

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

주간 구름광학두께 및
미세물리량 산출 알고리즘

양이석¹ 염성수¹ 엄준식²

¹연세대학교, ²부산대학교

Version 1.1

2019. 10. 15



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	날짜	작성자
0.1	기술분석서 초안 작성	0.3.0.1	2016.01.31	엄준식, 양이석, 염성수
0.5	3차년도 개발내용 추가 비문 수정 및 알고리즘소개 내용 보충	0.3.0.2	2017.01.18	양이석, 엄준식, 염성수
0.7	4차년도 개발내용 추가 알고리즘 검증 내용 보충	0.4.0.1	2017.09.28	양이석, 엄준식, 염성수
0.8	알고리즘 소개 품질플래그 내용 추가	0.5.0.1	2018.04.30	양이석, 엄준식, 염성수
0.9	5차년도 개발내용 추가 비문 수정 및 알고리즘 소개, 검증 부분 보충	0.5.0.2	2018.11.20	양이석, 엄준식, 염성수
1.0	비문 수정, 맞춤법 검사, 형식 수정	0.6.0.1	2019.04.15	양이석, 엄준식, 염성수
1.1	ATBD 1.0 점검사항 수정	0.6.2.4	2019.10.15	양이석, 엄준식, 염성수

<목 차>

1. 개요	1
1.1 목적	1
1.2 사용자	1
1.3 내용	1
1.4 관련 문서	1
2. 알고리즘 소개	2
2.1 개요	2
2.1.1 탑재체 특징	3
2.1.2 사용 채널	4
2.2 알고리즘 흐름도	6
2.3 알고리즘 입력자료	10
2.3.1 탑재체 기본 자료(L1B)	10
2.3.2 다른 산출물 자료(L2)	10
2.3.3 보조 자료	11
2.4 이론적 배경	11
2.5 수학적 설명	14
2.5.1 조건표(look-up table, LUT)	14
2.5.1.1 구름 조건표	14
2.5.1.2 흡수기체 조건표	19
2.5.2 대기보정(Atmospheric Correction)	20
2.5.3 최적추정방법(Optimal estimation technique)	26
2.6 산출물	28
2.6.1 품질플래그	28
3. 시험자료 및 출력물	29
3.1 모의 입력자료	29
3.2 산출결과	32
3.2.1 검증	34
3.2.1.1 해외 타 기관 산출물과의 비교	34
3.2.1.2 MODIS MYD06 산출물과의 검증	40
3.2.2 향후 계획	43
4. 현업운영시 고려사항	44

4.1 수치계산 고려사항	4
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	44
4.3 품질평가 및 진단	44
4.4 예외사항 처리	44
4.5 알고리즘 검증	44
5. 가정 및 제한	44
5.1 성능	44
5.2 예상되는 탑재체 성능	45
5.3 산출물 개선을 위한 사전계획	45
6. 참고문헌	46

<표 목차>

표 1. AMI DCOEW 구름산출물 세부사항.	2
표 2. AMI와 다른 탑재체들의 채널과 중심파장. DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 채널은 회색으로 표시되어 있다. VIS: 가시광선, NIR: 근적외, WV: 수증기, IR: 적외.	4
표 3. 지표면에 따른 채널 조합.	5
표 4. DCOEW 알고리즘에 사용되는 자료의 종류와 이름.	7
표 5. DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 탑재체 기본 자료.	10
표 6. 현업 위성에서 사용 중인 구름광학두께, 구름입자유효반경과 구름수액경로, 구름빙정경로 사이의 실험적 관계식. ρ_l , ρ_i , Q_e 는 각각 액상물의 밀도, 빙상물의 밀도, 소산계수(extinction coefficient)이다.	14
표 7. AMI 채널에 따라 고려해야할 흡수기체.	20
표 8. 식 8에서 사용된 흡수기체 양의 단위.	22
표 9. 계산된 AMI 채널별 흡수기체 투과계수.	25
표 10. DCOEW 알고리즘 산출물 목록.	28
표 11. DCOEW 알고리즘의 품질 플래그 목록.	29

〈그림 목차〉

그림 1. AMI (적색), ABI (청색), AHI (녹색), MODIS (흑색) 채널의 분광반응 함수.	3
그림 2. DCOEW 알고리즘의 개략적인 흐름. R: 반사도 VIS: 가시, NIR: 근적외. 6	6
그림 3. DCOEW 알고리즘 흐름도.	8
그림 4. DCOEW 최적추정법 산출 모듈 흐름도.	9
그림 5. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 AMI 채널 3($\lambda=0.64 \mu\text{m}$, 왼쪽 행)과 6($\lambda=1.61 \mu\text{m}$, 오른쪽 행)의 구름 반사도, 위 열은 액체상 구름, 아래 열은 얼음상 구름.	13
그림 6. AMI 채널 3과 6(왼쪽), 채널 4와 6(오른쪽)를 사용하여 만든 액체상 구름의 반사도.	16
그림 7. AMI 채널 3과 6(왼쪽), 채널 4와 6(오른쪽)를 사용하여 만든 얼음상 구름의 반사도.	16
그림 8. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 구름 투과도. AMI 채널 3 (왼쪽), 4 (중간), 6 (오른쪽).	17
그림 9. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 구름 투과도. AMI 채널 3 (왼쪽), 4 (중간), 6 (오른쪽).	17
그림 10. 태양천정각 60° 일 때 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).	18
그림 11. 태양천정각 60° 일 때 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).	18
그림 12. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 구름 구면 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).	19
그림 13. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 구름 구면 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).	19
그림 14. AMI 채널과 흡수기체에 따른 흡수기체 투과도. 회색으로 색칠한 부분은 DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 채널의 범위를 표시함.	22
그림 15. AMI 채널 3에서 직접 계산된 오존(O_3)의 투과도(실선)와 식 10-11을 사용하여 모수화한 값(점선).	23
그림 16. AMI 채널 4에서 직접 계산된 수증기(H_2O)의 투과도(실선)와 식 10-11를 사용하여 모수화한 값(점선).	23
그림 17. AMI 채널 6에서 직접 계산된 메탄(CH_4)의 투과도(실선)와 식 10-11를 사용하여 모수화한 값(점선).	24
그림 18. AMI 채널 6에서 직접 계산된 이산화탄소(CO_2)의 투과도(실선)와 식 8-9를 사용하여 모수화한 값(점선).	24
그림 19. 모의자료로 사용된 서태평양 상에서 MODIS가 관측한 2015년 태풍 앓사	

니(atsani).	30
그림 20. 모의자료로 사용된 서태평양 상에서 MODIS가 관측한 인도차이나 반도 그림.	30
그림 21. 모의자료로 사용된 2015년 8월 19일(0230 UTC) Himawari AHI 채널 4(상단) and 5(하단) 반사도.	31
그림 22. 산출된 DCOEW 구름광학두께(오른쪽)와 구름입자유효반경(왼쪽, μm). 2015년 08월 19일 태풍 앳사니(atsani)의 MODIS 관측자료가 사용되었다(그림 19).	32
그림 23. AHI 관측자료(예, 그림 21)를 모의 자료로 사용한 DCOEW 구름광학두께(상단)와 구름입자유효반경(하단) 산출물.	33
그림 24. AHI 관측자료(2015년 8월 19일 0230 UTC)를 사용하여 산출된 구름 유효입자반경. 각기 다른 연구기관의 산출 알고리즘이 사용되었다. NOAA/NESDIS (좌상단), CIMSS (우상단), KMA DCOEW (좌하단), 및 NASA/GSFC (우하단).	35
그림 25. 산출된 액체상 구름의 구름광학두께의 알고리즘간 비교.	36
그림 26. 산출된 얼음상 구름의 구름광학두께의 알고리즘간 비교.	37
그림 27. 산출된 액체상 구름의 구름유효입자반경의 알고리즘간 비교.	38
그림 28. 산출된 얼음상 구름의 구름유효입자반경의 알고리즘간 비교.	39
그림 29. 2015년 8월 19일 태풍 앳사니(atsani)의 DCOEW(왼쪽)와 MODIS(오른쪽)가 산출한 구름광학두께(위쪽)와 구름입자유효반경(아래쪽) 그림.	41
그림 30. DCOEW와 MODIS 산출물의 비교 결과. 위쪽은 액체상, 아래쪽은 얼음상, 왼쪽은 구름광학두께, 오른쪽은 구름입자유효반경의 결과를 나타낸다.	41
그림 31. 2015년 8월 19일 인도차이나 반도의 DCOEW(왼쪽)와 MODIS(오른쪽)가 산출한 구름광학두께(위쪽)와 구름입자유효반경(아래쪽) 그림.	42
그림 32. DCOEW와 MODIS 산출물의 비교 결과. 위쪽은 액체상, 아래쪽은 얼음상, 왼쪽은 구름광학두께, 오른쪽은 구름입자유효반경의 결과를 나타낸다.	42
그림 33. DCOEW와 MODIS의 LWP(왼쪽)과 IWP(오른쪽) 검증 결과. 위쪽은 태풍 앳사니 사례, 아래쪽은 인도차이나 반도의 사례를 나타낸다.	43

<약어 표>

ABI: Advanced Baseline Imager
AHI: Advanced Himawari Imager
AMI: Advanced Meteorological Imager
AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer – EOS
ATBD: Algorithm Theoretical Basis Document
CER: Cloud Effective Radius
CIMSS: Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies
COMS: Communication, Ocean and Meteorological Satellite
COT: Cloud Optical Thickness
CPH: Cloud Phase
CPR: Cloud Profiling Radar
CTP: Cloud Top Pressure
CWP: Cloud Water Path
DAA: Difference in Azimuth Angle
DCOEW: Daytime Cloud Optical thickness, Effective radius, and Water path
DCOMP: Daytime Cloud Optical Microphysical Properties
DISORT: Discrete Ordinate Radiative Transfer
GSFC: Goddard Space Flight Center
GK2A: Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2A
GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite
HITRAN: High Resolution Transmission
ICWG: International Cloud Working Group
IR: Infrared
IWP: Ice Water Path
KMA: Korean Meteorological Administration
LaRC: Langley Research Center
LUT: Look-Up-Table
LWP: Liquid Water Path
MI: Meteorological Imager
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA: National Aeronautics and Space Administration
NESDIS: National Environmental Satellite, Data, and Information Service
NIR: Near Infrared
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
NWP: Numerical Weather Prediction

OE: Optimal Estimation

RTM: Radiative Transfer Model

SEVIRI: Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

SRF: Spectral Respose Functions

SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager

SZA: Solar Zenith Angle

VIS: Visible

VZA: Viewing Zenith Angle

WV: Water Vapor

1. 개요

1.1 목적

이 알고리즘 기술분석서(Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD)는 대한민국 후속 정지궤도 위성인 천리안 2A호(Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2A, GK-2A)의 탑재체 중 하나인 Advanced Meteorological Imager (AMI)의 관측 값을 이용하여 주간 중(daytime) 구름광학두께(cloud optical thickness, COT), 구름입자유효반경(cloud particle effective radius, CER), 구름수액경로(liquid water path, LWP), 구름빙정경로(ice water path, IWP)를 산출해 내는 DCOEW(Daytime Cloud Optical thickness, Effective radius, Water path) 알고리즘의 이론적 배경을 설명하기 위해 만들어졌다.

1.2 사용자

이 문서는 DCOEW에서 생산하는 구름산출물의 세부적인 내용과 알고리즘의 이론적 배경을 알고자 하는 이를 위해 만들어졌다. 또한 이 문서는 구름산출물 알고리즘의 유지, 보수 및 다음 세대 알고리즘 개발을 원하는 사람에게도 유용하다.

1.3 내용

이 문서는 다음과 같은 내용을 담고 있다.

- 관측 시스템 개요: AMI 탑재체 설명
- 알고리즘 설명: 알고리즘의 이론적 배경
- 시험 자료와 산출물: 알고리즘의 입력 자료, 시험 자료(즉, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)와 Advanced Himawari Imager (AHI) 자료)와 산출물에 대한 설명
- 현업운영 시 고려사항: 알고리즘 수행 시 고려되어야 하는 수치계산, 프로그래밍, 품질평가에 대한 설명
- 가정 및 제한: 현재 알고리즘의 한계와 사용된 가정에 대한 설명 및 차후 개선 계획을 설명

1.4 관련 문서

이 문서는 다음에 열거한 GK2A AMI 산출물 문서와 관련되어 있다.

- GK2A AMI 운상(cloud phase)
- GK2A AMI 운정기압(cloud top pressure)
- GK2A AMI 구름탐지(cloud detection)

다른 관련 문서는 7. 참고문헌에 제시되어 있다.

2. 알고리즘 소개

2장에서는 DCOEW 알고리즘의 현재 개발상황 및 특징이 설명되어 있다. 이 내용은 본 문서 버전이 업데이트 될 때마다 지속적으로 수정될 예정이다.

2.1 개요

DCOEW 알고리즘은 AMI 탑재체의 채널 정보를 최대한 활용하며, AMI 채널의 복사 휘도 값을 입력자료로 사용하여 주간 중의 구름광학두께(optical thickness) 및 미세 물리특징(microphysical characteristics)을 산출해낸다. DCOEW 알고리즘은 먼저 구름광학두께와 구름입자유효반경을 산출하고, 이후 구름수액경로와 구름빙정경로를 산출한다. 구름광학두께, 구름입자유효반경의 단위는 각각 무차원, μm , 구름수액경로와 구름빙정경로의 단위는 $g m^{-2}$ 이다.

본 알고리즘에서 ‘주간’은 태양 천정각(solar zenith angle, SZA)이 80° 보다 작을 때로 정의한다. DCOEW 알고리즘은 운상이 액체상 또는 얼음상으로 판명된 화소(pixel)에 대해서만 계산을 수행하며, 청천(clear sky)화소이거나 운상이 불확실(uncertain)한 화소에 대해서는 계산을 수행하지 않는다. AMI DCOEW 알고리즘 산출물의 산출 범위 및 목표 정확도가 표 1에 정리되어 있다.

표 1. AMI DCOEW 구름산출물 세부사항.

산출물	범위	오차 평균(Mean bias)
구름광학두께	1-160	10 or 20%
구름입자유효반경	액체상: 2-70 μm 얼음상: 5-90 μm	액체상: 4 μm 얼음상: 10 μm
구름수액경로	25-1000 $g m^{-2}$	25 $g m^{-2}$ or 15%
구름빙정경로	25-2000 $g m^{-2}$	25 $g m^{-2}$ or 30%

2.1.1 탑재체 특징

천리안 2A호는 2018년 말에 발사되어 기존의 기상 및 해양 관측을 수행하고 있는 천리안 1호 인공위성의 임무를 승계할 예정이다. 천리안 2A호에 탑재될 새로운 탑재체인 AMI는 천리안 1호 탑재체인 MI(Meteorological Imager)에 비해 약 4배 향상된 성능을 가지고 있다(16개의 채널, 500m 해상도, 전구 촬영 10분 미만). 천리안 2A호에 탑재될 AMI는 미국에서 2016년 11월에 발사된 GOES-16에 탑재된 ABI(Advanced Baseline Imager)와 일본 Himawari-8 위성에 탑재된 AHI와 유사한 성능 및 특징을 가지고 있다.

AMI의 채널 구성과 채널 별 중심파장, 그리고 그에 상응하는 MODIS, ABI, AHI, 채널들의 중심파장을 비교하여 표 2에 나타냈다. DCOEW 알고리즘에서 사용하는 AMI 3, 4, 6채널은 표 2에 음영으로 표시하였고, 그림 1에 이 채널들의 분광반응함수(spectral response functions, SRF)와 그에 상응하는 타 채널들의 분광반응함수를 나타냈다. 그림 1에서 볼 수 있듯, MODIS, AHI, ABI는 AMI와 유사한 분광반응함수를 가지고 있기 때문에, 세 탑재체의 L1B 자료 모두 모의자료로써 사용 가능하다. 현재 개발단계까지는 MODIS와 AHI 데이터를 모의자료로써 사용하였다. 이로 인해 이 후 알고리즘 기술분석서에 포함된 그림들과 표는 AMI 분광반응함수를 기준으로 작성하였으나, 실제 개발과정에서 DCOEW 알고리즘의 계산에서는 MODIS나 AHI의 분광반응함수를 사용하였다.

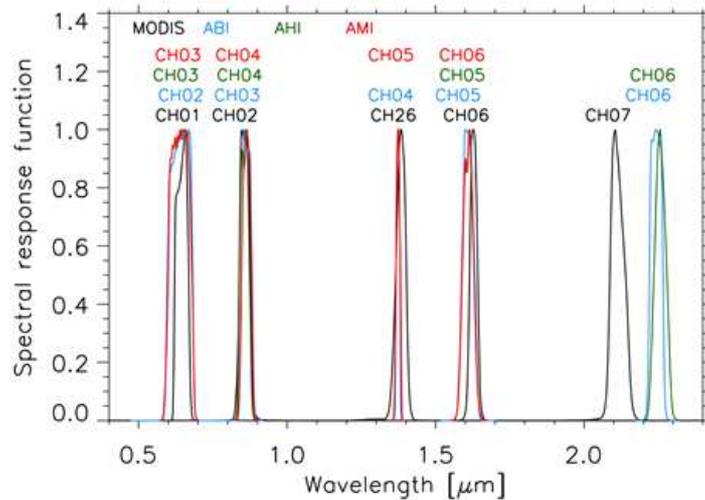


그림 1. AMI (적색), ABI (청색), AHI (녹색), MODIS (흑색) 채널의 분광반응함수.

표 2. AMI와 다른 탑재체들의 채널과 중심파장. DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 채널은 회색으로 표시되어 있다. VIS: 가시광선, NIR: 근적외, WV: 수증기, IR: 적외.

AMI 채널	중심 파장 (μm)				
	AMI	ABI	AHI	MI	MODIS
1 (VIS)	0.470	0.470	0.47		0.469 (B03)
2 (VIS)	0.511		0.51		0.555 (B04)
3 (VIS)	0.640	0.640	0.64	0.675	0.645 (B01)
4 (VIS)	0.856	0.865	0.86		0.859 (B02)
5 (NIR)	1.380	1.378			1.382 (B26)
6 (NIR)	1.610	1.610	1.61		1.64 (B06)
NIR		2.250	2.25		2.114 (B07)
7 (IR)	3.830	3.90	3.9	3.75	3.96 (B20)
8 (WV)	6.241	6.185	6.24		6.765 (B27)
9 (WV)	6.952	6.95	6.94	6.75	6.765 (B27)
10 (WV)	7.344	7.34	7.35		7.33 (B28)
11 (IR)	8.592	8.50	8.6		8.55 (B29)
12 (IR)	9.615	9.61	9.63		9.73 (B30)
13 (IR)	10.403	10.35	10.4	10.8	B30+B31
14 (IR)	11.212	11.20	11.24		11.019 (B31)
15 (IR)	12.364	12.30	12.3	12.0	12.032 (B32)
16 (IR)	13.31	13.30	13.3		13.365 (B33)

2.1.2 사용 채널

Hansen and Pollack (1970)에서 태양 파장대(solar wavelengths)에서 구름광학두께와 구름입자유효반경 사이의 관계를 이용하여 구름의 미세물리적, 광학적 특성을 결정하는 방법을 제안한 이후, 항공기와 위성을 이용하여 구름의 미세물리·광학적 특성을 관측하는 방법의 발전은 지속적으로 이루어졌다(Twomey and Cocks, 1982; King, 1987). 특히, 구름에 의해 빛이 거의 흡수되지 않는 파장대 채널과 빛이 일부 흡수되는 파장대 채널에서 관측된 복사휘도 값을 동시에 사용하여 구름의 광학두께 및 미세물리특성을 산출하는 방법이 원격탐사를 통한 구름 특성 연구를 위해 개발되었고(예, Twomey and Cocks, 1989), Nakajima and King (1990)에 이르러 이 두 개의 채널을 동시에 사용하는 알고리즘의 이론적 토대가 정립되었다.

DCOEW 알고리즘은 위 문단에서 서술한 Nakajima and King (1990)의 방법을 기반으로 하여 구름광학두께와 구름입자유효반경을 산출한다. 이 방법은 구름입자에 의해 빛의 흡수가 거의 일어나지 않는 가시광선(Visible) 파장 채널(비흡수 채널)

널)과 구름입자에 의해 빛의 흡수가 상당량 일어나는 근적외(Near IR, NIR) 파장 채널(흡수채널)에서 관측된 복사휘도 값을 동시에 사용한다. 태양광이 지구로 도달하기 전에 구름에 의해 빛이 반사되면, 위성의 탑재체가 반사된 태양 빛을 관측할 수 있는데, 이때 가시광선 채널에서 관측한 반사된 태양 빛의 복사휘도 크기는 구름광학 두께에 거의 비례하고, 근적외광선 채널에서 관측한 반사된 태양 빛의 복사휘도 크기는 구름입자유효반경에 거의 반비례한다. DCOEW 알고리즘은 이와 같은 가시광, 근적외광 채널의 특징을 이용하여 두 개의 채널에서 관측된 복사휘도 값을 이용하여, 구름광학두께와 구름입자유효반경을 산출하도록 개발되었다. DCOEW 알고리즘에서는 육지와 해양, 각각의 지면에서 사용하기 편리한 가시광 채널이 다르므로, 지면의 성질에 따라서 두 개의 다른 채널을 조합하여 사용한다 (표 3).

표 3. 지표면에 따른 채널 조합.

지표면	비흡수 채널	흡수 채널
육지	3 ($\lambda=0.64 \mu m$)	6 ($\lambda=1.61 \mu m$)
바다	4 ($\lambda=0.87 \mu m$)	6 ($\lambda=1.61 \mu m$)

DCOEW 알고리즘은 크게 다섯 부분으로 구성되어 있는데, 1) 복사전달모델 (radiative transfer model, RTM)을 사용하여 구름 조건표 (look up table, LUT)와 흡수기체 투과계수(absorption gas transmission coefficient) 조건표를 생성하고, 2) 천리안 2A 위성의 다른 구름특성 산출물(운상, 운정기압, 분광지면알베도)과 미량기체 연직분포도(trace gas vertical profile)를 알고리즘에 적용, 3) 구름에서 반사된 태양 빛이 위성까지 도달하는 동안 레일리 산란이나 에어로졸 또는 미량기체에 의해 흡수되어 감쇄되는 양을 보정하고, 4) 구름광학두께와 구름입자유효반경을 최적추정법(optimal estimation)을 사용하여 산출하며, 5) 산출된 구름광학두께와 구름입자유효반경 사이의 실험적 관계식을 이용하여 구름수액경로와 구름빙정경로를 산출하게 된다. 위의 언급된 처리 방법을 그림 2에 모식도로 나타냈다.

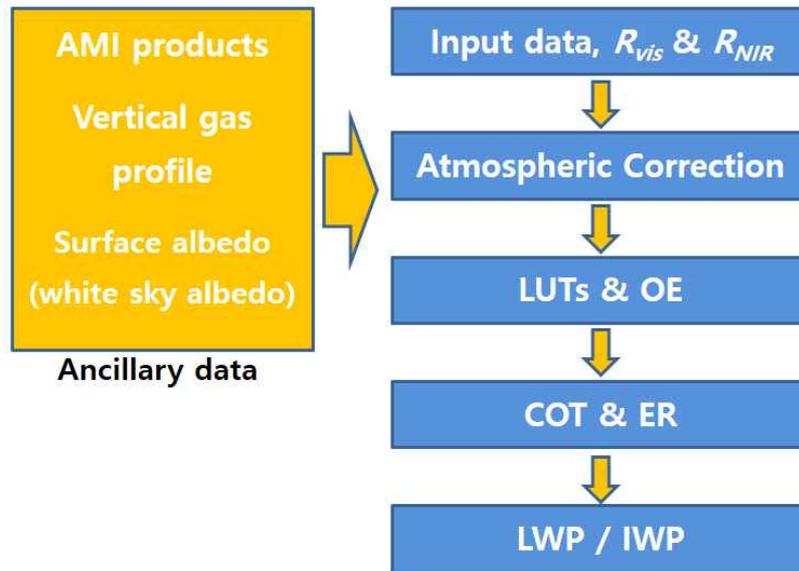


그림 2. DCOEW 알고리즘의 개략적인 흐름. R: 반사도
VIS: 가시, NIR: 근적외.

2.2 알고리즘 흐름도

DCOEW 알고리즘의 처리 흐름은 그림 3-4에 정리되어 있으며, 알고리즘 처리 흐름을 설명하는데 사용한 약어를 표 4에 정리하였다. DCOEW 알고리즘이 시작되면, 먼저 입력된 화소에 대해 계산 수행 여부를 판단하고, 계산을 수행해야 할 화소라면 AMI의 가시/근적외 채널에 관측된 복사휘도 값을 읽고 대기 상부(top of atmosphere)에서의 반사도로 변환한다. 이후 대기보정방법, 최적추정법을 이용하여 구름광학두께 및 구름입자유효반경을 산출한 후 두 산출물을 이용하여 구름수액경로와 빙정경로를 계산하게 되는데, 이에 대한 자세한 설명은 2.5절에서 서술하였다.

표 4. DCOEW 알고리즘에 사용되는 자료의 종류와 이름.

자료 종류	자료명	약어
관측	가시채널 복사휘도(radiance)	L_{VIS}
	근적외채널 복사휘도(radiance)	L_{NIR}
	가시채널 반사도(reflectance)	R_{VIS}
	근적외채널 반사도(reflectance)	R_{NIR}
다른 AMI 산출물	구름운정기압(cloud top pressure)	CTP
	운상(cloud phase)	CP
	구름탐지(cloud detection)	CLD
조건표	흡수기체 투과계수 (absorption gas transmission coefficients)	T_{gas}
	구름 알베도(cloud albedo)	A_c
	구름 구면알베도 (cloud spherical albedo)	$R_{c,sph}$
	구름 투과도(cloud transmittance)	T_c
	구름 반사도(cloud reflectance)	R_c
보조자료	기압연직분포도(vertical pressure profile)	P
	지표 알베도(surface albedo)	A_{sfc}
	일사량(solar flux)	F_0

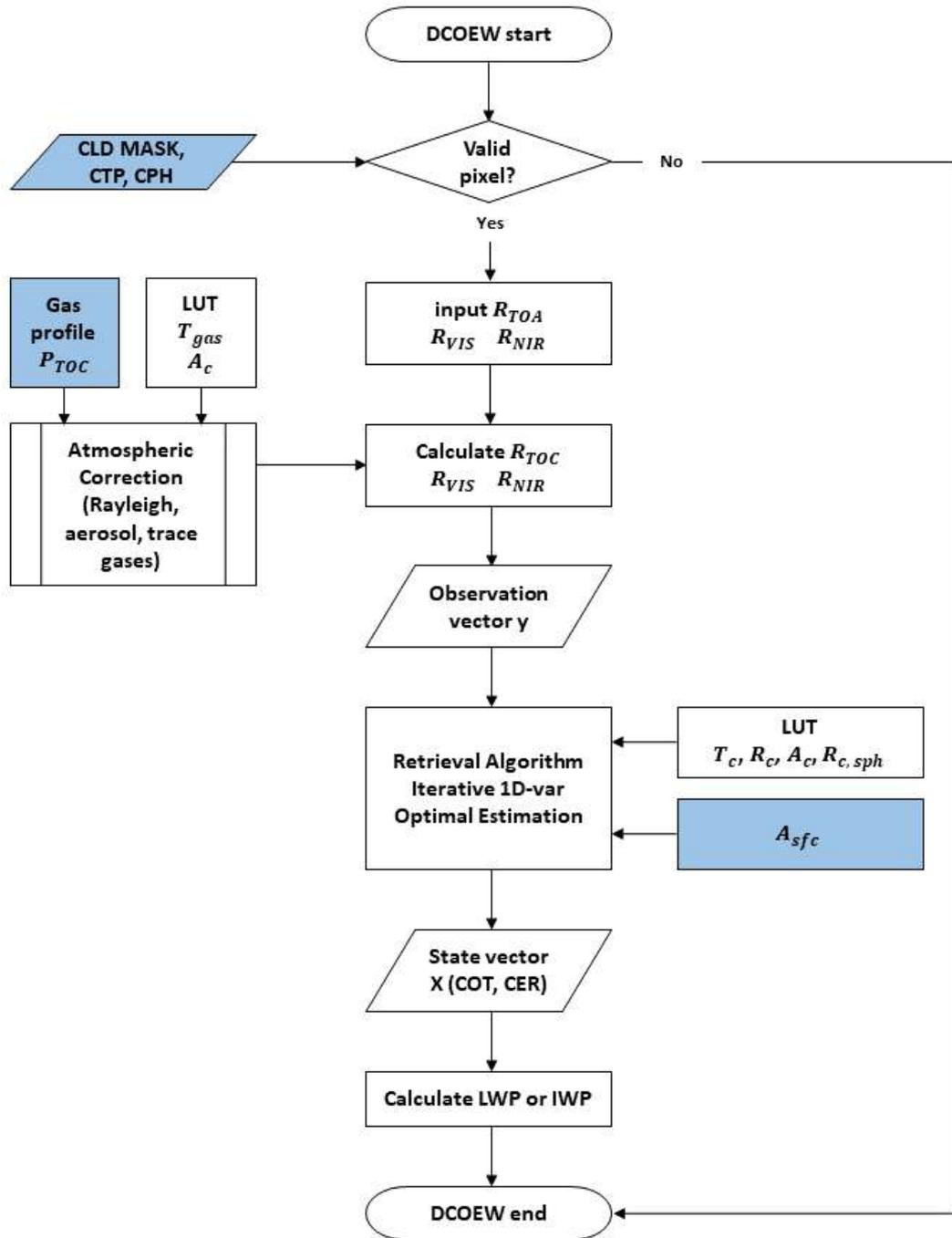


그림 3. DCOEW 알고리즘 흐름도.

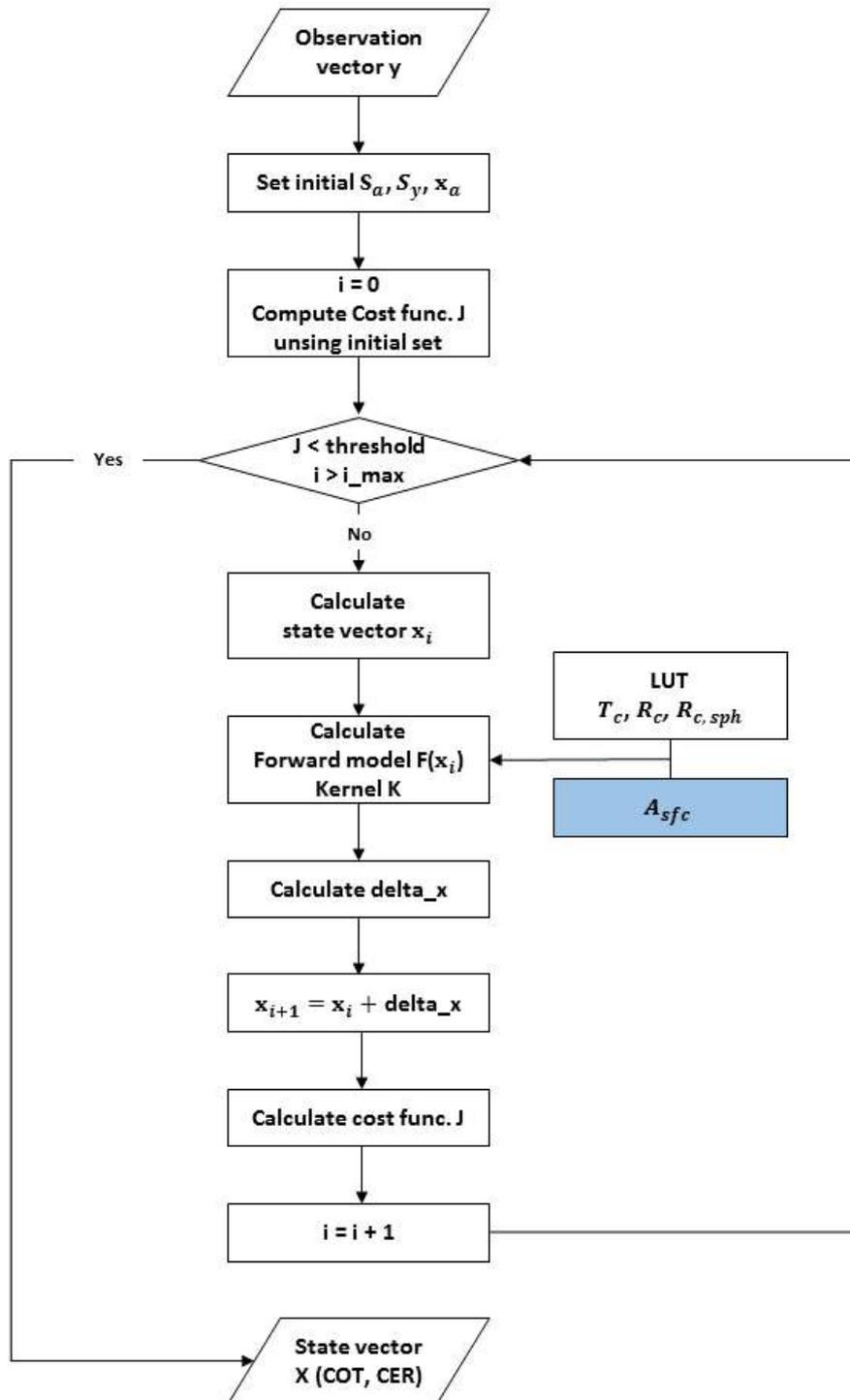


그림 4. DCOEW 최적추정법 산출 모듈 흐름도.

2.3 입력자료

2.3절에서는 DCOEW 알고리즘을 실행하는데 필요한 입력 자료에 대해 설명하였다.

2.3.1 탑재체 기본 자료(L1B)

DCOEW 알고리즘에 필요한 입력 자료, 즉 가시채널과 근적외채널의 복사휘도 (radiance), 화소의 위경도정보, 태양과 AMI의 위치정보에 대한 설명을 표 5에 제시하였다.

표 5. DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 탑재체 기본 자료.

입력자료	설명	차원
복사휘도	AMI 채널3 복사휘도	2 차원(x, y)
복사휘도	AMI채널4 복사휘도	2 차원(x, y)
복사휘도	AMI채널6 복사휘도	2 차원(x, y)
위도	해당 화소의 위도	2 차원(x, y)
경도	해당 화소의 경도	2 차원(x, y)
태양 위치정보	태양 천정각과 방위각	2 차원(x, y)
AMI 위치정보	AMI 천정각과 방위각	2 차원(x, y)

2.3.2 다른 산출자료(L2)

다음 세 종류의 자료는 AMI의 다른 알고리즘에서 산출된 구름 산출물로서 DCOEW 알고리즘에서 입력 자료로 사용된다.

- **운정기압(cloud top pressure)**: 대기보정을 적용시 수증기를 비롯한 흡수기체의 양을 결정하는데 사용.
- **운상(cloud phase)**: 운상에 따른 구름 조건표를 사용, 예, 액체상 또는 얼음상.
- **구름탐지(cloud detection)**: 구름탐지자료를 사용하여, 해당 화소가 구름화소인지 청천화소인지 구분.

2.3.3 보조 자료

다음 네 종류의 자료는 DCOEW 알고리즘에서 주간 구름광학두께, 구름입자유효반경, 구름수액경로, 구름빙정경로를 산출할 때 사용된다.

- **육지 경계도:** 국가위성센터(NMSC)가 제공한 2 km 해상도 육지-해양 경계도.
- **청천 지표 알베도:** GK-2A 개발팀이 제공한 2 km 해상도 청천 지표 알베도 자료(현재 개발단계까지는 MODIS의 MCD43C3 자료를 수정하여 사용하였다).
- **흡수기체 연직 분포도:** 기압, 수증기 연직 분포, 지면압력, 흡수기체 양의 관측값 연직 분포도 (Anderson et al., 1986).
- **각 채널별 조건표:** AMI 채널 3, 4, 6에 대한 구름 조건표와 흡수기체 투과계수 조건표.

2.4 이론적 배경

태양복사 파장대에서 구름의 복사 특징(radiative properties)은 구름광학두께(τ_λ)와 구름입자유효반경(r_e)을 사용하여 잘 나타낼 수 있다. 여기서 구름광학두께는 운저고도(cloud bottom height)부터 운정고도(cloud top height)까지의 연직 광학두께를 의미하며, 빛이 구름을 투과할 때 소산(extinction)되는 정도를 수치화해주는 척도이다. 구름광학두께는 무차원 단위(unitless)를 가지며, 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_\lambda = -\ln(I_\lambda/I_{\lambda 0}). \quad (1)$$

여기에서 $I_{\lambda 0}$ 는 구름에 입사하는 복사휘도, I_λ 는 구름을 통과한 복사휘도를 나타낸다. 구름광학두께는 빛의 파장에 따라 값이 달라질 수 있으나 가시광선 영역에서는 파장에 따른 변화는 거의 없다.

어떤 한 덩이의 구름이 있다고 가정해보면, 그 구름 안에는 무수히 많은 다른 크기의 구름입자들이 있을 것이다. 그리고 그 구름 전체의 복사 특징은 해당 구름입자들 각각의 다양한 크기를 모두 고려한 ‘어떠한 미세물리량(microphysical quantities)’으로 나타낼 수 있을 것이다. 이러한 구름입자 각각의 다양성과 구름 전체의 복사 특징을 연결하기 위해 도입된 미세물리량이 바로 구름입자유효반경이다. 구름입자유효반경은 입자크기분포의 세 번째 모멘트(moment)와 두 번째 모멘트 사이의 비로 나타낼 수 있고, 다음과 같이 정의된다.

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}. \quad (2)$$

이때, r 은 입자반경, $n(r)$ 은 입자크기분포를 나타낸다. 구름입자유효반경은 구름의 광학적 성질 (반사, 투과, 흡수)을 결정하는 변수이며 실제 구름의 입자반경과는 다른 물리량이다.

구름광학두께와 구름입자유효반경을 사용하여 구름의 특성을 표현하는 방법이 Hansen and Pollack (1970)에 의해 제안된 이후로, 이 두 물리량을 정확하게 계산하려는 많은 연구가 있었고, 일련의 연구들을 통하여 구름에 의해 반사되는 가시과장 영역대의 빛의 반사도(reflectance)는 주로 구름광학두께에 의존하며, 근적외선 과장 영역대 빛의 반사도는 주로 구름입자유효반경에 의존하는 성질이 있음을 알게 되었다. 그림 5에서, ch3(vis 채널)의 반사도는 운상과는 관계없이 구름입자유효반경 크기 변화에 대해서는 작은 민감도를 가지지만 구름광학두께변화에 대해서는 큰 민감도를 가지고 있음을 볼 수 있다. 하지만 ch6(nir 채널)의 반사도는 얇은 광학두께(r_e 가 10 이하)의 구름 반사도는 구름광학두께변화와 구름입자유효반경 변화 모두 민감하지만, 두꺼운 광학두께(r_e 가 10 이상)의 구름 반사도는 구름광학두께 변화에는 거의 영향을 받지 않고, 구름입자유효반경 변화에 큰 민감도를 가지는 것을 볼 수 있다. 위와 같은 사실을 기반으로 하여 가시채널과 근적외채널, 두 개의 채널을 사용하면 구름광학두께와 구름입자유효반경을 정확하게 산출해낼 수 있다.

Nakajima and King (1990)가 위에서 서술한 가시/근적외채널과 구름광학두께 및 구름입자유효반경 사이의 관계, 그리고 그 복사원리에 대해서 체계적으로 정리하였고 가시/근적외채널을 사용하여 구름광학두께 및 구름입자유효반경을 산출하는 방법(이하 VIS/NIR 방법이라 명명함)을 제시하였다. VIS/NIR 방법은 ABI, MODIS, SEVIRI 등 가시과장대와 근적외과장대 채널을 가진 탑재체의 구름입자유효반경과 구름광학두께 산출 알고리즘의 원형이 되었고, AMI 탑재체의 구름입자유효반경/구름광학두께 산출 알고리즘도 VIS/NIR 방법을 토대로 개발되었다. VIS/NIR 방법을 사용하여 구름입자유효반경과 구름광학두께를 산출하기 위해서는 복사전달모델 (radiative transfer model, RTM)이 필요하다. 또한 VIS/NIR 방법을 사용하기 위해서는 구름의 미세물리적, 광학적 성질 이외에도 흡수기체, 에어로졸, 레일리 산란 등의 대기보정 과정들을 고려해야 한다. 복사전달모델에 대한 설명 및 여러 과정에 대해서 2.5절에서 자세히 설명하였다.

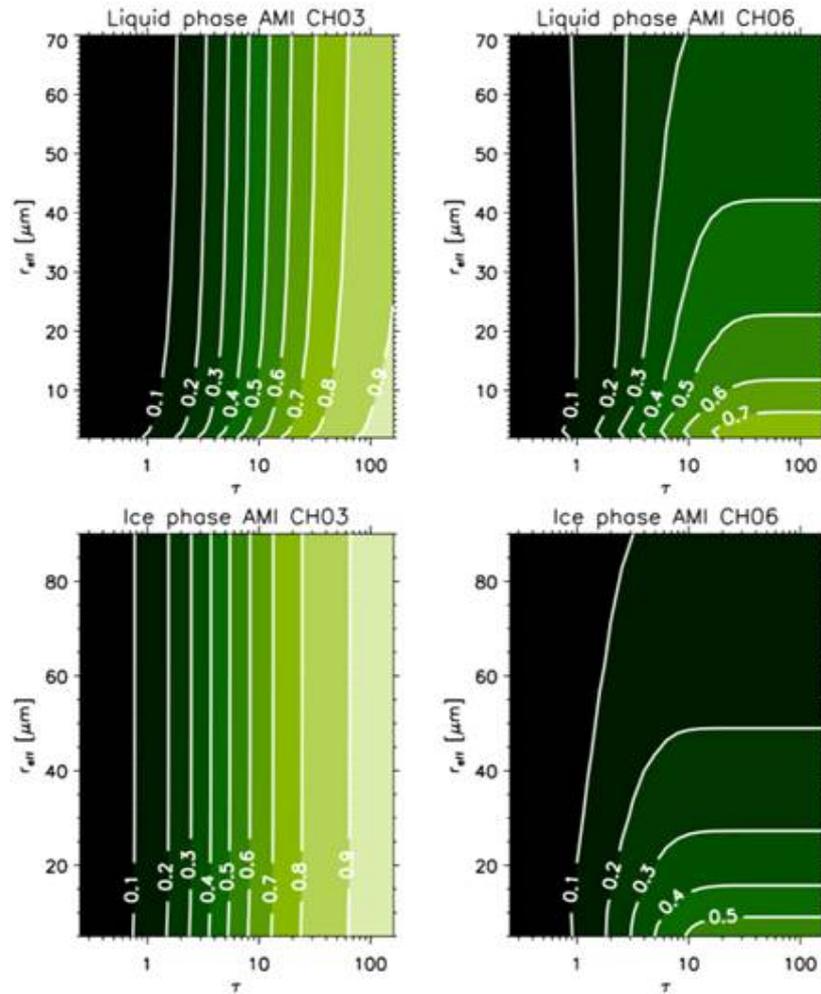


그림 5. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 AMI 채널 3($\lambda=0.64 \mu m$, 왼쪽 행)과 5($\lambda=1.61 \mu m$, 오른쪽 행)의 구름 반사도, 위 열은 액체상 구름, 아래 열은 얼음상 구름.

구름수액경로나 구름빙정경로는 구름 속에 포함된 물이나 얼음의 단위 면적당 무게를 의미하며, 구름광학두께와 구름입자유효반경 사이의 관계식으로 나타낼 수 있다는 것이 알려져 있다. 또한, 선행 연구에서 구름수액경로, 구름빙정경로와 구름광학두께 및 구름입자유효반경 사이의 실험적 관계식(empirical relationship)을 제시했다. 표 6은 현재 VIS/NIR 방법을 이론적 배경으로 삼는 현업 위성에서 사용 중인 구름수액경로, 구름빙정경로와 구름광학두께, 구름입자유효반경 사이의 관계식을 보여준다. 본 알고리즘 개발과정에서 표 6에 나열된 관계식을 사용하여 산출 테스트를 해보았으며, 현재 개발단계에서는 MODIS의 것과 같은 식을 사용하고 있다. 사용자의 의도에 따라 DCOEW의 산출된 구름광학두께 및 구름입자유효반경을 사용하여, 표 6에 표현된 식들은 언제든지 테스트해 볼 수 있다.

표 6. 현업 위성에서 사용 중인 구름광학두께, 구름입자유효반경과 구름 수액경로, 구름빙정경로 사이의 실험적 관계식. ρ_l , ρ_i , Q_e 는 각각 물의 밀도, 얼음의 밀도, 소산계수(extinction coefficient)이다.

탑재체명	구름수액경로	구름빙정경로	채널
SEVIRI	$\frac{2}{3}\rho_l r_e \tau_c$	$\frac{2}{3}\rho_i r_e \tau_c$	0.6 / 1.6 μm
MODIS	$\frac{4}{3Q_e} r_e \tau_c$	$\frac{0.93 \times 4}{3Q_e} r_e \tau_c$	0.65, 0.86, 1.24 / 1.64, 2.13, 3.75 μm
ABI DCOMP	$\frac{5}{9}\rho_l r_e \tau_c$	$\frac{5}{9}\rho_i r_e \tau_c$	0.64 / 2.25 μm

2.5 수학적 설명

DCOEW 알고리즘은 VIS/NIR 방법을 사용하여 구름광학두께와 구름입자유효반경을 계산한 후 운상 구분에 따라 구름수액경로 또는 구름빙정경로를 표 6에 정리된 실험적 관계식을 사용하여 산출한다. VIS/NIR 방법으로 구름광학두께와 구름입자유효반경을 성공적으로 산출하기 위해서는 복사전달모델을 사용하여 구름 조건표와 채널 별 흡수기체 계수 조건표를 계산해야 한다. 구름광학두께와 구름입자유효반경 산출방법으로는 최적추정법(optimal estimation technique)을 사용한다. 다음 절에서 DCOEW 알고리즘의 세부 내용과 수학적 이론을 제시하였다.

2.5.1 조건표(look-up table, LUT)

2.5.1.1 구름 조건표

VIS/NIR 방법을 사용하여 구름광학두께와 구름입자유효반경을 산출하기 위해서는 먼저 복사전달모델을 사용하여 계산한 구름 광학 매개변수(optical parameter)들이 필요하다. DCOEW 알고리즘 개발단계에서 사용된 복사전달 관련 계산에는 DISORT 2.0(discrete ordinate radiative transfer, Buras et al, 2011)모델을 사용했다. 복사전달모델 계산 수행 시, 구름은 단일층(single layer), 균등성(homogeneous), 평행평면(plan-parallel)의 특성을 가진다고 가정하였다. 또한, 계산 시에 대기가 없는 상태에서 지표면의 반사도(surface albedo, A_{sfc})는 0, 미량기체나 에어로졸에 의해 빛의 감쇄가 일어나지 않고 태양 빛이 순수하게 구름에 의해서만 반사되며, 조각구름(partial cloud)은 없는 것으로 가정하였다. 아래 나열된 구름 광학변수들이 복사전달모델을 이용해 계산 결과를 미리 저장해놓아야 하는

것들이며, 이것들은 알고리즘 개발과정 중에 미리 계산하여 저장해야 한다.

- **구름 반사도**, R_c : 구름 반사도는 파장(λ), 구름광학두께, 구름입자유효반경, 태양 천정각(SZA, θ_o), 위성 천정각(VZA, θ), 태양 방위각(ϕ_o)과 위성 방위각(ϕ)의 차이(DAA, $\Delta\phi$)의 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$R_c(\tau_c, r_e, \theta_o, \theta, \Delta\phi, \lambda) = \frac{\pi L^\uparrow(\tau_c, r_e, \theta_o, \theta, \lambda)}{F_o(\lambda) \cos\theta_o} \quad (3)$$

- **구름 투과도**, T_c : 구름 투과도는 파장, 구름광학두께, 구름입자유효반경, 태양 천정각의 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$T_c(\tau_c, r_e, \theta_o, \lambda) = \frac{\pi L^\downarrow(\tau_c, r_e, \theta_o, \lambda)}{F_o(\lambda) \cos\theta_o} \quad (4)$$

- **구름 알베도**, A_c : 구름 알베도는 파장, 구름광학두께, 구름입자유효반경, 태양 천정각의 코사인(μ_o)의 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$A_c(\tau_c, r_e, \mu_o, \lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \int_0^1 R_c(\tau_c, r_e, \theta_o, \theta, \lambda) \mu_o d\mu d\Delta\phi \quad (5)$$

- **구름 구면 알베도**, $R_{c, sph}$: 구름 구면 알베도는 파장, 구름광학두께, 구름입자유효반경의 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$R_{c, sph}(\tau_c, r_e, \lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \int_0^\pi \int_0^1 R_c(\tau_c, r_e, \theta_o, \theta, \lambda) \mu d\mu d\Delta\phi d\mu \quad (6)$$

위에 언급된 네 종류의 구름조건표는 29개의 구름광학두께(최대 약 160), 9개의 구름입자유효반경(액체상: 2~70 μm , 얼음상: 5~90 μm), 45개의 태양 천정각과 위성 천정각(0~88°, 2° 간격), 49개의 태양과 위성의 방위각 차이(0~5°, 170~180°는 1° 간격, 5~170°는 5° 간격)를 조합하여 계산하였다. 액체상 구름에는 미이 모델(Mie theory model)이 사용되었고, 얼음상 구름에는 severely roughened column aggregates 모델이 사용되었다(Yang et al., 2013). MODIS Collection 6에서도 이 모델이 사용되고 있다(Platnick et al., 2014). 구름 조건표의 구름 반사도, 구름 투과도, 구름 알베도, 구름 구면 알베도 예시를 그림 6-7, 8-9, 10-11, 12-13에 각각 나타내었다.

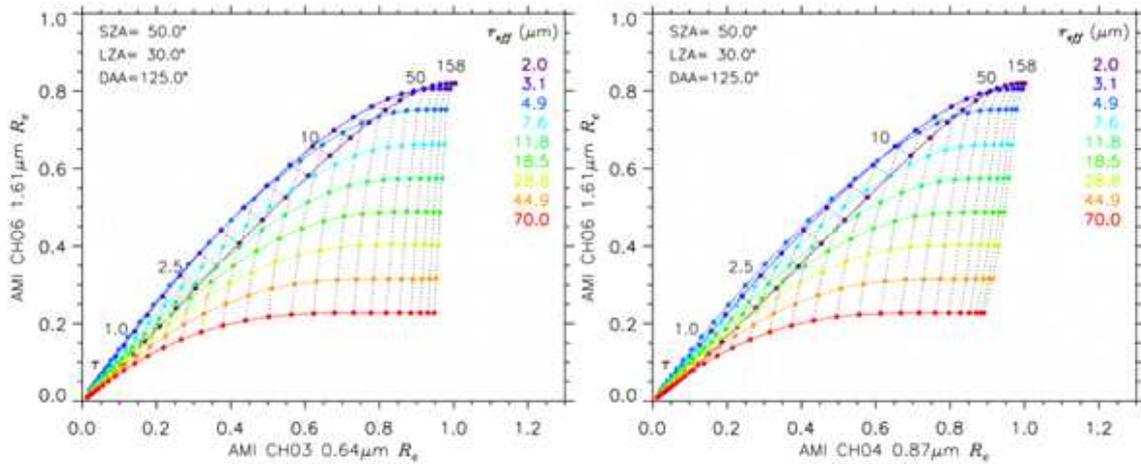


그림 6. AMI 채널 3 과 6(왼쪽), 채널 4와 6(오른쪽)를 사용하여 만든 액체상 구름의 반사도.

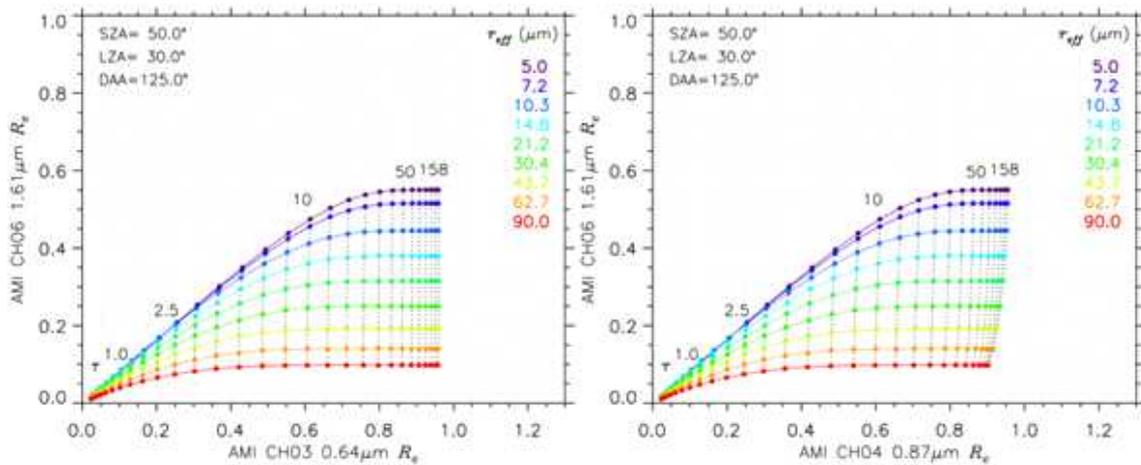


그림 7. AMI 채널 3 과 6(왼쪽), 채널 4와 6(오른쪽)를 사용하여 만든 얼음상 구름의 반사도.

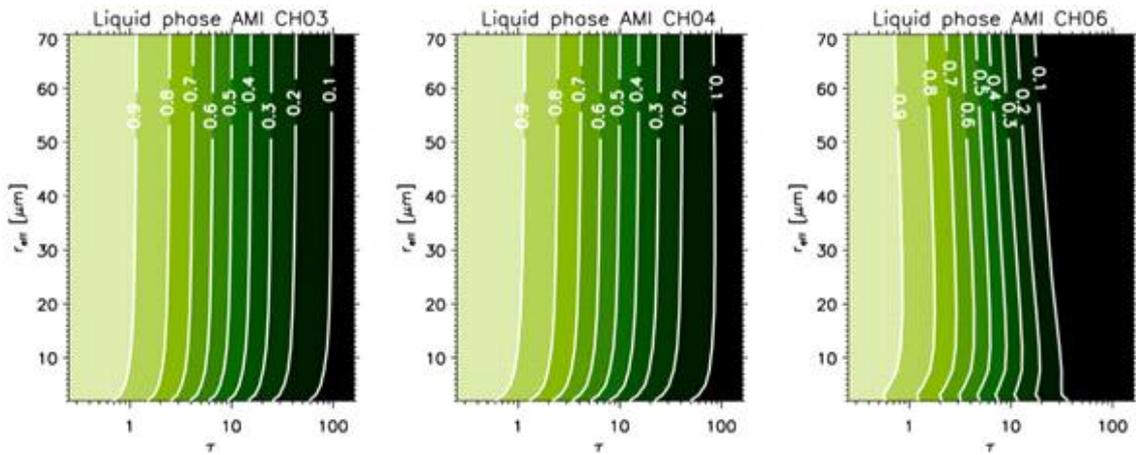


그림 8. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 구름 투과도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).

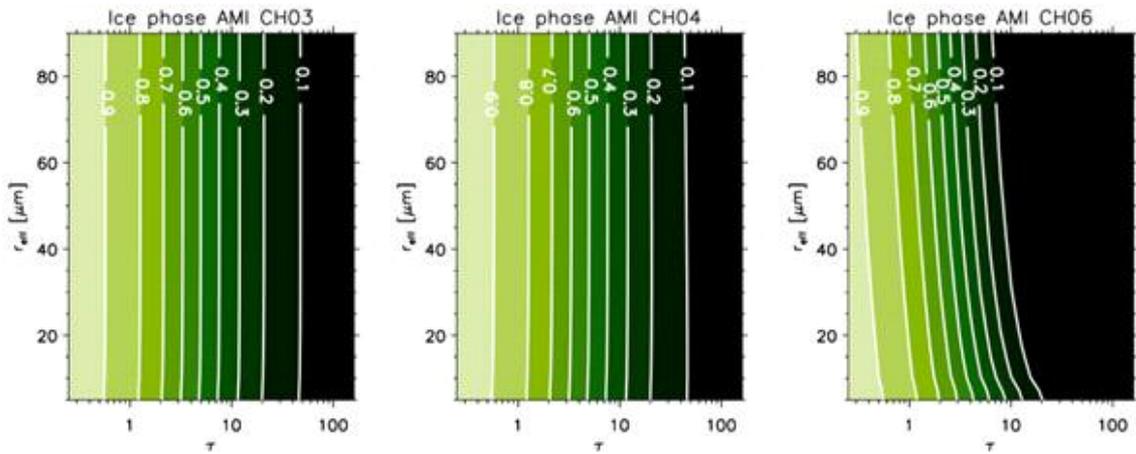


그림 9. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 구름 투과도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).

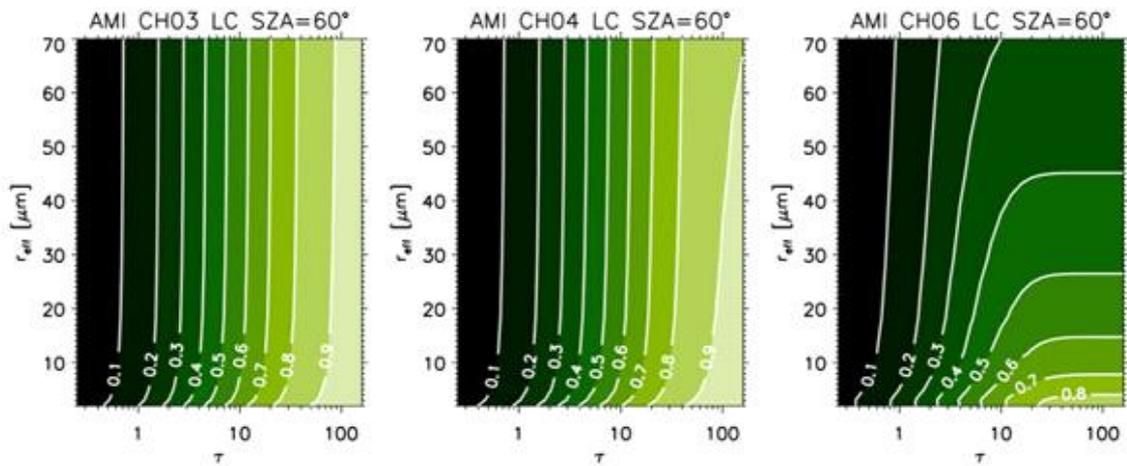


그림 10. 태양천정각 60° 일 때 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 구름 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).

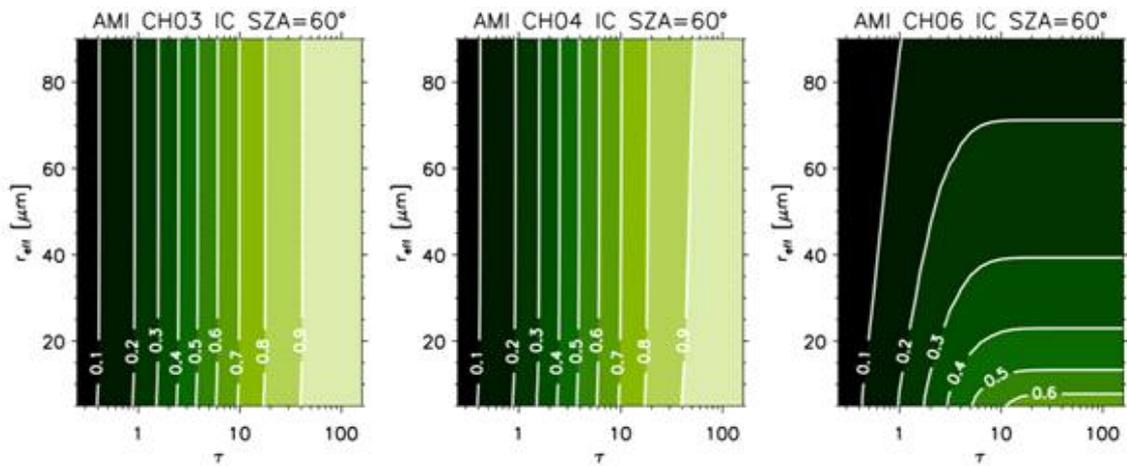


그림 11. 태양천정각 60° 일 때 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).

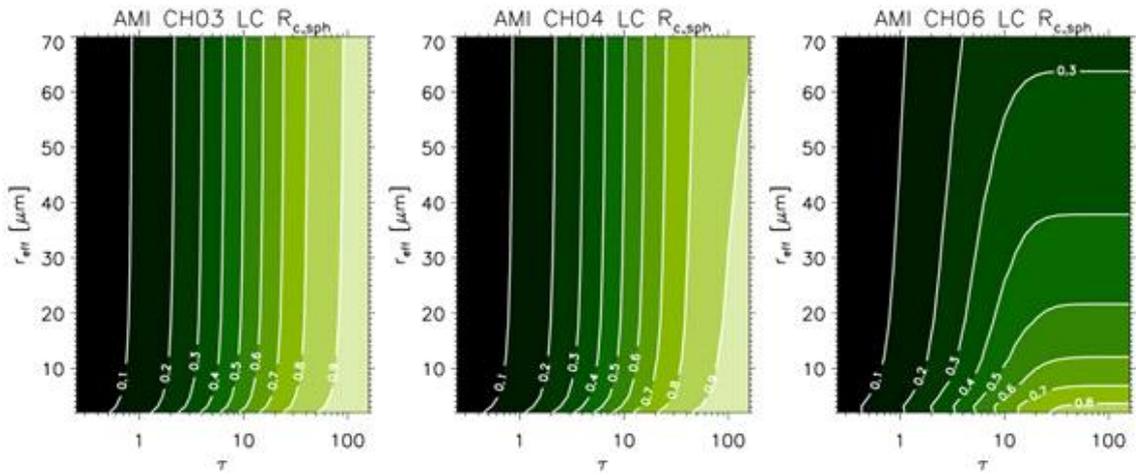


그림 12. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 액체상 구름의 구름 구면 알베도. AMI 채널 3 (왼쪽), 4 (중간), 6 (오른쪽).

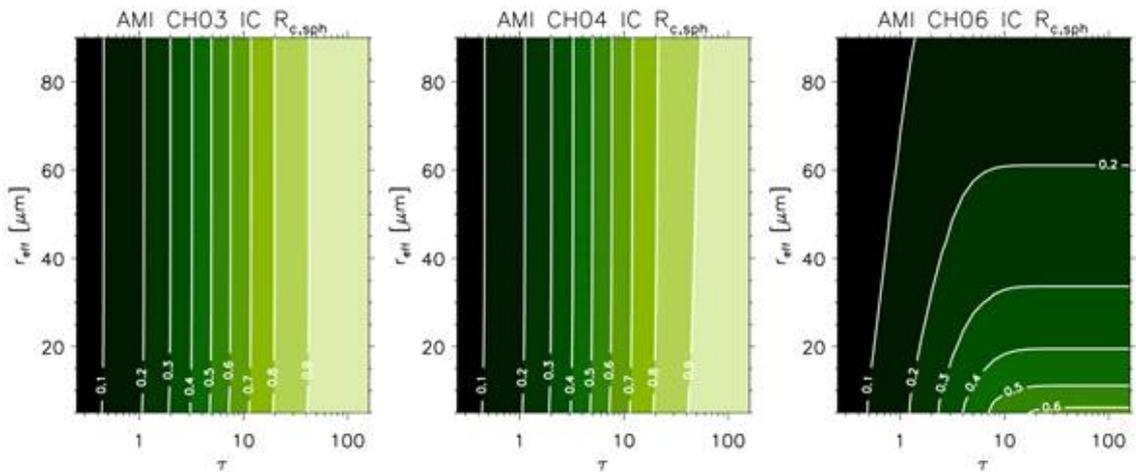


그림 13. 구름광학두께와 구름입자유효반경에 따른 얼음상 구름의 구름 구면 알베도. AMI 채널 3(왼쪽), 4(중간), 6(오른쪽).

2.5.1.2 흡수기체 조건표

구름 상부(top of cloud)에서부터 반사된 태양 빛이 위성까지 도달하는 동안, 대기 중에 존재하는 여러 미량 기체들에 의해 빛의 감쇄가 일어난다. 또한 위성 탑재체의 채널 종류에 따라 빛의 감쇄량은 크게 달라지므로, 미량 기체에 의한 빛의 감쇄량을 계산하기 위해서 미리 위성 탑재체의 채널 각각에 대하여 흡수기체 투과계수를 계산해 놓아야 한다. 표 7에 AMI 채널에 따라 흡수기체로서 고려해야 할 미량 기체 종류를 제시하였다. 흡수 기체 투과계수의 의미와 흡수기체 투과계수 조건표를

구하는 자세한 방법은 2.5.2절에 설명하였다.

표 7. AMI 채널에 따라 고려해야할 흡수기체.

AMI 채널	중심 파장 (μm)	흡수기체
3	0.640	O ₃ , H ₂ O
4	0.856	H ₂ O, O ₂ , CO ₂
6	1.610	H ₂ O, CO ₂ , CH ₄

2.5.2 대기보정 (Atmospheric Correction)

2.5.1.1절에서 복사전달모델을 이용하여 미리 계산하고 저장해놓은 구름의 광학적 특성(R_c , T_c , A_c , $R_{c,sph}$) 조건표를 설명하였다. 이 조건표들을 계산할 때에는 대기가 없는 상태에서 지표면의 반사도(surface albedo, A_{sfc})를 0이라 가정을 했고, 미량기체나 에어로졸에 의해 빛의 감쇄가 일어나지 않고 태양 빛이 순수하게 구름에 의해서만 반사된다고 가정하였다. 하지만 실제로 위성에서 관측된 복사휘도 값은 구름을 투과한 태양 빛이 지면에 반사되어 위성에 도달한 빛과 구름에서 태양 빛이 반사되어 위성까지 도달하는 동안 지구 대기 안에 있는 여러 입자와 상호작용하면서 빛의 투과, 산란, 흡수가 일어나 감쇄된 양이 합쳐진 값이다. 따라서 구름광학두께와 구름입자자유효반경을 산출하기 위해서는 대기상부(top of atmosphere, TOA)에서 위성에서 관측된 반사도(R_{TOA}) 값으로부터 순수한 구름에 의한 반사도(R_c) 값을 찾아내고, 이 값을 조건표를 이용한 계산 값과 비교해야 한다. 이를 위해서 대기보정(atmospheric correction)과정이 필요하다.

대기보정 과정은 구름을 기준으로 구름 아래(below cloud)에서의 지면 반사도 효과를 고려하는 것과 구름 위(above cloud)에서의 미량 기체에 의한 감쇄 효과를 고려하는 것 두 가지로 구분할 수 있다. 구름 아랫부분의 효과는 최종적으로 2.5.3절에서 설명할 전방모형(forward model)를 통해 고려하고, 구름 윗부분의 효과는 그림 3에서 나타난 것처럼, ‘대기보정처리’ 모듈에서 고려한다.

구름 위(above cloud)의 대기보정에서 구름 반사도는 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$R_{TOC} = \frac{R_{TOA} - R_{sca}}{T_{ac}}, \quad (7)$$

여기서 R_{TOA} 와 R_{sca} 는 각각 대기 상부에서 관측된 반사도와 후방산란(backscattering)에 의한 반사도이다. T_{ac} 는 구름 위(top of cloud)부터 대기 상한(top of atmosphere)까지의 투과도로서, 기본적으로 레일리 산란에 대한 투과도(T_{ray}), 에어로졸 산란에 대한 투과도(T_{aer}), 미량기체 흡수에 대한 투과도(T_{gas})의 곱으로 표현된다. 그러나 근적외채널에서는 에어로졸과 미량기체 흡수의 영향이 거의 없기 때문에 가시채널($T_{ac,VIS}$)과 근적외채널($T_{ac,NIR}$)의 구름 위 투과도는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{ac,VIS} = T_{ray} T_{aer} T_{gas}, \text{ and} \quad (8)$$

$$T_{ac,NIR} = T_{gas}. \quad (9)$$

DCOEW 알고리즘에서는 T_{ray} 와 T_{aer} 는 상수로 취급하고, T_{gas} 를 고려한다. T_{gas} 는 식 10으로 나타낼 수 있다.

$$T_{gas} = \text{EXP}\left(-\frac{1}{\cos\theta} \times \tau_{gas}\right). \quad (10)$$

여기에서 τ_{gas} 는 구름 위부터 대기 상한까지의 광학두께, θ 는 위성의 천정각을 의미한다. DCOEW에서는 식 10에 있는 τ_{gas} 를 흡수기체의 양 (U)과 기체 투과계수 사이의 함수로 모수화하여 식 11로 표현한다.

$$\tau_{gas} = C_0 + C_1 \times U + C_2 \times U^2. \quad (11)$$

DCOEW 알고리즘에서는 가시채널, 근적외채널 각각의 특성에 맞게 투과도를 계산하고 식 11의 계수들(C_0 , C_1 , C_2)을 흡수기체 조건표로 저장한다. AMI 채널에 따른 해당 흡수기체를 표 7에 정리하였고, 표 8에 모수화에 사용된 흡수기체의 양 (U)의 단위를 나타냈다. 모든 계산은 DISORT 복사전달모델과 HITRAN (high resolution transmission) 2004 데이터베이스 (Rothman et al., 2004)를 사용하여 수행되었다. 그림 14에 AMI 채널에 따른 흡수기체와 흡수기체 투과율의 전체적인 특징을 나타냈다.

표 8. 식 8에서 사용된 흡수기체 양의 단위.

흡수기체	단위
H ₂ O	mm
O ₃	Dobson Unit
CH ₄	$10^{19} \text{ molecules cm}^{-2}$
CO ₂	$10^{21} \text{ molecules cm}^{-2}$
O ₂	$10^{24} \text{ molecules cm}^{-2}$

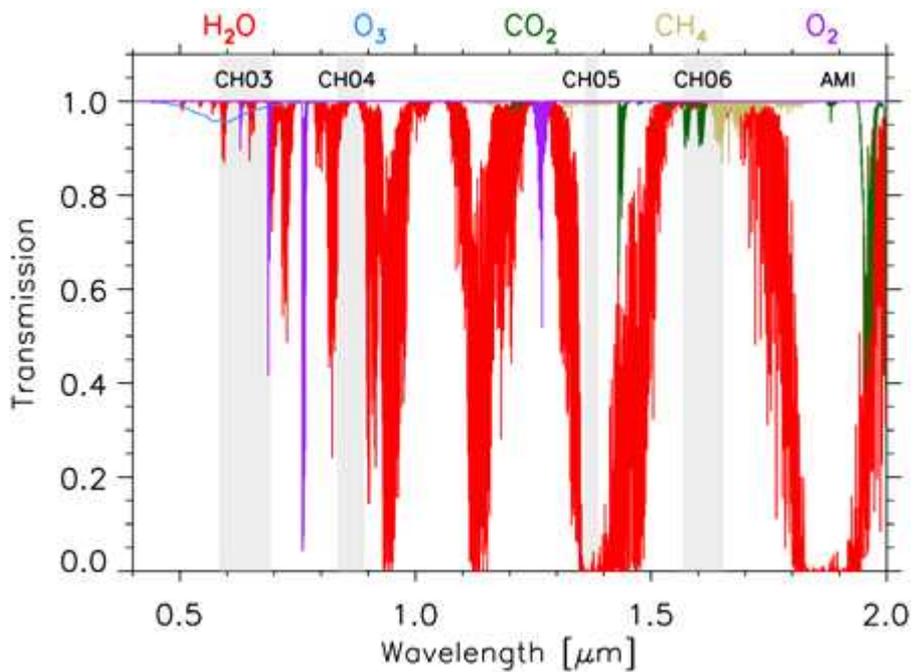


그림 14. AMI 채널과 흡수기체에 따른 흡수기체 투과도. 회색으로 색칠한 부분은 DCOEW 알고리즘에 사용되는 AMI 채널의 범위를 표시함.

그림 15-18은 RTM을 사용하여 직접 계산한 흡수기체 투과계수(실선)와 이를 식 8-9를 사용하여 모수화한 값 (점선)을 비교하고 있다. 최종적으로 계산된 AMI 채널별 흡수기체의 투과계수가 표 6에 정리되어 있다.

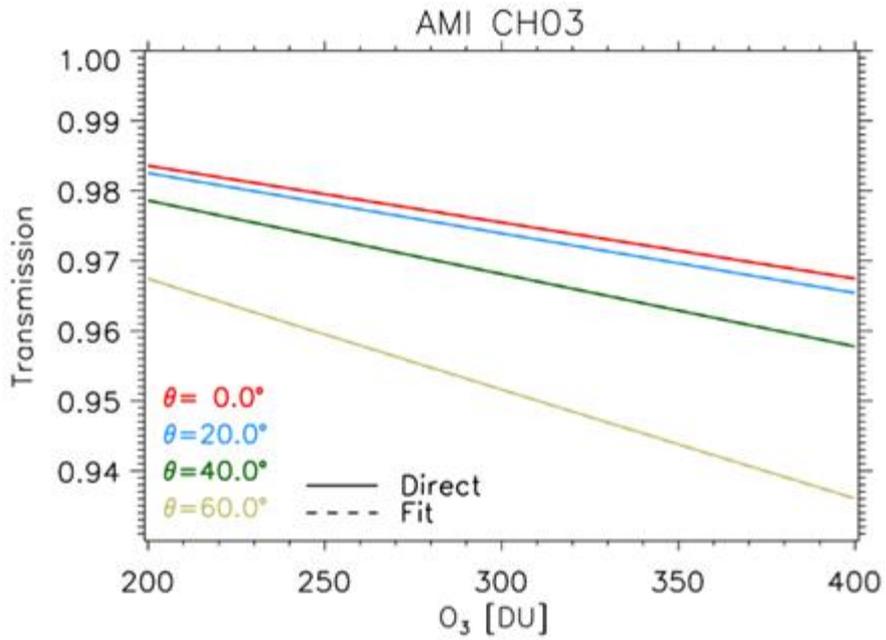


그림 15. AMI 채널 3에서 직접 계산된 오존(O_3)의 투과도(실선)와 식 10-11을 사용하여 모수화한 값(점선).

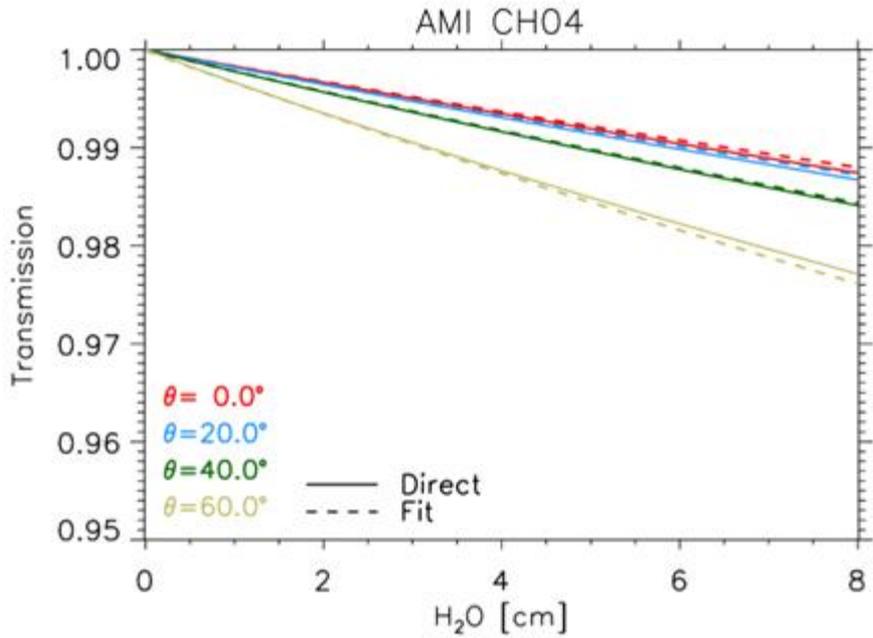


그림 16. AMI 채널 4에서 직접 계산된 수증기(H_2O)의 투과도(실선)와 식 10-11를 사용하여 모수화한 값(점선).

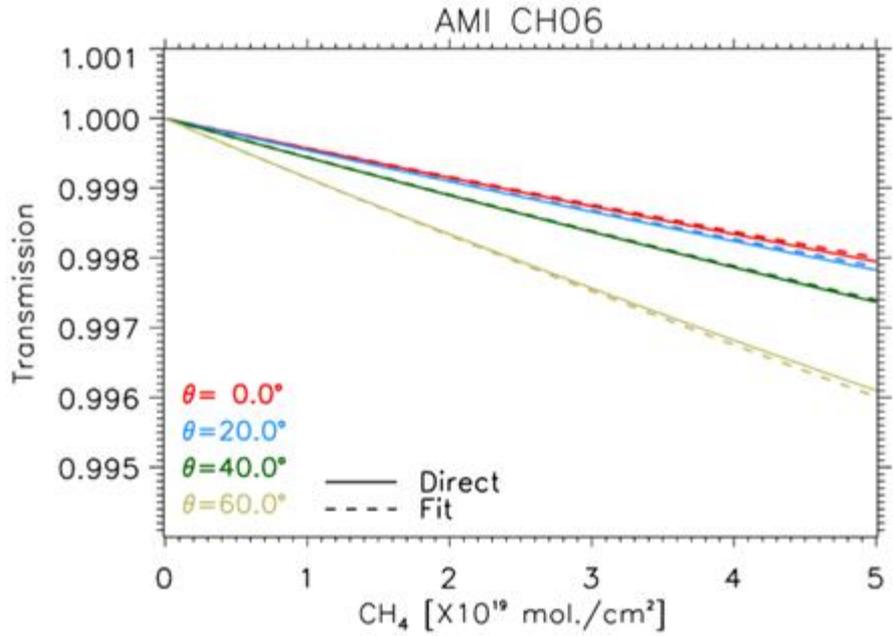


그림 17. AMI 채널 6에서 직접 계산된 메탄 (CH₄)의 투과도(실선)와 식 10-11를 사용하여 모수화한 값(점선).

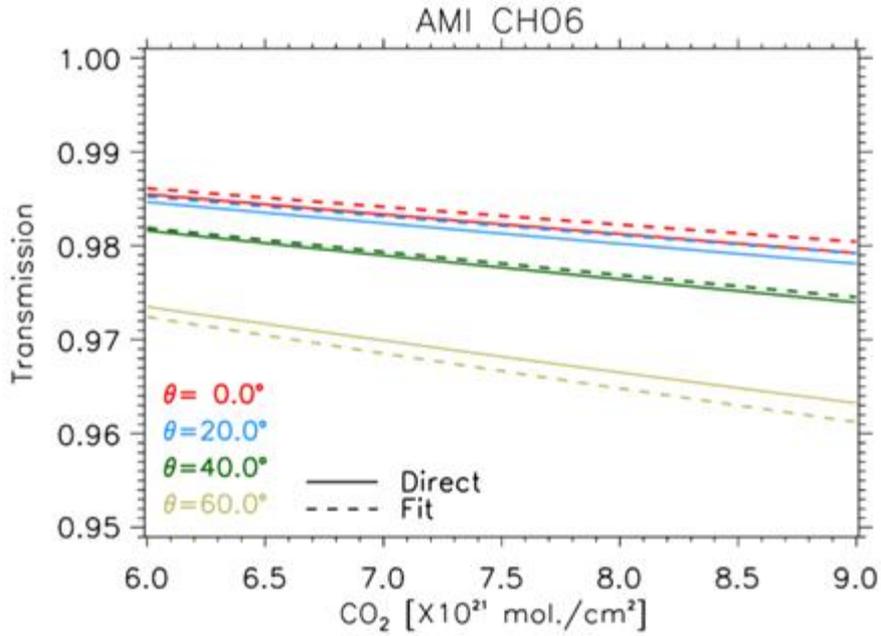


그림 18. AMI 채널 6에서 직접 계산된 이산화탄소(CO₂)의 투과도(실선)와 식 10-11를 사용하여 모수화한 값(점선).

표 9. 계산된 AMI 채널별 흡수기체 투과계수.

AMI 채널	파장 (μm)	계수	O ₃	H ₂ O	O ₂	CO ₂	CH ₄
3	0.65	C_0	4.38353×10^{-7}	1.18984×10^{-4}	1.63363×10^{-4}	N/A	N/A
		C_1	8.29381×10^{-5}	2.22236×10^{-4}	2.61915×10^{-4}		
		C_2	-6.66712×10^{-10}	-3.11890×10^{-7}	-8.60060×10^{-6}		
4	0.87	C_0	N/A	5.67212×10^{-4}	N/A	N/A	N/A
		C_1		1.64750×10^{-4}			
		C_2		-1.80368×10^{-7}			
6	1.61	C_0	N/A	5.54739×10^{-6}	N/A	5.47270×10^{-4}	1.92556×10^{-6}
		C_1		1.36368×10^{-4}		2.44600×10^{-3}	4.31873×10^{-4}
		C_2		1.79377×10^{-7}		-3.44766×10^{-5}	-6.52447×10^{-6}

식 7에 있는 R_{sca} , 즉 레일리 산란에 대한 보정은 Wang and King (1997) 방법을 사용하며, 이를 위해서는 지표기압, 운정기압, 연직 기압분포 정보가 필요하다.

위에서 설명한 구름 위(above cloud)의 대기보정과 식 7-11을 통해 R_{TOC} 를 구할 수 있다. R_{TOC} 는 구름으로부터 직접 반사된 빛뿐만 아니라, 지면에서 반사된 후 구름을 투과한 빛도 포함하고 있다. 이를 수식으로 나타내면 식 12와 같다.

$$R_{TOC} = R_c + \frac{A_{sfc}}{1 - A_{sfc}R_{c,sph}} T_c T_c^* \quad (12)$$

여기서 T_c 와 T_c^* 는 각각 구름을 통과할 때의 빛의 하향 투과도, 상향 투과도를 의미하며, 복사전달 모델을 통해 미리 계산되어 조건표에 저장된 값이다. A_{sfc} 는 지표

알베도를 나타낸다. 대기보정을 통해 구한 식 7의 R_{TOC} 는 다음 단계인 산출 알고리즘의 입력 자료로 사용된다.

2.5.3 최적추정방법 (optimal estimation technique)

위성의 가시채널과 근적외채널의 관측값을 이용하여 구름광학두께와 구름입자유효반경을 산출하기 위해서 여러 가지 방법들이 개발되었다. 현업 위성에서 사용하고 있는 대표적인 방법으로 최소자승법 (least square method)과 최적추정법 (Rodgers, 2000)이 있다. 이 방법 중에서 최근에는 최적추정법이 많이 사용되고 있고, 현재 ABI, MTG 탑재체의 구름특성 산출 알고리즘 등에 사용되고 있다. DCOEW 알고리즘의 산출모듈 또한 최적추정법을 기반으로 개발했다.

최적추정법은 관측값뿐만 아니라, 구하고자 하는 변수의 선형 정보(a priori information)를 추가로 고려하여 관측 자료 및 사전정보로부터 변수의 최적 값을 찾아내는 역산방법이다. 본 알고리즘의 경우 관측 자료는 R_{TOA} 로부터 대기보정 과정을 거친 후 얻어진 R_{TOC} 이며 구하고자 하는 변수는 구름광학두께와 구름입자유효반경이다. 관측자료는 관측벡터 (observation vector) \mathbf{y} 로 표현되며 구하고자 하는 변수는 상태벡터 (state vector) \mathbf{x} 로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \tau_c \\ r_e \end{pmatrix}, \text{ and} \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} R_{VIS} \\ R_{IR} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

최적추정법의 최종 목적은 사전정보와 관측값을 포함하고 있는 비용함수 (cost function) J 와 관측오차를 최소화 하는 것이다. 이때 비용함수는 다음과 같다.

$$J = \mathbf{S}_x (\mathbf{K}^T (\mathbf{S}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}))) + \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x})), \quad (15)$$

여기서 \mathbf{x}_a , \mathbf{F} , \mathbf{K} 는 각각 선형상태벡터, 전방모델, 커널행렬 (kernel matrix)이다. \mathbf{S}_y 는 관측과 전방모델에서 발생하는 오차 (error)의 공분산 행렬 (covariance matrix), \mathbf{S}_a 는 선형상태벡터 \mathbf{x}_a 에서 발생하는 오차의 공분산 행렬이다. 상태벡터 \mathbf{x} 의 오차 공분산 행렬 \mathbf{S}_x 은 다음과 같이 계산한다.

$$\mathbf{S}_x = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K})^{-1}. \quad (16)$$

DCOEW 알고리즘에서는 식 12가 전방모델의 식이며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = R_c(\mathbf{x}, \theta, \theta_0, \Delta\phi) + \frac{A_{sfc}}{1 - A_{sfc} R_{c, sph}(\mathbf{x})} T(\mathbf{x}, \theta) T(\mathbf{x}, \theta_0). \quad (17)$$

전방모델 \mathbf{F} 의 각 채널별 요소들은 다음과 같다.

$$R^{VIS} = R_c^{VIS}(\mathbf{x}, \theta, \theta_0, \Delta\phi) + \frac{A_{sfc}^{VIS}}{1 - A_{sfc}^{VIS} R_{c, sph}^{VIS}(\mathbf{x})} T^{VIS}(\mathbf{x}, \theta) T^{VIS}(\mathbf{x}, \theta_0), \quad (18)$$

$$R^{NIR} = R_c^{NIR}(\mathbf{x}, \theta, \theta_0, \Delta\phi) + \frac{A_{sfc}^{NIR}}{1 - A_{sfc}^{NIR} R_{c, sph}^{NIR}(\mathbf{x})} T^{NIR}(\mathbf{x}, \theta) T^{NIR}(\mathbf{x}, \theta_0). \quad (19)$$

커널행렬 \mathbf{K} 는 전방모델 \mathbf{F} 의 요소를 편미분하여 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \frac{\partial R^{VIS}}{\partial \tau} & \frac{\partial R^{VIS}}{\partial r_e} \\ \frac{\partial R^{NIR}}{\partial \tau} & \frac{\partial R^{NIR}}{\partial r_e} \end{pmatrix} \quad (20)$$

각 채널별 \mathbf{K} 의 요소들은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial R^k}{\partial \tau} = \frac{\partial R_c^k}{\partial \tau} + D_{sfc}^k T^k(\mathbf{x}, \theta) \frac{\partial T^k(\mathbf{x}, \theta_0)}{\partial \tau} + D_{sfc}^k \frac{\partial T^k(\mathbf{x}, \theta)}{\partial \tau} T^k(\mathbf{x}, \theta_0) + \frac{\partial D_{sfc}^k}{\partial \tau} T^k(\mathbf{x}, \theta) T^k(\mathbf{x}, \theta_0), \quad (21)$$

$$\frac{\partial D_{sfc}^k}{\partial \tau} = \frac{A_{sfc}^k A_{sfc}^k \frac{\partial R_{c, sph}^k}{\partial \tau}}{(1 - A_{sfc}^k R_{c, sph}^k)^2}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial R^k}{\partial r_e} = \frac{\partial R_c^k}{\partial r_e} + D_{sfc}^k T^k(\mathbf{x}, \theta) \frac{\partial T^k(\mathbf{x}, \theta_0)}{\partial r_e} + D_{sfc}^k \frac{\partial T^k(\mathbf{x}, \theta)}{\partial r_e} T^k(\mathbf{x}, \theta_0) + \frac{\partial D_{sfc}^k}{\partial r_e} T^k(\mathbf{x}, \theta) T^k(\mathbf{x}, \theta_0), \quad (23)$$

$$\frac{\partial D_{sfc}^k}{\partial r_e} = \frac{A_{sfc}^k A_{sfc}^k \frac{\partial R_{c, sph}^k}{\partial r_e}}{(1 - A_{sfc}^k R_{c, sph}^k)^2}. \quad (24)$$

DCOEW 알고리즘에서 커널행렬 \mathbf{K} 는 미리 계산된 조건표를 이용해 계산되기 때문에 다른 방법에 비해 산출 시간을 절약할 수 있다.

위에 제시된 식들을 이용하여 비용함수 J 를 최소화하게 되는데, 다음과 같은 기준치를 만족할 때까지 계산을 반복한다.

$$\| \sum \delta \mathbf{x} \mathbf{S}_x^{-1} \delta \mathbf{x} \| \leq \frac{p}{2}, \quad (25)$$

여기서 p 는 상태벡터 \mathbf{x} 의 원소의 개수이며, DCOEW 알고리즘의 경우 $p=2$ 이다. 이 기준치를 만족하지 않을 경우 상태벡터 x_i 에 $\delta \mathbf{x}$ (식 27)를 더하여 x_{i+1} 를 만들어 비용함수 J 를 다시 계산한다.

$$\delta \mathbf{x} = \mathbf{S}_x (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_i)) + \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x}_a - \mathbf{x})), \quad (26)$$

위의 식 27에서 사용되는 관측 오차 \mathbf{S}_y 는 여러 종류의 불확실성을 고려하여 결정된다. 예상되는 불확실성으로는 AMI 탑재체의 보정 오차, 전방모델의 오차, 복사전달모델 가정 오차 등이 있다. 이러한 오차를 고려하여 \mathbf{S}_y 를 정한다.

위의 과정을 정리를 하면, 본 알고리즘은 식 7에서 대기보정을 통해 구한 R_{TOC} (위성에 의해 관측된 값)와 전방모델(식 12)과 조건표를 사용하여 계산한 R_{TOC} (전방모델을 통해 계산된 값)의 값을 비교하는 과정이다. 비용함수에서 위성 관측값은 \mathbf{y} 가 되고, 전방모델 계산 값은 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 이다. 반복계산을 통해 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 와 \mathbf{x} , \mathbf{K} , \mathbf{S}_x 의 값을 바꿔가며 비용함수 J 를 최소값을 가지게 하는 구름광학두께와 구름입자유효반경을 찾아내게 된다. DCOEW 알고리즘에서 사용되는 최적추정방법의 흐름도를 그림 4에 제시했다.

2.6 산출물

AMI DCOEW 알고리즘은 낮시간 구름광학두께, 구름입자유효반경, 그리고 운상에 따라 구름수액경로 또는 구름빙정경로를 산출한다(표 10).

표 10. DCOEW 알고리즘 산출물 목록.

산출물명	차원	단위
구름광학두께 (COT)	2 차원 (x, y)	무차원
구름유효입자반경 (CER)	2 차원 (x, y)	μm
구름수액경로 (LWP)	2 차원 (x, y)	$g m^{-2}$
구름빙정경로 (IWP)	2 차원 (x, y)	$g m^{-2}$

2.6.1 품질플래그(quality flag)

AMI DCOEW 알고리즘의 품질플래그를 표 11에 나타내었다. DCOEW 알고리즘의 구동이 정상적으로 되었을 경우 품질플래그는 0이며, 그 외 DCOEW 알고리즘에서 산출된 산출물에 특이사항이 있거나 이상이 있는 경우에는 품질플래그는 1이상의 정숫값을 나타낸다. 표 11에 해당 내용을 정리했다.

표 11. DCOEW 알고리즘의 품질플래그 목록.

Flag 종류	요약
0	알고리즘 정상 구동, 유효한 산출 값
1	유효함 하지만 황혼기(SZA가 66° ~ 80°)로 인한 저품질 산출물
2	유효하지 않은 산출 값, SZA나 VZA가 80° 이상
3	유효하지 않은 산출 값, 관측 값이 조건표 범위를 벗어남
4	청천화소, 유효하지 않은 값
5	운상이 불확실한 경우, 유효하지 않은 값
6	유효함, 하지만 sunglint 현상이 일어난 구역
7	입력자료가 없는 경우, 유효하지 않은 값
8	DCOEW 알고리즘 구동 실패, 유효하지 않은 값

3. 시험자료 및 출력물

3.1 모의 입력자료

DCOEW 알고리즘을 개발, 검증하는 데 있어 주된 모의 입력 자료는 MODIS와 AHI의 복사휘도 자료이다. DCOEW 알고리즘에서 사용되는 AMI 채널 3, 4, 6에 해당하는 MODIS 채널 1, 2, 6과 AHI 채널 3, 4, 5 복사휘도 자료를 주로 한반도와 서태평양 자료를 중심으로 다양한 관측 기간을 모의 입력 자료로 선택하였다. 또한 한반도에 영향을 미치는 여러 기상현상(예, 태풍, 황사, 폭설)을 반영할 수 있는 자료를 수집하였다. 또한, 전구규모 산출을 위해 AHI 복사휘도 자료도 사용되었다. 모의 입력 자료의 예시로서 그림 19는 서태평양 상공에 자리 잡은 2015년 태풍 앓사니(atsani)의 MODIS 관측 자료, 그림 20은 인도차이나반도의 MODIS 관측 자료를 보여 준다. 또한, 그림 21에는 전구 규모의 AHI 자료를 나타냈다.

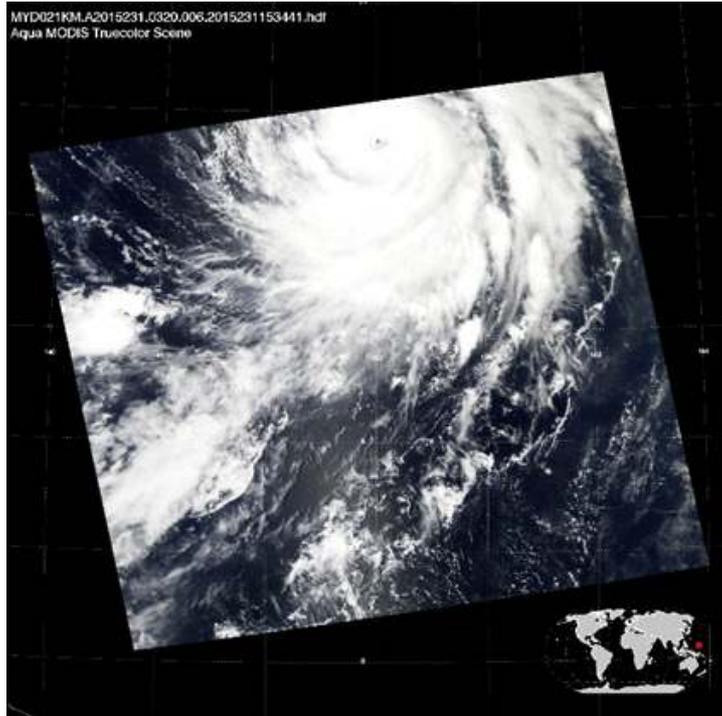


그림 19. 모의자료로 사용된 서태평양 상에서 MODIS가 관측한 2015년 태풍 앳사니(atsani).



그림 20. 모의자료로 사용된 서태평양 상에서 MODIS가 관측한 인도차이나 반도.

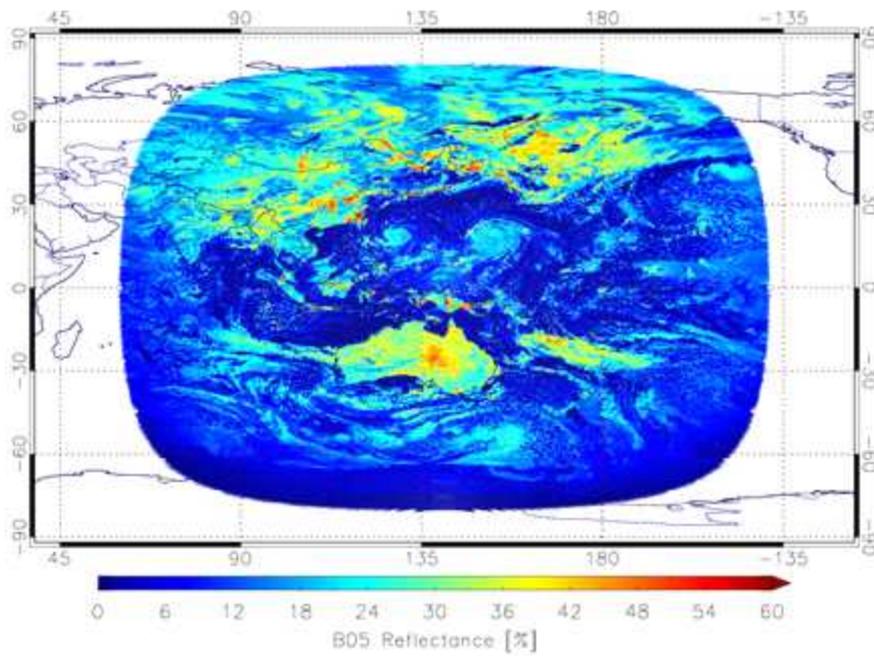
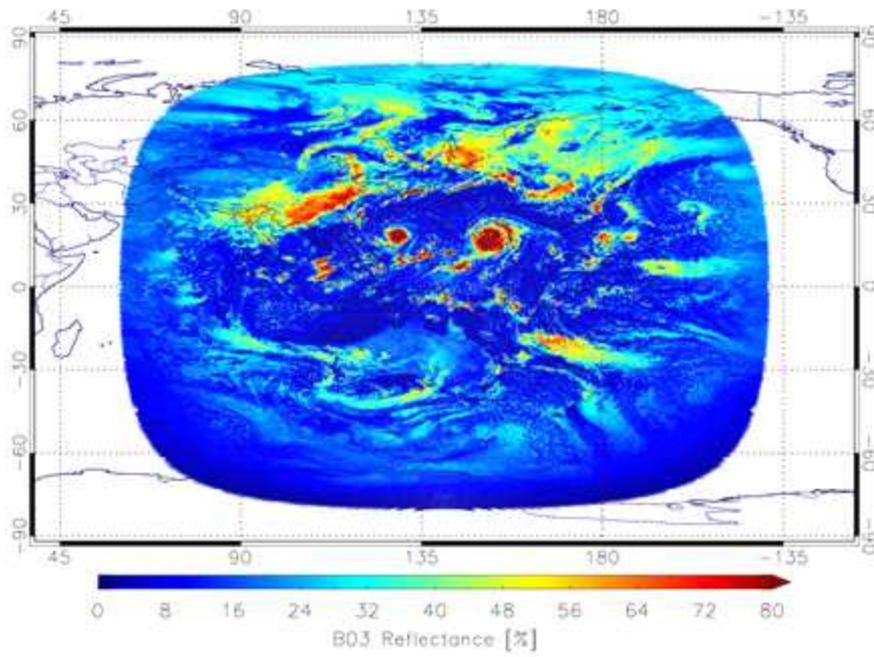


그림 21. 모의자료로 사용된 2015년 8월 19일(0230 UTC) Himawari AHI 채널 4(상단) and 5(하단) 반사도.

3.2 산출결과

그림 22에 모의 입력자료로써 MODIS 자료(그림 19)를 사용하여 DCOEW 알고리즘이 산출해낸 구름광학두께와 구름입자유효반경을 나타냈다. 이 결과를 검증하기 위해 MODIS 알고리즘에서 산출된 구름광학두께와 구름입자유효반경 자료와 비교하는 작업도 수행하였다. 전구 규모의 산출을 위해 그림 21에 나타낸 AHI 관측 자료를 모의 입력자료로 사용하여 DCOEW 알고리즘이 산출한 구름광학두께와 구름입자유효반경을 그림 23에 나타냈다. 이 결과는 DCOEW 알고리즘 정확도 검증을 위해 다른 위성 산출물과 비교 검증하는 데 사용되었다(3.2.1.1절).

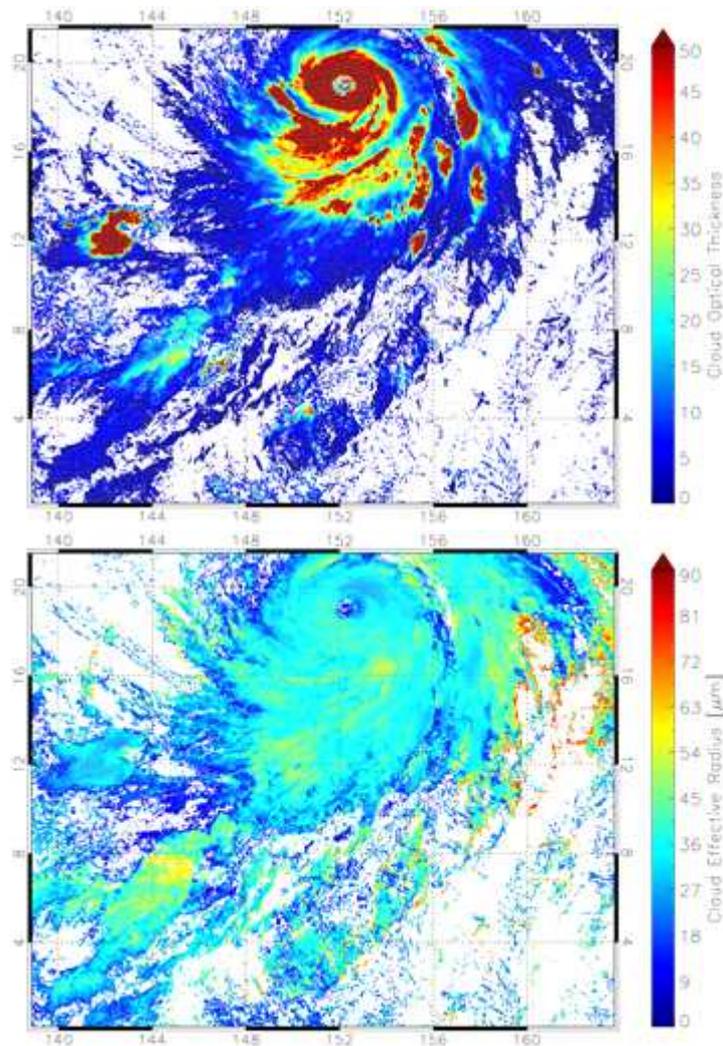


그림 22. 산출된 DCOEW 구름광학두께(오른쪽)와 구름입자유효반경(왼쪽, μm). 2015년 08월 19일 태풍 앓사니(atsani)의 MODIS 관측자료가 사용되었다(그림 19).

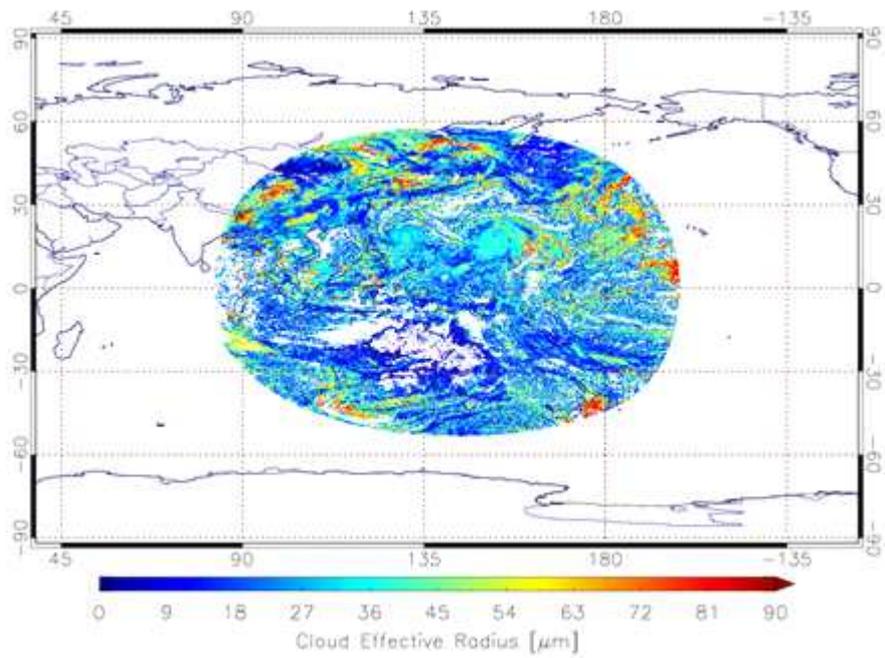
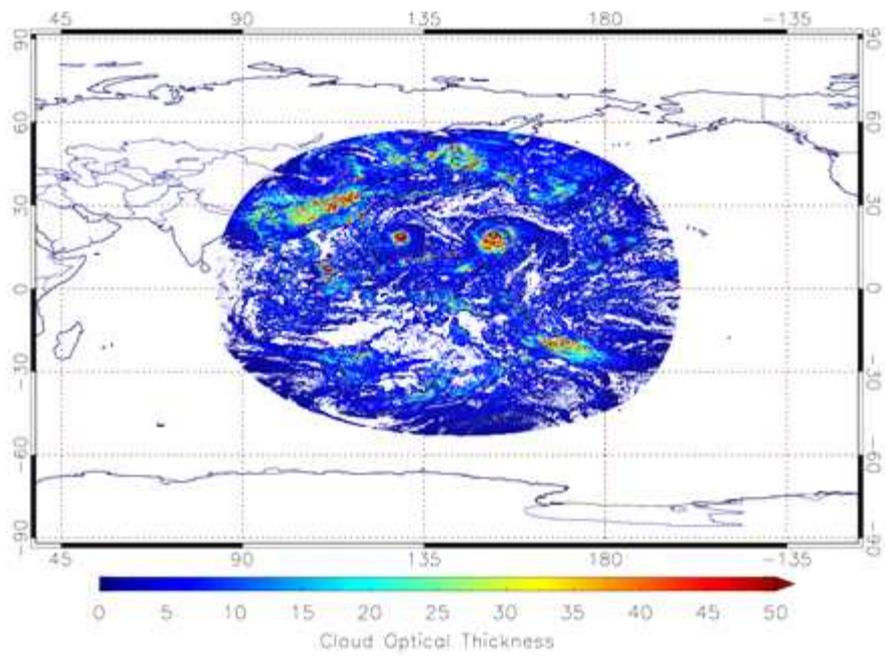


그림 23. AHI 관측자료(예, 그림 21)를 모의 자료로 사용한 DCOEW 구름광학두께(상단)와 구입자유효반경(하단) 산출물.

3.2.1 검증

3.2.1.1 해외 타 기관 산출물과의 비교

2016년 5월에 열린 International Cloud Working Group (ICWG) 세계 각국에서 모인 일곱개의 연구기관(China Meteorological Administration, European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites, Japan Meteorological Agency, Korea Meteorological Administration (KMA), National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center (NASA-GSFC), NASA Langley Research Center (NASA-LaRC), and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA))의 구름 산출물 (구름탐지, 온도, 구름 방출률, 운상, 온도기압, 구름광학두께, 구름입자유효반경)을 비교하는 연구를 진행하였다(Wu et al., 2017). 서로 다른 알고리즘으로 산출한 구름 산출물 간의 공정한 비교를 위해서 Himawari-8에 탑재된 AHI의 2015년 8월 19일 자료가 사용되었다.

구름광학두께와 구름입자유효반경 비교에는 세 그룹 (NASA-GSFC, NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA-NESDIS), Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS))이 참여하였다. 이후 위의 비교에 사용된 2015년 8월 19일 AHI 관측자료를 입력자료로 받아 DCOEW 알고리즘에서 산출한 구름 산출물과 비교할 수 있었다. DCOEW 알고리즘의 구름입자유효반경과 다른 알고리즘의 산출물 간의 비교 예시를 그림 25에 나타냈다. 그림 26-29에서는 다른 그룹의 산출물 간의 1:1 비교 결과를 제시하였다. 거의 모든 그룹 간에 비교에서 구름광학두께는 운상과 관계없이 높은 상관관계를 나타냈지만(그림 26-27), 구름입자유효반경은 낮은 상관관계를 보였다(그림 28-29). 서로 다른 그룹 산출물 간의 차이는 특히 얼음상 구름에서 더 컸으며, 이는 액체상 구름과는 달리 얼음상 구름의 조건표를 만드는데 사용된 얼음결정 모델이 그룹별로 다르기 때문으로 추정된다.

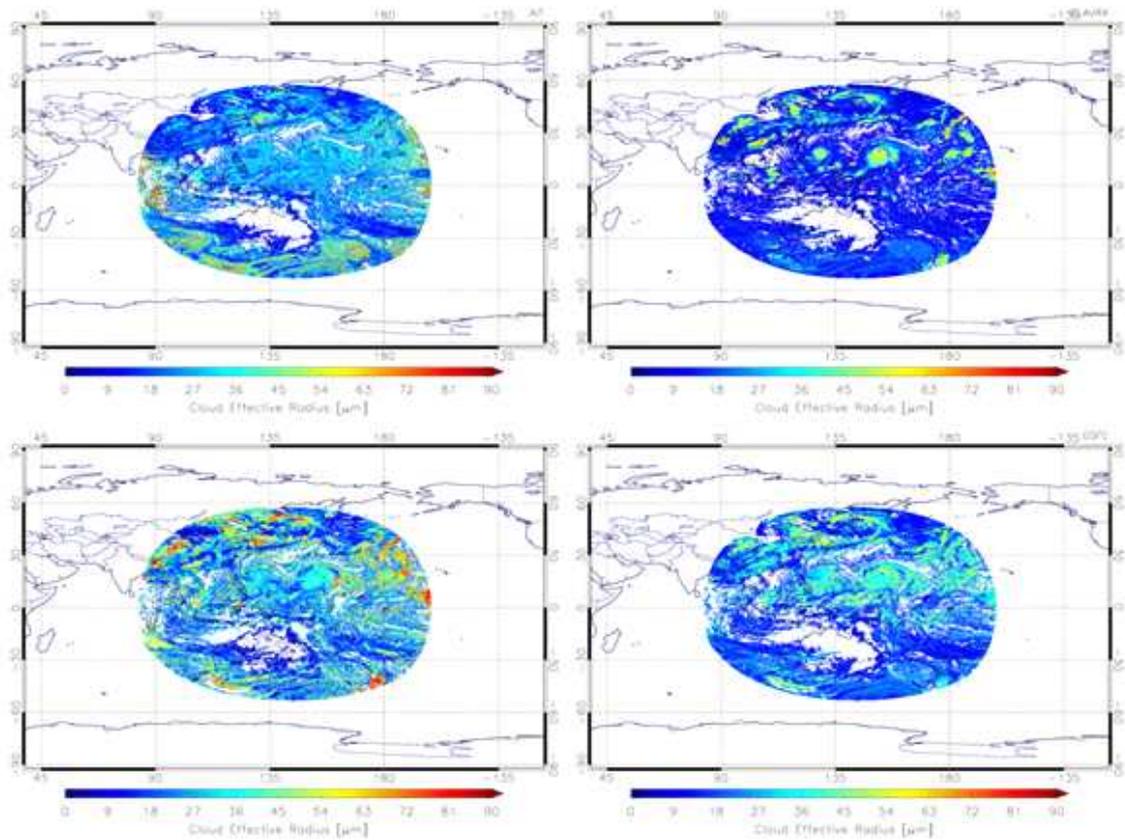


그림 24. AHI 관측자료(2015년 8월 19일 0230 UTC)를 사용하여 산출된 구름 유효입자반경. 각기 다른 연구기관의 산출 알고리즘이 사용되었다. NOAA/NESDIS (좌상단), CIMSS (우상단), KMA DCOEW (좌하단), 및 NASA/GSFC (우하단).

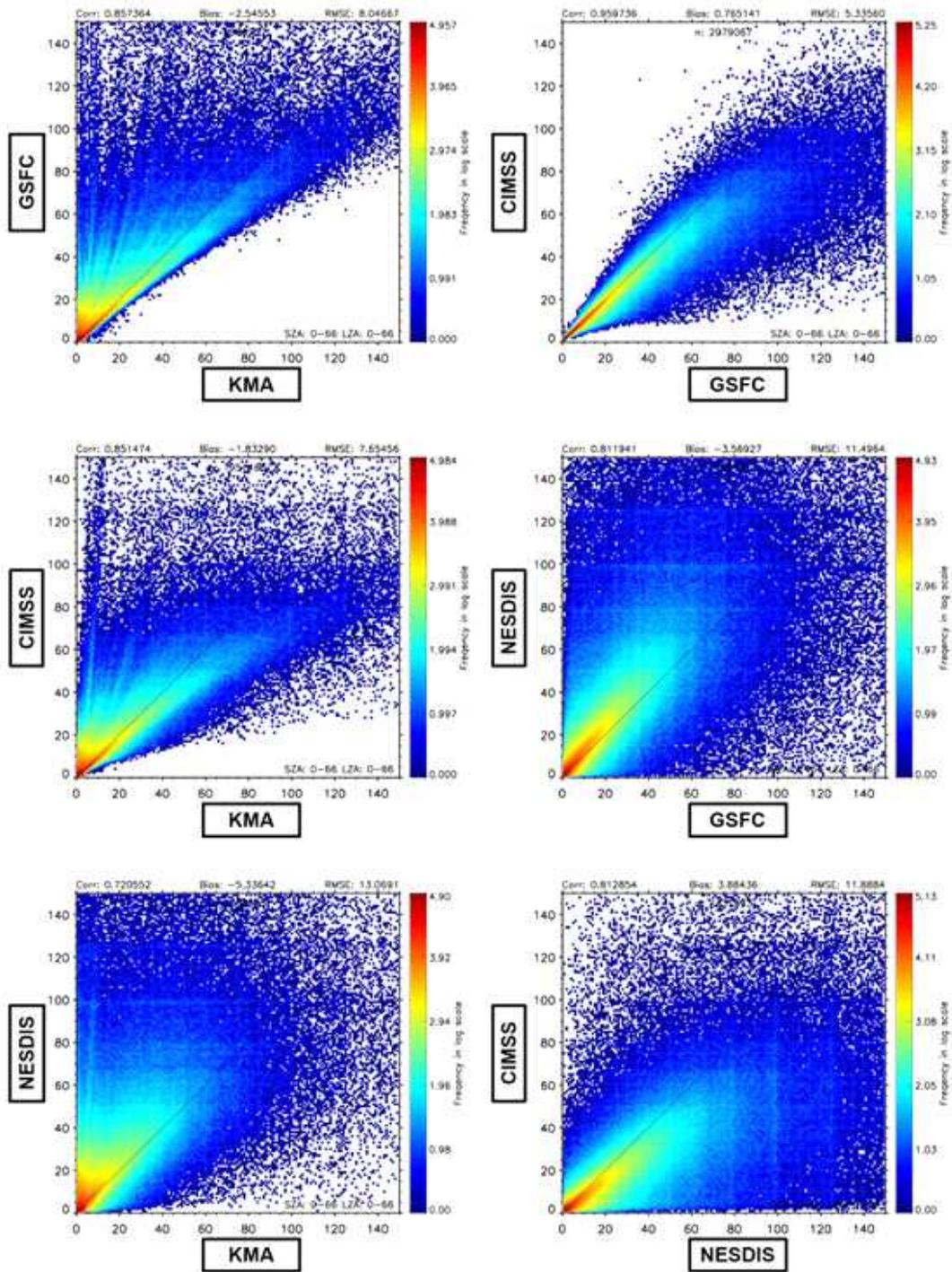


그림 25. 산출된 액체상 구름의 구름광학두께의 알고리즘간 비교.

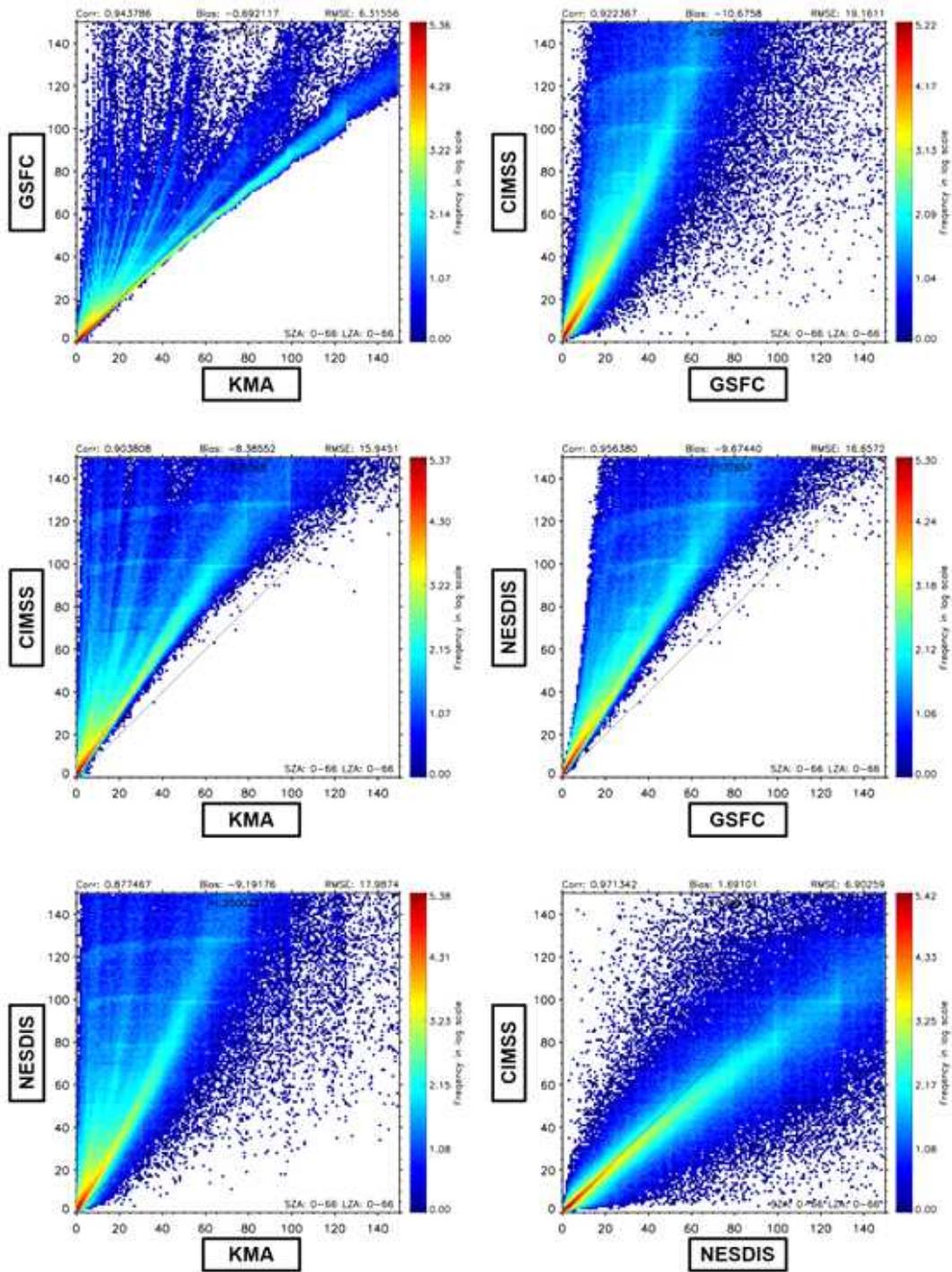


그림 26. 산출된 얼음상 구름의 구름광학두께의 알고리즘간 비교.

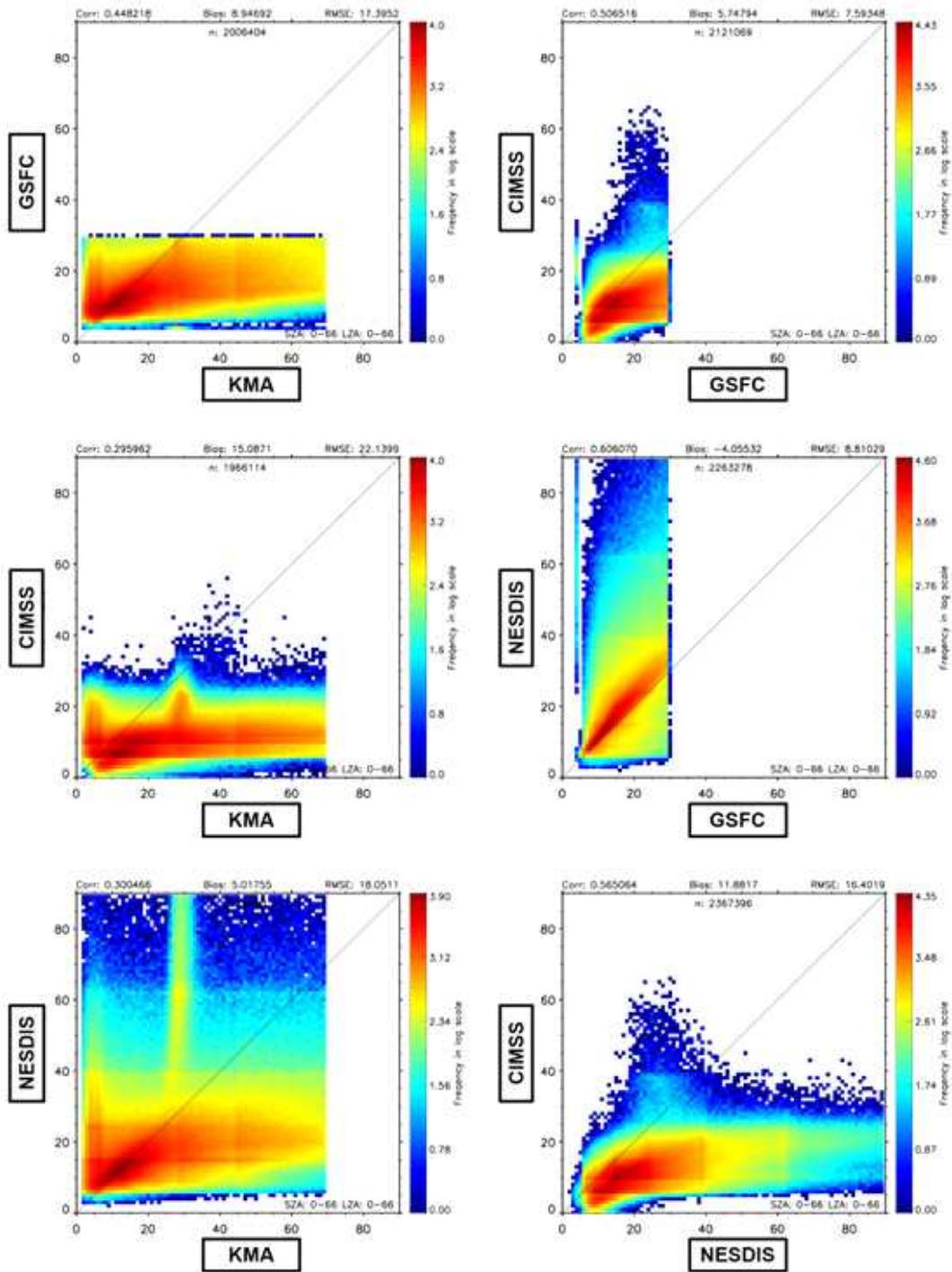


그림 27. 산출된 액체상 구름의 구름유효입자반경의 알고리즘간 비교.

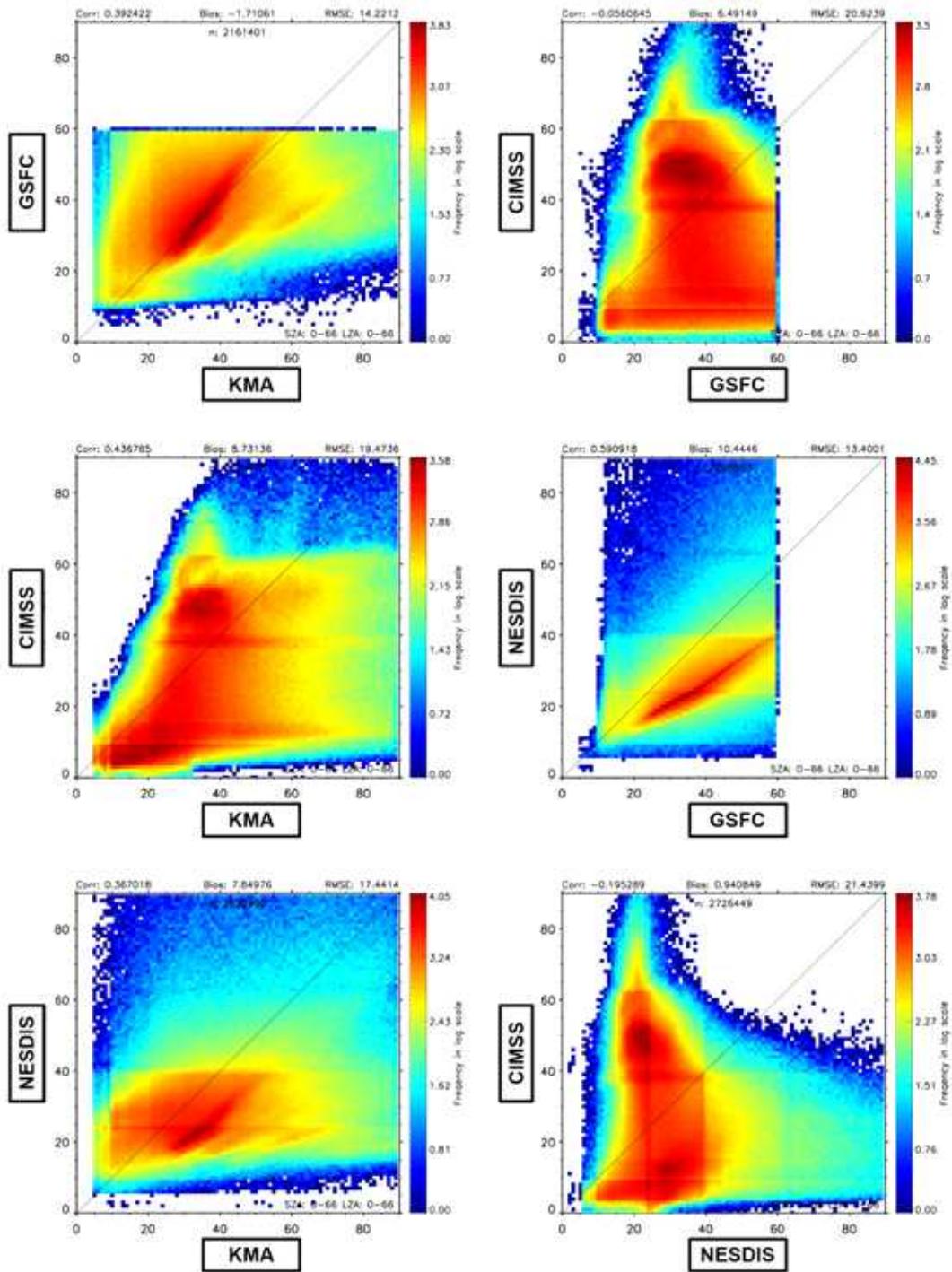


그림 28. 산출된 얼음상 구름의 구름유효입자반경의 알고리즘간 비교.

3.2.1.2 MODIS MYD06 산출물과의 검증

Aqua MODIS의 MYD06 산출물을 검증자료로 사용하여 DCOEW 산출물의 검증을 수행하였다. MYD06 산출물과 DCOEW 산출물 화소의 위치 정보가 다르기 때문에 DCOEW의 화소 위치에 맞추어 MYD06 산출물의 결과를 위치보정(colocation)하였다. 검증은 그림 19와 그림 20에 나온 태풍 앓사니와 인도차이나반도에 대하여 실시하였고, 그 결과는 그림 29-33에 나타내었다.

검증 결과, 산출물의 대부분이 표 1에서 제시한 목표 정확도를 잘 만족하는 것을 알 수 있다. 하지만 육지에서 액체상 구름 입자유효반경 비교 결과에서는 높은 RMSE가 나타났다(그림 32). 또한 해상에서의 입자유효반경 검증에서는 액체상, 얼음상 구름 둘 다 목표 정확도는 만족하지만 액체상 구름의 결과에서 더 큰 RMSE가 나타났다(그림 30). 이러한 액체상 구름에서의 불확실성으로 인해 IWP보다 LWP에서 더 큰 RMSE가 나타나는 것을 확인할 수 있다(그림 33).

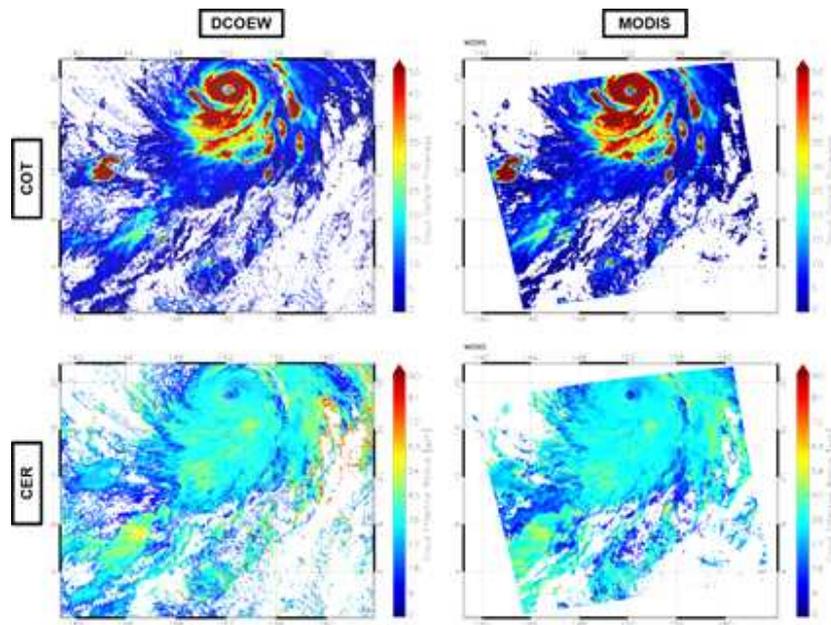


그림 29. 2015년 8월 19일 태풍 앗사니(atsani)의 DCOEW(왼쪽)와 MODIS(오른쪽)가 산출한 구름광학두께(위쪽)와 구름입자유효반경(아래쪽) 그림.

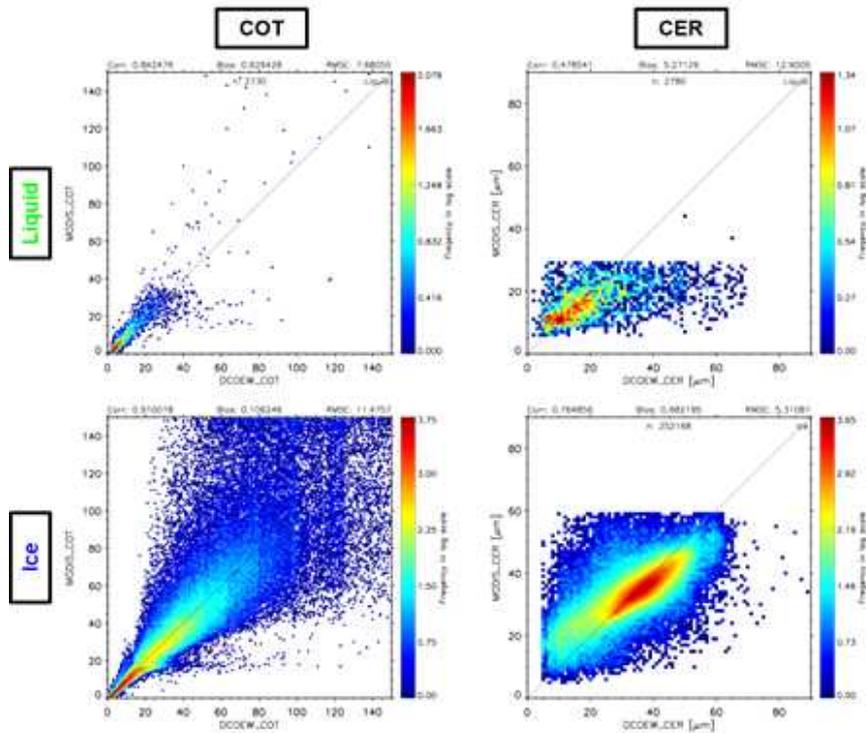


그림 30. DCOEW와 MODIS 산출물의 비교 결과. 위쪽은 액체상, 아래쪽은 얼음상, 왼쪽은 구름광학두께, 오른쪽은 구름입자유효반경의 결과를 나타낸다.

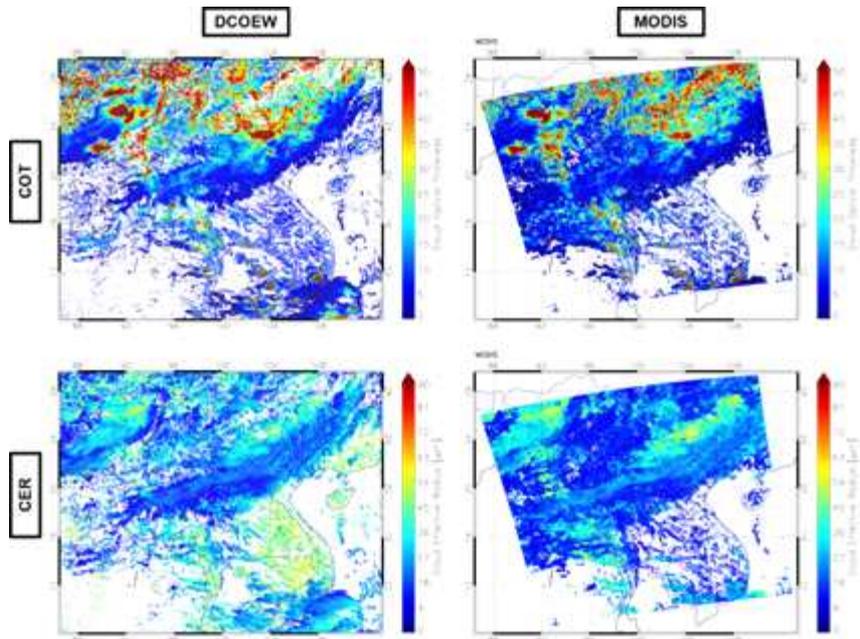


그림 31. 2015년 8월 19일 인도차이나 반도의 DCOEW(왼쪽)와 MODIS(오른쪽)가 산출한 구름광학두께(위쪽)와 구름입자유효반경(아래쪽) 그림.

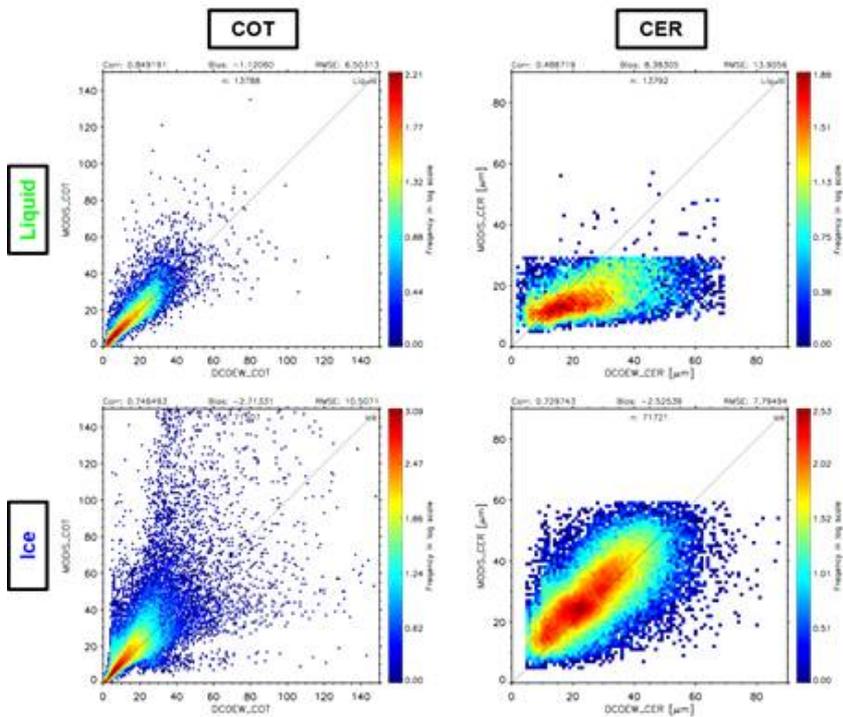


그림 32. DCOEW와 MODIS 산출물의 비교 결과. 위쪽은 액체상, 아래쪽은 얼음상, 왼쪽은 구름광학두께, 오른쪽은 구름입자유효반경의 결과를 나타낸다.

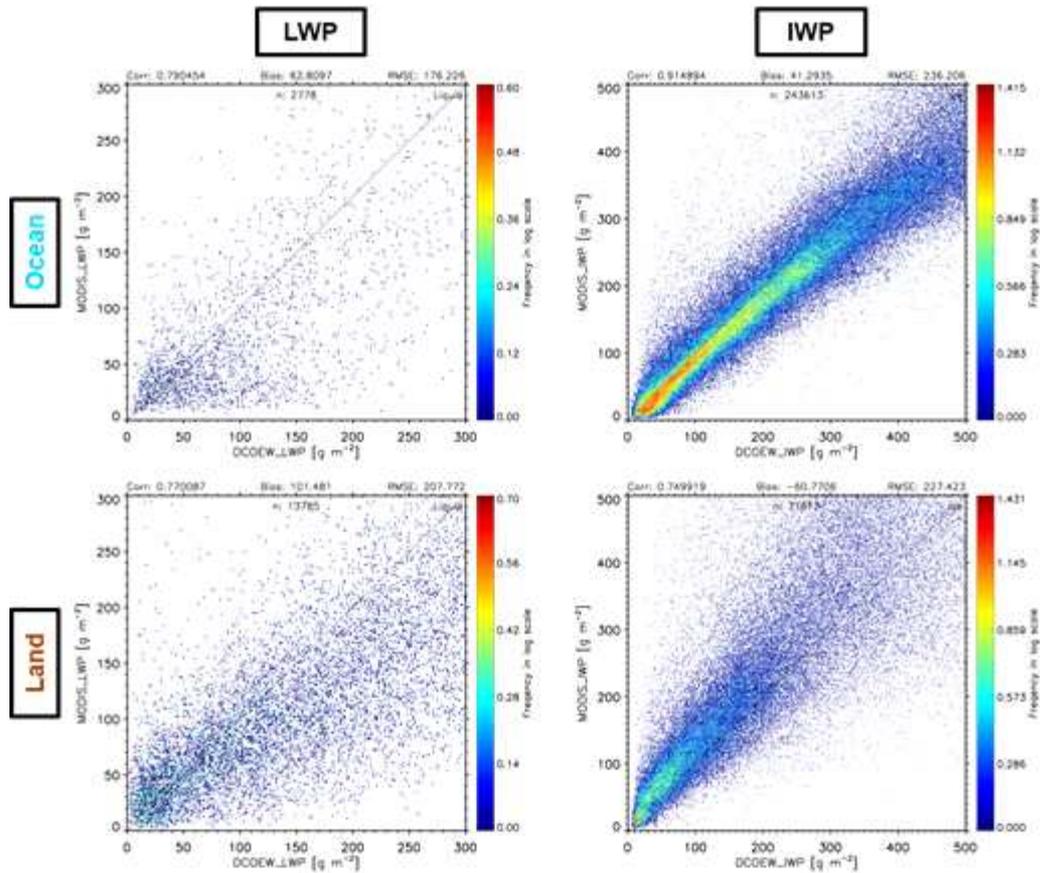


그림 33. DCOEW와 MODIS의 LWP(왼쪽)과 IWP(오른쪽) 검증 결과. 위쪽은 태풍 앓사니 사례, 아래쪽은 인도차이나 반도의 사례를 나타낸다.

3.2.2 향후 계획

현재 버전 AMI DCOEW 알고리즘을 개선하기 위해 DCOEW 알고리즘과 같이 VIS/NIR 방법을 이론적 배경으로 하는 위성 탑재체(MODIS, AHI, ABI, 등등)의 산출물과 지속적으로 추가 검증을 수행하고, VIS/NIR 방법이 아닌 다른 방법으로 구름광학두께나 구름입자유효반경을 산출하는 마이크로파 파장대 위성의 탑재체(AMSR-2, CPR, 등등)의 산출물을 DCOEW 산출물과 비교, 검증할 것이다.

4. 현업운영시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

DCOEW 알고리즘은 각각의 화소에 대해서 일일이 계산을 수행한다. 수치계산 시 효율성을 높이기 위해서는 병렬화 및 코드의 최적화를 고려하여야 한다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

DCOEW 알고리즘은 각 픽셀 단위의 자료를 처리하는 알고리즘이다. 서브루틴을 포함한 모든 프로그램은 FORTRAN 90으로 작성되었다.

4.3 품질평가 및 진단

DCOEW 알고리즘 실행 시 산출되는 품질플래그를 참고하여 사용자의 목적에 맞는 품질평가를 실시한다.

4.4 예외사항 처리

DCOEW 알고리즘은 계산 시 예외사항이 있을 경우, 품질플래그에 기록을 할 수 있도록 설계되었다. 예외사항의 종류를 알고 싶다면 품질플래그를 참고할 것을 추천한다.

4.5 알고리즘 검증

DCOEW 알고리즘 검증은 크게 세 가지 방법을 통해 검증할 수 있다. 첫째는 DCOEW 알고리즘과 같이 입력자료로써 가시채널과 근적외채널을 사용하는 알고리즘과의 비교이다. 검증 가능한 탑재체 종류로는 MODIS, AHI, ABI, 등등이 있다. 두 번째는 첫째 검증과 다르게 마이크로파 파장대 채널을 가지고 있는 탑재체 산출물과의 검증이다. 이를 이용해 첫 번째 방법에서 검증할 수 없는 부분들을 검증할 수 있다. 검증 가능한 마이크로파 파장대 탑재체 종류로는 AMSR-2, CloudSat CPR 등등이 있다. 마지막 세 번째로 실제 항공기 관측 데이터와의 검증이다. 실제 항공기 관측데이터와의 비교를 통해서 DCOEW 알고리즘의 산출 값이 참값에 얼마나 근접하는지 확인할 수 있을 것이다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

DCOEW 알고리즘 개발과 검증을 위해서 아래와 같은 가정들이 사용되었다.

- 구름은 수평적으로 균일하며, 운정의 구름광학두께와 구름입자유효반경은 구름 전체를 대표할 수 있다.
- DCOEW 알고리즘이 사용하는 다른 AMI 산출물(운정, 구름탐지, 분광지면알베

도)자료는 목표 정확도를 만족한다.

- DCOEW 알고리즘이 사용한 검증자료들은 실제 구름특성을 대표할 수 있는 산출물들이다.

5.2 예상되는 탑재체 성능

- 탑재체 개발시 요구되는 성능을 만족할 것이라 가정한다.

5.3 산출물 개선을 위한 사전계획

- 산출물 개선을 위해, 필요한 경우 알고리즘 업데이트를 할 계획이다.

6. 참고문헌

Anderson, G., Clough, S., Kneizys, F., Chetwynd, J., and Shettle, E.: AFGL atmospheric constituent profiles (0-120 km), Tech. Rep. AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force Base, Bedford, Mass., 1986.

Buras, R. T. Dowling, and C. Emde, 2011: New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering. *J. Quant. Spectro. Radiative Transf.*, 112, 2028-2034.

Hansen, J. E. and J. B. Pollack, 1970: Near-infrared light scattering by terrestrial clouds. *J. Atmos. Sci.*, 27, 265-281.

Hansen, M., R. DeFries, J. R. G. Twonshend, and R. Sohlberg, 2000: Global land cover classification at 1km resolution using a decision tree classifier, *Inter. J. Remote Sensing*, 21, 1331-1365.

King, M. D., 1987: Determining of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements. *J. Atmos. Sci.*, 44, 1734-1751.

Nakajima, T. and M. D. King, 1990: Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, 47, 1878-1893.

Platnick, S., M. D. King, K. G. Meyer, C. Wind, N. Amarasinghe, B. Marchant, G. T. Arnold, Z. Zhang, P. A. Hubanks, B. Ridgway, and J. Riedi, 2014: MODIS cloud optical properties: User guide for the Collection 6 level-2 MOD06/MYD06 product and associated level-3 datasets, NASA, 113 pp.

Rodgers, C. D., 2000: Inverse method for atmospheric sounding: theory and practice, xvi, 238 pp, World Scientific, Singapore.

Rothman, L. S., D. Jacquemart, A. Barbe, D. Chris Benner, M. Birk, L. R. Brown, M. R. Carleer, C Chackerian Jr, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, J.-M. Hartmann, K.

W. Jucks, A. G. Maki, J.-Y. Mandin, S. T. Massie, J. Orphal, A. Perrin, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, J. Tennyson, R. N. Tolchenov, R. A. Toth, J. Vander Auwera, P. Varanasi, G. Wagner, 2005: The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectro. Radiative Transf.*, 96, 139–204.

Twomey, S. A. and T. Cocks, 1982: Spectral reflectance of clouds in the near infrared: Comparisons of measurements with simulations. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 60, 583–592.

Twomey, S. A. and T. Cocks, 1989: Remote sensing of cloud parameters from spectral reflectance in the near-infrared. *Beitr. Phys. Atmos.*, 62, 172–179.

Walther, A., W. Straka, and A. K. Heidinger, 2011: ABI Algorithm Theoretical Basis Document for Daytime Cloud Optical and Microphysical Properties (DCOMP), 61 pp.

Wang, M. and M. D. King, 1997: Correction of Rayleigh scattering effects in cloud optical thickness retrievals. *J. Geophys. Res.*, 102, 25915–25926.

Wu, D., B. Baum, Y. Choi, M. Foster, K. Karlsson, A. Heidinger, C. Poulsen, M. Pavolonis, J. Riedi, R. Roebeling, S. Sherwood, A. Thoss, and P. Watts, 2017: Towards global harmonization of derived cloud products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* doi:10.1175/BAMS-D-16-0234.1, in press.

Yang, P., Bi, L., Baum, B. A., Liou, K.-N., Kattawar, G., and Mishchenko, M., 2013: Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 μm to 100 μm . *J. Atmos. Sci.*, pp. 330–347.