으며, CI 발생 후 2시간까지의 레이더 자료를 이용하여 POD, FAR 등의 검증스코어를 산출하였다.

4.4 예외사항 처리

알고리즘 수행에 필요한 GK-2A AII 자료가 누락되는 경우 수치예보모델 GDAPS 자료를 사용하여 계산하고, 모델 자료도 없는 경우에는 대기안정도지수를 사용하지 않는 상태로 알고리즘이 수행된다. 또한 이전 시간의 영상이 없는 경우에는 현재 시간 영상만으로 알고리즘이 수행된다. 그러나 시간변화율에 대해서는 산출되지 않아 상승 강도 대신 대류 발생 가능성이 있는 객체만 산출된다. 그리고 필수 자료인 GK-2A/AMI 적외 채널 자료가 잘못되었거나 누락되었을 경우에는 알고리즘이 수행되지 않는다.

4.5 검증 알고리즘

검증은 레이더 CAPPI 1.5 km 합성장 자료를 사용하며, 기상청에서 관측 중인 자료이기 때문에 10분 뒤에 수집된다. CI 산출 시각 이후 20분~2시간 이내의 레이더 자료를 사용하므로 2시간 뒤에 검증이 가능하다. 간혹 레이더 CAPPI 합성장 중에서 모든 레이

더가 합성되지 않는 경우가 발생하므로 검증에 사용되는 10개의 자료 중 절반 이상의 자료에서 레이더 신호가 없는 경우는 검증 대상에서 제외하였다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

해당사항 없음

5.2 예상 센서 성능

현재 대류운발생탐지 알고리즘은 Himawari-8/AHI 센서로 개발되었기 때문에 GK-2A AMI 자료를 적용하면 결과가 상이하게 도출될 가능성이 있다. 따라서 GK-2A AMI의 궤도상 시험 과정에서 개선 작업이 이루어져야 한다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

대류형 구름 분류 단계 및 대류운 판별 경계값 검사(Interest field)는 현재 33개의 대류운 사례를 이용하여 경계값을 결정하였다. 이 사례들은 주로 열적 불안정에 대한 사례이며 2017년 자료만을 이용하였다. 추후 장기간의 다양한 대류운 모니터링을 통해 경계값을 최적화할 계획이다. 또한 이전 시간 객체를 사용하는 데 있어 시간 간격에 대한 연구를 수행할 것이다.

6. 참고문헌

- 기상청 예보기술분석과 (2014). 손에 잡히는 예보기술 통합본. 90-97.
- Bins, L. S. A., Fonseca, L. G., Erthal, G. J., and Ii, F. M. (1996). Satellite imagery segmentation: a region growing approach. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 8, 677-680.
- Chahine, M. T. (1974). Remote sounding of cloudy atmospheres. I. The single cloud layer. *Journal of Atmospheric Science*, 31, 233-243.
- George, J. J. (1960). Weather Forecasting for Aeronautics. Academic Press, 410-415.
- Hayashi, M. (2015). Development of the optimal cloud Analysis product for the next geostationary meteorological satellites “Himawari-8/9” , *The annual EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 21-25, September, Toulouse, France.
- Heidinger, A. K. and M. J. Pavolonis (2009). Gazing at cirrus clouds for 25 years through a split window. Part I: Methodology. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 48, 1100-1116.
- Hogan, R. J., Illingworth, A. J., O’ Conner. E. J. and Poiaras Baptista, J. P. V (2003). Characteristics of mixed phase clouds. II: A climatology from ground-based lidar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, 2117-2134.
- Inoue, T. (1985). On the temperature and effective emissivity determination of semi-transparent cirrus clouds by bi-spectral measurements in the 10 μm window region. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 63, 88-98.
- Izumi, O., I. Takahito, and I. Yasushi (2011). Detection of rapidly developing cumulus area through MTSAT rapid scan operation observations, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, 55, 69-90.
- Lakshmanan, V., K.Hondl, and R. Rabin (2009). An efficient, general-purpose technique for identifying storm cells in geospatial images. *Journal of Oceanic Atmos Technique*, 26, 523-537.

- Marshall, J. S., and W. McK. Palmer (1948). The distribution of raindrops with size, *Journal of Meteorology*, 5(4), 165–166.
- Mecikalski, J. R., and K. M. Bedka (2006). Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery. *Monthly Weather Review*, 134(1), 49–78.
- Meteo–France (2013). Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (CMA–PGE01 v3.2, CT–PGE02 v2.2 & CTTH–PGE03 v2.2)
- Moncrieff, M. W., and M. J. Miller (1976). The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373–394.
- Muller, C., T. Saxen, R. Roberts, J. Wilson, T. Betancourt, S. Detting, N. Oien, and J. Yee (2003) NCAR Auto–Nowcast System, *Weather Forecasting*, 18, 545–561.
- Roberts, R. D., and S. Rutledge (2003). Nowcasting storm initiation and growth using GOES–8 and WSR–88D data. *Weather Forecasting*, 18, 562–584.
- Showalter, A. K. (1947). A stability index for thunderstorm forecasting. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 34, 250–252.
- Szejwach, Gerard (1982). Determination of semi–transparent cirrus and cloud temperature from infrared radiances: Application to METEOSAT, *Journal of Applied Meteorology*, 21(3), 384–393.
- Uijlenhoet R. (2001). Raindrop size distributions and radar reflectivity–rain rate relationships for radar hydrology, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 615–627.
- Walker, J. R., and J. R. Mecikalski (2011). NOAA NESDIS center for satellite applications and research algorithm theoretical basis document convective initiation.
- Walker, J. R., W. M. Mackenzie JR, J. R. Mecikalski, and C. P. Jewett (2012) An enhanced geostationary satellite–based convective initiation algorithm for 0–2h nowcasting with object tracking, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 1931–1949.
- Wolters, E. L. A., R. A. Roebeling, and A. J. Feijt (2008) Evaluation of cloud–phase

retrieval methods for SEVIRI on *Meteosat-8* using ground-based lidar and cloud radar data, 47, 1723–1738.