

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

AMI Atmospheric Profile

이수정, 한단비, 하승민, 김태명, 이연진,
안명환

이화여자대학교

Version 1.0

2019. 4. 15.

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	MSG SEVIRI자료 및 UM과 RTTOV(v8.7)를 이용한 알고리즘 개발	0.1.0.0	2015. 3.	이수정, 안명환
0.2	Himawari-8 AHI자료 및 UM과 RTTOV(v11.2)를 이용한 알고리즘 개발	0.2.0.0	2016. 1.	이수정, 안명환
0.3	-해양에서 ch11번 추가 -UM 온·습도 배경오차 공분산 사용 -새로운 검증 결과 추가	0.3.0.0	2017. 1.	이수정, 안명환
0.4	-NEdT를 이용한 동적 수렴조건 적용 -알고리즘 특성분석 추가 -TPW 검증결과 갱신	0.4.1.1	2017. 11.	이수정, 안명환
0.5	-UM자료를 이용한 AHI체계오차 보정 방법개선 -알고리즘 특성에 대한 분석 추가	0.5.1.1	2018. 12.	김태명, 이수정, 안명환
1.0	-RTTOV(v12)를 이용한 알고리즘 개발 -오존 프로파일 배경장 생산방법 변경 -알고리즘 검증결과 갱신	0.6.5.1	2019. 4.	김태명, 이수정, 안명환

<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	4
2.3.1 Level 1B.....	4
2.3.2 Level 2.....	5
2.3.3 보조 자료	5
2.4 이론적 배경	12
2.5 수학적 설명	13
2.6 산출물	14
2.6.1 연직 온·습도 프로파일	15
2.6.2 가강수량	15
2.6.3 LI.....	16
2.6.4 CAPE	17
2.6.5 SSI.....	17
2.6.6 TTI.....	18
2.6.7 KI	18
2.6.8 총오존량	18
2.6.9 산출물별 flag 정보.....	19
3. 모의자료 및 검증	20
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	20
3.1.1 모의 입력자료.....	20

3.1.2 라디오 존데.....	20
3.1.3 낙하존데	21
3.1.4 AMSR-2.....	21
3.1.5 OMI	22
3.2 검증 방법	22
3.2.1 라디오존데 자료를 이용한 검증	22
3.2.2 낙하존데 자료를 이용한 검증	22
3.2.3 AMSR-2 자료를 이용한 검증	23
3.2.4 OMI 자료를 이용한 검증.....	23
3.3 검증 결과	23
3.3.1 모의 입력자료에 대한 산출물	23
3.3.2 라디오존데 자료를 이용한 육상 검증	31
3.3.3 낙하존데 자료를 이용한 해상 검증.....	35
3.3.4 AMSR-2 자료를 이용한 가강수량 검증.....	38
3.3.5 OMI 자료를 이용한 총오존량 검증.....	39
4.1 수치계산 고려사항	40
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	40
4.3 품질 평가 및 진단	40
4.4 예외사항 처리	41
4.5 검증 알고리즘	42
5. 가정 및 제한.....	43
5.1 성능	43
5.2 예상 센서 성능	43
5.3 개선을 위한 사전 계획	44

<표 목차>

표 1 AMI 채널 정보 및 알고리즘에 사용되는 채널	4
표 2 AHI 채널별 대표온도에 대한 NEdT	8
표 3 AAP 산출물 범위, 목표 정확도, 산출영역 및 처리시간	15
표 4 산출물별 flag 정보	19
표 5 AHI와 AMI 채널 정보 및 알고리즘에 사용되는 채널	20
표 6 고도별 기온 최대 및 최소 기후값	22
표 7 AAP 1차 산출물	24
표 8 AAP 2차 산출물	24
표 9 라디오존데를 이용한 AAP 알고리즘 목표 정확도 및 검증 결과	31

<그림 목차>

그림 1 AAP 알고리즘 흐름도.....	3
그림 2 오존 프로파일 배경자료 산출 과정. (a, b)는 총오존량 기후장 생산 과정이며 (c, d)는 OMI 총오존량 위도 평균 과정이고 (c, d)는 병합된 총오존량 및 오존 프로파일 배경자료임(예시: 2017년 7월 25일 배경자료 생산).....	6
그림 3 배경 오차 공분산 행렬 구조.....	7
그림 4 AAP 알고리즘에 적용 중인 3개 위도구간에 대한 온도 배경오차공분산(a, b, c) 및 습도 배경오차공분산(d, e, f) 분포.....	8
그림 5 채널에 대한 온도별 NEdT와 그에 상응하는 NEdR 분포.....	9
그림 6 AMI 적외 채널에 대해 생산된 지면 방출율(예시: 6월).....	10
그림 7 경계값에 따른 산출 전후 휘도온도 잔차 비교(실선: O-R, 점선: O-B), 정적 수렴조건(a) 및 동적 수렴조건 적용시 결과(b).....	11
그림 8 경계값에 따른 850 hPa의 AAP 온도 산출 이미지, 정적 수렴조건(a) 및 동적 수렴조건(b) 적용 시의 결과.....	12
그림 9 산출물 검증에 사용된 라디오존데 지점 위치.....	21
그림 10 신호에 대한 DOF(a), 총 DOF(b), 온도에 대한 DFS(c) 그리고 습도에 대한 DFS(d), 2016년 8월 1일 00 UTC.....	25
그림 11 수렴에 필요한 반복수행 회수를 나타낸 지도(color bar의 0: 초기장으로 산출 성공, 1~3: 각각 1~3번의 반복으로 산출에 성공).....	26
그림 12 850 hPa에서 산출된 온도장(a), 습도장(c) 및 총오존량(e). 왼쪽: AAP 산출 결과, 오른쪽: AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출함(b, d).....	27
그림 13 대기안정도 지수 중 LI(a, b), SSI(c, d) 그리고 KI(e, f)이며, 왼쪽은 AAP 산출 결과이고 오른쪽은 AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출한 그림. 대기안정도 지수는 붉은색일수록 불안정함을 나타냄.....	28
그림 14 대기안정도 지수 중 TTI(a, b), CAPE(c, d) 및 총가강수량(e, f). 왼쪽은 AAP 산출 결과이, 오른쪽은 AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출한 그림. 대기안정도 지수는 붉은색일수록 불안정함을 나타냄.....	29
그림 15 하층(a, b), 중층(c, d) 그리고 상층(e, f) 가강수량. 왼쪽: AAP 산출 결과임. 오른쪽: AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출.....	30
그림 16 AAP 온도(a), 습도(b), 총가강수량(c) 및 대기안정도지수 5종(d-h)자료와 라디오존데의 산포도를 밀도 분포로 나타낸 것으로, 붉은색 일수록 높은 밀도를 의미함.....	32
그림 17 라디오존데를 이용해 검증한 AAP와 UM 예측장의 온도(a) 및 습도(b) 프로파일 과 초기장 대비 개선율.....	33
그림 18 AAP 알고리즘에 사용된 AHI 채널의 가중함수(US 표준고도를 이용하여 위성 천정각=0°, skinT=0 K, RH=100%에 대해 모의한 결과).....	34

그림 19 라디오존데자료를 이용한 AAP 산출 총가강수량(a)과 LPW1 (b, 지표면~850 hPa), LPW2 (c, 850~400 hPa), LPW3 (d, 400~200 hPa) 및 초기장 검증 결과	35
그림 20 낙하존데(실선) 및 라디오존데(파선)로 검증한 고도별 평균 온도(위) 및 습도(아래)의 bias(왼쪽)와 RMSE(오른쪽). 붉은색과 보라색은 AAP 결과, 파란색과 초록색은 UM 예측장 검증 결과.....	37
그림 21 라디오존데로 검증한 AAP(붉은색) 및 UM 예측장(파란색) 대기안정도 지수 (a: KI, b: LI, d: SSI, e: TTI)와 총가강수량(c)의 산포도 분포. 각각 bias, RMSE 그리고 회귀선이 포함됨.....	38
그림 22 해상에서 여름(a)과 겨울(b)에 대한 AMSR2 TPW와의 산포도 밀도 분포. 붉은색 일수록 밀도가 높음.....	38
그림 23 OMI자료를 이용한 위도밴드에 따른 계절별 총오존량 검증 결과로 (a)-(d)는 청천 산출 결과이고 (e)-(h)는 하층운 산출 결과임. 각 색은 위도를 나타냄.....	39

약어표

AAP	AMI Atmospheric Profile
ABI	Advanced Baseline Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
AII	Atmospheric Instability Indices
AMI	Advanced Meteorological Imager
AMSR-2	Advanced Microwave Scanning Radiometer-2
ASPEN	Atmospheric Sounding Processing Environment
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
BT	Brightness Temperature
CAPE	Convective Available Potential Energy
CIMSS	Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies
CT	Cross Totals
CTP	Cloud Top Pressure
DU	Dobson Unit
DOF	Degrees of Freedom
DFS	Degrees of Freedom for Signal
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EL	Equilibrium Level
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FOR	Field Of Regard
FOV	Field Of View
GCOM W-1	Global Change Observation Mission for Water-1
IREMIS	Infrared Land Surface Emissivity
IREMIS	infrared land surface emissivity
KI	K Index
LFC	Level of Free Convection
LI	Lifted Index
LPW	Layer Precipitable Water
MI	Meteorological Imager
MLS	Microwave Limb Sounder
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NEdR	Noise Equivalent delta Radiance
NEdT	Noise Equivalent delta Temperature
OMI	Ozone Monitoring Instrument
OPS	Observation Processing System

PW	Precipitable Water
RMSE	Root Mean Squared Error
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS(TIROS Operational Vertical Sounder)
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SSI	Showalter Stability Index
TOZ	Total column OZone
TPW	Total Precipitable Water
TROPOMI	TROPOspheric Monitoring Instrument
TTI	Total Totals Index
UM	Unified Model
VT	Vertical Total
1DVAR	1-Dimension VARiational

1. 개요

1.1 목적

AAP 알고리즘 이론적 기술문서(이하 “문서”라 한다)는 천리안-2A위성에 탑재된 영상기 AMI의 적외채널 자료를 이용하여 대기의 연직 온·습도 프로파일을 산출하고, 산출된 프로파일로부터 가강수량, 5종의 대기 안정도 지수(KI, LI, SSI, TTI, CAPE) 및 총오존량을 생산하기 위해 개발된 알고리즘이다.

1.2 사용자

이 문서는 AAP 알고리즘의 물리적 개념에 대한 이해가 필요하거나 AAP 산출물을 특정분야에 활용하기 위한 목적으로 최적화하거나 활용하고자 하는 사용자를 위해 작성되었으며, 알고리즘의 유지보수, 수정, 개선을 위한 사용자에게도 필요한 정보를 제공한다.

1.3 내용

문서의 구성은 아래와 같다.

- 개요: 산출물에 대한 간략한 설명
- 알고리즘 소개: 알고리즘의 이론적 개념, 입력 및 출력자료를 포함한 AAP 알고리즘에 대한 상세한 설명
- 모의자료 및 검증: 알고리즘 성능과 산출물 품질의 특성을 결정짓는 입력 및 검증 자료에 대한 기술과 천리안-2A(AMI)의 모의자료(proxy data)인 Himawari-8(AHI)를 이용해 처리된 알고리즘 결과에 대한 기술
- 현업운영 시 고려사항: 수치적인 계산, 프로그래밍과 절차, 품질평가, 진단 및 예외처리와 관련된 이슈에 대한 종합적인 기술
- 가정 및 제한: 알고리즘이 기반하고 있는 이론 관련 모든 가정과 제약사항에 대한 기술 및 토의

1.4 관련 문서

- “대기/항공 분야 알고리즘 개발(V)” 결과보고서(2018)

- 대기항공 5차년도 국문 ATBD, 구름 탐지 알고리즘(2018)

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

AAP 알고리즘은 천리안-2A위성에 탑재된 기상영상기 AMI의 적외채널 복사휘도를 이용하여 대기의 프로파일 정보를 산출하는 알고리즘으로, 청천화소에서의 연직 온·습도 프로파일을 1차원 변분법적 방법으로 산출하며, 산출된 연직 온·습도 프로파일을 이용하여 청천 가강수량 및 5종의 대기 불안정지수(LI, KI, CAPE, TTI, SSI)를 부가산출물로 생산한다. 또한, 1차원 변분과정에서 부가적으로 생산되는 연직 오존 프로파일로부터 청천 및 낮은 구름 존재시의 총오존량을 생산한다.

2.2 알고리즘 흐름도

AAP 알고리즘은 **그림 1**의 흐름도를 따라 수행된다. 가장 먼저 수행되는 과정은 알고리즘의 입력자료를 준비하는 단계로, 수치모델 분석장을 이용해 체계오차 보정된 AMI 휘도온도(T_B)와 수치예보모델 예측장을 복사전달모델로 모의한 자료($T_{B,0}$)가 준비되어야 한다. 두 번째 단계는 구름 화소 탐지 과정으로, 천리안-2A L2 구름 산출물을 이용하여 청천 및 구름 존재 여부를 판단하며, 청천화소로 판명된 경우는 **그림 1**의 왼쪽 흐름을 따라 알고리즘이 수행되며, 화소에 구름(특히 하층운)이 존재하는 것으로 판명된 경우는 그림의 오른쪽 흐름을 따라 총오존량 산출을 위한 과정이 진행된다. 청천 알고리즘의 경우, **표 1**에서와 같이 AMI 9개 적외채널 자료를 입력값으로 사용하는데, 이 중 사막이나 먼지(dust)가 존재하는 화소에서 지면방출율 값의 변화가 매우 큰 것으로 알려져 있는 ch11은(Li et al., 2010) 육지를 제외한 해양에서의 산출에만 활용된다. 본격적인 반복 산출 과정에 들어가기에 앞서, 알고리즘의 초기값으로 사용되는 모델 예측장($T_{B,0}$)과 관측값(T_B)이 매우 유사할 경우, 별도의 물리적 반복산출 과정을 거치지 않고 모델 초기값을 알고리즘의 최적 해로 바로 선택하게 된다. 하지만, 둘 사이의 차이가 경계값(threshold)을 만족하지 못할 경우 물리적 반복산출 과정이 시작되고, 복사전달모델의 자코비안을 이용해 초기값을 갱신함으로써 최적 해를 찾기 위한 반복 작업이 수행된다. 이때, 반복 수행 횟수(n_{iter})가 설정된 최대 반복회수(max_{iter})를 초과할 경우 알고리즘은 종료된다. 하층운 존재 시 총오존량 산출 알고리즘의 경우에는 청천과 달리, 3개의 적외채널(ch8, ch12, ch13) 정보만 사용하며, 비용함수를 최소로 만드는 해를 찾는 방법은 청천알고리즘과 동일하지만, 복사전달 모델을 이용하여 하층운 고도를 계산하는 과정이 포함된다.

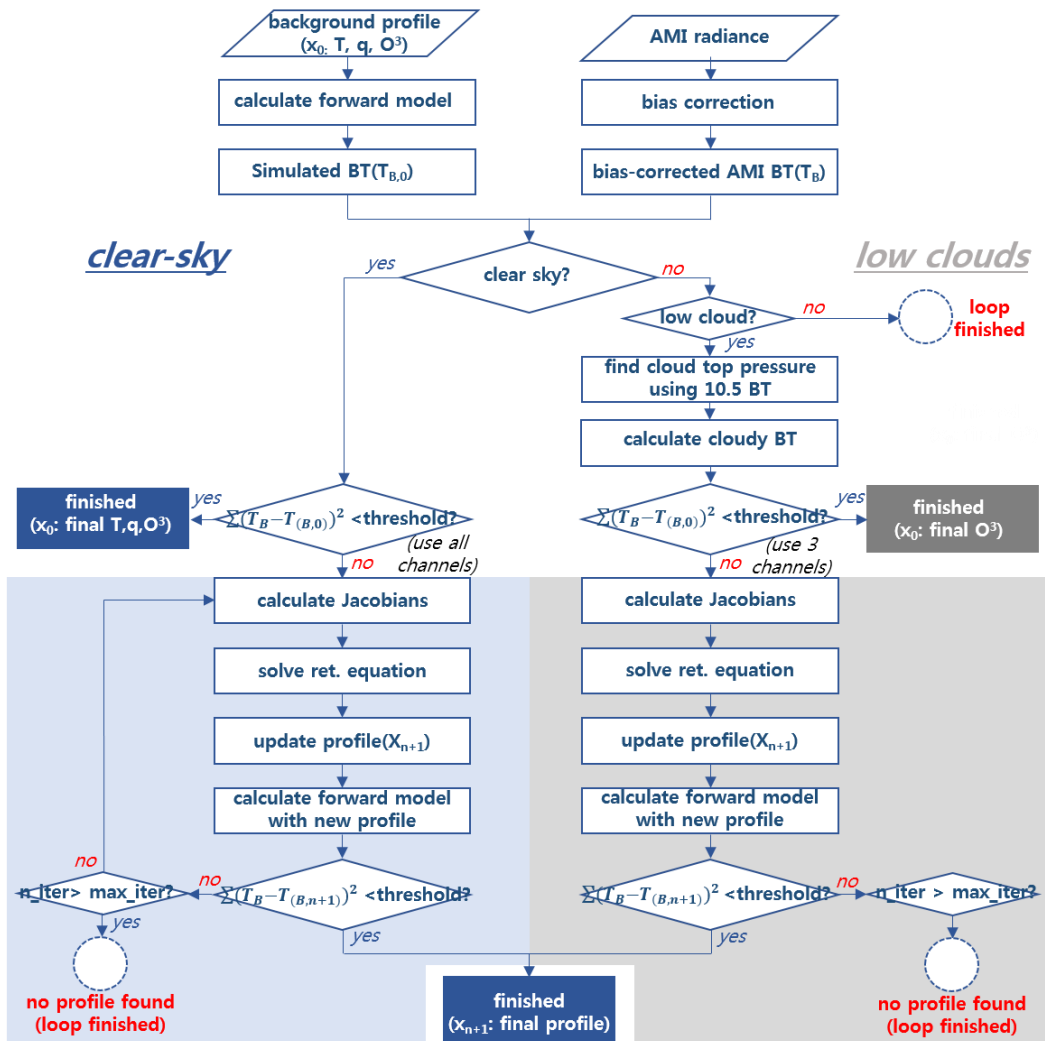


그림 1 AAP 알고리즘 흐름도

표 1 AMI 채널 정보 및 알고리즘에 사용되는 채널

채널 종류	중심과장 (μm)	FOV (km)	채널 특성	AAP 사용	
				청천	하층운
가시	0.4	1	육지 에어로졸 탐지(주간)		
	0.5	0.5	해색 (ocean color)		
	0.6	1	구름, 안개 탐지, 일사량 및 바람 벡터 산출(주간)		
근적외	0.8	2	식생 지수(주간)		
	1.3	2	권운 탐지(주간)		
	1.6	2	적설 및 운상 추정		
적외	3.8	2	지표면 및 구름 정보, 야간 안개 탐지, 산불 및 바람 벡터 산출		
	6.3	2	대류권 상층 수증기 정보	✓	✓
	6.9	2	대류권 중층 수증기 정보	✓	
	7.3	2	대류권 하층 수증기 정보	✓	
	8.7	2	운상, 강우강도, 먼지(dust) 및 SO2 탐지	✓*	
	9.6	2	총오존량, 난류 및 바람 벡터 산출	✓	✓
	10.5	2	지표면 및 구름 탐지	✓	✓
	11.2	2	영상 이미지, 해수면온도, 구름 및 강우강도	✓	
	12.3	2	총 가강수량, 화산재 및 해수면온도	✓	
13.3	2	공기 온도, 운정 고도 및 운량	✓		

*: 해양에서만 사용

2.3 입력자료

2.3.1 Level 1B

AAP 산출 과정에 필요한 주 입력자료는 AMI 9개 적외채널(ch8, ch9, ch10, ch11, ch12, ch13, ch14, ch15, ch16)자료이며, AMI 자료와 관련하여 사용되는 정보들은 아래와 같다.

- 관측 화소별 위·경도 및 위성천정각 정보
- 관측 화소별 육·해상 정보
- 채널별 보정계수(calibration coefficient)
- 채널별 관측오차

2.3.2 Level 2

구름의 존재유무는 천리안-2A 구름탐지 알고리즘의 결과를 이용하여 판단한다. 현재 AAP 알고리즘에서는 구름탐지 자료의 3가지 카테고리 중 cloud(flag: low confidence)와 clear(flag: confidence)인 경우를 청천 FOR계산에 사용하고 있으며, 해당 옵션은 사용자가 산출 목적에 맞추어 카테고리를 선택할 수 있도록 설정하였다.

2.3.3 보조 자료

동적 보조자료

- 기상청 전지구수치모델(UM 기반) 예측장
- OMI(또는 TROPOMI) 위성 관측 총오존량

정적 보조자료

- 오존 프로파일: 오존 존데와 Aura MLS를 이용한 기후 프로파일(McPeters and Labow, 2012).
- 배경오차 공분산
- AMI 관측오차 공분산
- AMI 체계오차 보정 계수
- 지면 방출율: CIMSS IREMIS를 이용한 월별 기후자료

2.3.3.1 수치모델 예측장

알고리즘의 초기장 혹은 배경 프로파일은 UM기반 기상청 전지구수치모델에서 1시간 간격으로 생산되는 예측장을 사용한다. AAP 알고리즘에 사용되는 자료는 온도, 습도, 지면온도, 지면기압, 2m 온도, 2m 습도 및 2m $u \cdot v$ 벡터이며, 해당 자료는 AMI자료의 시·공간 및 기압층으로 내삽 하여 사용한다.

2.3.3.2 오존 프로파일 배경자료

현재 기상청 전지구수치모델에서는 오존 프로파일을 생산하고 있지 않기 때문에 AAP 알고리즘에서는 해당 보조 자료를 자체 생산하여 사용한다.

AAP 알고리즘은 실제 대기상태에 근접한 오존 프로파일 배경자료를 생산하기 위해, 기후 오존 프로파일 자료와 위성 총오존량 관측자료를 병합하여 사용한다. 기후자료는 22년간(1988-2010)의 오존존데 자료와 Aura MLS 자료(2004-2010)를 이용하여

생성된 자료로, 위도 10도 간격(18개 위도밴드)의 66개 연직층에 대해 제공되는 월별 자료이며(McPeters and Labow, 2012), 위성 관측자료는 현재 Aura 위성에 탑재된 OMI센서에서 생산되는 Level 2 산출물인 OMT03 총오존량 관측자료이다. OMI 관측 자료를 대비하여 Copernicus Sentinel-5 Precursor 위성에 탑재된 TROPOMI 탐측기에서 생산되는 총오존량 자료를 이용한 배경자료 산출을 백업으로 구성하고 있다. 자세한 배경장 산출 방법은 다음과 같다.

1. 산출하고자 하는 월에 해당하는 오존 프로파일 기후자료($O3_{clim}$, 그림 2(a))를 총오존량 (TOZ_{clim})으로 컬럼 누적함(그림 2(b)).
2. 산출하고자 하는 날짜의 전날 OMI(또는 TROPOMI) 총오존량(TOZ_{omi}) 자료(그림 2(c))를 위도 10도 간격으로 평균함(그림 2(d)).
3. 동일 위도대에서 TOZ_{clim} 와 TOZ_{omi} 의 차이가 최소가 되는 2개의 $O3_{clim}$ 값을 층별 내삽하여 배경장으로 사용함. 이때 두 값의 차이가 1 DU 이내여야 함.
4. 만일, 차이가 1 DU 이상일 경우 인접한 월(± 1 달)의 $|TOZ_{clim} - TOZ_{omi}|$ 값이 최소가 되는 2개의 $O3_{clim}$ 값을 층별 내삽하여 배경자료로 사용함. 이때 최대 검색이 가능한 기간은 ± 3 개월임.
5. 그럼에도 불구하고 1 DU 이내의 $O3_{clim}$ 값을 찾지 못하였다면, 해당월의 $|TOZ_{clim} - TOZ_{omi}|$ 값이 가장 최소가 되는 2개의 $O3_{clim}$ 값을 층별 내삽 하여 배경자료로 사용함. 이때는 차이가 1 DU 이상이라도 상관없음.

위와 같은 방법으로 $|TOZ_{clim} - TOZ_{omi}|$ 값이 가장 최소가 되는 총오존량 기후값은 그림 2(e)와 같고 병합 및 내삽된 오존프로파일 배경자료는 그림 2(f)와 같다.

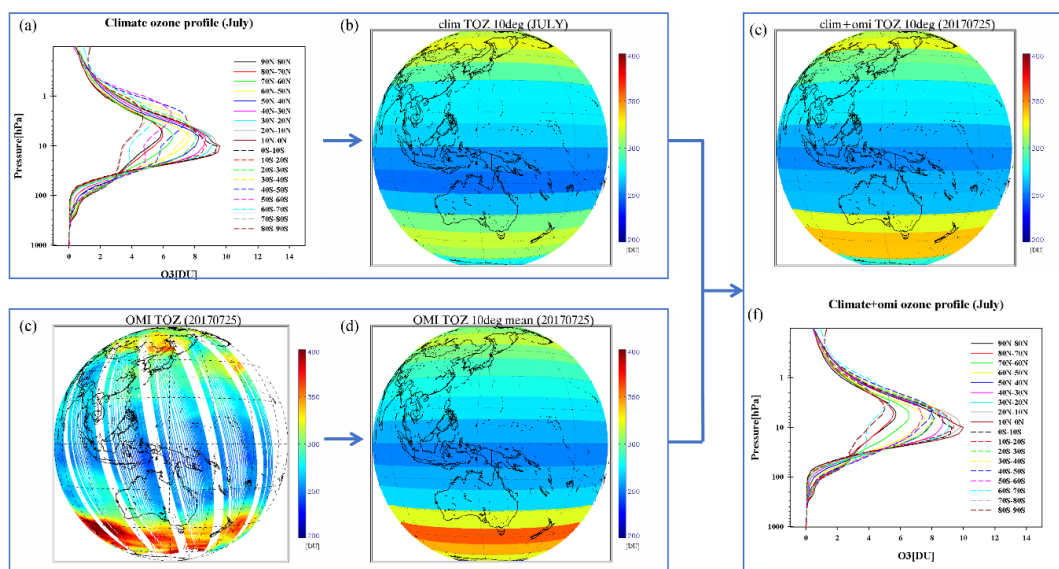


그림 2 오존 프로파일 배경자료 산출 과정. (a, b)는 총오존량 기후장 생산 과정이며 (c, d)는 OMI 총오존량 위도 평균 과정이고 (e, f)는 병합된 총오존량 및 오존 프로파일 배경자료임(예시: 2017년 7월 25일 배경자료 생산).

2.3.3.3 배경오차 공분산

배경장에 대한 통계적인 오차는 **그림 3**과 같이 $(3L+1) \times (3L+1)$ 크기의 행렬로 표시된다(L은 복사전달모델의 기압층 개수를 의미함). 배경오차 공분산 행렬은 변수(온도(T), 습도(q), 오존(O3), 그리고 피복 온도(Ts))간의 상관성은 없다는 가정 하에 비대각성분의 행렬 값들을 모두 0으로 설정한다.

T & T error covariance (L x L)	T & q error covariance (all 0) (L x L)	T & O3 error covariance (all 0) (L x L)	0 0 0 .
q & T error covariance (all 0) (L x L)	q & q error covariance (L x L)	q & O3 error covariance (all 0) (L x L)	.
O3 & T error covariance (all 0) (L x L)	O3 & q error covariance (all 0) (L x L)	O3 & O3 error covariance (L x L)	.
0 0 0 0 0			0 0
			Ts & Ts

그림 3 배경 오차 공분산 행렬 구조

그림 4는 AAP 알고리즘에 적용하고 있는 연직 온·습도 프로파일 배경오차 공분산 행렬이다. 해당 자료는 기상청에서 사용하는 수치예보모델(통합모델(UM)을 기반으로 함)의 자료동화 전처리 시스템(OPS) 1DVAR에 사용하고 있는 배경오차 공분산 자료로, 3개 위도밴드(90S - 30S, 30S - 30N, 30N - 90N)로 나누어 제공되며, 온도의 경우 43개 등압면에 대해(1013.25 hPa - 0.1 hPa) 습도의 경우 대기 하층 26개 층(1013.25 hPa - 122.04 hPa)에 대해 제공된다.

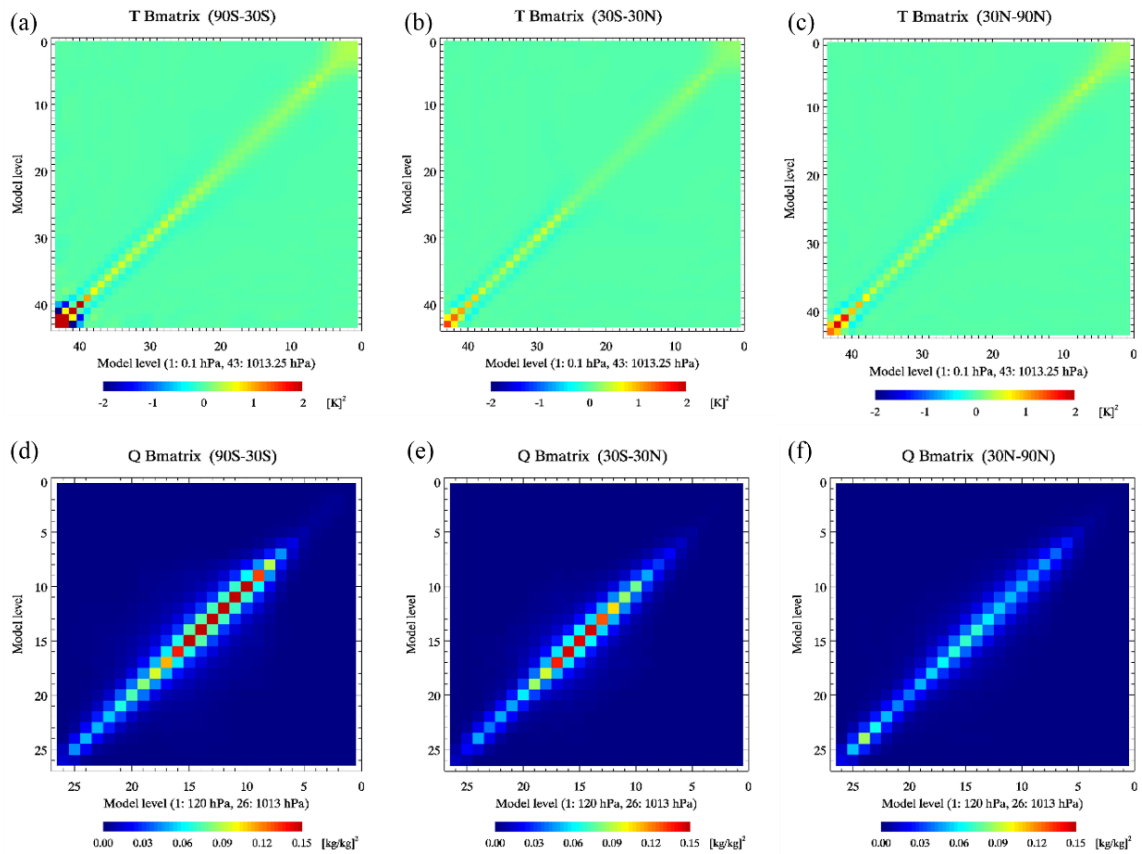


그림 4 AAP 알고리즘에 적용 중인 3개 위도구간에 대한 온도 배경오차공분산(a, b, c) 및 습도 배경오차공분산(d, e, f) 분포

2.3.3.4 관측오차 공분산

관측오차 공분산 행렬은 관측 휘도온도 오차와 복사전달모델의 오차를 대표하는 행렬로, 행렬의 각 성분은 관측 휘도온도 오차에 대한 공분산에 복사전달모델의 불확실성의 합으로 나타낸다. 현재 AAP 알고리즘은, 표 2와 같이 모의자료인 AHI의 채널별 대표 휘도온도에 대한 NEdT(WMO, 2016) 값에 기반하여 온도에 따른 NEdT를 계산 및 적용하고 있으며, 이는 궁극적으로 IOT기간 이후에 AMI로 변경될 것이다.

표 2 AHI 채널별 대표온도에 대한 NEdT

채널 중심파장 [μm]	6.2	6.9	7.3	8.6	9.6	10.4	11.2	12.4	13.3
NEdT [K]	0.4	0.1	0.32	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
대표 온도 [K]	240	300	240	300	300	300	300	300	300

관측 휘도온도에 따른 NEdT를 계산하기 위하여 다음과 같은 방법으로 조정 계수를 산출한다. 우선적으로 채널별 대표온도에 대한 NEdT에 플랑크 함수를 적용하여 NEdR을 계산한다. Scene 온도에 따라 값이 변하는 NEdT와 달리 NEdR은 동일 채널 안에서는 항상 같은 값을 가지기 때문에 계산된 NEdR을 이용하여 200 K–320 K에

대한 온도별 NEdT를 계산할 수 있다 (각 휘도온도별 복사휘도를 플랑크 함수를 이용해 계산한 후 이 값들에 NEdR을 더해준 후 다시 역 플랑크 함수를 이용해 휘도온도로 변환한다). 이렇게 산출된 온도별 NEdT는 그림 5와 같이 휘도온도가 증가함에 따라 감소되는 양상을 보인다.

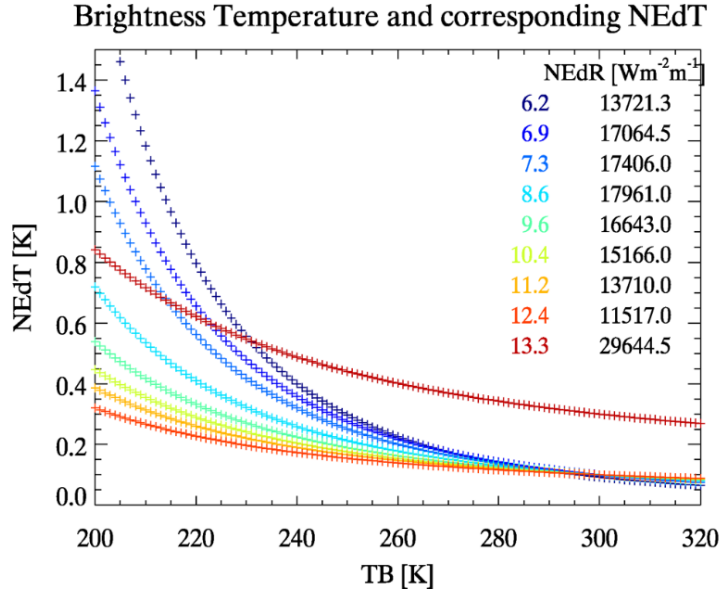


그림 5 채널에 대한 온도별 NEdT와 그에 상응하는 NEdR 분포

위와 같은 방법으로 계산된 온도별 NEdT를 매 산출시마다 관측오차에 동적으로 반영하기 위해, 지수 곡선(exponential curve)을 이용해 휘도온도와 NEdT의 관계에 대한 조정 계수(fitting coefficient) a_0, a_1, a_2 값을 계산하여 수식 1과 같이 적용하였다.

$$NEdT = a_0 \times \exp(a_1 \overline{BT} + a_2)^2 \quad \text{수식 1}$$

이와 더불어 채널간 상관관계가 관측오차 공분산에 반영되어 있지 않기 때문에(비대각성분=0), 이를 보완하기 위해 행렬 대각성분에 팽창 인수(inflation factor)를 곱하는 방법을 도입하였다(Steward et al., 2013). 따라서, 관측오차 공분산(S_ϵ)은 $nch \times nch$ (nch : 산출에 사용되는 채널 개수) 크기를 갖는 대각행렬이 되고, S_ϵ 의 대각 성분($S_\epsilon(i, i)$)은 수식 2와 같이 표현된다. 여기서 i 는 AHI 채널을 의미하고, $inf.f$ 는 팽창 인수이며 $error_{RTM}$ 은 복사전달모델의 오차를 나타낸다. 그리고 n_{clr} 는 산출 시 FOR 내의 청천 화소 개수로, 불규칙 오차(random noise)는 표본(sample)수가 증가할수록 표본수의 제곱근만큼 감소하는 통계법칙에 따라 NEdT를 n_{clr} 의 제곱근으로 나누었다.

$$S_\epsilon(i, i) = \left(\frac{NEdT_i}{\sqrt{n_{clr}}} \right)^2 \times inf.f + error_{RTM}^2 \quad \text{수식 2}$$

2.3.3.4 체계오차 보정 계수

본 알고리즘에서는 적외채널의 체계오차를 보정하기 위해 UM 분석장 자료를 사용하여 모의한 청천 복사휘도와 위성 관측자료의 값을 이용하였다. 수식 3은 보정계수(C_0 , C_1) 산출에 사용한 식으로, $Radiance_{obs}$ 는 위성 관측 복사휘도이고 $Radiance_{ret}$ 는 UM분석장을 이용해 모의된 복사휘도이다.

$$Radiance_{obs} = C_0 + C_1 \times Radiance_{ret} \quad \text{수식 3}$$

위의 식을 이용하여 계산된 보정 계수를, 관측 복사휘도 값에 적용한 방법은 수식 4와 같다.

$$Corrected_radiance_{obs} = (Radiance_{obs} - C_0)/C_1 \quad \text{수식 4}$$

2.3.3.5 적외영역 지면 방출율

본 알고리즘에서는 UW-Madison CIMSS IREMIS 자료를 기반으로 생산된 지면 방출율 기후자료를 사용한다. IREMIS는 MODIS 지면 방출율 자료를 이용하여 baseline fit 방식으로(Seemann et al., 2008) 산출한 자료로, 공간 해상도는 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 이며, 전구에 대한 월별 자료로 구성되어 있다. 그러나 해당 자료는 실시간 확보가 불가능한 단점이 있기에, 본 알고리즘에서는 IREMIS의 12년간 자료를 기반으로 월별 기후자료를 생산한 후, AMI 적외 채널에 대해 내삽한 자료를 알고리즘에 적용하였다. 그림 6은 6월 AMI 채널별 평균 지면 방출율 값으로 AAP에 입력되는 채널에 대한 자료이다.

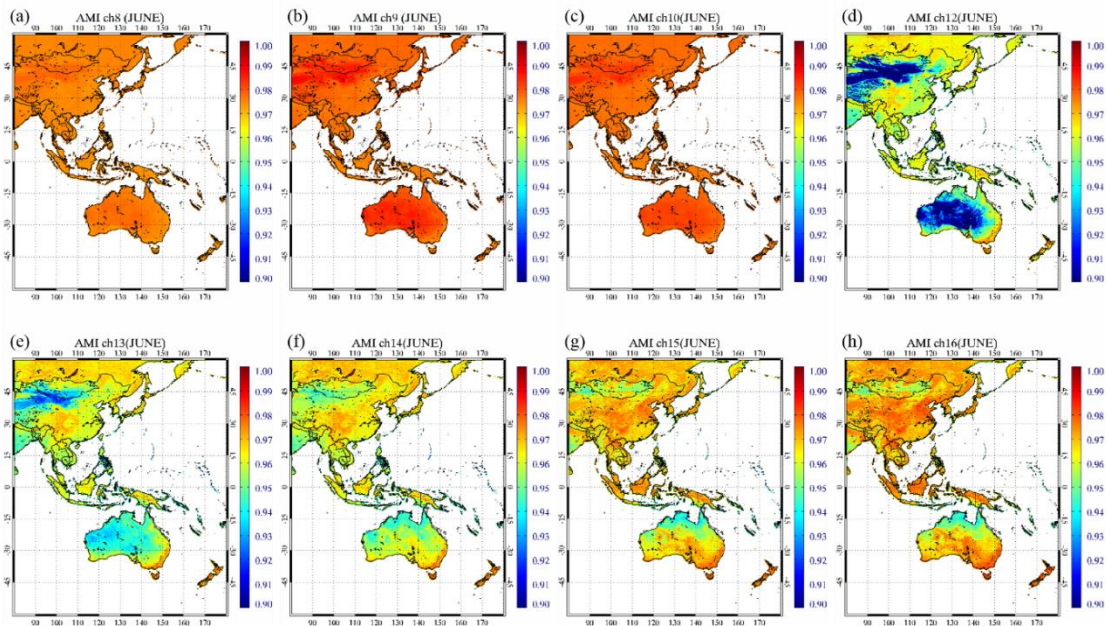


그림 6 AMI 적외 채널에 대해 생산된 지면 방출율(예시: 6월)

2.3.3.6 청천 화소에서의 수렴조건 및 경계값

AAP 청천 알고리즘의 조건은 기 정의된 경계값을 이용하는 정적 수렴과 FOR 평균 휘도온도별 NEdT값을 이용해 경계값을 동적으로 할당하는 동적 수렴조건이 있다. 수식 5는 정적 수렴조건식으로, BT_{obs} 및 BT_{ret} 는 각각 관측 및 모의된 휘도온도이며, ich 는 채널 숫자이고 nch 는 AAP 알고리즘에 사용되는 채널 개수이다. 이때 청천 화소에서의 경계값은 0.7 K으로 설정하였다. 동적 수렴조건은 수식 6과 같이 FOR 평균 휘도온도에 따른 NEdT값을 이용하여 계산된 관측오차 공분산(S_{ϵ})을 설정한다. NEdT의 자세한 내용은 2.3.3.4에 기술하였다.

$$\sqrt{\frac{\sum_{ich=1}^{nch} (BT_{obs} - BT_{ret})^2}{nch}} < threshold = 0.7 K \quad \text{수식 5}$$

$$|BT_{obs} - BT_{ret}| < \sqrt{S_{\epsilon}} \quad \text{수식 6}$$

그림 7은 UM 예측장 및 분석장을 이용하여 두 가지 수렴 조건 적용 결과를 비교한 것으로, 정적 수렴조건을 사용했을 경우(그림 7(a))보다 동적 수렴조건을 사용한 경우(그림 7(b)) 시간에 따라 안정된 통계값(bias)을 보이면서 bias가 감소하였다. 특히, 상층 수증기 채널($6.3 \mu m$)의 동적 수렴조건 적용 결과는 정적 수렴조건 적용 시와 비교하여 bias는 0.4 K에서 0.17 K으로, RMSE는 0.58 K에서 0.22 K으로 약 0.36 K가량 감소함을 보였다.

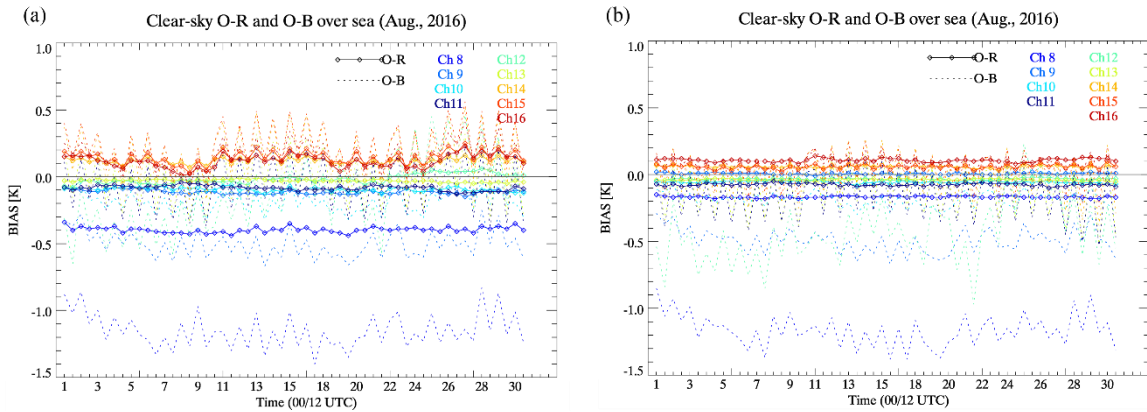


그림 7 경계값에 따른 산출 전후 휘도온도 잔차 비교(실선: O-R, 점선: O-B), 정적 수렴조건(a) 및 동적 수렴조건 적용시 결과(b)

두 수렴조건은 차이가 통계값 뿐만 아니라, 산출 성공률에도 영향을 미쳐 정적 수렴조건을 적용한 경우 33%였던 산출율이(그림 8(a)), 동적 수렴조건을 적용한 결과 약 1/3 수준인 11%로 감소하였다(그림 8(b)). 즉, 동적 수렴조건 적용시 검증 정확도는 증가하지만, 수렴에 성공하는 화소가 감소하면서 산출율이 감소하게 되므로, 검증 정확도와 산출율 및 산출물 사용 목적에 따라 적절한 수렴조건을 적용하는 것이

중요하다. 현재 알고리즘에서는 산출율을 고려하여 정적 수렴조건으로 설정하였으나, 추후 변경이 필요할 경우를 대비하여 설정 파일에서 선택할 수 있도록 되어 있으므로 사용자의 목적에 맞추어 조정이 가능하다.

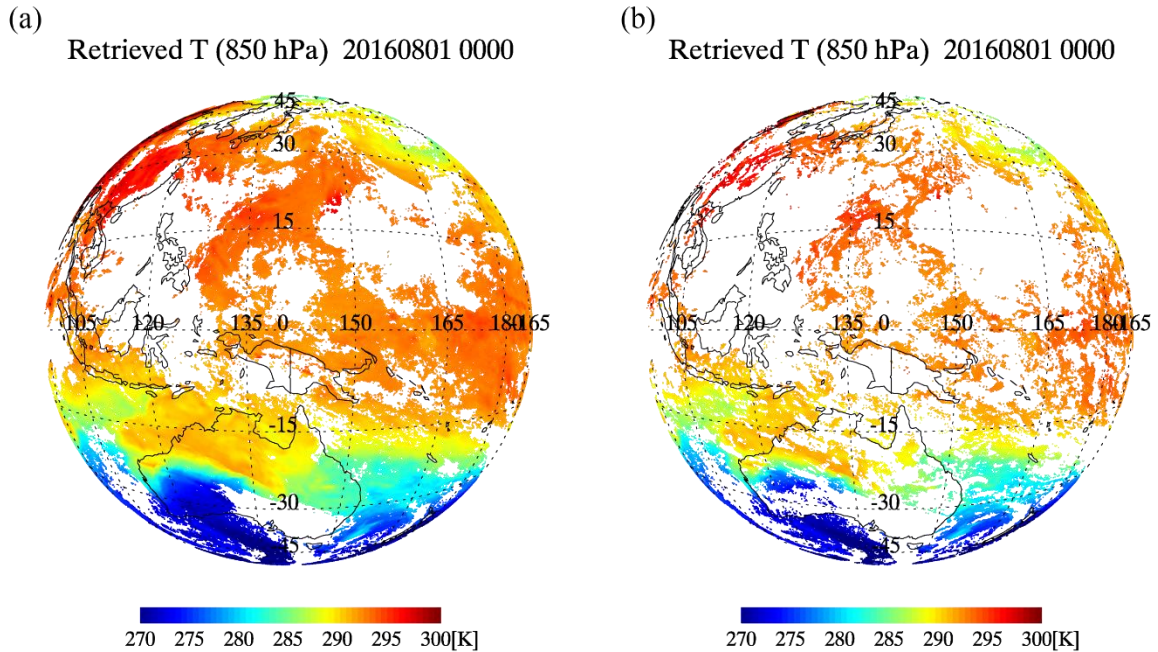


그림 8 경계값에 따른 850 hPa의 AAP 온도 산출 이미지, 정적 수렴조건(a) 및 동적 수렴조건(b) 적용 시의 결과

2.4 이론적 배경

대기의 연직 온·습도 프로파일이 확보된 상황에서, 이를 이용하여 대기 상단에서의 휘도온도를 계산하는 문제를 순방향 문제(forward problem)라고 하며, 그 반대로 위성에서 관측한 휘도온도를 이용하여 대기의 연직 온·습도 프로파일을 산출해내는 문제를 역변환 문제(inverse problem) 또는 산출 문제(retrieval problem)라 부른다. 산출 문제는 관측된 값과 모의된 값의 차이가 경계값을 만족시키는 대기 프로파일들을 찾아내는 문제로, 실제 대기 상태에 가장 근사한 온·습도 프로파일을 추정하는 과정을 수반한다. 이러한 산출 문제 기법은 크게 물리적 방법, 통계적 방법 그리고 혼합형 방법으로 구분된다(Kidder and Vonder Haar, 1995).

물리적 방법(Chahine, 1970; Smith, 1972)은 복사전달방정식의 물리적 의미를 최대한 유지하면서, 모의된 휘도온도와 관측된 휘도온도의 차이 값이 가장 적은 해(solution)를 찾기 위해 반복(iteration) 수행을 하는 것이다. 우선 초기값으로 사용할 연직 온·습도 프로파일을 선택하여 가중함수를 계산한 후, 복사전달모델을 이용하여 센서의 각 채널별 복사휘도 값을 모의한다. 만약 모의된 복사휘도 값이 센서의 노이즈 허용 수준 범위 내에서 관측된 복사휘도 값과 일치한다면 선택한 프로파일을 최종 산출 해로 받아들일게 되고, 만약 수렴이 일어나지 않는다면 만족할 만한 해를 찾을 때까지 다시 가중함수를 계산한 후 복사전달모델을 이용한 모의 작업을 거쳐 관측 값과 비교하는 작업을 반복하게 된다.

통계적 방법은 복사전달 방정식을 직접적으로 사용하지 않고, 위성자료와 시·공간 일치된 연직 온·습도 관측자료 사이의 상관관계를 이용하는 방법으로, 선형회귀, 제한적 선형회귀, 경험 직교함수, 신경망 모델 등 다양한 방법이 적용된다(Smith et al., 1970). 물리적 방식에서는 초기장과 대기 투과도 값의 정확도가 산출 결과의 성공 여부를 좌우하지만, 통계적 방법에서는 얼마나 대표성을 갖는 훈련 자료를 이용하는지가 산출의 성공여부에 결정적인 영향을 미친다(Kidder and Vonder Haar, 1995).

마지막으로 역변환 행렬(inverse matrix) 방식으로도 알려져 있는 혼합형 산출 방법(Fritz et al., 1972)은 통계적 방식과 유사하지만, 대규모 훈련 자료를 필요로 하지 않고, 물리적 기법과 같은 가중함수를 사용한다. 하지만 물리적 기법과 같이 가중함수를 복사전달 방정식의 적분에 직접적으로 포함시키지는 않는다. 이 방식은 물리적 혹은 통계적 방식에 비해 운영은 쉽지만 물리적 방식의 단점(대기 투과도의 정확도에 따라 산출 성공 여부가 좌우됨)을 그대로 안고 있다 (더 상세한 내용은 Kidder and Vonder Haar (1995) 참조).

본 AAP 알고리즘에서는 초기장 정보와 관측 값을 통계적으로 결합하고 물리적인 복사전달모델을 이용하는 통계-물리적 방법을 사용한다.

2.5 수학적 설명

AAP 알고리즘은 역변환 기법(inversion technique)을 사용한 최적의 추정(Optimal Estimation; OE)방식으로, 아래의 산출방정식(Ma et al., 1999; Rodgers, 1976)에 기초하여 복사전달모델을 이용해 모의된 휘도온도가 실제 관측 값에 유사해지도록 반복적으로 대기 프로파일을 조정하는 과정을 거친다.

$$x_{n+1} = x_a + S_a K_n^T (K_n^T S_a K_n^T + S_\epsilon)^{-1} [T_B - T_{B,n} + K_n(x_n - x_a)] \quad \text{수식 7}$$

위 방정식에서 각 변수가 의미하는 바는 다음과 같다

- x : 상태 벡터(대기 프로파일 대기하층 경계조건 포함)
- x_a : 초기장의 상태 벡터
- n : 반복 단계 ($n=0$: 배경 프로파일)
- T_B : 관측 휘도온도
- $T_{B,n}$: n 번째 반복된 프로파일에 대해 모의된 휘도온도
- S_a : 배경장의 오차 공분산 행렬
- K_n : n 번째 반복단계의 자코비안 행렬
- S_ϵ : 관측된 휘도온도와 복사전달모델의 오차 공분산 행렬

K_n 은 Jacobian K 라 불리는 값으로 고도 레벨 i 에서 대기 연직 프로파일 x 의 변화에 따른 모의 휘도온도의 변화 ($\partial T_x / \partial x(i)$)를 나타내는 항으로, 알고리즘 내에서

복사전달모델 RTTOV를 이용하여 계산되는 값이다. 현재 구축된 알고리즘에서 사용된 RTTOV는 12버전으로 지표면(1050 hPa)에서부터 대기 상한 (0.005 hPa)까지를 54개 층으로 나누고 있다.

청천의 경우, RTTOV의 전방향 모델은 주어진 온도 프로파일에 대해 청천에서의 휘도온도를 모든 채널에 대해 계산한다($T_{B,n}$). 구름 존재시에는 하층 경계 값을 지표면온도에서 운정기압(CTP)으로 변경하고, 구름 비율(cloud fraction)값을 100%로 설정한다. 운정기압 계산은, 모의한 cloudy BT10.5(이때, CTP의 초기값은 500 hPa로 함)와 AMI BT10.4의 차이가 최소가 되는 층(level)의 기압 값을 운정기압으로 하는 방법을 사용한다. 모든 입력자료가 준비되고 한개의 FOR에 대해 평균 및 내삽 처리가 완료되면, 물리적인 산출 프로세스가 시작되는데 이 과정은 다음과 같은 5개의 주요 작업으로 구성된다.

- 1) 주어진 관측 벡터 x_n 에 대해 모의 휘도온도 계산을 위한 복사전달모델 수행
- 2) 복사전달모델로 모의된 휘도온도를 관측 값과 비교하여 반복산출 여부 결정
- 3) 복사전달 K-모델(Jacobians)를 수행하여 K_n 행렬 계산
- 4) 산출 방정식(수식 7)의 해 구하기
- 5) 관측 벡터 x_n 업데이트

2.6. 산출물

AAP 알고리즘은 AMI의 $M \times M$ FOVs(AMI 적외채널의 화소는 지상에서 2 km \times 2 km의 해상도를 가진다)를 산출단위(FOR, 즉 한 개의 프로파일이 산출되는 화소 그룹으로, 현재 M=3으로 설정되어 있음)로 하여 54개 층에 대한 연직 온·습도 프로파일을 산출한다. 또한, 산출된 연직 온·습도 프로파일을 이용하여 가강수량(총가강수량 및 상·중·하층에 대한 가강수량) 및 대기불안정 지수(LI, KI, SSI, TTI, CAPE)를 계산한다. 오존 프로파일의 경우, 공식 산출물은 아니지만, 반복 산출과정에서 부가적으로 산출되는 값으로, 이를 이용하여 컬럼 누적된 총오존량을 계산할 수 있다. 표 3은 AAP 각 산출물의 물리적인 범위, 목표 정확도, 산출영역 및 요구되는 처리시간을 정리하였다.

표 3 AAP 산출물 범위, 목표 정확도, 산출영역 및 처리시간

산출물명	산출범위	목표정확도		산출영역	처리시간
		BIAS	RMSE		
연직 온도 프로파일	180~320 K	1 K (Sfc~400 hPa)	2 K (Sfc~400 hPa)	Full Disk	60 초
연직 습도 프로파일	0 ~ 100%	18% (sfc300 hPa) 20% (300~100 hPa)	18% (sfc~300 hPa) 20% (300~100 hPa)		60 초
총오존량	100 ~ 650 DU	15 DU	25 DU	Full Disk	60 초
Lifted index	-10 ~ 40 ℃	2 ℃	6.5 ℃	Full Disk	60 초
K-index	0 ~ 40 ℃	2 ℃	5 ℃		
Showalter Stability Index	-10~4 ℃ 이상	2 ℃	6.5 ℃		
Total Totals index	-43~56 ℃ 이상	1 ℃	4 ℃		
CAPE	0~5000 J/kg	1000 J/kg	2500 J/kg		
TPW	0 ~ 100 mm	1 mm	3 mm	Full Disk	60 초

2.6.1 연직 온·습도 프로파일

연직 온·습도 프로파일은 현재의 기상상태를 파악하고 미래를 예측하는데 필요한 중요한 자료로써, 특히 대기 안정도 지수 산출을 위한 필수 자료이다. 전통적으로 연직 온도 프로파일은, 기상 조건(청천, 구름존재, 강수)에 상관없이 비교적 높은 정확도의(RMSE 0.5 K) 온도 정보를 제공해주는 라디오존데 관측 자료를 이용하였으나, 존데 자료의 경우 시·공간 해상도가 매우 낮기 때문에 악기상 예보 등의 단기 예보에는 활용되지 못하는 제약을 안고 있다. 반면, 정지궤도 위성으로부터 산출되는 연직 온도 프로파일은 라디오존데 자료에 비해 낮은 정확도를 보이지만 지속적으로 특정 영역에 대한 정보가 매시간, 더 짧게는 몇 십분 단위로 제공되기 때문에, 예보활용 측면에서 더 많은 장점을 가지고 있다.

연직 습도 프로파일은 온도 프로파일과 더불어 대기 안정도 산출을 위한 필수 자료로써 위성 기술의 발달과 함께 수증기를 관측할 수 있는 채널 수의 증가로, 보다 정확한 습도 프로파일 산출이 가능하게 되었다. 온도 프로파일은 켈빈 온도[K]로 산출되며, 습도 프로파일은 대기 중의 수증기 양을 나타내는 혼합비와 상대습도로 표현되며 각각 [g/kg]와 [%] 단위로 산출된다.

2.6.2 가강수량

가강수량 산출물은 총가강수량(TPW)과 증별 가강수량(LPW)으로 나뉜다. 총가강수량은 지표에서 대기의 상단까지 단위 면적에 대한 공기 기둥에 포함된 수증기가

모두 응결하였을 때, 그 양을 표준 상태에서 액체 상태인 물의 단위 면적당 부피(또는 깊이)로 나타낸 것으로, 아래와 같이 계산되며 단위는 [mm]이다.

$$TPW = \frac{1}{\rho_w g} \sum_{k=1}^n 0.5 \cdot (q(k) + q(k+1)) \cdot (p(k) - p(k+1)) \quad \text{수식 8}$$

위 식에서 ρ_w 는 물의 밀도(1000 kg/m³), g [m/s²]는 지구중력 가속도, n 은 54개 기압 층, $q(k)$ 는 압력고도 k 에서의 수증기 혼합비 [kg/kg]의 값을, p [hPa]는 기압을 나타낸다.

층별 강수량은 지표부터 850 hPa, 850 hPa부터 400 hPa 그리고 400 hPa부터 대기 상단까지의 모든 수증기가 응결하였을 때 차지하는 깊이로, 3개의 층으로 나뉘며 아래와 같이 정의된다.

$$LPW = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q(p) dp \quad \text{수식 9}$$

2.6.3 LI

치올립 지수(LI)는 하층을 대표하는 공기덩이를 주변 공기와의 혼합 없이 500 hPa까지 단열적으로 상승시켰을 때, 단열 상승시킨 공기덩이 온도와 500 hPa 주변 공기와의 온도 차이를 나타내는 것으로, 혼합층의 공기를 사용하며 단위는 [°C]이다.

$$LI = T_{500} - T_{p500} \quad \text{수식 10}$$

T_{500} : 500 hPa 주변 공기 온도 [°C]

T_{p500} : 하층의 공기 덩이를 500 hPa까지 단열적으로 상승시켰을 때의 온도 [°C]

LI 값이 나타내는 대기의 열역학적 불안정성은 다음과 같으나(KMA, 2011), 절대적인 값 자체보다는 시간에 따른 불안정지수 값의 공간적인 변화를 다른 지수와 함께 모니터링하는 것이 중요하다.

$0 < LI$	안정 (stable)
$-3 < LI < 0$	약한 불안정 (marginally unstable)
$-5 < LI < -3$	보통 불안정 (moderately unstable)
$LI < -5$	강한 불안정 (very unstable)
$LI < -6$	매우 강한 불안정 (extremely unstable)

2.6.4 CAPE

대류가용잠재에너지(CAPE)는 대기 전체의 열역학적 대류에너지를 나타내고 부력에너지라고도 불리며, 상승 운동의 가능성을 나타낸다. 자유대류고도(LFC)에서 평형고도(EL)까지 포화단열선과 환경온도 곡선이 이루는 면적을 적분한 값으로 단위는 [g/kg]이다. CAPE는 하층 온·습도 정보에 민감하며, 대류 예보에 활용된다.

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} \left(\frac{F}{\rho'} \right) dz \quad \text{수식 11}$$

여기서, F 는 공기 덩이와 주변 공기와 온도차로 인해 상승하는 공기 덩이의 단위 부피당 양의 부력을 나타내며, ρ' 는 주변 공기의 밀도를 나타낸다. 한반도의 경우, 1000 J/kg보다 낮은 CAPE는 대기 중에 적정량의 잠재에너지(potential energy)가 있음을 나타내고, 1000 J/kg이 넘을 경우는 종종 강력한 악기상, 1800 J/kg 이상일 경우는 매우 격렬한 악기상과 연관된 아주 큰 잠재에너지를 가지고 있음을 의미한다. 하지만, CAPE 값이 매우 높은 경우라 할지라도 악기상이 발생하지 않는 경우가 있기 때문에, 악기상 강도를 예측하기 위해서는 해당 지역의 수분 수렴(moisture convergence) 여부와 시간에 따른 CAPE 및 LI, KI지수 등의 공간 분포를 고려해야한다.

2.6.5 SSI

쇼월터안정도지수(SSi)는 하층 850 hPa의 공기 덩이를 500 hPa까지 단열적으로 상승시켰을 때의 내부 온도와 주변 공기와의 온도 차이를 구한 것이다. SSI는 물리적으로 LI와 거의 유사하나, 하층을 대표하는 기준이 850 hPa이라는 점이 LI와 차이가 있다(LI는 혼합층의 공기를 사용함).

$$SI = T_{500} - T_L \quad \text{수식 12}$$

T_{500} : 500 hPa의 주변 공기 온도[°C]

T_L : 850 hPa 공기 덩이를 500 hPa까지 단열적으로 상승시켰을 때의 온도[°C]

SSI는 맑고 바람이 없는 날, 지표면 온도의 급격한 상승으로 대기가 매우 불안정한 상태에서 발생하는 뇌우를 진단하는데 유용한 지수로 값이 의미하는 바는 아래와 같다(KMA, 2011).

$3 < SSI < 6$	안정(stable)
$-3 < SSI < 3$	약한 불안정(marginally unstable)
$-6 < SSI < -3$	강한 불안정(very unstable)
$SSI \leq -6$	매우 강한 불안정(extremely unstable)

2.6.6 TTI

TTI는 뇌우의 강도를 평가하기 위한 지수로, 대기 하층-중층의 기온 감률을 고려하여 불안정을 판단하는 VT와 하층 수증기와 중층 기온의 관계인 CT가 결합된 식이다(수식 13). 단위는[°C]이다.

$$TTI = VT + CT = (T850 - T500) + (Td850 - T500) \quad \text{수식 13}$$

일반적으로 한반도에서 TTI값이 42-48 수준일 경우에는 뇌우 활동이 거의 없음을 의미하고, 48-54는 보통, 54-60은 강함, 60 이상이 되면 매우 강력한 뇌우라 할 수 있다(KMA, 2011).

2.6.7 KI

KI는 대기의 대류 잠재 가능성을 알아보기 위한 지수로 여름철 해양성 열대기단의 영향을 받을 때 나타나는 호우와 뇌우 진단에 사용된다. 또한 여름철 대류성 구름발달에 중요한 환경요소인 중·하층 대기 안정도, 대기 하층의 수증기 절대량, 중·하층 대기의 수증기 포화정도로 결정된 지수이다. KI는 소나기 예보에 좋은 지수이기는 하지만 강도는 결정하지 못한다. 한반도의 경우, 보통 KI 값이 40 이상이 되면 악기상이 발생할 확률이 매우 높다(KMA, 2011). KI는 아래의 식을 이용하여 구현하여 단위는 [°C]이다.

$$KI = (T850 - T500) + Td850 - (T700 - Td700) \quad \text{수식 14}$$

2.6.8 총오존량

AAP 총오존량은 AAP 온·습도 프로파일 산출에 적용하고 있는 것과 동일한 역산이론 기반의 통계-물리적 방식을 이용해 산출하며, 지표에서 대기상단까지 수직적으로 적분한 오존 총량식은 다음과 같다.

$$TOZ = \int_{p_{(surface)}}^{p_{(level)}} O_3(p) dp \quad \text{수식 15}$$

이 식에서 $O_3(p)$ 는 기압 p [Pa]층에서의 오존혼합비[kg/kg] 이다. TOZ의 단위는 [kg/m²]이며 다음과 같이 [DU] 단위로도 나타낸다.

$$TOZ[DU] = \frac{TOZ \left[\frac{kg}{m^2} \right]}{21.4E - 0.6}$$

수식 16

2.6.9 산출물별 flag 정보

AAP 산출물은 각각의 품질과 관련한 세 종류의 flag를 제공한다. 온·습도 프로파일, 가강수량, 대기안정도 지수 및 총오존량의 첫 번째 flag는 표 4와 같이 산출 성공 및 실패 여부를 나타낸 것으로, 온·습도 프로파일과 대기안정도지수는 4개, 가강수량은 3개 그리고 총오존량은 5개로 분류되며, 여기서 산출에 실패한 영역은 배경값(즉, 모델예측값)이 출력되게 된다. 이 외 FOR의 육/해상 정보와 사용한 구름탐지자료의 정보는 quality_flag2과 3로 하였다.

표 4 산출물별 flag 정보

온·습도 프로파일 및 대기안정도지수 flag	
quality_flag1	0: 칭찬, 산출 성공 1: 칭찬, 산출 실패, 배경값으로 대신함 2: 구름, 배경값으로 대신함 3: 입력자료 부재 또는 위성천정각 75도 이상
가강수량 flag	
quality_flag1	0: 칭찬, 산출된 습도 프로파일 자료를 이용하여 계산 1: 칭찬, 산출 실패, 배경값으로 대신함 2: 구름, 산출 실패, 배경값으로 대신함
총오존량 flag	
quality_flag1	0: 칭찬, 산출 성공 1: 낮은 구름, 산출 성공 2: 높은 구름, 산출 실패 3: 산출 실패 4. 입력자료 부재 또는 위성천정각 75도 이상
공통 flag	
quality_flag2	산출 FOR(i.e., 3 × 3 FOV)의 육/해상 정보 0: 해상 1: 육상
quality_flag3	0: 천리안-2A 구름탐지 자료 1: 내부 구름탐지 루틴 (천리안-2A 구름탐지 자료 부재시 사용)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

3.1.1 모의 입력자료

본 알고리즘을 검증하기 위해 AMI와 분광특성이 유사한 Himawari-8 위성에 탑재된 AHI 자료를 모의자료로 사용하였다. 표 5는 AHI의 채널과 향후에 사용될 AMI의 채널 정보이다.

표 5 AHI와 AMI 채널 정보 및 알고리즘에 사용되는 채널

AHI			AMI		
채널번호	중심파장 (μm)	AAP 사용여부	채널번호	중심파장 (μm)	AAP 사용여부
1	0.47		1	0.4	
2	0.51		2	0.5	
3	0.64		3	0.6	
4	0.86		4	0.8	
5	1.6		5	1.3	
6	2.3		6	1.6	
7	3.9		7	3.8	
8	6.2	✓	8	6.3	✓
9	6.9	✓	9	6.9	✓
10	7.3	✓	10	7.3	✓
11	8.6	✓*	11	8.7	✓*
12	9.6	✓	12	9.6	✓
13	10.4	✓	13	10.5	✓
14	11.2	✓	14	11.2	✓
15	12.4	✓	15	12.3	✓
16	13.3	✓	16	13.3	✓

*: 해양에서만 사용

3.1.2 라디오 존데

육상에서 산출된 AAP 자료(연직 온·습도 프로파일, 가강수량 및 대기안정도

지수)의 검증을 위해 AHI 관측 영역에 위치하는 라디오존데 자료를 이용하였다. 라디오존데 관측 정확도는(특히 대류권 상층 습도) 관측에 사용되는 라디오존데 센서의 종류에 따라 크게 달라지는 것으로(Ingleby, 2017) 보고되어 있다. 이에 관측 정확도가 비교적 높은 것으로 평가되어 있는 Finland의 Vaisala RS92 타입(DC3 및 Auto)을 사용하는 지점의 자료를 대상으로 산출물에 대한 검증이 진행되었다. **그림 9**는 해당 69개 라디오존데 지점의 위치를 나타낸다.

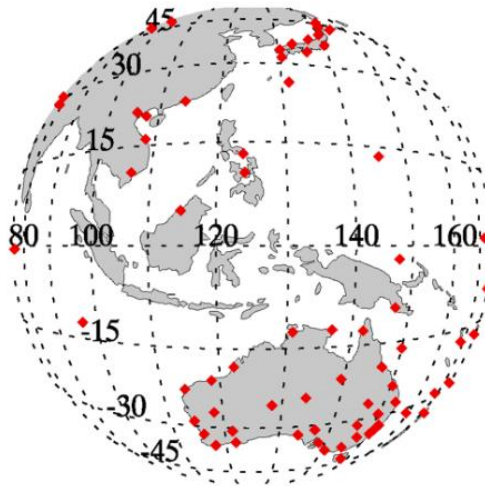


그림 9 산출물 검증에 사용된 라디오존데 지점 위치

3.1.3 낙하존데

낙하존데는 항공기로부터 기상관측 센서를 투하하여 고층 대기 정보를 관측하는 장비로 강하존데 또는 드롭존데라 불리기도 한다. 이는 해상이나 사막 등 지상으로부터의 관측이 불가능한 지역에서 고층 기상을 관측할 때 사용된다. 본 알고리즘에서 사용한 자료는 기상청 국립기상과학원으로부터 제공받은 Vaisala RD94 센서 자료로, 매 0.5초 마다 기상자료(기압, 온도, 이슬점온도, 상대습도, u벡터, v벡터, 풍속, 풍향, 낙하속도, 지오폠펜셜 고도, 위도, 경도, GPS 고도)가 관측 및 계산된다.

3.1.4 AMSR-2

해상에서 산출된 TPW 검증을 위해 GCOM W1에 탑재된 AMSR-2 TPW 자료를 이용하였다. AMSR2 TPW 자료의 정확도는 Global Positioning System TPW와 비교 시 RMSE가 1.5 mm, 라디오존데 TPW와 비교시 약 2.6 mm(JAXA, 2015)인 것으로 알려져 있다.

3.1.5 OMI

AAP 알고리즘으로 산출된 청천 및 하층 구름 화소에 대한 총오존량 검증을 위해 사용된 자료는 Aura 위성의 OMI OMT03로 TOMS 알고리즘을 이용하여 산출된 총오존량 자료이며, 지상기반 관측자료인 Dobson 분광광도계와 1% 이내의 정확도를 보인다(Balis et al, 2007).

3.2 검증 방법

3.2.1 라디오존데 자료를 이용한 검증

라디오존데 자료는 00 UTC 및 12 UTC에 관측된 자료를 사용하며, AAP 자료는 라디오존데 관측시간 및 지점을 기준으로 ± 30 분과 ± 25 km 이내의 자료를 평균하여 사용한다. 또한 라디오존데 자료와 AAP 산출 자료의 연직 해상도가 다르기 때문에 비교를 위해 라디오존데 자료를 AAP 54개 등압면에 대해 선형 내삽한다.

3.2.2 낙하존데 자료를 이용한 검증

낙하존데는 3.1.3절에 기술한 것과 같이, 항공기로부터 기상관측 센서를 투하하여 고층 대기 정보를 관측하는 장비로, 고정된 좌표에서 관측되는 자료가 아니기 때문에 다른 지상기반의 기상장비들에 비해 품질유지에 어려움이 따른다. 따라서, 일반적으로 낙하존데에서 관측(또는 계산)되는 모든 변수 자료는 NCAR의 ASPEN 소프트웨어를 사용하여 품질 검사 과정을 거친다. ASPEN은 다양한 품질관리 알고리즘을 적용하여 품질이 의심되는 자료를 자동적으로 제어하지만, 여전히 존재하는 오류를 탐지하기 위해 추가적인 수동 품질 관리를 하는 것이 일반적이다(Stern et. al., 2016). 이에 본 검증 작업에서는 Barker(1992)방법을 이용하여 GPS 오류로 인한 관측 위·경도 분포 검사 및 기후값을 이용한 고도별 온도 경계값(표 6) 검사 및 온도와 이슬점 온도의 차이($T-T_d$)가 -1 °C에서 50 °C 이내의 값을 사용)를 이용한 검사를 수행하였다.

표 6 고도별 기온 최대 및 최소 기후값

P[hPa]	Tmin[°C]	Tmax[°C]
$P < 300$	-100	0
$300 \leq P < 400$	-100	0
$400 \leq P < 500$	-90	5
$500 \leq P < 600$	-90	13
$600 \leq P < 700$	-90	20
$700 \leq P < 800$	-90	27
$800 \leq P < 900$	-90	34
$900 \leq P < 1080$	-90	60

낙하존데 자료의 시간일치는 존데가 지상에 도달한 시간을 기준으로 -10분 이내의 자료를, 공간일치는 낙하된 지점을 기준으로 ± 24 km 이내의 AAP 자료를 평균하였으며, 수직 해상도는 AAP 54개 등압면과 가장 근접한 낙하존데 자료를 사용하였다.

3.2.3 AMSR-2 자료를 이용한 검증

GCOM W1 위성이 검증영역(30-40N, 120-145E)을 통과하는 시간은 ascending 모드의 경우 0300과 0600 UTC 사이, descending 모드인 경우 1600과 1800 UTC 사이이다. 따라서, 검증을 위해 검증 시간으로부터 5분 이내, AMSR-2 FOV로부터 0.1° 반경 내의 자료들만 일치자료로 하여, 일치 공간에 대한 평균 AMSR-2 TPW와 평균 AAP TPW를 비교하였다.

3.2.4 OMI 자료를 이용한 검증

AAP와 OMI의 총오존량 비교를 위해 시간적으로 10분 이내 공간적으로 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 격자 내의 자료를 이용하여 일치자료를 생성하였다. 또한 Jin et al. (2008)에 의하면 OMTO3 자료는 태양천정각이 70° 이내의 자료가 높은 정확도를 보이므로 이 조건을 적용하여 검증을 수행하였다.

3.3 검증 결과

3.3.1 모의 입력자료에 대한 산출물

알고리즘 1차 산출물은 대기 연직 온·습도 프로파일로, 아래 표 7과 같다. 산출물의 연직 층은 복사전달모델에서 사용하는 등압면에 따라 달라지는데, 본 알고리즘에서 사용한 RTTOV(v12)의 등압면(단위: hPa)은 다음과 같다:

0.005, 0.01, 0.03, 0.06, 0.13, 0.23, 0.41, 0.67, 1.08, 1.67,
2.50, 3.65, 5.19, 7.22, 9.84, 13.17, 17.33, 22.46, 28.69,
36.17, 45.04, 55.44, 67.51, 81.37, 97.15, 114.94, 134.83, 156.88,
181.14, 207.61, 236.28, 267.10, 300.00, 334.86, 371.55, 409.89,
449.67, 490.65, 532.58, 575.15, 618.07, 661.00, 703.59, 745.48,
786.33, 825.75, 863.40, 898.93, 931.99, 962.26, 989.45, 1013.29,
1033.54, 1050.00

표 7 AAP 1차 산출물

AAP 산출값	설명
온도 프로파일 [K]	0.005 hPa부터 1050 hPa까지 각 등압면에서의 온도
습도 프로파일 혼합비 [g/kg] 및 상대습도 [%]	0.005 hPa부터 1050 hPa까지 각 등압면에서의 수증기

1차 산출물인 온도 및 습도 프로파일로부터 얻어지는 2차 산출물은 표 8과 같다.

표 8 AAP 2차 산출물

계산된 산출값	설명
PW [mm]	습도 프로파일을 이용해 계산
LI [°C]	
CAPE [J/kg]	
TTI [°C]	
SSI [°C]	
KI [°C]	
TOZ [DU]	오존 프로파일(1차 산출물에 포함되지는 않지만, 알고리즘 수행과정에서 산출되는 정보)을 이용해 계산

AHI의 채널들이 가지는 정보(information contents)를 나타내는 하나의 방법으로 신호에 대한 자유도(이하 “DFS”)가 있는데, DFS는 관측자료가 가지고 있는 독립적이고 유용한 정보의 양(Rodgers, 2000)을 의미한다. 그림 10(a)는 AAP 알고리즘에서 산출되는 온·습도 및 오존이 가지는 총 DFS 분포를 보이는데, 전구영역 평균 총 DFS는 약 3.5, 최대 4.6으로 나타난다. 습도가 가지는 DFS는 2~3이며(그림 10(c)) 온도의 DFS는 1정도로 보다 작은 값을 보인다(그림 10(d)). 그림 10(b)는 DOF에 대한 신호(signal)과 노이즈(noise)를 합친 것으로, 육지의 경우 약 8, 해상의 경우 약 9에 이른다. AAP 알고리즘은 육상에서 8개의 채널, 해상에서는 ch8을 더하여 9개 채널을 사용하기 때문에 분석된 DOF 패턴과 일치한다 볼 수 있다.

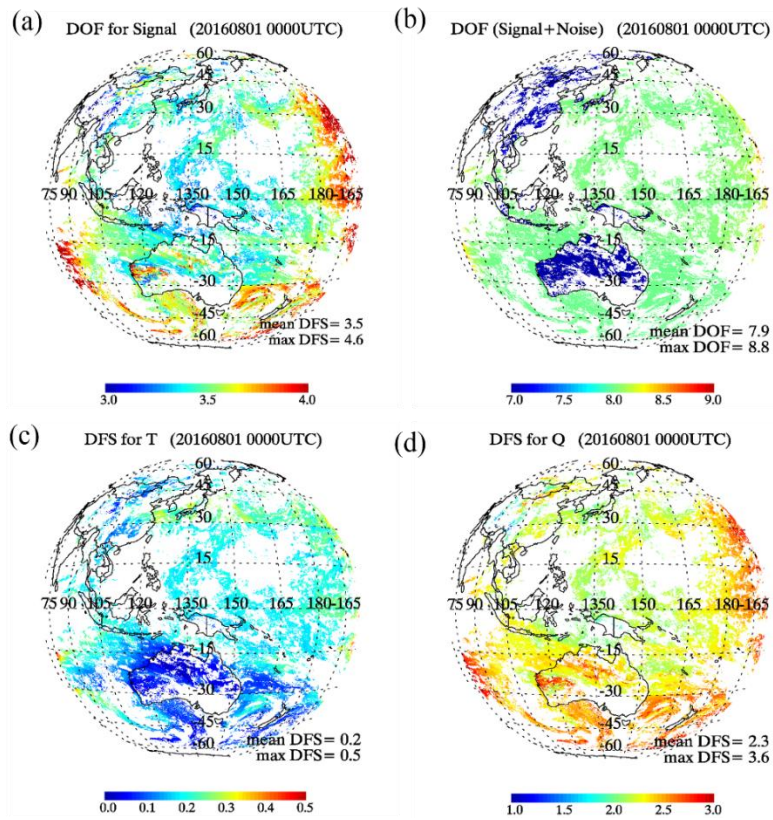


그림 10 신호에 대한 DOF(a), 총 DOF(b), 온도에 대한 DFS(c) 그리고 습도에 대한 DFS(d), 2016년 8월 1일 00 UTC

그림 11은 AAP 알고리즘 산출 필드를 BT10.5 영상 위에 나타낸 것으로, 그림에서 각 색깔이 의미하는 것은 알고리즘 산출과정에서 해에 수렴하기 위해 필요한 반복 횟수이다. 그림에서, 청천 영역보다는 구름 가장자리에서 더 많은 반복을 거쳐 산출이 이루어지고 있으며 대부분 한번의 반복으로 수렴(산출에 성공)이 이루어지고 있음을 보인다.

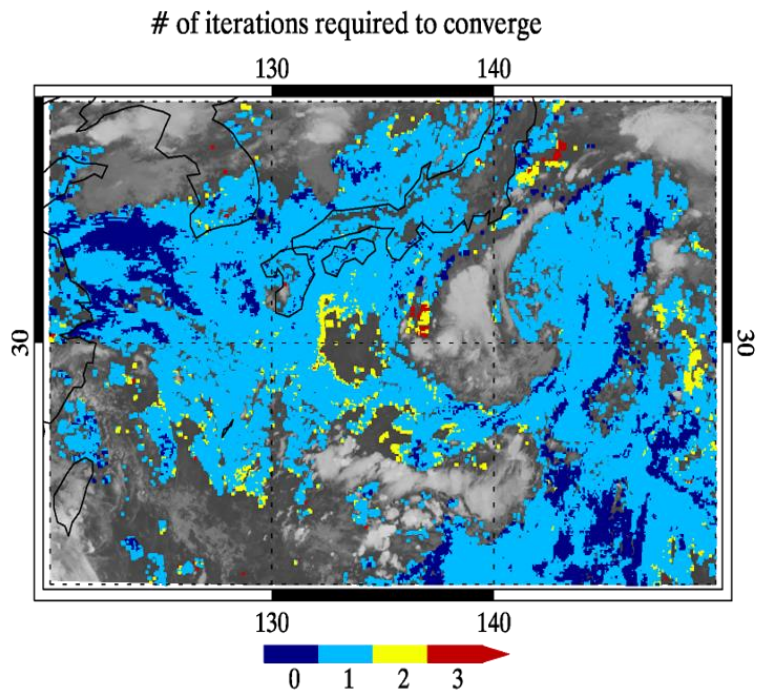
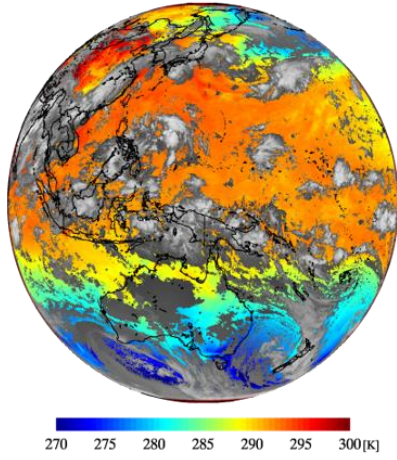


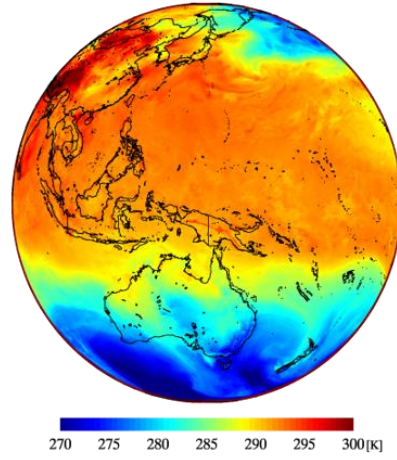
그림 11 수렴에 필요한 반복수행 회수를 나타낸 지도(color bar의 0: 초기장으로 산출 성공, 1~3: 각각 1~3번의 반복으로 산출에 성공)

아래 그림들(그림 12-15)은 2017년 7월 1일 00 UTC에 산출한 AAP 결과들을 나타낸 것으로, 왼쪽은 AAP 산출 결과로 AHI BT10.5 흑백 영상을 배경으로 하였으며, 오른쪽은 산출 실패 또는 구름으로 인한 AAP의 공백지역을 UM 예측장 자료로 대체하여 표출한 그림이다. 총오존량은 UM에서 산출하지 않는 변수이므로 AAP 결과 표출만 가능하다.

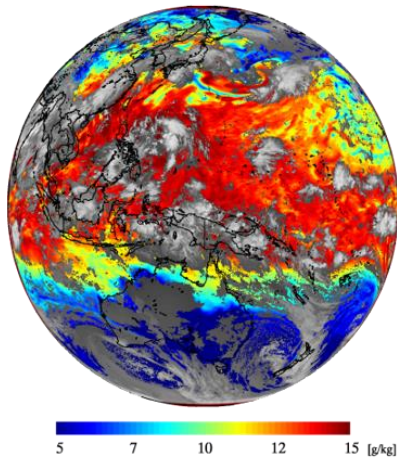
(a) Retrieved AAP T(850 hPa) 2017.07.01 0000 UTC



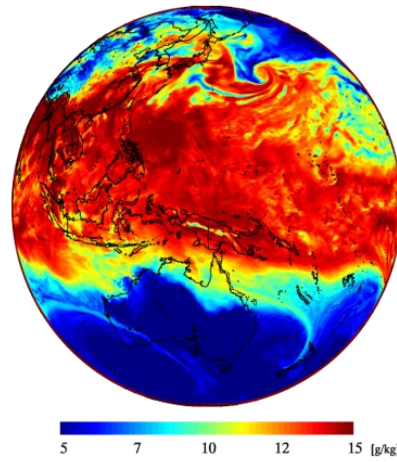
(b) Retrieved AAP T(850 hPa) 2017.07.01 0000 UTC



(c) Retrieved AAP q(850 hPa) 2017.07.01 0000 UTC



(d) Retrieved AAP+UM q(850 hPa) 2017.07.01 0000 UTC



(e) Retrieved TOZ AAP (2017.07.01 0000 UTC)

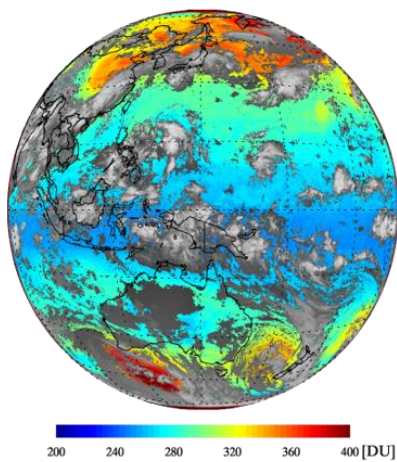
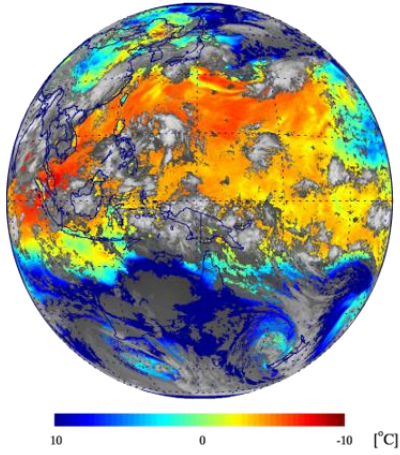
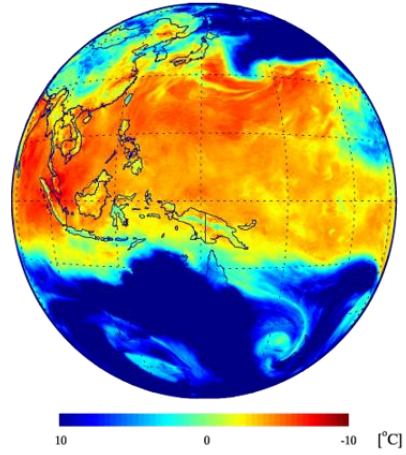


그림 12 850 hPa에서 산출된 온도장(a), 습도장(c) 및 총오존량(e). 왼쪽: AAP 산출 결과, 오른쪽: AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출함(b, d)

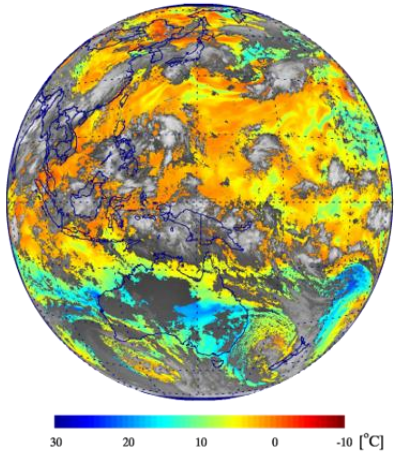
(a) Retrieved LI AAP (2017.07.01 0000 UTC)



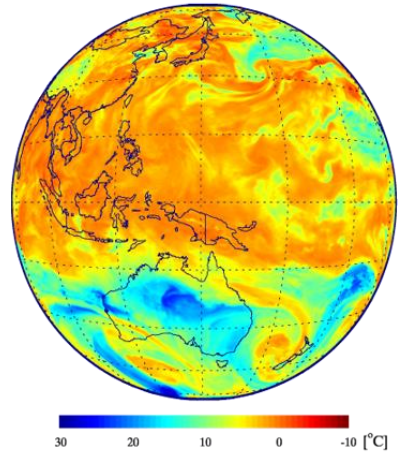
(b) Retrieved LI AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



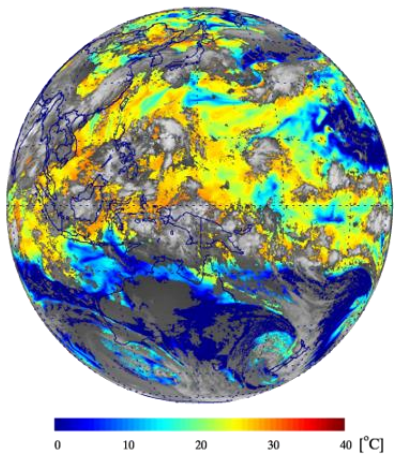
(c) Retrieved SI AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(d) Retrieved SI AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



(e) Retrieved KI AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(f) Retrieved KI AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)

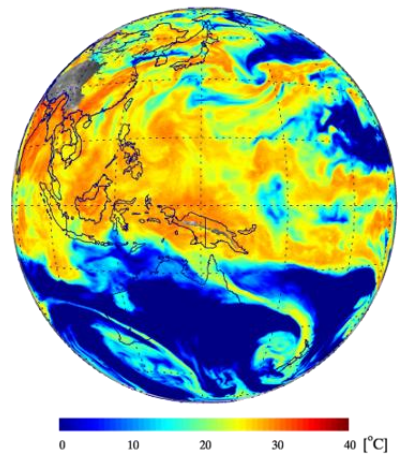
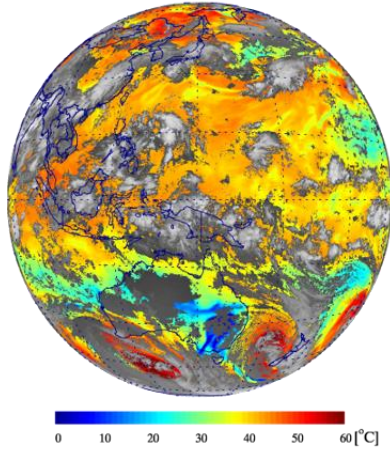
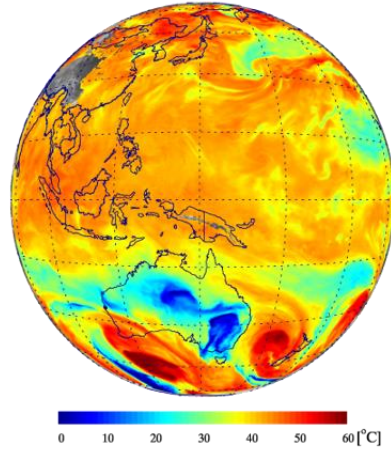


그림 13 대기안정도 지수 중 LI(a, b), SSI(c, d) 그리고 KI(e, f)이며, 왼쪽은 AAP 산출 결과이고 오른쪽은 AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출한 그림. 대기안정도 지수는 붉은색일수록 불안정함을 나타냄

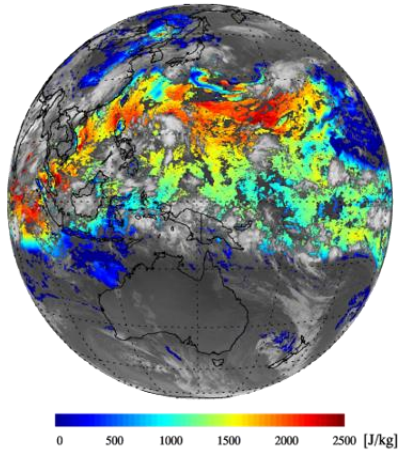
(a) Retrieved TTI AAP (2017.07.01 0000 UTC)



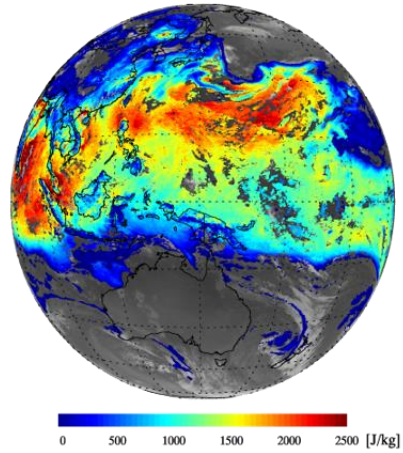
(b) Retrieved TTI AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



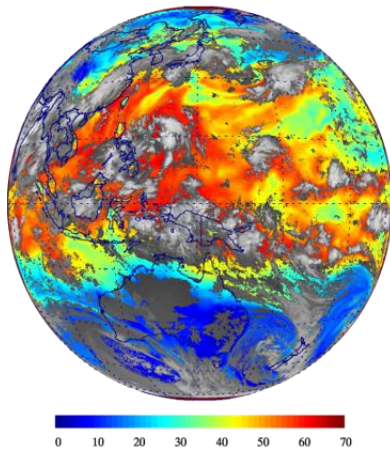
(c) Retrieved CAPE AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(d) Retrieved CAPE AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



(e) Retrieved TPW AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(f) Retrieved TPW AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)

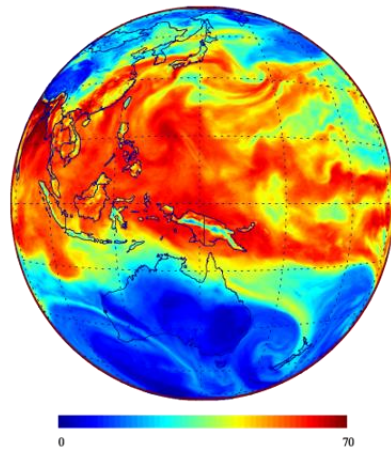
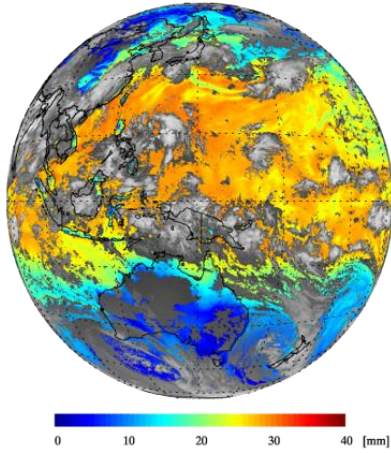
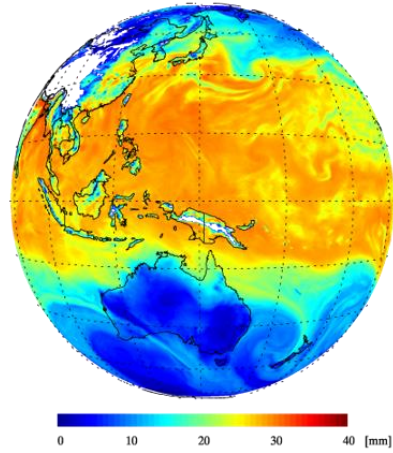


그림 14 대기안정도 지수 중 TTI(a, b), CAPE(c, d) 및 총가강수량(e, f). 왼쪽은 AAP 산출 결과이, 오른쪽은 AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출한 그림. 대기안정도 지수는 붉은색일수록 불안정함을 나타냄

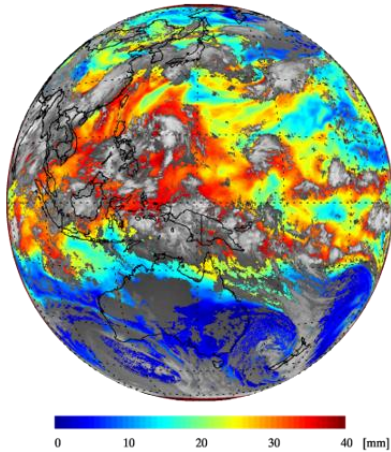
(a) Retrieved LPW1 AAP (2017.07.01 0000 UTC)



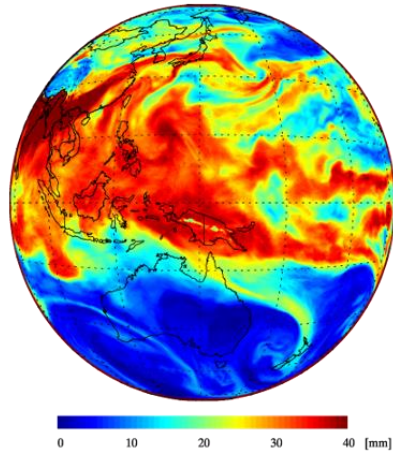
(b) Retrieved LPW1 AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



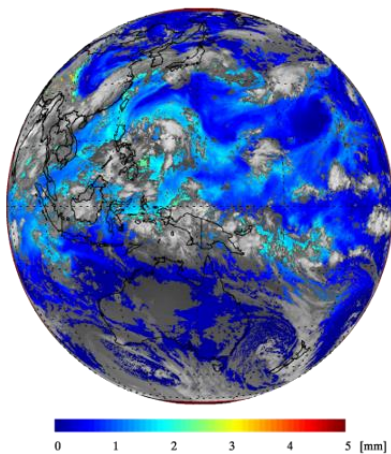
(c) Retrieved LPW2 AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(d) Retrieved LPW2 AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)



(e) Retrieved LPW3 AAP (2017.07.01 0000 UTC)



(f) Retrieved LPW3 AAP+UM (2017.07.01 0000 UTC)

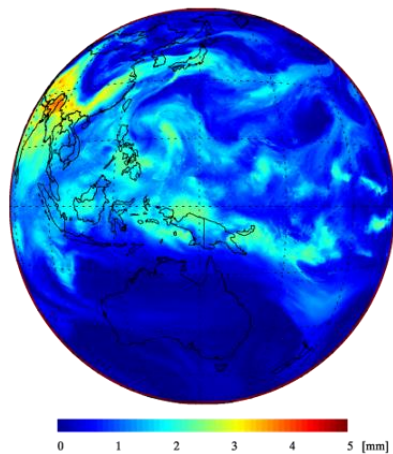


그림 15 하층(a, b), 중층(c, d) 그리고 상층(e, f) 가강수량. 왼쪽: AAP 산출 결과임. 오른쪽: AAP 산출 공백지역을 UM 예측장으로 표출

3.3.2 라디오존데 자료를 이용한 육상 검증

AAP 알고리즘으로 산출된 연직 온·습도 프로파일, 대기안정도지수 및 총가장수량 검증을 위해 Vaisala RS92 type의 라디오존데 자료(Wyoming 대학에서 제공)를 이용하였다(3.1.2 참조). 검증에 사용된 AAP결과는 자체 구름탐지 알고리즘을 적용하였으며(천리안-2A 구름탐지 알고리즘 개발이 완성되기 이전의 자료를 활용했기 때문) 정적 수렴조건을 사용하였기 때문에 실제 AAP의 성능에 비해 다소 낮은 값으로 평가될 수 있다. AAP의 최종적인 검증결과는 IOT 기간에 수행되는 활동에 의해 나타날 것으로 예상된다.

표 9는 산출물별 목표 정확도와 4개월 (2016년 8월과 11월 그리고 2017년 2월과 5월) 동안 검증한 결과를 통계치로 나타낸 것이다. 온도의 bias 및 RMSE는 0.01 K과 RMSE 1.19 K으로 2 K이내의 정확도 및 정밀도를 보였다. 습도의 경우 목표 정확도의 대기압 조건에 준하여 분석한 결과, 모두 목표 정확도에 만족하였으나, 최상층(300 hPa - 100 hPa)의 결과가 지표부터 300 hPa까지 결과보다 낮은 정확도와 정밀도를 보였다. 대기 안정도 지수의 경우 KI와 TTI의 RMSE는 5.89 °C와 4.93°C로 목표 정확도 5 °C와 4 °C에 부합하지 못하였으나, 그 외 산출물은 모두 목표 정확도에 만족하였다.

해당 검증결과를 정성적으로 분석하기 위해 그림 16과 같이 라디오존데와 AAP 결과의 산포도를 밀도로 나타냈다. KI와 CAPE를 제외한 산출물은 고밀도의 분포를 나타내는 붉은색 점이 일대일 선에 밀집되어 있으나, KI와 TTI는 다른 산출물들에 비해 큰 분산을 보였다. 특히 대기가 안정할수록 분산이 큰 경향을 보였다.

표 9 라디오존데를 이용한 AAP 알고리즘 목표 정확도 및 검증 결과

산출물 종류		목표 정확도		검증 결과	
		bias	RMSE	bias	RMSE
연직 온도 프로파일[K] (sfc.~400 hPa)		1	2	0.01	1.19
연직 습도 프로파일[%]	(sfc.~ 300 hPa)	18	18	0.95	13.5
	(300~ 100 hPa)	20	20	1.14	13.84
대기 안정도 지수	LI[°C]	2	6.5	0.52	2.49
	KI[°C]	2	5	1.13	5.89
	SSI[°C]	2	6.5	0.29	2.50
	TTI[°C]	1	4	1.1	4.93
	CAPE[J/kg]	1000	2500	-35.41	512.47
총가장수량[mm]		1	3	0.49	2.79

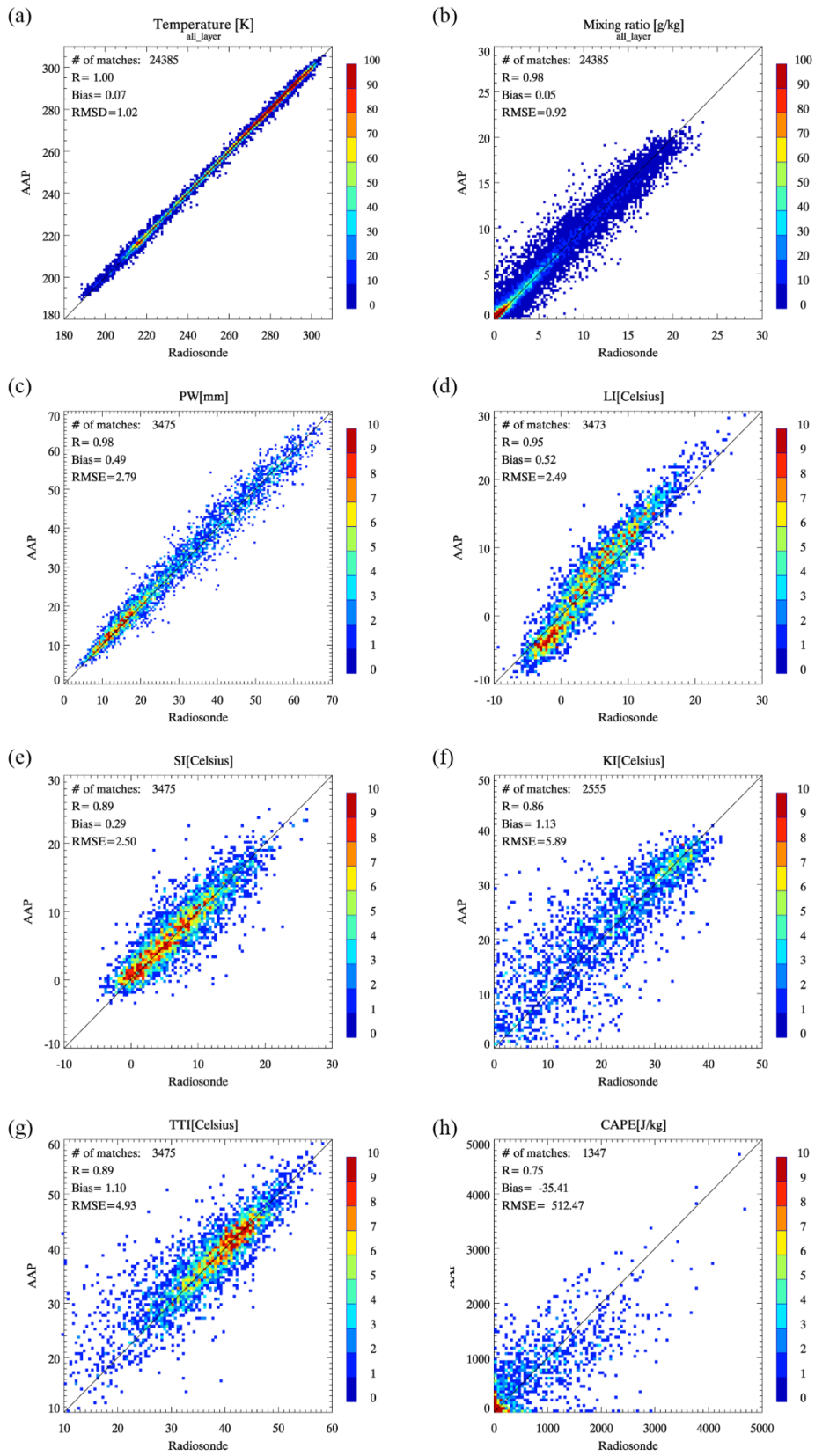


그림 16 AAP 온도(a), 습도(b), 총가장수량(c) 및 대기안정도지수 5종(d-h)자료와 라디오존데의 산포도를 밀도 분포로 나타낸 것으로, 붉은색 일수록 높은 밀도를 의미함

다음은 검증 기간 동안 연직 온·습도 프로파일의 층별 bias와 RMSE 정확도 분포이다. 그림 17(a)은 온도 프로파일이고 그림 17(b)는 습도 프로파일이며, 붉은선과 파란선은 각각 AAP와 초기장인 UM 예측장의 검증값을 나타내며, 실선은 bias이고 파선은 RMSE이다. 그리고 오른쪽 회색의 막대 그래프는 층별 UM 예측장대비 AAP 개선율을 나타낸다. 온도의 경우 지표부터 약 900 hPa까지는 AAP와 UM 예측장 모두 음의 편차(cold bias)를 보였고, 826 hPa에서 가장 큰 양의 편차(warm bias)를 보였으며 그 이상의 고도에서는 0 K에 근접한 분포를 보였다. RMSE는 bias와 마찬가지로 지표부근에서 가장 큰 값을 보였으며 826 hPa에서 두번째로 큰 RMSE 값을 보였는데, 이러한 결과는 AAP알고리즘 및 모델에 사용되는 지표면 온도값이 실제 관측값을 반영하지 못한 영향으로 볼 수 있다. 하지만 AAP 온도 프로파일의 경우 그림 18과 같이 온도프로파일 산출에 사용되는 채널의 가중함수가 최대가 되는 고도에서 UM 예측장 대비 개선율이 큰 것을 확인할 수 있다. 습도 프로파일의 초기장 대비 개선율은 온도에 비해 두드러짐을 보였다. RMSE는 약 800 hPa 부근에서 가장 큰 값을 보였으며 500 hPa부터 300 hPa 부근에서 초기장 대비 큰 개선율을 보였다. 이 또한 그림 18의 AHI 수증기 채널의 가중 함수그래프와 유사한 패턴을 보인다. 이는, 위성의 정보가 많이 포함되어 있는 고도에서 초기장 대비 개선을 보인다 해석할 수 있다.

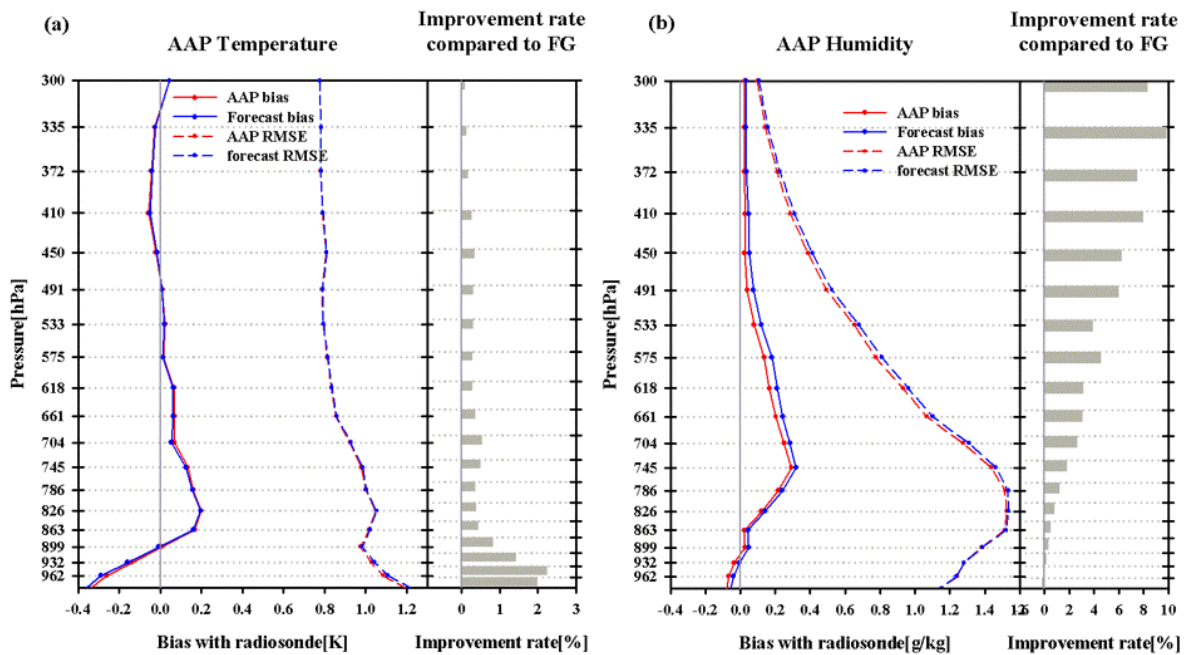


그림 17 라디오존데를 이용해 검증한 AAP와 UM 예측장의 온도(a) 및 습도(b) 프로파일 과 초기장 대비 개선율

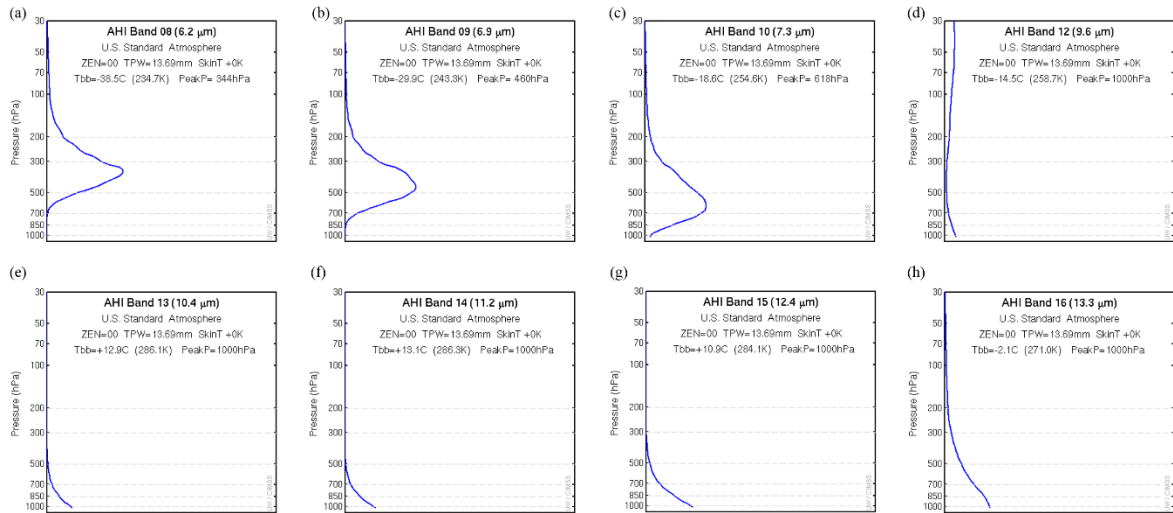


그림 18 AAP 알고리즘에 사용된 AHI 채널의 가중함수(US 표준고도를 이용하여 위성천정각=0° ; skinT=0 K, RH=100%에 대해 모의한 결과)

가중수량 검증은 정확도가 비교적 낮은 것으로 알려져 있는 여름(2016년 8월)에 대해 비교를 하였다. 그림 19는 TPW와 3개 층에 대한 LPW 비교 결과이다. TPW 검증결과(그림 19(a)) 평균 bias 및 RMSE 모두 목표 정확도인 1 mm, 3 mm를 만족하며, UM 예측장(파란색) 대비 알고리즘 산출결과(붉은색)가 더 나은 정확도를 보이고 있다. 대기 상·중·하층에 대한 LPW(그림 19(b-d)) 검증에서도 UM 예측장과 비교시 향상된 bias와 RMSE를 보이고 있으나, 대기 하층 수증기 정보가 부족한 AHI 채널 특성상, 대기 하층에서 산출된 습도 정보는 모델 예측장에 대한 개선이 나타나지 않고 비슷한 정확도를 보이고 있다.

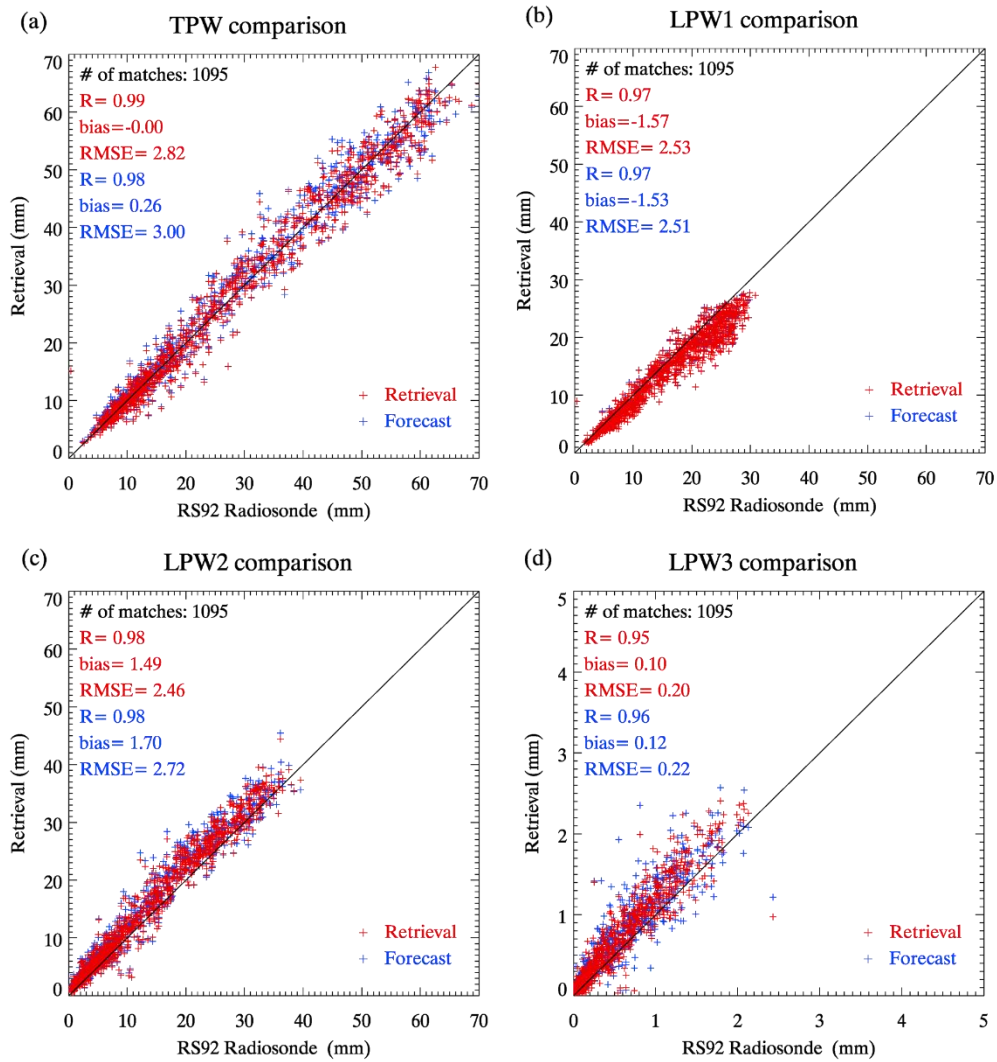


그림 19 라디오존데자료를 이용한 AAP 산출 총가강수량(a)과 LPW1 (b, 지표면~850 hPa), LPW2 (c, 850~400 hPa), LPW3 (d, 400~200 hPa) 및 초기장 검증 결과

3.3.3 낙하존데 자료를 이용한 해상 검증

AAP알고리즘의 정확도 평가는 주로 라디오존데와의 비교를 통해 이루어지나, 비교에 이용되는 라디오존데는 AAP 알고리즘의 초기값(a priori)으로 이용되는 수치모델의 입력자료이므로 알고리즘의 객관적인 정확도 평가에 한계가 있는 실정이며, 라디오존데가 존재하지 않는 해상의 성능평가에도 한계가 있는 실정이다. 따라서 이와 같은 문제를 보완하고자 최근 기상청 국립기상과학원에서 도입한 관측용 항공기에서 수행된 낙하존데 해상관측자료를 활용하였다.

검증 날짜는 2018년 2월 2일, 7일, 10일, 12일, 19일, 20일, 23일 그리고 3월 8일, 9일, 14일이고 관측영역은 동해상(37.6N~38.6N, 129E~132E)이다. 해당 분석은 천리안-2A 구름탐지 알고리즘 개발이 완성되기 이전에 분석한 결과이기 때문에, AAP 알고리즘에 내장된 자체 구름탐지 알고리즘을 사용하였다. 낙하존데의 경우 라디오존데보다 관측 회수가 충분하지 않아 검증자료의 개수에 따른 불확실성을 검증값과 함께 제시하였다.

초기장 대비 개선율을 살펴보기 위하여 UM 예측장의 검증 결과도 포함하였다.

지표면부터 100 hPa까지 온도의 평균 bias와 RMSE는 -0.42 ± 0.02 K와 -0.79 ± 0.03 K으로 UM 예측장 정확도와 같았으며, 습도의 경우도 bias -0.01 g/kg과 RMSE 0.30 ± 0.01 g/kg으로 UM 예측장과 같은 정확도 및 정밀도를 보였다. 그러나 800 hPa부터 500 hPa까지의 평균 bias와 RMSE는 0.08 ± 0.01 g/kg과 0.25 ± 0.02 g/kg으로 UM 예측장 (bias: 0.1 ± 0.01 g/kg, RMSE 0.26 ± 0.02 g/kg) 대비 개선됨을 보였고, 500 hPa부터 300 hPa까지의 분포에서도 bias 0.02 g/kg RMSE 0.05 g/kg으로 초기장 (bias: 0.04 g/kg, RMSE: -0.06 g/kg) 대비 개선됨을 보였다. 이는 AHI 자료가 중·상층 수증기에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 초기장에 비해 개선된 것이라 사료된다.

그림 20은 고도별 bias와 RMSE 분포를 나타낸 것으로, 라디오존데 검증 결과와 비교하기 위하여 2월 한달 동안의 전구에 대한 검증 결과를 포함하였다. **그림 20(a, b)**는 온도의 결과이고 **그림 20(c, d)**는 습도의 결과이며, 왼쪽은 bias, 오른쪽은 RMSE이고, 붉은색 실선과 파란색 실선은 낙하존데를 이용하여 검증한 AAP와 UM 예측장의 결과이며, 보라색 파선과 초록색 파선은 라디오존데를 이용하여 검증한 AAP와 UM 예측장의 결과이다. 대기 하층(1013~900 hPa)에서의 온도프로파일 정확도는 낙하존데를 이용한 검증 결과가 라디오존데보다 높은 정확도를 보였다. 또한, AAP와 UM 예측장의 습도 프로파일 검증결과는 bias와 RMSE 모두 지표부터 800 hPa까지는 유사하였지만, 그 이상 고도에서 AAP가 초기장보다 0 g/kg에 가까운 값을 보였다. 그에 따라 습도값에 의존적인 총가장수량과 안정도 지수의 결과가 초기장에 비해 높은 정확도를 보였다(**그림 21**). 낙하존데와 라디오존데의 검증 날짜와 관측 위치가 동일하지 않아 절대적으로 비교할 수는 없으나, 이 결과를 통하여 해양에서의 AAP 검증 결과가 육지보다 RMSE가 작고, 특히 습도 프로파일의 경우 UM 예측장 대비 개선됨을 확인할 수 있었다.

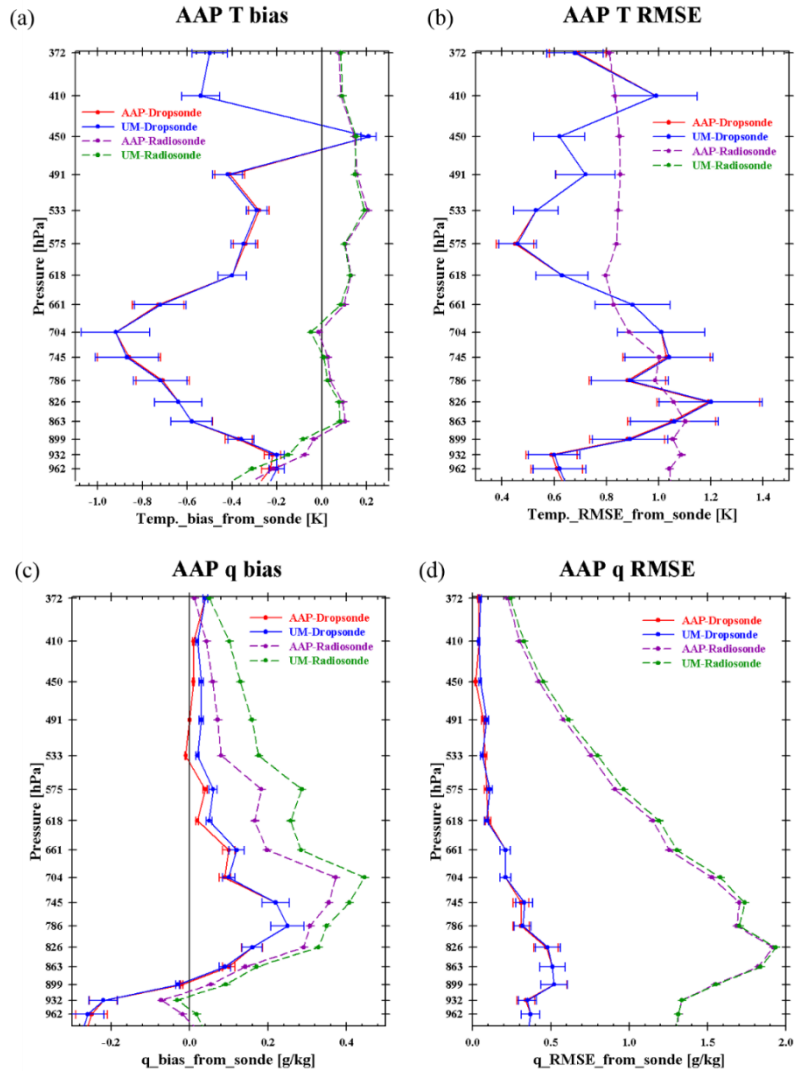


그림 20 낙하존데(실선) 및 라디오존데(파선)로 검증한 고도별 평균 온도(위) 및 습도(아래)의 bias(왼쪽) 와 RMSE(오른쪽). 붉은색과 보라색은 AAP 결과, 파란색과 초록색은 UM 예측장 검증 결과

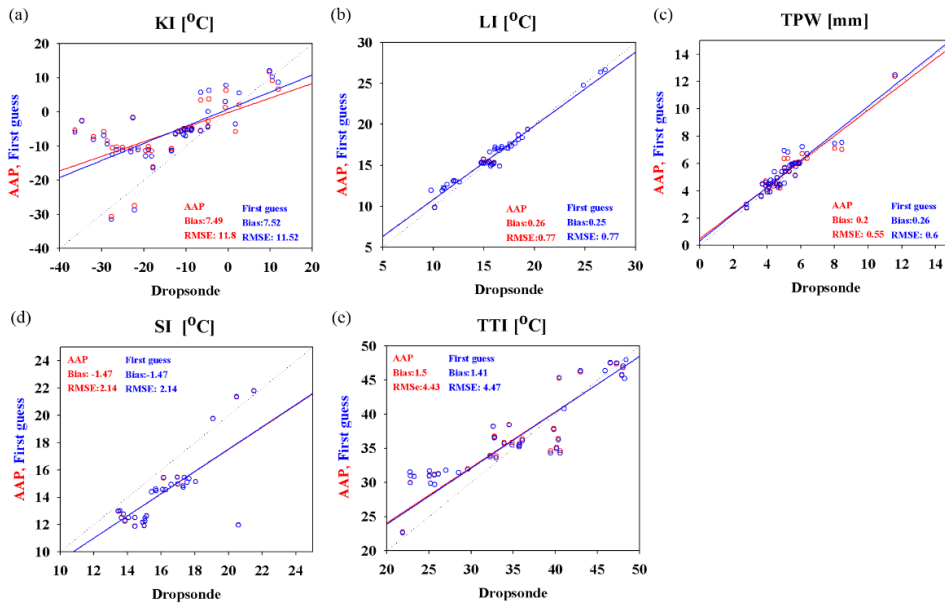


그림 21 라디오존데로 검증한 AAP(붉은색) 및 UM 예측장(파란색) 대기안정도 지수(a: KI, b: LI, d: SSI, e: TTI)와 총가강수량(c)의 산포도 분포. 각각 bias, RMSE 그리고 회귀선이 포함됨

3.3.4 AMSR-2 자료를 이용한 가강수량 검증

해상에서의 TPW 검증을 위해 AMSR-2를 이용한 비교를 수행하였고, TPW 정확도가 비교적 낮은 것으로 알려져 있는 여름과 높은 것으로 알려져 있는 겨울의 결과 비교를 위해 2016년 8월 1-6일과 2016년 12월 1-15일 일치자료를 사용하였다. 그 결과 그림 22와 같이 겨울(그림 22(b))에는 bias와 RMSE 모두 목표 정확도(표 3)를 만족하는 반면 여름(그림 22(a))에는 더 높은 bias와 RMSE를 나타내는 것을 확인할 수 있고, 이러한 패턴은 선행 연구결과(Pacione, 2002; Lee et al., 2014)와도 일치한다.

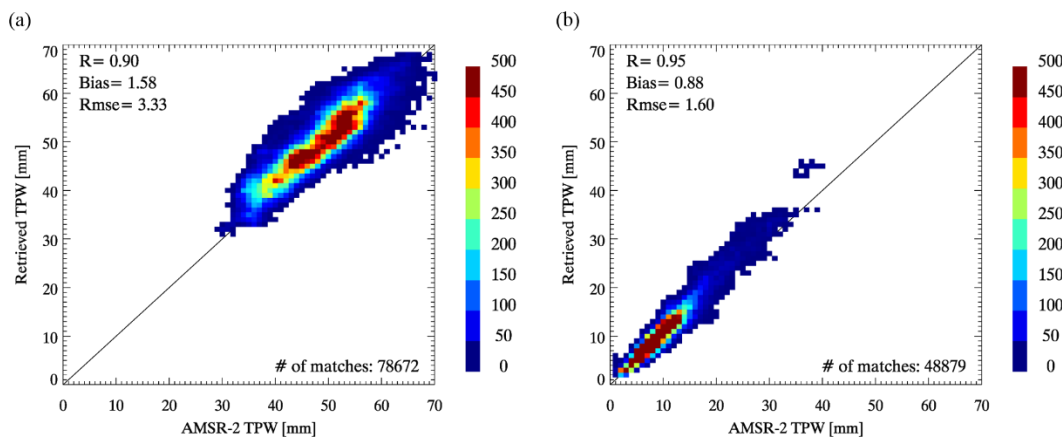


그림 22 해상에서 여름(a)과 겨울(b)에 대한 AMSR2 TPW와의 산포도 밀도 분포. 붉은색 일수록 밀도가 높음

3.3.5 OMI 자료를 이용한 총오존량 검증

AAP 알고리즘을 통해 산출된 청천 및 하층운 화소에 대한 총오존량 검증은 2017년 동안 매달 5일을 선택하여 수행하였다. 이때 위도에 따른 분포를 보고자 70S부터 70N까지 다섯 구간으로 나누어 보았다. 해당 분석은 천리안-2A 구름탐지 알고리즘 개발이 완성되기 이전에 분석한 결과이기 때문에, AAP 알고리즘에 내장된 자체 구름탐지 알고리즘을 사용하였다. **그림 23(a-d)**는 청천이고 **그림 23(e-h)**는 낮은 구름인 경우이며 왼쪽부터 봄(3·4·5월), 여름(6·7·8월), 가을(9·10·11월), 겨울(12·1·2월) 동안의 검증 결과이다. 청천인 경우 봄, 여름, 가을과 겨울의 bias는 5 DU, 9 DU, 5 DU, 10 DU이고 RMSE는 8 DU, 9 DU, 8 DU, 13 DU로 **표 3**에 제시된 목표 정확도를 만족하였고, 모든 계절에서 하층운이 청천인 경우보다 높은 RMSE값을 보였다. 위도별 분석 결과 겨울철 높은 RMSE를 보인 부분은 위도 30S에서 30N 부근인 것으로 분석되었다. 또한 고위도 지역에서는 bias와 RMSE가 저위도에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이는 오존초기장의 특성상 기후자료의 공간해상도가 위도 10도 간격으로 이루어져 있고, 위도별로 한 개의 오존 초기장이 알고리즘의 입력자료로 들어가기 때문에 동서방향(경도방향)의 총오존량 값의 변동이 큰 고위도 지역에서는 AAP로 산출되는 총오존량의 오차가 큰 것으로 사료된다.

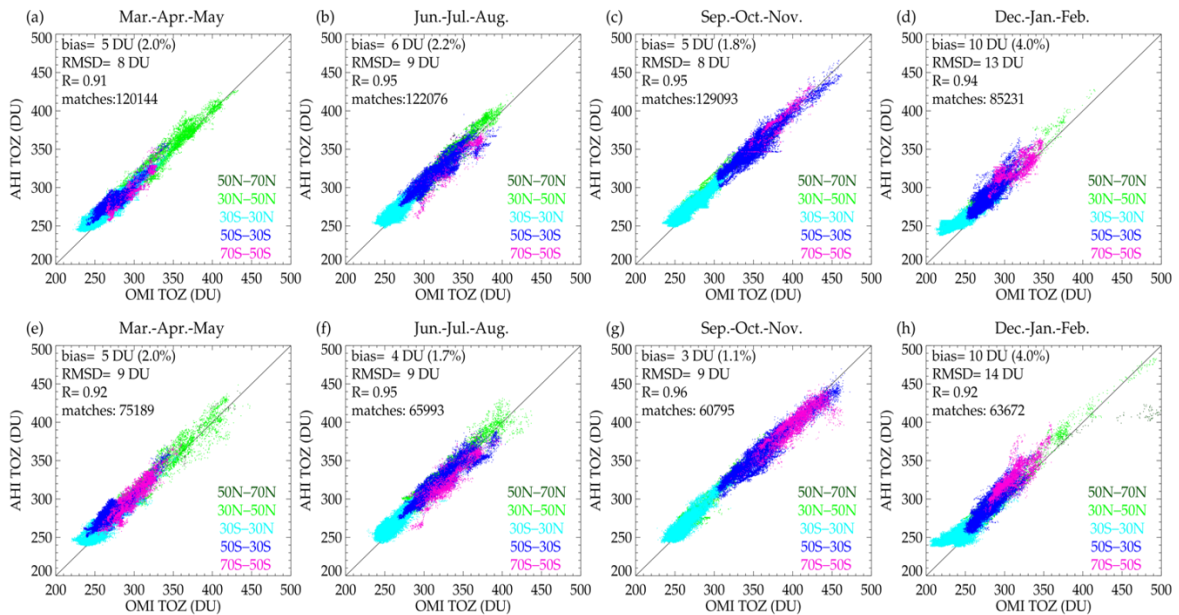


그림 23 OMI 자료를 이용한 위도밴드에 따른 계절별 총오존량 검증 결과로 (a)-(d)는 청천 산출 결과이고 (e)-(h)는 하층운 산출 결과임. 각 색은 위도를 나타냄

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

수치계산을 위해 고려되어야 할 가장 중요한 요소는 1) 산출주기, 2) 산출영역, 3) 산출해상도, 4) 반복횟수 최대 허용치가 될 것이며, 이에 따라서 전후자료 처리를 위한 수치계산의 규모도 결정될 것이다. 각각의 요소에 대한 최종 확정은 궤도상 시험에서의 시험 결과에 따라 결정될 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 현재 고려되고 있는 이들 요소를(10분 산출주기, 9개 화소 평균, 6번의 반복 최대허용치) 기준으로 요구되는 계산량은 산출하여, 시험과정에서 요구되는 계산규모를 산정하였다. 다만, 이 과정에서 추가적으로 고려되어야 할 사항은, 위성 관측 시공간 해상도에 해당하는 수치모델자료의 준비가 선행되어야 한다는 점이다. 이 과정은 실시간 처리 이전의 전처리 과정에서 이루어질 수 있으므로, 효율적인 스케줄 구성으로 전산자원의 최적 활용을 통해 반영될 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

AAP 알고리즘 수행과정에서는 구름이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우에 처리되는 과정이 달라지며, 이에 따라 구름탐지 결과의 효율적인 활용이 알고리즘 성능 확보를 위해서는 중요한 전제조건이 된다. 또한, 현재 기후값으로 지정되어 이용되고 있는 지면 방출율 정보가 실시간으로 신뢰할 수 있는 수준으로 갱신될 경우에는 이를 활용하는 과정을 포함할 필요도 있을 것이다. 따라서 AAP 알고리즘의 처리순서는 구름탐지 알고리즘이 수행된 이후에는 어느 때라도 수행될 수 있으며, 구름정보가 제공되지 않을 경우를 대비해서 알고리즘 내에 간단한 구름탐지 과정이 포함되었다.

AAP 알고리즘의 성능에 크게 영향을 미치는 또 하나의 요소는 초기장이다. 따라서, AAP 알고리즘 수행 이전에 산출규격에 해당하는 초기장이 준비되어야 하며, 이 초기장은 수치모델의 예측장에서 제공되어야 하므로, 수치모델 예측장이 생산된 후 최대한 빠른 시간 안에 AAP 알고리즘 수행 전 시간에 대한 초기장을 준비할 필요가 있을 것이다. AAP 알고리즘 자체는 전처리, 물리적 반복 접근 순으로 순차적으로 실행된다. 또한 AAP는 순전히 FOR × FOR 알고리즘이므로, 전체 관측 영역을 일정한 크기의 세부 영역으로 분리하여 독립적으로 처리할 수도 있다. 즉, 산출속도를 향상시키기 위해 다수의 CPU를 사용하는 경우에는 CPU 간의 통신은 없이 분할처리가 가능하므로, 세부 영역으로의 정보전달 속도가 확보될 수 있다면, AAP 수행속도를 효과적으로 증가시킬 수 있다.

4.3 품질 평가 및 진단

AAP 산출자료의 품질평가와 성능 진단을 위해서는 실시간 및 비실시간 절차가 가능할 것으로 판단된다. 우선 실시간 성능 진단을 위해서는 알고리즘의 실시간 운영과정에서 생산되는 다음과 같은 정보를 이용한 감시가 가능할 것으로 판단된다.

-FOR 내의 청천 화소 비율 모니터: 현재 구축된 알고리즘의 경우에는 청천화소를 대상으로 하기 때문에, 청천화소의 비율이 낮으면 낮을수록 그 산출성능은 낮아질 것으로 예상됨. 따라서 산출영역내의 청천화소 비율은 산출성능의 지표가 될 수 있음.

-관측 휘도온도와 초기장을 이용한 휘도온도, 알고리즘으로 산출된 휘도온도의 잔차(residuals): 초기장과 잔차는 초기장이 가지는 불확실성을 나타내는 척도가 될 수 있으며, 산출된 휘도온도와 잔차는 다양한 정보를 포함할 수 있음. 잔차가 높을 경우에는 초기장과 관측장의 차이가 수렴에 이르기 어려울 정도로 큰 경우와 탐지되지 않은 현상(예를 들어 구름)에 의한 간섭으로 이론적인 휘도온도와 관측 휘도온도가 일치하지 않음을 의미함. 따라서, 이러한 자료의 비실시간 분석을 통해 AAP 알고리즘의 특성분석 및 개선이 가능할 것으로 기대함.

-10.5 채널 휘도온도에 대한 관측값과 모의된 값 사이의 차이: 적외창 채널에서의 휘도온도는 표면방출에 의해 지배된다는 물리적 특성에 따라 관측값과 산출값의 차이는 모델에서 이용되는 경계조건의 정확도를 나타내는 척도가 될 수 있음. 따라서 이 값이 큰 차이가 나는 경우는 주로 구름에 의한 영향과 표면의 휘도온도가 크게 다르기 때문(예를 들어 주간 육상에서 관측되는 지표면 온도는 급격하게 증가하지만 모델의 지표면 온도는 이를 잘 반영하지 못하는 경우와 같은)에 주로 발생함.

AAP 알고리즘의 비실시간 성능평가를 위해서는 기준자료가 필요하며, 이를 위해 관측영역 내에 존재하는 라디오존데 자료 및 수치모델 분석장의 활용이 필요할 것으로 판단된다. 라디오존데 자료의 경우에는 모든 관측주기의 자료를 수집할 필요가 있으며, 비교를 위해 사용되는 자료는 품질검사를 반드시 거친 후에 활용되어야 한다. 수치모델 분석장은 매 6시간마다 이루어지는 자료를 활용하게 된다. 특히, 수치모델 분석장은 라디오존데 관측이 가지는 시공간적 불균질성을 효과적으로 파악하고 대응할 수 있도록 할 것으로 판단된다.

4.4 예외사항 처리

알고리즘 수행의 필수 입력자료인 적외채널 값이나 구름정보가 잘못되었거나 누락되었을 시, 알고리즘 수행이 불가하다. AAP는 포화된 프로파일이 포함되었는지 여부나 누락된 복사전달 값들이 있는지 등에 대한 조건을 확인한다.

4.5 검증 알고리즘

검증 알고리즘의 경우 검증에 사용되는 기준자료의 준 실시간 확보가 무엇보다 중요하다. 또한, 검증 자료의 주기적인 품질검사를 통하여 품질이 유지되는지 확인이 필요하다. 이와 더불어 검증자료로 사용하는 위성자료의 운영 종료 일정을 대비한 준비가 필요하다. 그 일환으로 현재 총오존량 검증자료로 활용하고 있는 OMI자료의 운영 종료를 대비하여 그 후속 위성인 TROPOMI를 이용한 검증 체계를 마련하였다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

AAP 성능에 영향을 미치는 요소로는, 부정확한 구름탐지, 사용되는 복사전달모델의 불확실성, 사막과 같은 지표면 방출율 및 표면온도가 급격하게 변하는 경우, 복사휘도와 보정 편차, 불완전한 모델 배경오차 공분산 행렬이 포함된다. 이러한 요소들의 영향을 줄이기 위한 전략은:

(1) 구름탐지 정확도 향상을 위해서는 구름 산출물 팀과 협조하여 구름탐지 자료 사용에 관한 피드백을 제공하고 구름탐지 알고리즘 상에서 문제가 될 만한 부분을 식별한다. 현재는 비상계획(contingency plan)의 일환으로 AAP 알고리즘 자체 내에 구름탐지 성능을 평가할 수 있는 간단한 루틴을 추가하였다.

(2) 복사보정 편차의 경우는 편차 보정을 위한 알고리즘을 개발하고 보정 계수를 주기적으로 업데이트해야 한다. 또한 복사 편차의 일변화에 대한 특성 연구가 수행되어야 한다. 현재 센서 설계과정에서 제시된 편차정보를 이용하고 있으나, 센서 운영기간이 증가하고, 비교결과의 신뢰도가 높아질 경우, 관측오차 공분산 정보의 갱신 여부를 평가할 수 있을 것이다. 또한, 채널간 오차공분산을 산출하여 그 영향에 대한 평가도 수행하여 관측오차 공분산 및 오차정보의 부정확한 사용에 의한 성능저하를 최소화할 필요가 있다.

(3) 배경오차 공분산 행렬의 경우, 수치모델 운영을 담당하는 부서에서 제공되는 정보를 기본적으로 활용한다. 현재, 온도와 습도 배경오차 공분산 행렬은 기상청에서 사용하는 수치예보모델(통합모델(UM)을 기반으로 함)의 자료동화 전처리 시스템(OPS) IVAR에서 사용하고 있는 배경오차 공분산 자료를 이용하고, UM에서 제공되지 않는 오존 공분산 자료는 ECMWF 오차 공분산 행렬로 대체한다. 다만, 민감도 검사를 통해 주기적인 갱신이 필요한 경우 이를 만족시킬 수 있는 방안을 마련한다 (예를 들어 월 단위 갱신 필요)

5.2 예상 센서 성능

현재 AHI 제시 센서성능을 그대로 가정하여 알고리즘이 구축되었으며, 향후 AMI 레도상 시험 준비를 위한 과정에서는 AMI 지상실험에서 제공되는 센서 성능을 반영하여 알고리즘을 갱신할 수 있을 것으로 예상된다. 이 과정에서 AMI 방사계 성능 대비 AAP 산출물의 특성변화를 확인할 수 있을 것으로 기대한다. 즉, AAP 알고리즘 내에서 적용되는 관측오차 공분산의 크기에 따라 위성정보가 반영되는 정도가 달라지므로, 다양한 관측오차 공분산의 적용을 통해 산출되는 정보의 정확도 변화를 분석함으로써 센서 성능의 절대값 및 그 특성정보의 정확성이 최종 산출물의 정확도에 미치는 영향을 평가할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

개선 1: 극궤도 위성의 적외 탐측기 방출율 자료 활용

육상에서의 산출 정확도는 지표면 방출율의 정확도에 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다. 현재의 육상 방출율은 월 평균 기후자료를 활용하고 있으나, 이를 개선할 경우 산출정확도 향상이 이루어질 것으로 기대된다. 현재 고려할 수 있는 방안으로는 IASI에서 산출되는 지표면 방출율 스펙트럼을 활용하여 AMI 채널에서의 평균 방출율을 갱신하는 것으로, 향후 알고리즘 개선과정에서 시험될 수 있을 것으로 기대한다.

개선 2: 복사휘도 편차 보정

각 센서가 가지는 복사휘도 편차 보정을 위한 알고리즘의 개발도 중요한 것으로 판단된다. 복사휘도 편차 보정의 효과를 조사하기 위해 AHI 자료를 사용하고자 하며, 이를 통해 궤도상 시험에서의 AMI 예상특성을 반영할 수 있을 것으로 기대되며, 궤도상 시험을 통해 AMI에 대한 내용을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

개선 3: 고해상도 시간자료 활용

AMI는 이전에 비해 훨씬 향상된 시간 해상도를 가지게 되므로, 이를 최대한 활용하기 위한 다양한 방법을 고려할 수 있다. 하나의 예로는, 이전시간에 산출된 정보를 현재 시간의 초기장으로 활용하는 것이다. 이를 가능하게 만들기 위해서 몇 가지 평가를 수행할 필요가 있다. 우선은 산출되지 않은 영역에 대한 처리와 산출되었더라도 산출정확도가 낮은 자료의 파악과 대처방안을 마련하는 것이다. 이 과정에서는 수치모델 기반의 초기장이 기본적으로 존재하는 상황을 효과적으로 이용할 수 있을 것이다. 다양한 조합의 민감도 시험이 고려될 수 있으며, 이를 통한 활용 가능성 평가 및 최적의 방안을 마련하고자 한다.

또 다른 활용 방안으로는 대기운동벡터에 적용되는 것과 같은 이전시간자료를 이용한 산출자료의 객관적인 품질지수를 생산하여 제공하는 것이다. 짧은 시간동안 연직 온·습도 분포가 크게 바뀌지 않는다면, 산출된 정보들의 시간에 따른 변화도 크지 않다는 가정이 성립할 경우, 이를 적용한 품질지수를 고안할 수 있을 것이다. 그 가능성을 평가하기 위해서는 짧은 시간동안 나타나는 연직 온·습도 분포의 실질적인 변화정보가 요구된다.

개선 4: 고해상도의 지역 예보모델 사용

Jin et al. (2008)에 의하면 고해상도 지역모델 프로파일을 초기장으로 사용할 경우 대기 하층의 습도 프로파일에 대한 산출 결과가 눈에 띄게 향상되는 것으로 나타났다. 향후 기상청 전구모델 및 지역모델의 개선방안과 산출영역과 지역모델 운영영역을 종합적으로 고려하여, 지역모델을 초기장으로 활용하는 AAP 알고리즘의 개선도 고려될 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- Baker, N. L., 1992: Quality control for the U.S. Navy operational database. *Wea. Forecasting*, **7**, 250–261
- Balis, D., M. Kroon, M. E. Koukouli, E. J. Brinksma, G. Labow, J. P. Veefkind, and R. D. McPeters (2007), Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations, *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S46, doi:10.1029/2007JD008796.
- Chahine, M. T., 1970: Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 960–967
- Fritz, S., D. Q. Wark, H. E. Fleming, W. L. Smith, H. Jacobowitz, D. T. Hilleary, and J. C. Alishouse, 1972: Temperature sounding from satellites. *NOAA technical report NESS 59*, Washington, DC.
- Ingleby, B., 2017: An assessment of different radiosonde types 2015/2016. ECMWF Technical Memorandum No. 807
- JAXA (2013), Status of AMSR2 Level-2 Products (Algorithm Ver. 1.00), available at: http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_W/materials/product/AMSR2_L2.pdf
- Jin, Xin, Jun Li, Timothy J. Schmit, Jinlong Li, Allen H. Huang, and Mitchell D. Goldberg, 2008: GOES-R/ABI legacy profile algorithm evaluation using MSG/SEVIRI and AMSR-E, Atmospheric and Environmental Remote sensing Data Processing and Utilization IV: Readiness for GEOSS II, edited by Mitchell D. Goldberg, Hal J. Bloom, Allen H. Huang, Philip E. Ardanuy. *Proc. SPIE*, **7085**, 70850F
- Kidder, S. Q. and T. H. Vonder Harr, 1995: Satellite Meteorology: An Introduction. Ch6. Academic Press, London, UK. p189–196
- KMA, 2011: 손에 잡히는 예보기술. 3호. published in May, 2011
- Lee, Y.-K., Li, Z. and J. Li, 2014: Evaluation of the GOES-R ABI LAP Retrieval Algorithm Using the GOES-13 Sounder. *J. Atmos. Ocean Tech.*, **31**, 3–19
- Li J., T. J. Schmit, X. Jun, G. Martin, 2010: GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document for Legacy Atmospheric Moisture Profile, Legacy Atmospheric Temperature Profile, Total Precipitable Water, and Derived Atmospheric Stability Indices. NOAA NESDIS
- Ma, X.L., T. J. Schmit, W. L. Smith, 1999: A nonlinear physical retrieval algorithm – its application to the GOES-8/9 sounder. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 501–513.
- McPeters, R. D., and G. J. Labow (2012), Climatology 2011: An MLS and sonde derived ozone climatology for satellite retrieval algorithms, *J. Geophys. Res.*, **117**, D10303, doi:10.1029/2011JD017006.
- Pacione, R., E. Fionda, R. Ferrara, R. Lanotte, C. Sciarretta, and F. Vespe, 2002: Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy. *Phys. Chem. Earth*, **27**, 309–316.
- Rodgers, C. D., 1976: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation. *Rev. Geophys. Spac. Phys.*, **14**, 609–624.
- Rodgers, C. D. (2000), Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice.

F.W. Taylor, A., Eds.; Publisher: *World Scientific Publishing, Singapore*, Volume 2, pp. 21–41, pp. 81–99, ISBN 981–02–2740–X

- Seemann, S.W., E. E. Borbas, R. O. Knuteson, G. R. Stephenson, H.–L. Huang, 2008: Development of a Global Infrared Land Surface Emissivity Database for Application to Clear Sky Sounding Retrievals from Multi–spectral Satellite Radiance Measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 108 – 123
- Smith, W. L., Woolf, H. M. and Jacob, W. J. A, 1970: regression method for obtaining real–time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to Nimbus 3 SIRS observations. *Mon. Weather Rev.*, **98**, 582–603
- Smith, W. L., Woolf, H. M. and Fleming, H. E., 1972: Retrieval of atmospheric temperature profiles from satellite measurements for dynamical forecasting. *J. Appl. Meteorol.* , **11**, 113–122
- Stern, D. P., Bryan, G. H., & Aberson, S. D., (2016): Extreme low–level updrafts and wind speeds measured by dropsondes in tropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 144(6), 2177–2204
- Stewart, L. M., S. L. Dance, N. K. Nichols, 2013: Data assimilation with correlated observation errors: experiments with a 1–D shallow water model. *Tellus A* 65, doi: 10.3402/tellus.v65i0.19546
- WMO, 2016: Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. Space–based Capabilities, Instrument: AHI