

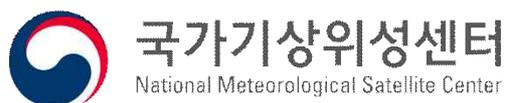
GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

대류권계면 접힘 난류 탐지
(Tropopause Folding
Turbulence Detection)

김미정 부산대학교

Version 1.0

2019. 03. 20.



<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	전체 알고리즘 개요	0.1.0.0	2016.12	김미정
0.2	검증 결과 추가 및 알고리즘 설명 수정	0.4.3.1	2017.09	김미정
0.3	전문가 평가에 따른 권고 사항 수정	0.5.0.0	2018.04	김미정
1.0	ATBD 포맷 및 입력 자료 수정	0.5.3.1	2019.03	김미정

<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	3
2.3. 입력 자료	4
2.3.1 L1B	4
2.3.2 보조 자료	5
2.4. 이론적 배경	5
2.5. 수학적 설명	6
2.6. 산출물	12
3. 모의 자료 및 검증	13
3.1. 모의 입력 자료 및 검증 자료	13
3.1.1 L1B	13
3.1.2 보조 자료	13
3.1.3 검증 자료	13
3.2. 검증 방법	14
3.3. 검증 결과	16
4. 현업 운영 시 고려사항	20
4.1. 수치계산 고려사항	20
4.2. 프로그래밍 절차상의 고려사항	20
4.3. 품질 평가 및 진단	20
4.4. 예외사항 처리	20
4.5. 검증 및 알고리즘	20
5. 가정 및 제한	21
5.1. 성능	21
5.2. 예상되는 센서 성능	21
5.3. 산출물 개선을 위한 사전계획	21
6. 참고문헌	22

<표 목차>

Table 1 Product requirements	3
Table 2 AMI channel specification	5
Table 3 Tropopause Folding Turbulence mask index	12
Table 4 The turbulence intensities reported in the Pilots Report.	14
Table 5 2×2 Contingency Table for the score test	15
Table 6 The goal accuracy of TFTD	15
Table 7 2×2 Contingency Table for the score test of 2016	17
Table 8 The validation result of TFTD in 2016	15
Table 9 2×2 Contingency Table for the score test of 2017	15
Table 10 The validation result of TFTD in 2017	15

〈그림 목차〉

Figure 1 Cross-section of a tropopause folding illustration	2
Figure 2 The TFTD Flowchart illustrating the main processes.	4
Figure 3 Flowchart of the Edge Detection Process for (a) Wimmers and Feltz(2010) method for GOES-R TFTP and (b) Canny edge detection within a main processing.	8
Figure 4 Sobel operator 3×3 mask for (a) x-direction(Gx) and (b) y-direction(Gy).	9
Figure 5 The partition of gradient orientation for possible edges.	10
Figure 6 Pixel locations for Non-maximum Suppression according to the gradient orientation partition of (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4.	10
Figure 7 Flowchart of the edge expansion and quality control processes within a main processing.	11
Figure 8 The spatial distribution of the Pilot Reports(PIREPs) from 2014 to 2015.	14
Figure 9 Step-by-step result of the tropopause folding turbulence detection from Himawari-8 AHI data; (a) LASH calculation, (b) cloud-clearing using 232K threshold(Kim and Kim, 2017), (c) Canny edge detection, (d) edge expansion and quality control, and (e) the final result on 0000UTC 8th April, 2016.	16
Figure 10 Step-by-step result of the tropopause folding turbulence detection from Himawari-8 AHI data; (a) LASH calculation, (b) cloud-clearing, (c) Gradient Magnitude, (d) LASH and final result of TFTD on 0130UTC 1st January, 2017.	18

ACRONYMS AND ABBREVIATIONS

ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
AMI	Advanced Meteorological Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
CAT	Clear Air Turbulence
CIT	Convective Induced Turbulence
GK-2A	Geostationary Korea Multipurpose Satellite (GeoKOMPSAT) - 2A
L1B	Level 1b
LASH	Layer Average Specific Humidity
POD	Probability Of Detection
POFD	Probability Of False Detection
PVU	Potential Vorticity Unit
TFTD	Tropopause Folding Turbulence Detection
UM	United Model

1. 개요

1.1. 목적

본 알고리즘 기술서는 한국의 후속 기상위성 GK-2A에 탑재된 AMI 센서를 이용하여 산출되는 대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘의 개요와 물리적인 설명을 위해 작성되었다.

1.2. 사용자

본 문서의 사용자는 대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘의 물리적 원리를 이해하거나 산출물을 이용하고자 하는 이를 대상으로 한다.

1.3. 내용

본 문서는 다음과 같은 순서로 구성된다.

- 개요 : ATBD의 전체적인 목적, 사용자, 내용과 관련 문서를 서술함
- 알고리즘 소개 : 알고리즘의 이론적 배경과 설명, 입력 자료와 출력물을 포함한 알고리즘의 상세한 서술
- 시험자료 및 출력물 : 개발된 알고리즘을 사전에 시험하기 위한 모의 입력 자료와 검증 방법 및 결과 서술
- 현업 운영 시 고려사항 : 수치계산, 품질 평가, 예외 처리, 그리고 검증 알고리즘에 관한 사항 서술
- 가정 및 제한 : 현재 알고리즘의 한계와 개선을 위한 사전 계획 제시

1.4. 관련 문서

본 문서는 다른 문서와 연결되지 않으며, 참고 문헌은 문서 내에서 언급된다.

2. 알고리즘 소개

본 장은 대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘의 전체적인 개요, 처리 흐름, 이론적인 배경, 수학적 설명과 산출물을 자세히 기술한다.

2.1. 개요

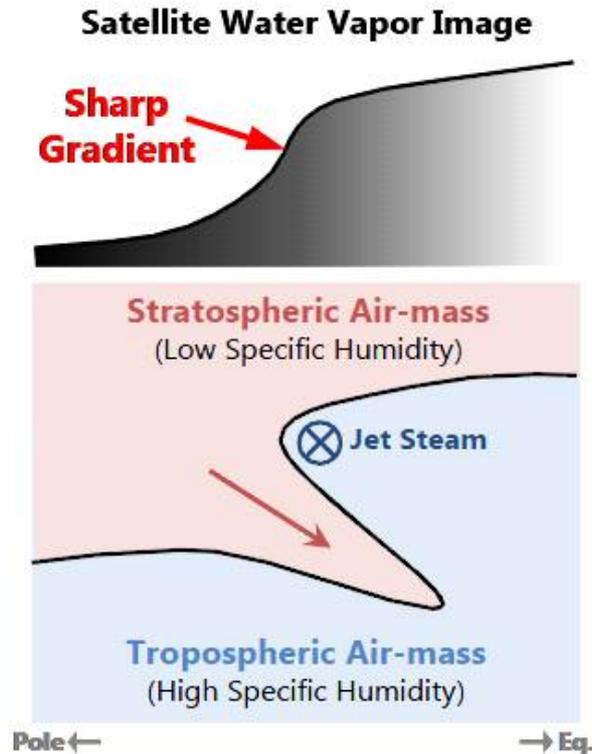


Figure 1 Cross-section of a tropopause folding illustration

TFTD는 성층권과 대류권 기단의 경계에서 발생하는 대류권계면 접힘 영역에서 발생할 수 있는 역학적 난류 영역을 탐지한다. 대류권계면 접힘은 수증기의 공간적인 구배와 밀접한 상관관계를 가지므로 상부 대류권 수증기량에 민감한 AMI 6.3 μ m 수증기 채널을 이용한다. 알고리즘의 첫 번째 단계에서는 수증기 채널 밝기 온도와 수치모델 온도 프로파일을 보조 자료로 사용하여 상부 대류권 비습장(LASH)을 계산한다. 두 번째 단계로 계산된 LASH의 공간적인 구배(gradient)가 가장 큰 영역을 대류권계면의 갈라짐(break)이자 대류권계면 접힘이 시작한 위치로 정의하며, 이는 가장자리 탐지(edge detection) 기법을 사용하여 계산할 수 있다. 세 번째로 성층권 공기가 대류권으로 침투한 영역까지 확장시키며 이 지역을 대류권계면 접힘 영역으로 정의한다. 따라서 최종적으로 대류권계면 접힘으로 인한 난류 발생 가능 지역을 제시할 수 있다.

TFTD 산출물의 개발 요구사항은 표 1에서 확인할 수 있다.

Table 1 Product requirements

Geographic Coverage	Full Disk
Horizontal Resolution	0.1° × 0.1°
Measurement Range	Binary yes or no detection above 18000ft for Moderate or Greater(MOG) Turbulence
Measurement Accuracy	Probability of Detection(POD) : above 50% Probability of False Detection(POFD) : below 50%
Processing Time	180 sec

2.2. 알고리즘 흐름도

TFTD의 산출 순서는 아래 흐름도(그림 2)로 확인할 수 있다. 화소 기반으로 산출되는 산출물들과 달리, TFTD는 한번 처리할 때 계산된 가장자리 영역(edge)을 객체(object)로 처리함에 유의하여야 한다.

크게 산출 해상도인 0.1도 간격으로 위경도와 입력 자료를 변환하는 과정, LASH를 계산하는 과정, 에지 탐지를 수행하는 과정, 권계면 접힘 영역인 에지 확장 영역을 계산하는 순서로 수행된다. 자세한 계산 방법은 알고리즘의 다음 장의 수학적 설명에 기술하였다.

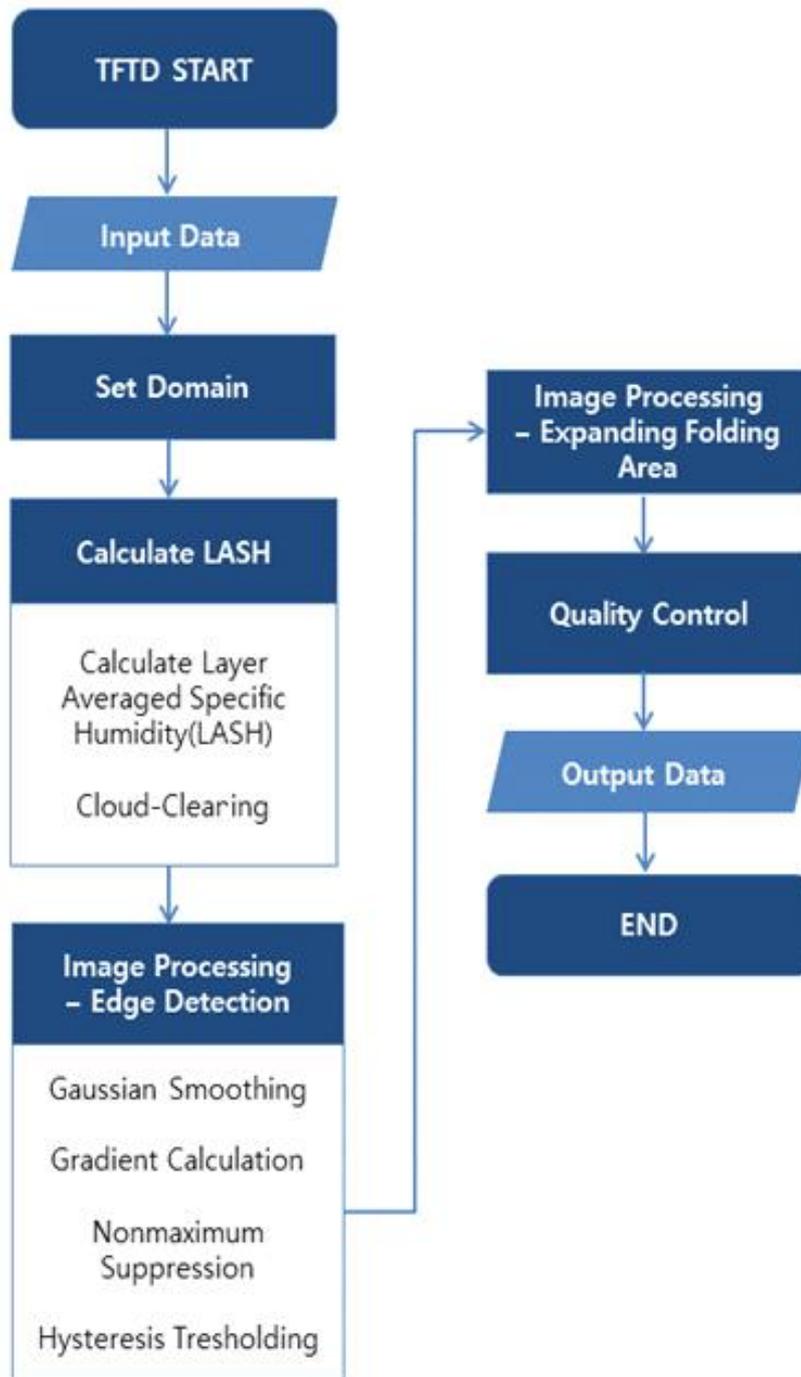


Figure 2 The TFTD Flowchart illustrating the main processes.

2.3. 입력 자료

본 장은 대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘을 구동하기 위한 입력 자료를 서술한다.

2.3.1. L1B

TFTD에 사용되는 AMI 센서의 채널 정보는 아래 표 2와 같다. 알고리즘 구동에 필수적인 기본 입력 자료로서, 센서 정보와 위경도 자료를 입력받는다. TFTD 알고리즘은 본 두 자료가 준비되지 않을 시 산출되지 않으며 그 외 계산에 추가로 필요한 위성 천정각은 내부에서 위경도 자료를 이용해 서브루틴으로 계산된다.

Table 2 AMI channel specification

Channel	Spectral range (μm)	Center wavelength (μm)	FOV (km)	Used in AMI TFTD
visible	0.43 - 0.479	0.47	1	
	0.50 - 0.52	0.511	0.5	
	0.625 - 0.66	0.640	1	
near-infrared	0.85 - 0.87	0.856	2	
	1.37 - 1.38	1.38	2	
	1.60 - 1.62	1.610	2	
infrared	3.74 - 3.96	3.830	2	
	6.06 - 6.425	6.241	2	0
	6.89 - 7.01	6.952	2	
	7.258 - 7.43	7.344	2	
	8.44 - 8.76	8.592	2	
	9.543 - 9.72	9.625	2	
	10.25 - 10.61	10.403	2	
	11.08 - 11.32	11.212	2	
	12.15 - 12.45	12.364	2	
13.21 - 13.39	13.31	2		

2.3.2. 보조 자료

TFTD를 구동하기 위한 보조 자료는 기상청 통합 모델(UM)에서 산출되는 예보장이다. 그 중에서 온도 프로파일만 사용되며, 수증기 채널 휘도 온도를 수증기량에 대한 함수로 만드는 과정에서 사용된다.

현재 최종 개발 단계에서는 기상청 현업에서 사용되는 UM 전 지구 예보장의 최신 버전을 사용하며 6시간 간격으로 1일 4회 1시간 간격으로 제공된다.

2.4. 이론적 배경

TFTD 알고리즘은 상부 대류권 전선 시스템에서 발생하는 역학적 난류 영역을 탐지하는 알고리즘이다. 난류는 수십년간 역학적으로 다양한 시공간 규모의 대기 현상으로서 연구되어 왔다. 이 문제에 대한 역학적 배경을 이해하기 위해서는 레이놀즈 수(Reynolds number)와 같이 수학적으로 간소화된 난류의 지표를 정의하는 단계가 필요할 것이나, 대기에서 발생하

는 난류는 유체의 유동 중에서 무질서하고 비정상성을 가지는 경우로서 결정론적인 접근이 어렵기 때문에 최종적인 수학적 지수나 정의는 현재로서도 존재하지 않는다. 또한 대기 요란의 발달은 종관규모 이상의 배경 흐름으로부터 에너지를 받으며 더 물리적으로 작은 규모로 그 에너지가 전달되면서 발달하는데, 이 과정이 무질서하고 비정상성을 가지게 되므로 난류의 예측은 극히 제한될 수 있다.

본 알고리즘에서 탐지하는 난류는 항공기 순항에 영향을 끼치는 규모의 맴돌이(eddy) 현상이며 이를 탐지하기 위해서는, 난류를 발생시키는 더 큰 메커니즘을 탐지하는 방법으로 접근할 수 있다. 난류는 큰 규모에서 작은 규모로 에너지를 전달(cascade) 시키며 발달하기 때문에 더 큰 규모의 영역을 분석하는 접근은 기술적으로나 수치 모델을 이용한 난류 탐지나 예측을 하는 방법으로서 일반적으로 널리 사용되고 있다. Wimmers and Moody(2004a,b)가 위와 같은 접근 방법을 실제 관측과 이론 사이의 관계를 이용하여 제시하였으며, TFTD 알고리즘은 이러한 물리적 과정과 방법에 기초하여 개발되었다.

대류권계면 접힘은 상부 대류권에서 극기단, 아열대기단, 성층권기단이 만나 비지균적인 힘에 의해 기단의 가장자리에서 성층권 공기가 대류권으로 침투한 영역을 의미한다(Keyser et al., 1986). 한편 각 기단이 만나는 경계에서 지균 흐름인 제트류(jet stream)는 대류권계면 접힘 영역을 강화시켜 성층권 공기를 끌어당긴다(Keyser and Pecnick, 1985a,b). 이렇게 발달한 영역은 성층권에서 침투한 오존으로 상부 대류권의 오존 농도 상승, 대류권에서 유입된 하부 성층권의 에어로졸 농도 상승, 그리고 성층권 공기를 진단할 수 있는 잠재 와도의 상승으로 확인 할 수 있다(Danielson, 1968).

대류권계면 접힘의 내부는 하부 성층권에서 유래한 기단이므로 열적으로 안정하지만 접힘 영역의 상부와 하부 경계면은 상부 대류권 기단의 영역으로 열적안정도가 낮고 연직적으로 바람시어가 존재하므로 난류가 발생하기 쉬운 영역을 된다. 이에 Shapiro(1981)는 난류가 전선을 통과하는 모멘텀의 차이를 유지하기 위해 발생할 수 밖에 없음을 역학적으로 유도한 바 있으며, 이를 기반으로 대류권계면 접힘에서는 청천 난류가 발생할 가능성이 매우 높다고 정의할 수 있다.

위와 같은 원리로 위성 관측 자료로부터 대류권계면 접힘 영역을 산출한다면 이를 대류권계면 접힘 난류 발생 영역으로 제시할 수 있다. 접힘 영역에서는 연직적으로 수증기의 양이 급격히 차이가 나기 때문에, 위성 영상에서는 휘도 온도의 급격한 기울기(gradient)가 발생한다(그림 1). 따라서 상부 대류권 수증기의 절대적인 양인 상부 대류권 비습에 대한 함수로 수증기채널을 변환하고, 이에 대한 공간적인 기울기를 구함으로서 대류권계면 접힘 영역을 산출할 수 있다.

2.5. 수학적 설명

이론적 배경에 따라 TFTD 알고리즘은 상부 대류권 수증기 채널을 이용하여 기단의 경계면을 찾고, 경계를 대류권계면 접힘으로 정의한다. 화소 규모에서 산출하는 다른 알고리즘과 달리 본 알고리즘은 산출물인 난류의 특징을 하나의 화소 아니라 종관적인 규모의 객체 단위로 계산을 수행하며, 기하학적인 영역을 산출한다.

본 알고리즘의 첫 번째 단계는 상부 대류권의 비습장, LASH를 산출하는 단계이다. LASH는 Wimmers and Moody(2001)이 위성 천정각과 공기의 온도 영향을 배제한 위성의 수증기채널이 비습의 로그와 거의 비례한다는 것에 주목하여 유도하였다. LASH 식의 수학적 인 유도는 아래와 같다. 먼저 식 1은 Soden and Bretherton(1996)이 제시한 수증기 채널 휘도온도(T_{wv})가 상부 대류권 상대습도에 대한 함수임을 나타낸다.

$$\text{Log}\left(\frac{RH}{\cos\theta}\right) = \log(RH) - \log(\cos\theta) = a - b \cdot T_{wv} \quad \text{eq. 1}$$

θ satellite zenith angle
 a, b constants

위와 같은 관계를 이용하여 Wimmers and Moody(2003)은 Clausius-Clapeyron 관계를 이용하여 상대습도가 비습과 상부 대류권 온도장으로 나뉘질 수 있음을 이용하여 다음과 같이 정리했다.

$$\log(RH) = \log(q) + c_1 \bar{T} + c_0 \quad \text{eq. 2}$$

\bar{T} weighted average of upper-tropospheric temperature

그 후, 식 1과 2를 결합하여 아래와 같은 일반화된 LASH 식을 유도하였다. \bar{T} 는 상부 대류권 온도장을 기준 기압에 대해 가우시안 가중 평균하여 사용한다. 본 알고리즘에서는 기준 기압(400hPa)을 기준으로 표준 편차가 1인 가우시안 커널을 계산하여 온도 프로파일에 서 상부 대류권 온도장을 위해 연직 평균한다.

$$LASH = c_q \log(q) + c_{\theta} = T_{wv} - \bar{T} - c_{\theta} \log(\cos\theta) + c \quad \text{eq. 3}$$

현 알고리즘 개발 단계에서는 COMS UTH(Upper Tropospheric Humidity) CMDPS 코드에서 사용되는 월별 계수 b를 이용하여 아래와 같은 LASH 계산식을 사용하였다.

$$LASH = T_{wv} - \bar{T} - b \cdot \log(\cos\theta) + 240 K \quad \text{eq. 4}$$

LASH 공간적인 구배(gradient)를 계산하기 전에, 간단하지만 저위도의 구름을 제거하기 위한 단일 경계값을 적용한다.

$$LASH(LASH < Threshold) = Threshold \quad \text{eq. 5}$$

계산된 LASH 영상의 공간적인 구배가 가장 큰 영역은 컴퓨터 비전/이미지 프로세싱

(Computer Vision/Image Processing) 분야에서 사용되는 에지 검출 알고리즘(Edge Detection Algorithm)을 사용한다. 본 알고리즘에서 사용된 에지 검출기는 Canny 에지 검출기(Canny Edge Detection)이다.

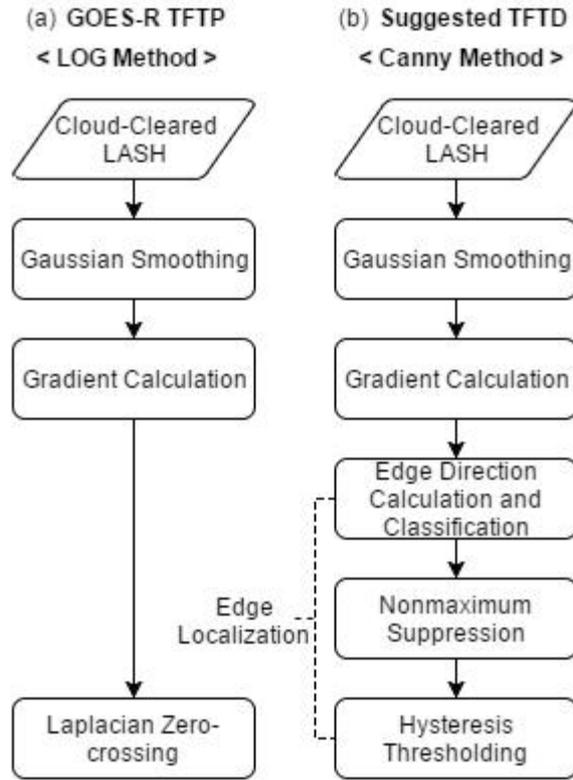


Figure 3 Flowchart of the Edge Detection Process for (a) Wimmers and Feltz(2010) method for GOES-R TFTP and (b) Canny edge detection within a main processing.

그림 3은 본 알고리즘에서 사용된 Canny 에지 검출의 알고리즘 흐름도와 기존에 제시된 GOES-R TFTP의 에지 검출 알고리즘 흐름도이다. 저위도 구름이 제거된 이미지에서 최종적으로 계산하고자하는 중관 규모의 기울기를 산출하기 위하여 $\sigma = 0.30$ 로 하는 가우시안 스무딩(Gaussian Smoothing)을 수행한다. 이 때 사용되는 위치에 대한 함수 w 는 다음과 같으며 I 는 스무딩 된 LASH 이미지이며, (ϕ, θ) 는 경도와 위도, (ϕ_0, θ_0) 는 수행되는 픽셀의 경도와 위도 값이다.

$$\begin{aligned}
 LASH(smoothed) &= G_{\sigma} * I(\phi_0, \theta_0) \\
 &= \sum_{i=\phi_0-N}^{\phi_0+N} \sum_{j=\theta_0-N}^{\theta_0+M} w(\phi_{i0}, \theta_{j0}, \phi_i, \theta_j, \sigma) \cdot I(\phi_i, \theta_j)
 \end{aligned}
 \tag{eq. 6}$$

where

$$w_{gc}(\phi_{i0}, \theta_{j0}, \phi_i, \theta_j, \sigma) = c \cdot \exp\left\{-\frac{(\phi_i - \phi_{i0})^2}{2(\sigma \sec \theta_j)^2} - \frac{(\theta_i - \theta_{i0})^2}{2\sigma^2}\right\}$$

and

$$c = \left(\sum_{i=i0-N}^{i0+N} \sum_{j=j0-N}^{j0+M} w(\phi_{i0}, \theta_{j0}, \phi_i, \theta_j, \sigma) \right)^{-1}$$

스무딩 후 1차 미분인 소벨(Sobel) 연산자(그림 4)로 영상의 경사도를 계산한다. 그 후 Canny 에지 검출기는 계산된 경도, 위도 방향의 경사도(G_x , G_y)를 이용하여 에지의 방향을 계산 하며(식 7), 이를 4가지 방향으로 분리하여 1부터 4까지의 에지 방향에 대해서 번호를 할당한다(그림 5).

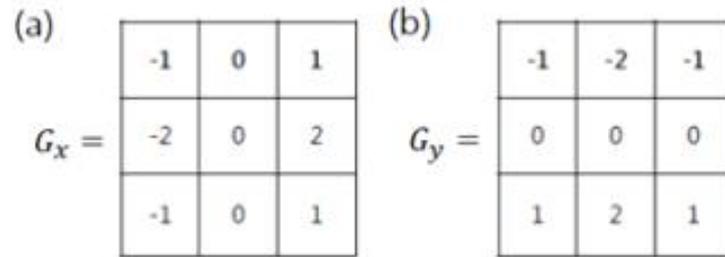


Figure 4 Sobel operator 3×3 mask for (a) x-direction(G_x) and (b) y-direction(G_y).

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_x^* I}{G_y^* I}\right) \quad \text{eq. 7}$$

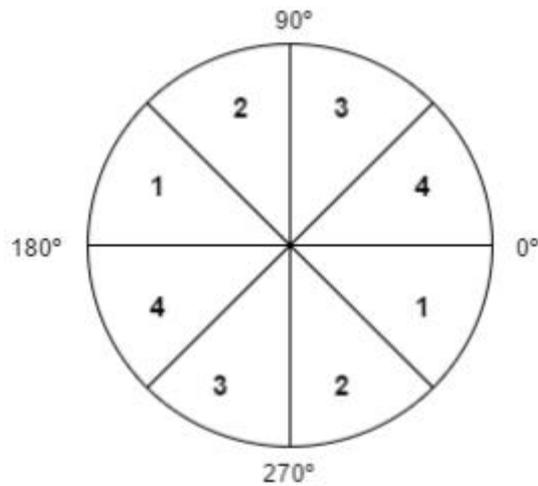


Figure 5 The partition of gradient orientation for possible edges.

계산하려는 화소의 3×3 주변 화소 영역에서 이전 단계에서 계산된 에지 방향의 두 화소를 비교하였을 때(그림 6), 중심 화소가 최대가 되지 않으면 지역적 비최대 화소(Local Non-maximum Pixel)로서 배경 화소로 할당된다.

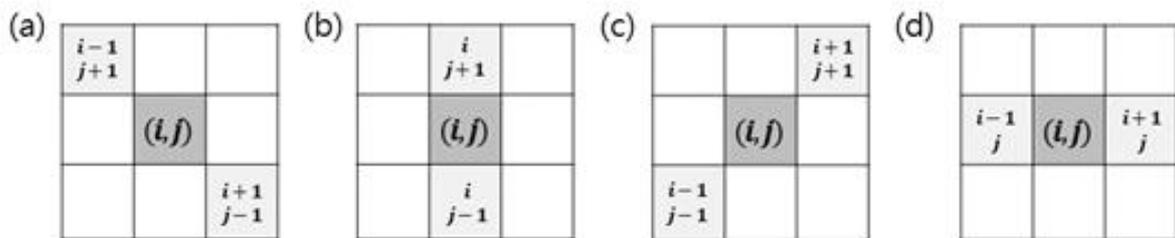


Figure 6 Pixel locations for Non-maximum Suppression according to the gradient orientation partition of (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4.

다음 과정은 두 경계값을 사용하는 방법이다. 각 경계값을 T1(최대 경계값), T2(최소 경계값)라고 부를 때, LASH의 공간 경사도가 T1보다 높으면 에지 화소, T2보다 낮으면 배경 화소로 할당하고 두 경계값 사이의 값일 경우에는 주변에 에지 화소와 연결되어 있을 때 에지 화소로 판별한다. 에지 화소를 1, 배경 화소는 0으로 입력하여 최종적으로 에지를 산출한다.

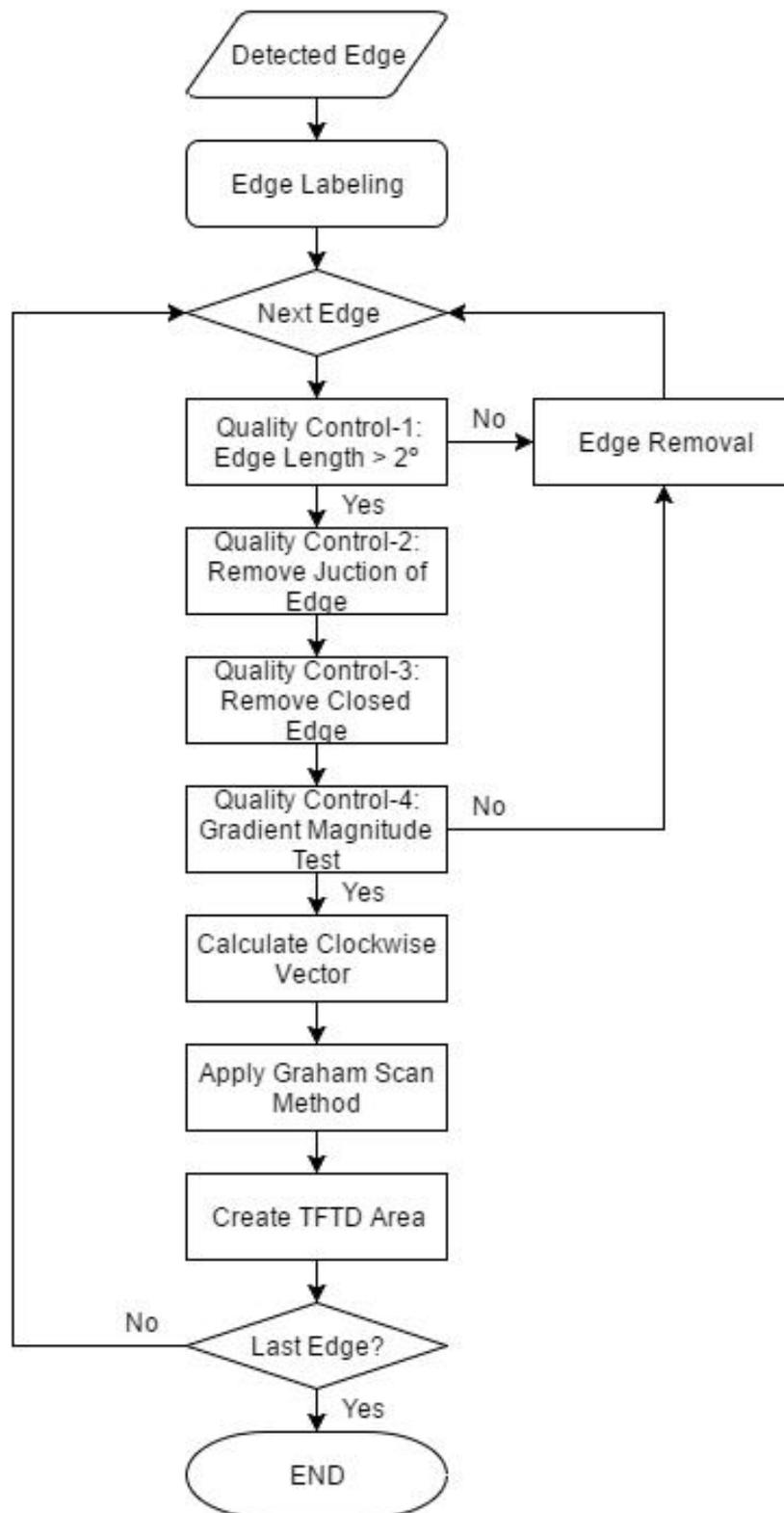


Figure 7 Flowchart of the edge expansion and quality control processes within a main processing.

알고리즘의 마지막 단계는 산출된 에지의 품질 관리와 에지 확장이다. 탐지된 에지는 대류권계면의 불연속(Tropopause Break) 영역으로 정의하며 품질 관리 단계가 수행된다(그림

7). 이 때, 예지로부터 비습이 높은 방향으로 2° (약 222km) 확장된 대류권계면 바깥쪽 경계까지의 영역을 대류권계면 접힘 영역으로 정의한다. 확장하는 영역은 Wimmers and Moody(2010)에서 항공 관측 데이터를 이용하여 경험적으로 제시되었다. 따라서 대류권계면 접힘이 발생하는 수평적인 영역을 0 또는 1로 마스킹하여 최종 산출물로 제시함으로써, 상부 대류권에서 항공기가 역학적 난류와 조우할 가능성이 높은 영역을 제공한다.

2.6. 산출물

대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘은 대류권계면 접힘이 발생한 영역을 대류권계면 접힘 난류 발생 가능지역으로 정의하여 해당 영역에 대한 마스킹을 산출한다. 난류가 존재할 시 1, 난류가 존재하지 않는 영역은 0을 나타낸다.

Table 3 Tropopause Folding Turbulence mask index

Turbulent Area	Non-turbulent Area
1	0

또한 TFTD의 보다 다양한 활용을 위하여, TFTD 산출 과정에서 활용 가능한 중간 산출물을 같이 제공한다. TFTD와 같은 해상도의 LASH(TFTD_LASH), LASH의 수평 구배 크기를 계산한 TFTD_MAG, 마지막으로 품질 관리 Flag를 포함한다 (TFTD_DQF).

3. 모의 자료 및 검증

3.1. 모의 입력 자료 및 검증 자료

TFTD의 개발을 위해 모의 시험 자료로 사용되는 자료들과 검증 자료에 대해 서술한다.

3.1.1. L1B

2015년 7월에 운영에 들어간 일본의 Himawari-8에 탑재된 AHI는 근적외 채널 외에 GK-2A AMI와 센서 스펙이 유사하다. 또한 AHI IR 채널의 공간적 해상도 4km, 전구(Full Disk) 기준 관측 해상도 10분으로 AMI와 같다. 따라서 TFTD 개발을 위한 시험에서 필수 입력 자료로서 AHI의 휘도온도가 AMI의 모의 자료로 사용되었으며, TFTD는 그 중 채널 8번 수증기 채널의 휘도 온도를 사용하였다.

3.1.2. 보조 자료

보조 자료로는 동적 입력 자료로서 UM 예보장을 사용한다. 이는 TFTD의 입력 자료와 같으며, 개발 초기에 ERA-Interim 재분석장 자료가 사용되었으나, 현업화를 위하여 기상청에서 제공하는 UM 예보장을 실시간으로 사용하도록 입력 자료가 수정 되었다. 사용된 UM은 N768 버전과 N1280 버전으로 수평 해상도 각각 약 17 km와 10km이며, 연직 해상도는 해발 80 km까지 70개 층의 모델 면으로 구성되어 있다. 하루 4번 00, 06, 12, 18UTC에 생산되며, 현업화를 위해 제공되는 자료는 1시간 간격의 예측장이며 다음 두 형식으로 제공된다; ph006(04 ~ 08 UTC 예측장), ph012(10 ~ 12 UTC 예측장). 계산된 예측장의 안정성을 위하여 +06 UTC 이상의 예측장을 사용하였으며, 가장 가까운 한 시간 간격의 예측장을 그대로 사용하였다. 이는 수증기 채널이 종관적인 흐름으로 움직이므로 예보장 사이의 내삽으로 인한 에지의 오탐지를 줄이기 위함이다.

3.1.3. 검증 자료

대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘을 검증하기 위하여 조종사 보고 자료(PIREPs)를 사용하였다. PIREPs은 항공 운항 중에 운항사와 항공 교통 관제사의 음성으로 기록되는 관측 자료로 관측 당시의 항공기의 위치, 관측 시간과 입력 시간, 항공기의 종류, 풍향, 풍속, 온도, 난류의 강도, 착빙, 시정 등의 정보를 제공한다. 난류의 강도는 아래 표와 같이 4가지 강도로 기록된다.

Table 4 The turbulence intensities reported in the Pilots Report.

무 강도	약 강도	중 강도	강 강도
null(NIL)	light(LGT)	moderate(MOD)	severe(SEV)

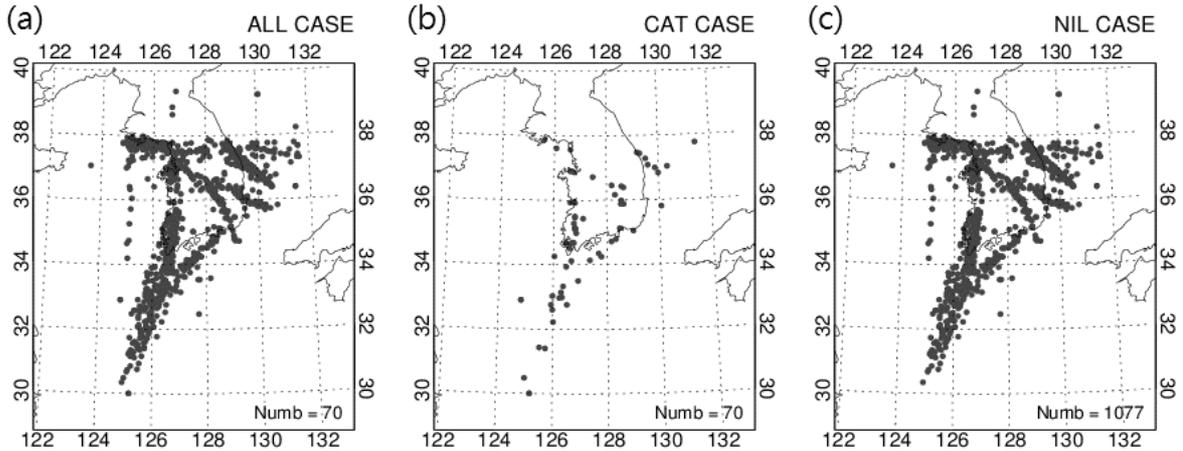


Figure 8 The spatial distribution of the Pilot Reports(PIREPs) from 2014 to 2015.

PIREPs은 보고한 조종사와 항공기의 종류, 크기에 따라서 불확실성이 높은 자료이며, 알고리즘 시험에서 사용된 PIREPs은 항공기상청에서 제공받았으며 한반도 주변, 특히 공항 주변부와 주요 항로로 한정되어 있다(그림 8). PIREPs은 보고된 고도 및 위치를 구두로 보고하므로 매뉴얼이 존재하더라도 다른 주기적인 지상 관측 자료에 비하여 주관성이 포함되므로 정확도가 낮다. 하지만 현재 수집할 수 있는 유일한 자료이므로 수치 모델을 이용한 난류 예측 시스템의 검증과 같은 선행 연구에서 검증과 분석에 활용되고 있는 자료이다.

3.2. 검증 방법

PIREPs은 항공기에서 구두로 보고되는 자료이므로 특성상 계통 오차(systematic error)가 존재한다. 정규 격자로 산출된 자료의 검증 지수로는 Score Test를 실시하여 탐지확률(POD)를 주로 사용한다. 탐지형 알고리즘의 검증 지수로 주로 사용되는 FAR(False Alarm Ratio), CSI(Critical Success Index)는 PIREP을 이용한 검증에서는 자료의 수집 개수에 따라 지수 값이 변할 수 있으므로 사용되지 않는다(Brown and Young, 2000). 다만 오탐지를 확인하기 위하여 관측 되지 않은 영역에서 얼마나 잘못 탐지하였는지 알 수 있는 오탐지확률(POFD)을 사용하고자 한다.

Table 5 2×2 Contingency Table for the score test

Observation Detection	Yes	No	Total
Yes	a(Hit)	b(False Alarm)	a+b
No	c(Miss)	d(Corrective Negative)	c+d
Total	a+c	b+d	a+b+c+d=n

본 알고리즘의 목표는 중강도 이상(Moderate or Greater; MOG)의 난류가 발생할 가능성이 있는 영역을 탐지하는 것이다. 이를 검증하기 위하여 PIREP에 중강도 이상(MOG) 사례가 보고된 경우 관측(Observation)이 YES, 발생하지 않았을 경우 NO, 그리고 TFTD 산출 결과 1일 경우 탐지(Detection)가 Yes, 0일 경우 No 로 하여 표 5와 같이 작성한다. 한편 PIREP에 보고된 난류 자료의 위·경도 자료의 불확실성을 고려하고자 보고 시점에서 50km 이내에 탐지할 경우 탐지 한 것(Hit)으로 간주하였다.

검증에 사용할 검증 지수는 Probability Of Detection(POD), Probability Of False Detection(POFD)이며, 아래와 같이 나타낼 수 있다(식 8). POD는 난류가 관측된 사례 중에 탐지가 성공할 확률(난류가 있을 때 난류가 있음을 탐지할 확률)로 부터 1까지의 값 중에서 1에 가까워질수록 알고리즘의 정확도가 높음을 나타낸다. POFD는 난류가 관측되지 않은 사례 중에 탐지가 성공하지 않을 확률(난류가 없을 때 난류를 탐지할 확률)이며 0에 가까워질수록 알고리즘의 정확도가 높음을 의미한다.

$$POD = \frac{a(Hit)}{a(Hit) + c(Miss)}, POFD = \frac{b(False Alarm)}{b(False Alarm) + d(Corrective Negative)} \quad \text{eq. 8}$$

최종 알고리즘의 목표 정확도는 POD 50%(0.5)이상, POFD 50%(0.5) 이하이다.

Table 6 The goal accuracy of TFTD

Probability Of Detection(POD)	Probability Of False Detection(POFD)
50% 이상	50% 이하

알고리즘 검증을 위해 사용되는 PIREPs의 사례일은 다음과 같은 방법으로 선정된다. 우선 보고된 PIREPs의 고도가 15,000 ft 이상인 중상층 난류 분류와 기상청 낙뢰 자료를 이용한 대류 시스템에 의한 난류(CIT) 제거 방법을 사용한다. 난류가 보고된 PIREPs 위치의 반경 50km, 40분 이내에서 낙뢰 관측이 존재 할 시 난류 사례일에서 제거하는 방법이다. 하지만 위와 같은 방법만으로는 대류권계면 근처의 제트류와 관련된 난류만을 선별하지

못하고 산악파에 의한 난류 등의 효과도 함께 고려된 결과이므로, 검증 결과를 높게 신뢰할 수 없다.

따라서 수치 예보 자료를 이용하여 대류권계면 고도를 계산하고, 권계면 고도 근처 1,000 m 이내에서 보고된 PIREPs만을 사용할 수 있도록 권계면 고도를 이용한 선정 방법이 추가로 사용된다. 대류권계면 고도는 오존 혼합비를 이용한 화학적 정의, 잠재 와도를 이용한 역학적 정의, 기온 감률을 이용한 열적 정의 등 여러 정의에 의해 계산될 수 있으며, 본 알고리즘의 검증은 WMO에서 제시한 열적 대류권계면(Thermal tropopause) 정의를 사용하였다; 기온감률이 2 °C/km 보다 작은 고도에서 위로 2 km 이내에서 2 °C/km의 온도 감률이 유지되는 고도(WMO, 1957). 이를 계산하기 위하여 UM 온도 프로파일을 사용하였다. 중위도에서 열적 대류권계면의 정확도가 낮은 단점을 고려하였을 때, 보다 정확한 권계면 고도 계산을 위하여 예보장보다 정확도가 높은 재분석장을 사용하였다.

3.3. 검증 결과

알고리즘의 검증은 2016년과 2017년 기간에 대하여 수집된 PIREPs으로 수행되었다.

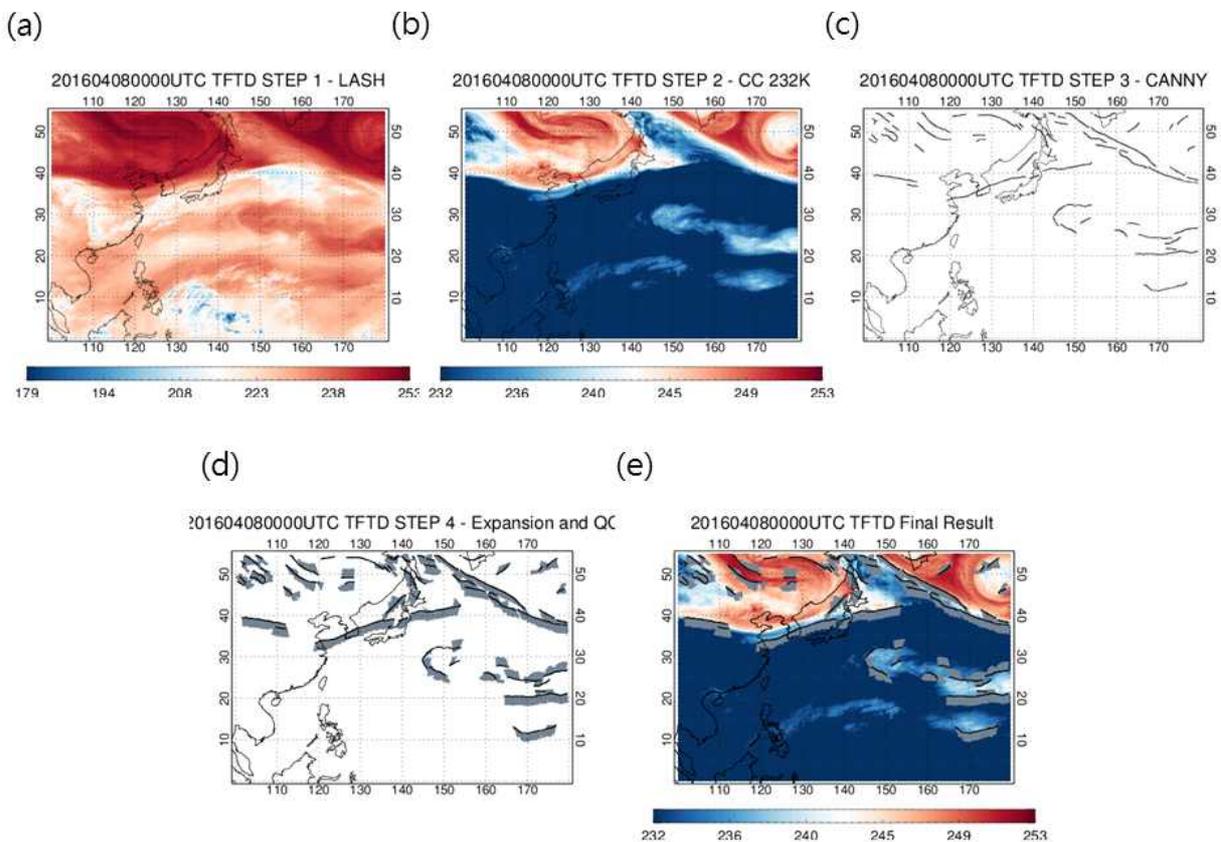


Figure 9 Step-by-step result of the tropopause folding turbulence detection from Himawari-8 AH1 data; (a) LASH calculation, (b) cloud-clearing using 232K threshold(Kim and Kim, 2017), (c) Canny edge detection, (d) edge expansion and quality control, and (e) the final result on 0000UTC 8th April, 2016.

우선 2016년 동안 남한 영공에서 수집된 PIREPs 중에서 총 16건의 MOG(중강도 이상)와 468건의 Null(난류 미발생) 사례들이 사용되었다. 표 7은 검증 결과로서 $POD = 0.5$ 와 $POFD = 0.49$ 를 보임을 확인할 수 있다. 이 결과는 목표 정확도인 $POD 0.5$ 이상과 $POFD 0.5$ 이하에 근접한 결과이나, 수집된 사례의 양이 매우 적으므로 통계적으로 유의한 결과를 위해서는 더 많은 자료가 수집되어야 한다.

Table 7 2×2 Contingency Table for the score test of 2016

Detect \ Observ	Yes	No	Total
	Yes	8	231
No	8	237	245
Total	16	468	484

Table 8 The validation result of TFTD in 2016

Probability Of Detection(POD)	Probability Of False Detection(POFD)
50.00%	49.00%

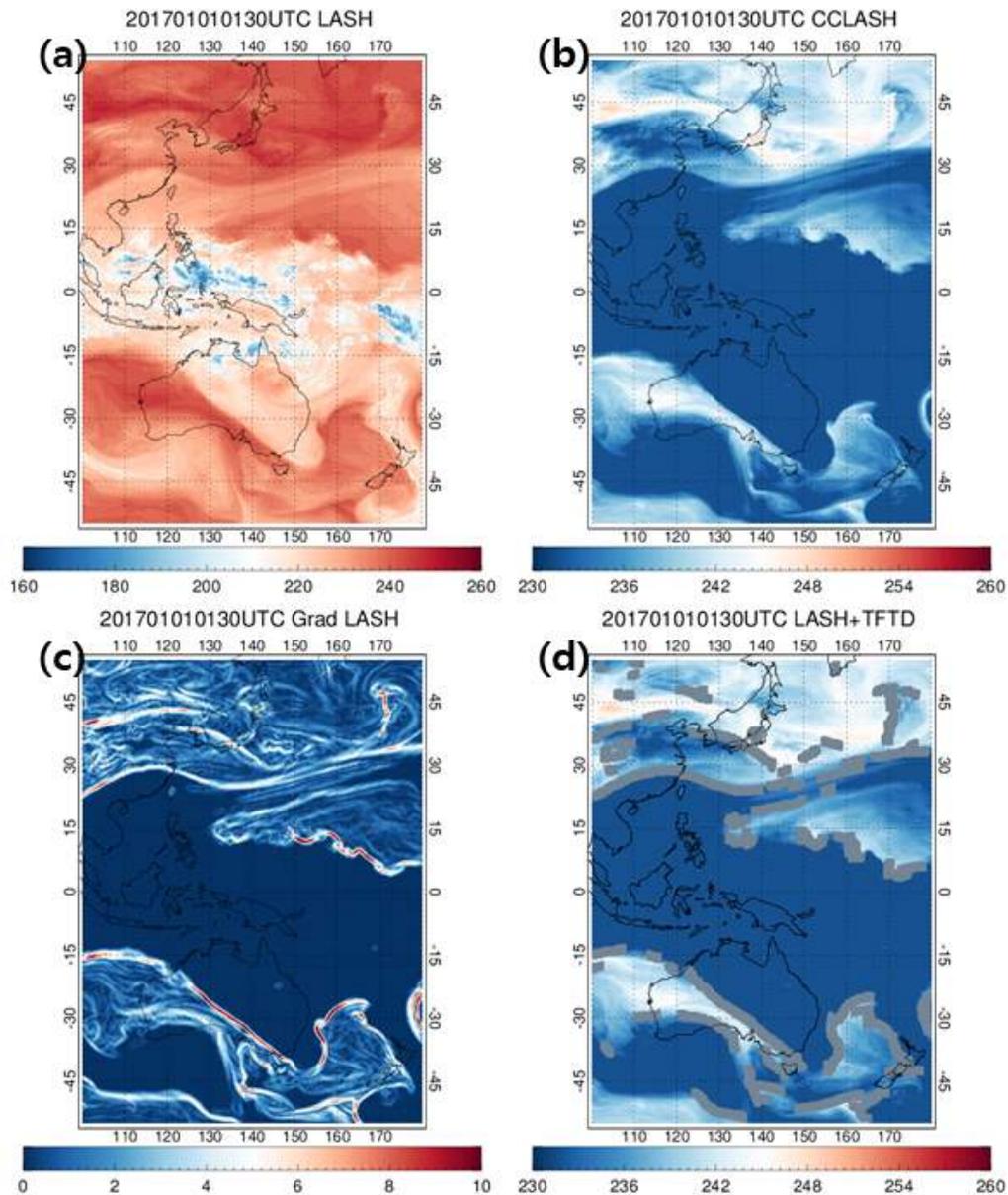


Figure 10 Step-by-step result of the tropopause folding turbulence detection from Himawari-8 AHI data; (a) LASH calculation, (b) cloud-clearing, (c) Gradient Magnitude, (d) LASH and final result of TFTD on 0130UTC 1st January, 2017.

2017년 분석은 1월부터 7월까지 수행되었다. 보조 입력장은 UM N768 온도 프로파일이 사용되었다. 그림 10은 2017년 1월 1일 0130 UTC의 TFTD의 단계별 산출 결과이다. 그 중 최종 결과인 (d)는 Cloud-Clearing이 적용된 LASH에서 보이는 강한 공간적 경사도를 따라 에지(edge)를 탐지한 결과를 배경으로 한 양의 구배 방향으로 확장한 최종 Binary 결과를 오버랩한 결과다.

2017년 검증을 위한 자료는 항공 기상청의 PIREP, 국토해양부의 AIREP이 각각 수집되었

다. 2016년 하반기부터 PIREP을 수집할 때 AIREP이 함께 제공되었는데, PIREP과 AIREP의 차이는 수집하는 기관의 차이인 것으로 확인되며, 따라서 같은 사례일 선정 기준을 사용하였다. 산출 기간 내에서 대류권계면 고도와 낙뢰 테스트를 통과한 사례일은 총 271건이며, 그 중 중강도 이상의 난류 보고는 2건, 난류 미발생 보고는 269건이었다. 선정된 PIREP으로 산출한 결과는 표 9와 같으며, POD 50%, POFD 40.46%로 목표 정확도를 만족하였다.

Table 9 2×2 Contingency Table for the score test of 2017

Observ Detect	Yes	No	Total
Yes	2	159	161
No	2	234	236
Total	4	393	397

Table 10 The validation result of TFTD in 2017

Probability Of Detection(POD)	Probability Of False Detection(POFD)
50.00%	40.46%

4. 현업 운영 시 고려사항

4.1. 수치 계산 고려사항

대류권계면 접힘 난류 탐지 알고리즘은 종관 규모의 현상을 탐지하기 위한 알고리즘으로 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 크기의 정규 격자로 입력 자료를 내삽하여 산출된다.

4.2. 프로그래밍 절차상의 고려사항

TFTD에서 사용되는 Canny 에지 검출 단계는 에지를 따라가며 수행되는 Edge_Follow 서브루틴이 포함된다. 위 서브루틴은 각 에지 객체의 시작점부터 종료점을 만날 때 까지 Edge_Follow 서브루틴을 내부에서 다시 호출하는 재귀 코드임에 유의하여야 한다.

4.3. 품질 평가 및 진단

TFTD 알고리즘의 품질은 정성적으로 LASH의 공간 구배가 큰 구간에 대하여 연속적으로 TFTD 산출이 되는지 확인할 수 있다. 정량적인 품질은 충분한 검증 기간에 대하여 검증 알고리즘의 구동 결과에 따라 진단 할 수 있다.

4.4. 예외사항 처리

주요 입력 자료인 수증기 채널 복사량과 UM 온도 프로파일이 산출되지 않을 경우 구동되지 않는다. 자료는 존재하나 수증기 채널 복사량에 Scan Line 에러와 같은 상황이 발생할 경우 미분 계산 과정이 포함된 TFTD 알고리즘 결과에 영향을 끼칠 수 있다. 특히 TFTD는 LASH의 공간 경사도를 계산하는데 이 때 사용되는 3×3 혹은 5×5 화소 크기의 커널 때문에 불량 화소가 존재 할 때 커널 크기의 영역만큼 산출에 영향을 준다. 따라서 알고리즘을 구동하기 전 입력 자료의 불량 화소 여부를 확인하고 품질 관리에서 확인할 수 있도록 하는 예외 사항 처리가 필요하다.

4.5. 검증 알고리즘

TFTD의 검증 알고리즘은 알고리즘의 구조가 검증 자료와 GK2A AMI L2 결과의 시공간 일치성을 수행하는 'COL' 와 시공간을 일치시킨 검증 자료를 이용하여 검증을 수행하는 'VAM' 으로 구분된다. 이 때, 검증 자료로 사용되는 PIREPs은 항공기상청으로부터 엑셀 포맷으로 제공 받을 수 있으므로 검증 자료 수집의 완전한 자동화가 불가능하다. 따라서 PIREPs 전처리 코드가 Python으로 추가 개발되었다. 전처리 코드에서는 제공받은 엑셀 파일에서 변환한 csv 포맷을 ascii로 변환하는 부분이 포함되었고, 사례일 선정을 위한 두 가지 테스트는 검증 알고리즘의 본 코드에 서브루틴 형식으로 포함되었다.

5. 가정 및 제한

5.1. 성능

TFTD 산출물은 대류권계면 접힘 영역이다. 따라서 본 산출물이 적절히 활용되기 위해서는 대류권계면 접힘 영역이 상부 대류권의 비습장의 공간 경사가 높은 지역에서 발생하며, 대류권계면 접힘 영역 주변에서 청천 난류가 발생할 가능성이 높다는 가정을 기반으로 한다.

5.2. 예상되는 센서 성능

GK-2A AMI의 모의자료로서 Himawari-8 AHI 자료를 사용하였다. 기본적으로 AMI와 AHI의 센서 성능이 유사하며, 시공간 해상도가 같으므로 결과가 유사하다. 중심 파장과 SRF(Spectral Response Function)가 동일하지 않으나, TFTD는 공간적인 구배를 계산하여 산출하므로 영향이 적을 것으로 사료되는 바이다.

5.3. 산출물 개선을 위한 사전 계획

TFTD에서 새롭게 적용된 Canny 에지 탐지 단계에서 사용되는 내부 경계값을 결정하기 위해서는 장기간 축적된 검증 자료가 필요하다. 검증 자료인 PIREPs 외에 항공기에서 직접적으로 관측하는 난류 관측 자료가 보다 넓은 영역과 장기간에 걸쳐 수집되고 자료를 축적할 수 있다면 본 알고리즘의 정확도 향상에 큰 기여가 될 수 있으며, 내부 경계값은 Namelist 수정을 통해 향후 업데이트 될 수 있다.

6. 참고 문헌

- Brown, B. G., and G. S. Young(2000), Verification of icing and turbulence forecasts: Why some verification statistics cannot be computed using PIREPs. *9th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Met.*, Orlando, USA, 393–398.
- Canny, J. F.(1986), A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal.*, **6**, 679–698.
- Danielson, E. F.(1968), Stratospheric–tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 502– 518.
- Jaeger, E. B., and M. Sprenger(2007), A Northern Hemispheric climatology of indices for clear air turbulence in the tropopause region derived from ERA40 reanalysis data. *J. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JD008189.
- Jain, R., R. Kasturi, and B. G. Schunck(1995), *Machine Vision*, McGraw–Hill, 549.
- Keyser, D., and M. J. Pecnick(1985a), A two–dimensional primitive equation model of frontogenesis forced by confluence and horizontal shear. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1259–1282.
- Kim M. and J. H. Kim(2017), Feasibility study for detecting the tropopause folding turbulence using COMS geostationary satellite, *Atmos. Korean Meteo. Sci.*, **27**, 199–131.
- Soden, B. J., and F. P. Bretherton(1993), Upper tropospheric relative humidity from the GOES–7 6.7 lam channel: Method and climatology for July 1987, *J. Geophys. Res.*, **98**, 16669–16688.
- Wimmers, A.J., and J.L. Moody(2001), A fixed–layer estimation of upper tropospheric specific humidity from the GOES water vapor channel: Parameterization and validation of the altered brightness temperature product, *J. Geophys. Res.*, **106**, 17115–17132.
- Wimmers, A. J., and J. L. Moody(2004a), Tropopause folding at satellite–observed spatial gradients: 1. Verification of an empirical relationship, *J. Geophys. Res.*, **109**, D19306, doi:10.1029/2003JD004145.
- Wimmers, A. J., and J. L. Moody(2004b), Tropopause folding at satellite–observed spatial gradients: 2. Development of an empirical model, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD004146.
- Wimmers, A. J., and W. Feltz(2010), Tropopause Folding Turbulence Product: GOES–R Algorithm theoretical basis document version 2.0, *UW/CIMSS*.