

GK-2A AMI

Algorithm Theoretical Basis

Document

에어로졸 광학두께 및 에어로졸 입자 크기
(Aerosol Optical Depth and Ångström Exponent Product)

지준범, 이권호, 이규태
강릉원주대학교

Version 1.0

2019. 04. 25.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	최초 작성	0.1.0.0	2015.03.23.	이권호
0.2	장별 순서 변경	0.2.0.0	2016.01.16.	이권호
0.3	육/해상 알고리즘 통합	0.3.0.1	2016.12.22.	이권호
0.4	알고리즘 개선, 시험 검증	0.4.1.1	2017.11.12.	이권호
0.5	AOD LUT 산출방법 개선	0.5.3.9	2018.04.30.	지준범
0.6	ADPS 산출 결과 반영 개선	0.5.6.1	2018.11.20.	지준범
0.7	ATBD 수정	0.5.7.1	2019.01.15.	지준범
0.8	알고리즘 개선 및 조건표 개선	0.5.8.1	2019.03.25.	지준범
0.9	ATBD 알고리즘 설명 수정	0.5.9.1	2019.04.15.	지준범
1.0	GK-2A AOD LUT 개선	0.5.10.1	2019.04.25.	지준범

<목차>

1. 개요	1
1.1 목적	1
1.2 사용자	2
1.3 내용	2
1.4 관련 문서	2
2. 알고리즘 소개	3
2.1 개요	3
2.2 알고리즘 흐름도	3
2.3 입력자료	4
2.3.1 L1B	4
2.3.2 L2	5
2.3.3 보조 자료	6
2.4 이론적 배경	6
2.5 수학적 설명	7
2.6 산출물	8
3. 모의자료 및 검증	11
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	11
3.2 검증 방법	12
3.3 검증 결과	12
4. 현업운영 시 고려사항	18
4.1 수치계산 고려사항	18
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	18
4.3 품질 평가 및 진단	18
4.4 예외사항 처리	18
4.5 검증 알고리즘	18
5. 가정 및 제한	20
5.1 성능	20
5.2 예상 센서 성능	20
5.3 개선을 위한 사전 계획	20
6. 참고문헌	21

<표 목차>

표 2.3.1. 에어로졸 광학두께 알고리즘을 위한 주요 입력자료.	4
표 2.3.2. GK-2A 에어로졸 탐지 L2 산출물.	5
표 2.4.1. 에어로졸 광학두께 산출에 필요한 GK-2A/AMI 센서의 채널별 특성값 (채널 특성이 유사한 AHI RSR을 차용하여 이론적으로 계산).	7
표 2.6.1 에어로졸 광학두께 산출물의 정의.	9
표 2.6.2. 에어로졸 부가 산출물(에어로졸 입자크기)의 정의와 설명.	10
표 3.1.1. 에어로졸 광학두께 알고리즘을 위한 주요 입력자료.	11
표 3.3.1. GK-2A AOD 산출물과 MODIS 산출 AOD의 Bias와 RMSE.	16
표 3.3.2. GK-2A AEP 산출물과 MODIS 산출 AOD의 Bias와 RMSE.	16
표 3.3.3. GK-2A AOD 산출물과 JMA 에어로졸 산출물 검증.	17

<그림 목차>

그림 2.2.1. 에어로졸 광학두께 산출을 위한 자료처리 흐름도.	3
그림 3.3.1. 황사 발생일(2017.05.05.) 산출 결과. 좌:GK-2A AOD 산출물, 중:COMS AI, 우:JMA AOD.	13
그림 3.3.2. 연무 발생일 선정 사례분석(2017.05.07.). 좌:GK-2A AOD 산출물, 중:COMS AI, 우:JMA AOD.	14
그림 3.3.3. 2017년 5월 5일 0300UTC에 산출된 AOD와 AE 결과: 위쪽: GK-2A 에어로졸 산출물, 아래: JMA 에어로졸 산출물.	15

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
ADP	Aerosol Detection Product
AE	Ångström exponent
AERONET	AERosol RObotic NETwork
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
AOD	Aerosol Optical Depth
AOT	Aerosol Optical Thickness
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
AWG	Algorithm Working Group
BRDF	Bidirectional Reflectance. Distribution Function
BT	Brightness Temperature
COMS	Communication, Ocean and Meteorological Satellite
CSI	Critical Success Index
FAR	False Alarm Rate
GK-2A	GEO-KOMPSAT 2A
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
MI	Meteorological Imager
MISR	Multi angle Imaging SpectroRadiometer
IR	InfraRed
JMA	Japan Meteorological Agency
LUT	Look-Up-Table
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NIR	Near InfraRed
NWP	Numerical Weather Prediction
PC	Proportion Correct
POD	Probability Of Detection
SBDART	Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer

SSM	Spectral Shape Matching
RMSE	Root Mean Square Error
RTM	Radiative Transfer Model
TOA	Top Of Atmosphere
UM	Unified Model

1. 개요

에어로졸은 입자 및 다양한 화학 성분의 입자들의 응집을 통해 다른 화학적 성질의 에어로졸을 형성하고 지역의 대기 질과 시정을 악화시키는 등 인간의 건강에도 악영향을 끼치고 있다 (IPCC, 2013). 에어로졸은 전 세계적인 지표면 온도, 기후, 물 순환 및 생태계에 영향을 미치고 있다 (IPCC, 2013). 따라서 에어로졸의 과학적 이해를 돕기 위해 깊이 있는 연구가 이루어져야 하며 보다 정확한 산출 값이 요구된다. 현재까지 많은 지구 관측 위성의 에어로졸 광학두께 (AOD) 산출 알고리즘이 개발되어 왔다. 즉 광역 가시광선 영역의 채널자료를 사용하는 기존의 기상관측용 센서자료를 사용하는 단일 채널 가시 채널 알고리즘, 해색 관측을 위한 센서로부터 AOD를 결정할 수 있는 해색(Ocean Color) 알고리즘(Gordon and Wang, 1994), MODIS 센서와 같은 다파장 채널자료를 사용하는 다파장 알고리즘 (Remer et al., 2006; Lee et al., 2009; 2012; Hsu et al., 2013), MISR와 같은 다파장 채널자료와 다중 관측각 정보를 이용한 알고리즘(Diner et al., 2005) 그리고 편광을 이용한 알고리즘 등이 개발되었다.

AOD 산출 알고리즘의 기본 원리는 위성이 관측하는 복사량에서 에어로졸 이외의 기여도를 제거하는 방법을 적용하고 있으며 센서의 특성이나 관측대상 지역에 따라 계수의 적용이나 자료처리 방법이 약간씩 수정된 형태로 발전하고 있다. 우리나라에선 정지궤도 위성인 천리안(COMS)에 탑재된 기상영상기(MI)로부터 AOD를 산출하고 있고 지속적인 연구개발 사업을 수행함으로써 국내 환경조건에 맞는 한국형 AOD 산출 알고리즘의 개발을 통해 산출되는 해양/대기 요소 산출물의 정확성을 높여야 하며 분석 시스템의 효율을 높이기 위한 프로세스 구축방안 등의 모색이 필요한 시점이다. GK-2A 위성의 AOD 산출물은 관측영역에서 발견되는 에어로졸 위성원격탐사의 체계적 관리 및 고품질화에 초점을 맞추는 것을 목적으로 한다. 또한 GK-2A 위성으로부터 산출될 AOD 결과는 에어로졸 입자의 크기에 관한 지표인 AE를 산출하기 위한 입력자료로 활용될 수 있다.

1.1 목적

본 기술서는 GK-2A AOD를 위한 자료 해석 및 처리를 위한 방법론을 구체적으로 기술하였으며 위성 영상의 해당 화소별 황사와 미세먼지(연무) 및 화산재를 구분하는 알고리즘에 대한 기초 설명서이다. 알고리즘의 입/출력값 및 보조 자료에 대한 설명을 제시한다. 추가적으로 GK-2A AOD 산출값을 이용하여 에어로졸 입자크기에 대한 정보와 관련된 AE값 산출 방법론에 대한 설명을 포함하였다.

1.2 사용자

본 알고리즘 기술서의 사용자는 광학두께 알고리즘의 물리적 배경을 이해하고 산출물을 산출하는 과정에 대한 이해 및 산출값의 활용을 도모하기 위한 자이다. 광학두께 산출물 및 활용의 예상 사용자로는 기상예보자, 대기질 관리자, 보건당국, 재해방지 관련 기관, 항공운항 관련 기관 그리고 군(軍) 등이 예상된다. 향후, AOD 알고리즘을 수정하거나 유지할 경우 이 문서를 참조할 수 있다.

1.3 내용

알고리즘 소개: GK-2A 모의 영상자료의 특성과 AOD 산출물 및 AOD 산출물 결과값을 입력자료로 사용하여 산출 가능한 AE에 대하여 상세히 설명한다. AOD 알고리즘에 대한 물리적 이론 배경과 입출력자료의 특징 및 산출물의 활용(AE)을 기술한다.

시험자료 및 출력물: 시험자료에 대한 설명과 AOD 알고리즘의 실행과정을 설명한다. 그리고 산출결과물에 대한 정확도 검증에 대해서 기술하고 산출결과물을 입력 자료로 이용하여 계산된 에어로졸 입자크기 정보 산출 결과를 포함한다.

현업운영 시 고려사항: 수치계산과 프로그래밍 과정 그리고 QA/QC 진단 및 예외 사례 처리에 관한 내용을 기술한다.

가정 및 제한: 광학두께 알고리즘에서 사용된 가정과 현재 접근방법의 한계에 대하여 설명한다. 그리고 알고리즘 개선을 위한 제한점 극복방안에 대하여 제시한다.

1.4 관련 문서

- AOD 알고리즘 과학코드 분석서
- AOD 알고리즘 시험보고서

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

AOD 산출은 에어로졸 광학 특징에 따라 위성에서 관측되는 반사도 값이 변화하기 때문에 산출하는데 어려움이 있다. 그러나 GK-2A/AMI는 한 파장 이상의 대기 상단(TOA) 반사도 값을 얻게 되며 이를 통해 어려움을 해결할 수 있다. 이 ATBD 알고리즘에서 AOD를 산출하기 위해서 지표에서의 반사도를 계산하고 추정하여 이에 해당되는 산출 알고리즘을 선택함으로써 수행되었다. GK-2A 위성의 관측영역의 반사도와 관측영역에 주로 존재하는 에어로졸 입자의 광학 특성정보를 반영하여 알고리즘을 개발한다.

2.2 알고리즘 흐름도

AOD를 위한 전체적인 자료처리 흐름도는 그림 2.2.1과 같으며 전체 과정은 에어로졸 탐지 이전 단계인 자료준비 과정과 에어로졸 탐지 알고리즘이 선행 자료처리 과정으로서 적용된다.

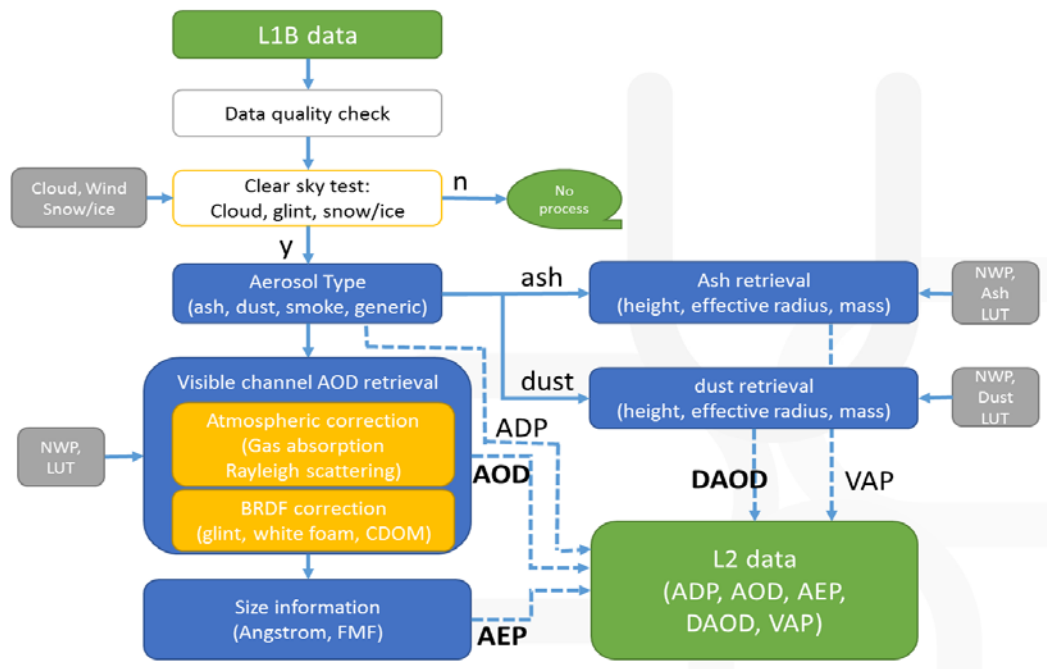


그림 2.2.1. 에어로졸 광학두께 산출을 위한 자료처리 흐름도.

에어로졸 탐지된 화소는 AOD 결정단계에서 대기 분자 산란과 지표 반사도가 보정된 반사도값과 조건표와의 비교를 통해 최적화된 AOD 값을 결정한다. 에어로졸 입자크

기 산출은 이전의 에어로졸 탐지 및 에어로졸 광학적두께 산출결과와 연관이 있고 독립적인 알고리즘으로 존재하는 것이 아니라 상기의 과정에서 산출된 에어로졸 광학적 두께의 값을 변수로 사용하며 AE 값과 에어로졸 광학적 두께와의 관계식으로부터 산출된다.

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

GK-2A AOD 산출물은 GK-2A/AMI의 채널정보에 최적화하여 알고리즘이 개발되었다. AOD 알고리즘 수행에 필요한 입력자료로서 위성 센서의 특성정보는 가시채널 반사도 (reflectance)와 적외채널 밝기온도 (BT) 값이다 (표 2.3.1참조). 공간해상도는 가시채널인 0.64 μm 은 500 m 그리고 1.38 μm 와 10개의 적외채널은 2 km이며 이하 채널들은 1 km이다. AOD 산출의 기본 원칙은 구름이 없는 청천화소 (clear sky pixel)를 대상으로 대기 중의 에어로졸 성분의 광 소산계수의 적분값을 결정하는 것이다. 청천화소란 구름으로 탐지된 영역을 제외한 영역을 말한다. 따라서 구름탐지 산출물의 활용 또는 자체적인 구름탐지 기법이 사용될 수 있다. 단 구름탐지 산출물의 활용이 가능한 경우는 구름탐지 산출과정에서 에어로졸 영역이 구름으로 오인 되지 않는 경우에 한한다. 주요 에어로졸 성분이란 에어로졸 입자에 대한 개별적 화학종 (수용성, 금속성, 유기성 물질 등)이 아닌 위성이 관측하는 대기 영역에 존재하는 모든 에어로졸 중 주로 존재하는 에어로졸 입자의 형태이다. 여기에서는 황사, 화산재, 미세먼지(연무) 그리고 기타 미확인 에어로졸 입자로 분류된 에어로졸로 정의한다.

표 2.3.1. 에어로졸 광학두께 알고리즘을 위한 주요 입력자료.

중심파장[μm]	자료	용도
0.4702	Calibrated L1b reflectance	에어로졸 광학두께(육상)
0.5086	Calibrated L1b reflectance	에어로졸 광학두께(해상)
0.6394	Calibrated L1b reflectance	에어로졸 광학두께(육/해상)
0.8630	Calibrated L1b reflectance	에어로졸 광학두께(해상)

1.6092	Calibrated L1b reflectance	에어로졸 광학두께
latitude	degree of pixel	에어로졸 화소의 위치정보
longitude	degree of pixel	에어로졸 화소의 위치정보

2.3.2 L2

ADP 산출물은 GK-2A/AMI 관측영역에 대해 2 km × 2 km의 공간해상도와 약 10분 간격의 시간해상도로 산출된다. 에어로졸 탐지는 구름이 제거된 화소에 대하여 화산재와 황사 및 미세먼지 탐지과정을 수행하여 해당 에어로졸 타입에 대한 탐지를 제공한다. ADP 산출물은 이후 에어로졸 광학두께 및 화산재 특성정보 산출을 위한 입력 자료로 활용된다. ADP 산출물은 에어로졸의 타입에 대한 에어로졸 탐지로서 에어로졸 형태별 정보와 Q/C flag를 제공한다.

표 2.3.2. GK-2A 에어로졸 탐지 L2 산출물.

이름	설명			산출물 자료의 차원
Aerosol Detection Product (ADP)	황사, 화산재, 미세먼지, 기타 미량 에어로졸에 대한 화소별 정보			격자(경도, 위도)
	Type	0	etc(undefined or mixed)	
		1,2	ash	
		3.xx~4.xx	dust	
		5.xx	haze	
		6	clean	
		-999	No data	
Q/C flag	자료처리 과정 중 발생한 QC요소 기록 (0:산출불능, 1:나쁨, 2:보통, 3:좋음)			격자(경도, 위도)
	flag	conditions		
	0	None : sunglint 영역, ROI 영역외, 구름 판별시, 에어로졸 탐지불능		
	1	Low confidence : CLD L2 구름판별시 ADP 탐지(etc)		

	2	Medium Low confidence : CLD L2 구름판별시 ADP 탐지(화산재, 미세먼지(연무))	
	3	Good confidence : CLD L2 청천시 ADP 탐지, CLD L2 구름판별시 ADP 탐지(황사)	

2.3.3 보조 자료

AOD 및 이를 이용한 에어로졸 입자크기 산출에 필요한 보조 자료는 GK-2A/AMI 기하정보(화소별 위도, 경도, 위성천정각, 위성관측각, 태양천정각, 태양위치각, 육지해양마스크 등)자료가 사용되었다. 위성자료와 함께 제공되는 복사 보정된 L1B 자료에 대한 바이너리 형식의 경·위도 자료(Lat_2km.bin, Lon_2km.bin)와 육지마스크(LandSea_2km.bin)자료를 사용하였다. GK-2A 위성의 위치벡터(북위 0°, 동경 127.2°, 고도 36,000km)와 각 화소별 경위도 값으로부터 위성관측각을 계산하였으며 해당 관측시각에서의 태양 고도각 및 상대방위각을 별도로 계산하여 사용하였다. 해양의 파도에 의한 난반사에 반사도 증가를 보정하기 위하여 기상청에서 현업운영되는 수치모델의 풍향과 풍속을 보조자료로 입력하였다. 배경장 자료는 이전 30일의 동일시각에 관측된 L1b를 이용하여 화소별 최소 반사도를 찾아 생성된 것으로 맑은 상태에서의 지표면 상태의 반사도이며 위성 관측된 반사도에 대한 지표면의 기여율 제거를 위한 자료이다.

2.4 이론적 배경

AOD 또는 AOT (τ)는 에어로졸 입자 한 개가 가지는 광 산란 효과 (single scattering)로부터 계산되는 고도 z 에서의 광 소산계수 (light extinction, σ_{ext})를 대기 총 두께 중 존재하는 모든 입자에 대하여 적분한 값으로서 에어로졸 입자의 총 개수와 관련이 있다.

$$\tau = \int_{z=0}^{TOA} \sigma_{ext}(z)dz \quad (1)$$

AOD 산출 알고리즘의 주요 입력자료는 에어로졸 탐지 알고리즘에서 필요한 자료와 에어로졸 탐지결과 산출물이 사용된다. 따라서 복사보정 (radiative calibration)과 기하보정 (geometrical calibration)이 수행된 각 화소별 가시채널 반사도, 적외채널 밝기온도, 위경도 그리고 위성-태양의 기하각 (geometrical angles) 정보가 사용된다. 복사 보정 단계를 거친 L1B 자료 중 가시채널 복사량은 자료처리를 위한 편의상 다음의 식 (2)를 이용하여 반사

도(ρ_{TOA})로 변환할 수 있다.

$$\rho_{TOA}(\lambda) = \frac{\pi L(\lambda)}{F_0(\lambda) \cos(\theta_0)} \quad (2)$$

여기서 $F_0(\lambda)$ 는 파장(λ)에 대한 태양상수이고 θ_0 는 태양 천정각이며 픽셀별 주어진 위도 및 경도값과 관측 시간 자료를 이용하여 태양의 위치를 수치적으로 계산할 수 있다. 이 반사도 값은 인공위성이 관측하는 총 반사도 값으로서 대기 중 에어로졸과 대기분자 그리고 지표면에 의하여 반사된 태양광의 합이다. 표 2.4.1은 GK-2A 위성의 기상탐재 센서인 AMI의 이론적인 채널별 특성값으로서 각 채널별 파장 범위에 관한 상대반응함수는 유사 센서인 AHI와 ABI의 것을 차용하였다.

표 2.4.1. 에어로졸 광학두께 산출에 필요한 GK-2A/AMI 센서의 채널별 특성값 (채널 특성이 유사한 AHI SRF를 차용하여 이론적으로 계산).

밴드	1	2	3	4	5	6	7	8
Wavelength [μm]	0.4702	0.5086	0.6394	0.8630	1.3740	1.6092	3.8316	6.2104
Band width [nm]	37.3	30.8	79.7	33.4	40.6	15.5	193.8	785.4
$F_0[\text{W/m}^2]$	75.426	52.724	128.57	32.211	5.6751	9.9765	1.9887	1.2673
Rayleigh optical thickness (ROT)	0.134	0.095	0.032	0.013	0.001	0.002	2.99E-5	3.48E-6

2.5 수학적 설명

위성이 관측하는 가시채널 반사도값(ρ_{TOA})은 다음과 같이 레일리 산란에 의한 반사도와 에어로졸 반사도, 지표 반사도의 함수로 표현된다.

$$\rho_{TOA}(\lambda) = \rho_{Ray}(\lambda) + \rho_{Aer}(\lambda) + \rho_{sur}(\lambda) \quad (3)$$

식 (3)에서 레일리 산란과 지표 반사도의 기여도를 제거하면 위성관측값에서 에어로졸에 의한 반사도를 결정할 수 있다. 여기서 결정된 에어로졸 반사도값은 미리 계산된 조건표를 이용하여 해당 AOD 값으로 산출된다. 레일리 산란에 대한 반사도값은 계절과 지역에 따라 결정될 수 있으며 가시채널에서 비교적 정확하게 결정될 수 있다. 여기에서

는 Bucholtz (1995)가 제시한 분자산란계수 계산식을 사용하였다. 식 (4)에서 상수 A,B,C,D는 계절별로 서로 다른 값을 가진다.

$$\rho_{Ray}(\lambda) = A \lambda^{-(B+C\lambda+\frac{D}{\lambda})} \frac{P(z)}{P_0} \quad (4)$$

지표면 반사도값은 2.1 μm 채널의 반사도값을 활용하여 채널들 간의 지표 반사도 관계를 이용하였다 (Kaufman et al., 1997). 최적의 산출 결과를 도출하기 위한 최소 반사도 방법 (Herman and Celarier, 1997; Torres et al., 1998; Hsu et al., 2004, 2006)은 실제 상당한 기간 (최소 한 달에서 1년 이상) AMI를 통해 직접 수집된 자료를 적용시킬 필요가 있다. 지표면 반사도는 AOD 산출에 직접적인 관련이 있으므로 지표면 반사도의 오차는 에어로졸 광학두께 산출 오차와 연관된다. 해수면 반사도값은 해수에 대한 양방향 반사도 함수 (BRDF)가 사용되며 평균 풍속은 수치예보 (NWP)자료로부터 결정된 값에 대한 BRDF 값이 고려되었다. 실제 위성이 관측한 파장별 반사도 값과 조건표에서 제시되는 파장별 에어로졸 반사도 값과의 반복비교 작업을 수행하여 가장 차이가 적은 에어로졸 모델에 해당하는 광학두께 값을 최종적으로 결정하게 된다. 조건표 작성을 위한 복사전달모델은 SBDART (Richiazzi et al., 1998)를 사용하였다. SBDART는 평행-평면(plane-parallel) 복사전달 기법과 구분종좌표 법 (discrete ordinate method)을 사용하는 포트란 코드로서 지표와 대기의 조건에 따라 자외선-가시광선-적외선 영역에서의 복사량을 모의할 수 있다. 상기의 과정을 통해 산출된 에어로졸 광학적 두께는 에어로졸 입자 크기에 관한 지표인 AE 값을 산출을 위한 입력값으로 사용되며 AE값 산출을 위한 AE와 에어로졸 광학적 두께와의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\tau_{\lambda}}{\tau_{\lambda_0}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-\alpha} \quad (6)$$

여기서 τ_{λ} 는 λ 파장에서의 광학적 두께이고 τ_{λ_0} 는 λ_0 파장에서의 광학적 두께이다.

2.6. 산출물

AOD 산출 알고리즘은 GK-2A/AMI 센서의 청천 스펙트럼 반사율에 대한 육상 AOD 산출로 구성되어 있다. 출력 자료는 공간해상도가 2 km $\times$ 2 km 이고 주간동안 시간해상도는 10분이다. AOD 산출 알고리즘은 지표면 반사율에 대해 상대적으로 약한 에어로졸 신호와 큰 불확실성 때문에 육지의 건조한 지역이나 사막과 해양에서의 sun-glint를 포함

한 밝은 지표면 위에서의 산출은 시도할 수 없다. GK-2A AOD 산출물은 에어로졸 탐지 산출결과에 대하여 해당 화소별 조건표를 이용한 역산방법을 적용 및 AOD에 대한 수치 자료를 제공한다. Table 2.6.1에 에어로졸 광학두께에 대한 산출물 정보를 나타내었다.

표 2.6.1 에어로졸 광학두께 산출물의 정의.

산출물명	설명		차원
AOD	에어로졸 광학두께($\lambda = 0.55\mu\text{m}$) 범위: 0.0 – 5.0		grid(xsize, ysize)
AOD quality flag	자료 산출과정에 발생한 Q/C요소 기록(0:산출불능, 1:나쁨, 2:좋은)		grid(xsize, ysize)
	flag	Conditions	
	0	None : sunglint, 야간, adps = 0	
	1	bad confidence : adps < 1	
	2	good confidence : $0 < \text{aod} < 5$ adps=2	

GK-2A AOD 산출물은 에어로졸 입자크기의 정보에 대한 지표인 AE 값의 산출하기 위한 입력 자료로 활용되었고 에어로졸 입자크기 산출물의 정의와 설명을 표 2.6.2에 정리하였다. 에어로졸 입자크기 정보에 대한 산출값은 0에서 3 사이의 값으로 표현될 수 있고 작은 크기의 에어로졸 입자들은 큰 AE 값을 가지며 큰 에어로졸 입자들은 작은 AE 값을 갖는다.

표 2.6.2. 에어로졸 부가 산출물(에어로졸 입자크기)의 정의와 설명.

이름	설명	산출물 자료의 차원
Angstrom Exponent Product(AEP)	에어로졸 입자 크기 정보 • 파장: $0.47\mu\text{m}$, $0.64\mu\text{m}$ (육상), $0.66\mu\text{m}$, $0.86\mu\text{m}$ (해상), • 범위: -0.5 – 3.0 (주간)	격자(경도, 위도)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

AOD 산출에 필요한 입력자료는 Himawari-8/AHI L1B 자료가 사용되었다. Himawari-8 위성은 GK-2A 위성의 유사채널 정보로서 에어로졸 탐지 알고리즘의 설계 및 테스트를 수행하였다. Himawari-8 위성의 성공적인 발사 이후 L1B 자료가 가능하였던 2015년 8월 이후부터는 에어로졸 탐지 알고리즘의 모의 입력자료로서 Himawari-8/AHI 16개 채널정보 자료가 사용되었으며 해당 알고리즘의 입출력 및 자료 산출 과정을 모두 Himawari-8/AHI 자료에 맞추어 수정되었다.

표 3.1.1. 에어로졸 광학두께 알고리즘을 위한 주요 입력자료.

GK-2A/AMI (μm)	MODIS (μm)	Himawari-8/AHI (μm)
Ch. 1 : 0.4702	Ch. 3 : 0.466	Ch. 1 : 0.46
Ch. 2 : 0.506	Ch. 4 : 0.554	Ch. 2 : 0.51
Ch. 3 : 0.6394	Ch. 1 : 0.674	Ch. 3 : 0.64
Ch. 4 : 0.8630	Ch. 2 : 0.857	Ch. 4 : 0.86
Ch. 5 : 1.3740	Ch. 26 : 1.382	
Ch. 6 : 1.6092	Ch. 6 : 1.629	Ch. 6 : 1.6
		Ch. 5 : 2.3
Ch. 7 : 3.8316	Ch. 20 : 3.788	Ch. 7 : 3.9
Ch. 8 : 6.2104	Ch. 27 : 6.765	Ch. 8 : 6.2
Ch. 9 : 6.9413	Ch. 27 : 6.765	Ch. 9 : 7.0
Ch. 10 : 7.3266	Ch. 28 : 7.337	Ch. 10 : 7.3
Ch. 11 : 8.5881	Ch. 29 : 8.529	Ch. 11 : 8.6
Ch. 12 : 9.6210	Ch. 30 : 9.734	Ch. 12 : 9.6
Ch. 13 : 10.3593	Ch. mix : 30+31	Ch. 13 : 10.4
Ch. 14 : 11.2285	Ch. 31 : 11.019	Ch. 14 : 11.2
Ch. 15 : 12.3651	Ch. 32 : 12.032	Ch. 15 : 12.3
Ch. 16 : 13.2870	Ch. 33 : 13.365	Ch. 16 : 13.3

AOD 산출물에 대한 검증자료는 AERONET AOD, MODIS L2 MOD35 AOD, MYD35 AOD, Himawari-8 AOD이고 AE산출물의 검증 자료는 AERONET AE, MODIS L2 MOD35 AE, MYD35 AE, Himawari-8 AE등이다. AERONET 자료의 경우 육상에 한정적으로 위치하고 있으며 MODIS AE의 경우 해상만 자료를 산출하여 제공되고 있다. Himawari-8 AHI AOD, AE는 육/해상에 대하여 제공하고 있으나 해상도는 5 km 이고 천정각 및 영역에 대한 제한이 있다.

3.2 검증 방법

AOD 및 AE 산출물의 정확도 검증을 위한 방법은 정량적인 방법이 사용되며 검증량은 상관계수, BIAS, RMSE(Root Mean Square Error)이다. 여기서 산출물은 본 연구에서 개발된 에어로졸 광학두께이고 검증자료는 위에서 언급된 타 위성자료(공개된 표준 산출물)이며 AOD, AE 산출결과물의 연속 산출이 가능한 시점 이후 충분한 산출물이 획득되면 상기의 검증 및 검증결과에 대한 통계분석 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 검증 결과

GK-2A AOD 산출물은 청천 대기 중에 존재하는 AOD값을 관심지역내의 지도상에 포출한다. 그림 3.3.1과 3.3.2는 미량기체 효과가 보정된 Himawari-8 반사도 산출물을 입력자료 하여 획득된 중국 동쪽 지역에서 발생한 황사 사례와 연무사례의 광학적 두께를 나타내었다. 이 지역에서 발생한 황사의 광학적 두께는 1.0~3.0의 높은 값으로 측정되었다. 이러한 에어로졸 광학적 두께 분석 데이터는 Himawari-8 자료가 확보 될 경우 지속적으로 산출 및 축적될 것이다. 육안 비교를 위하여 COMS AI와 JMA AOD의 결과를 나타내었다. GK-2A AOD는 JMA AOD와 전체적으로 유사한 분포를 나타내고 있으나 황사에 집중하여 생산되는 COMS AI에서는 황사를 중심으로 나타나고 있어 차이를 보인다.

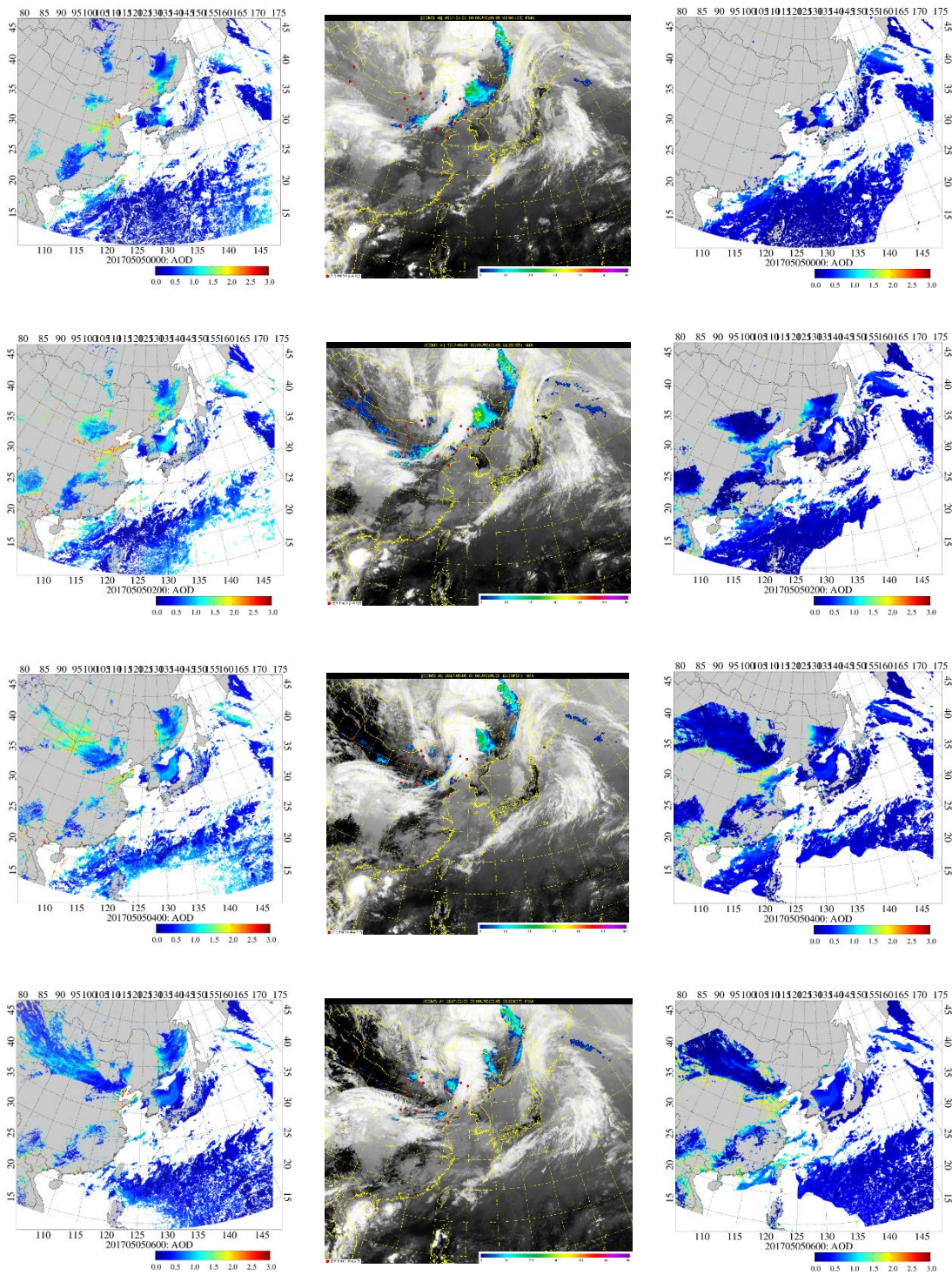


그림 3.3.1. 황사 발생일(2017.05.05.) 산출 결과. 좌:GK-2A AOD 산출물, 중:COMS AI, 우:JMA AOD.

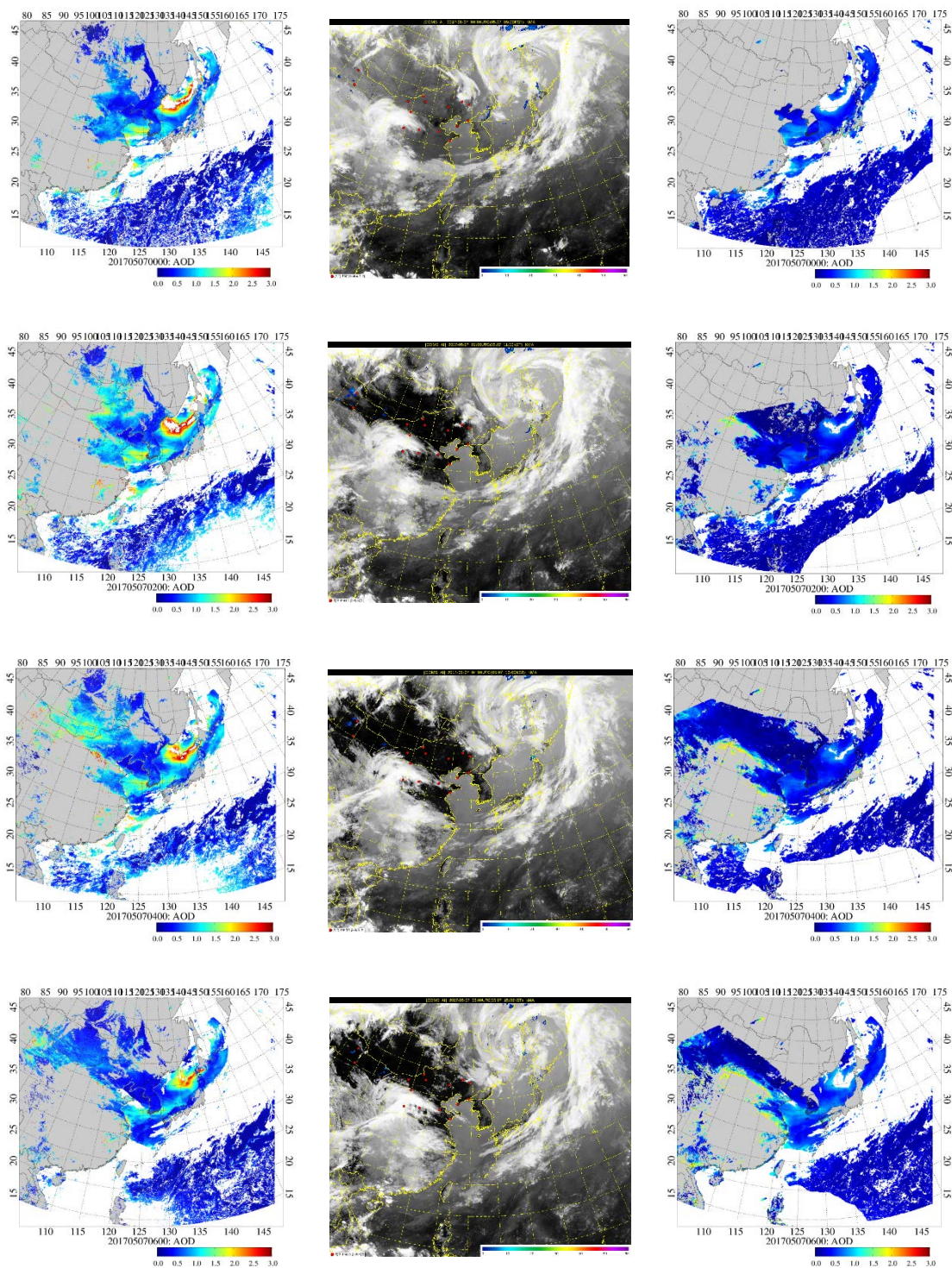


그림 3.3.2 연무 발생일 선정 사례분석(2017.05.07.). 좌:AOD 산출물, 중:COMS AI, 우:JMA AOD.

그림 3.3.3에서는 2017년 5월 5일 0300UTC의 HIMAWARI-8/AHI L1B 자료를 이용하여 산출한 동아시아 영역의 AOD와 AE를 나타내었다. 이는 해양에서 발생한 해염입자와

같은 비교적 입자의 크기가 큰 에어로졸의 영향을 받은 것으로 판단된다. 육상에서의 AE는 높은 지표 반사도 때문에 파장별 광학적 두께 산출이 어렵고 오차요인이 많으므로 현재 많은 위성자료(MODIS 등)에서 산출물이 생산되지 않고 있다. 그러나 본 연구에서는 JMA 에어로졸 산출물과 같이 육상에서의 AE를 산출한다.

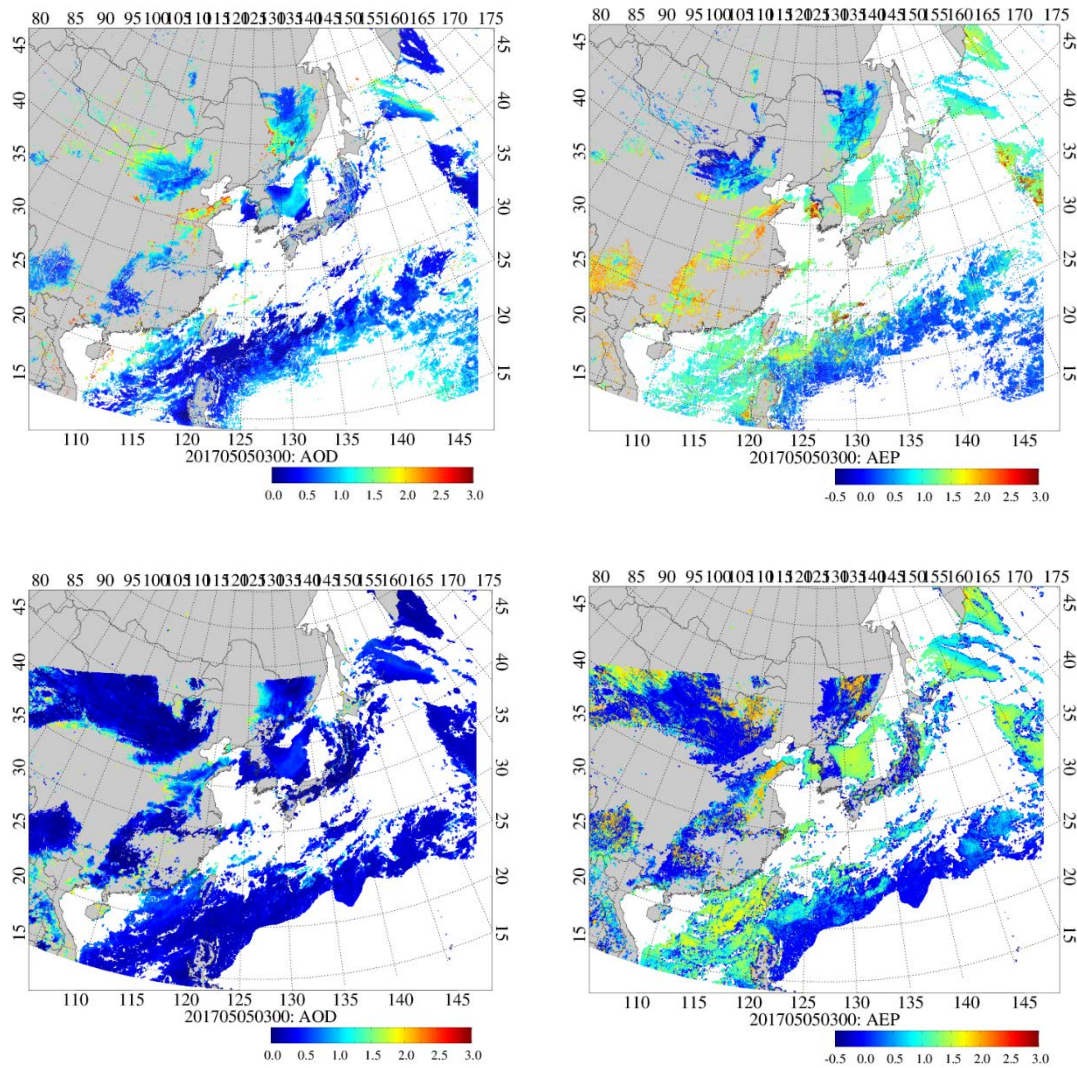


그림 3.3.3. 2017년 5월 5일 0300UTC에 산출된 AOD와 AE 결과: 위쪽: GK-2A 에어로졸 산출물, 아래: JMA 에어로졸 산출물.

2017년 5월 5일부터 5월 9일 사례기간에 대한 MODIS L2 AOD 산출물을 이용한 에어로졸 광학정보의 검증결과는 표 3.3.1~ 3.3.2와 같다. AOD의 경우 육상과 해상으로 분류하여 검증하였을 때 Bias는 0.09와 -0.05 그리고 상관계수는 0.77과 0.79로 비교적 높은 정

확도를 나타내었으나 MODIS 육상(Deep blue) AOD의 경우 상대적으로 큰 Bias (0.61)과 낮은 상관성(0.46)이 나타났다. 에어로졸 광학두께의 목표정확도는 Bias 0.1~0.2, RMSE 0.25~0.30으로 육상(Deep blue)를 제외하고 만족하였다. 또한 입자크기 검증결과 Bias 0.22와 RMSE 0.57의 결과가 나타나 입자크기의 경우 목표정확도 Bias 0.3 및 RMSE 0.5를 만족하였다.

표 3.3.1. GK-2A AOD 산출물과 MODIS 산출 AOD의 Bias와 RMSE.

검증기간	2017.05.05.00:00~2017.05.09.23:50		
구분	Bias	RMSE	R
육상(Dark Target)	0.09	0.17	0.77
육상(Deep Blue)	0.61	0.65	0.46
해상	-0.05	0.08	0.79

표 3.3.2. GK-2A AEP 산출물과 MODIS 산출 AOD의 Bias 와 RMSE.

산출물	산출범위 (TBC)	산출주기 (TBC)	공간해상도 (TBC)	산출영역 (TBC)	성능(목표정확도) (TBC)	
에어로졸 입 자크기	Angstrom exponent: -0.5 ~ 3.0	관측 주기	2km	FD ELA	Bias: RMSE:	0.3 0.5
	해상	R = 0.58, Bias = 0.22, RMSE = 0.57				

또한 JMA AOD와 AE 산출물을 이용하여 GK-2A AOD 산출물을 비교검증하였다. 2017년 5월 5일부터 5월 7일까지 시간별 생산된 GK-2A AOD와 AE이며 동일시각에 생산된 JMA 에어로졸 산출물을 이용하였다. JMA 에어로졸 산출물의 경우 5 km × 5 km 해상도를 가지며 GK-2A 알고리즘과 비교하여 산출영역이 제한적이다 (그림 3.3.1~그림 3.3.3 참조). 그러나 MODIS 에어로졸 산출물과 달리 AE의 경우 육/해상 모든 영역에서 산출되어 GK-2A 에어로졸 산출물과 비교하기 수월하다. 에어로졸 광학두께와 입자크기 검증결과 AOD의 경우는 Bias 0.17 및 RMSE 0.26으로 높은 상관성(0.92)을 보였으나 AE의 Bias 0.48

와 RMSE 0.61로 GK-2A AE가 상대적으로 작은 입자크기로 나타났으며 상관성도 0.64 로 비교적 낮았다.

표 3.3.3. GK-2A AOD 산출물과 JMA 에어로졸 산출물 검증.

검증기간	2017.05.05.00:00~2017.05.07.23:50		
구분	Bias	RMSE	R
AOD	0.17	0.26	0.92
AE	0.48	0.61	0.64

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

AOD 알고리즘 및 에어로졸 입자크기 정보 산출은 각 화소별 계산을 위한 충분한 메모리 확보 및 저장소의 고려가 필요하다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

AOD 알고리즘 및 에어로졸 입자크기 정보 산출은 육상과 해상에서 각각의 다른 과정에 대하여 별도로 적용되어 컴퓨터 계산이 수행된다.

4.3 품질 평가 및 진단

AOD 산출물 및 에어로졸 입자크기 정보 산출의 품질평가 및 진단을 위한 절차는 다음과 같다.

- AOD 산출결과와 AOD 유효 화소수의 총합 점검.
- AOD 산출결과를 표시한 이미지의 검사를 통한 이상점 점검.
- AOD 산출결과가 관심영역 이외의 지역에서 결과 산출 여부 점검.
- 음의 AOD 산출값 점검
- 에어로졸 탐지 산출결과와 연속적 프로세스가 되고 있는지에 대한 연속성 점검.
- 에어로졸 입자크기 정보의 품질은 AOD 산출결과와 품질 평가에 따라 종속적으로 결정된다.

4.4 예외사항 처리

예외사항으로는 주/보조 입력 자료의 입력자료로서 사용 불량과 전달 오류가 발생할 경우 플래그에 기록한다. 에어로졸 탐지 산출물에서 에어로졸로 탐지가 되지 않은 지역에 대해서는 본 알고리즘을 수행하지 않는다.

4.5 검증 알고리즘

AOD 산출물은 각 에어로졸 탐지 화소에 대한 에어로졸 광학두께값으로서 현재 사용 가능한 검증용 자료로는 MODIS L2 AOD 자료와 AERONET AOD자료 및 Himawari-8

AHI AOD가 있으며 이들과의 시공간적 비교를 통하여 산출물의 정확도 검증이 수행가능하다. 에어로졸 입자크기 산출물의 검증은 타 위성자료 또는 지상 관측 자료와의 1:1 비교를 통해서 이루어진다. 현재 사용이 가능한 검증용 자료로는 MODIS L2 에어로졸 산출물 자료 및 AERONET sunphotometer로부터 측정된 파장별 AOD 자료 기반의 AE값을 활용할 수 있다. AOD의 검증에는 MODIS L2 에어로졸 자료가 사용되었으며 MODIS L2 에어로졸 자료는 NASA에서 개발된 에어로졸 분석 알고리즘이 사용되어 산출된 Level 2 (version 6) 자료로서 파장 550 nm 에서의 AOD (τ_{550})값이 저장되어 있다. AOD 산출시 에어로졸 영역에 해당하는 화소만 사용하므로 에어로졸 탐지 산출물의 직접적인 비교가 가능하다. GK-2A 에어로졸 광학적 두께 산출물은 MODIS L2 에어로졸 광학적 두께의 값의 비교검증을 위한 검증 알고리즘 개발을 완료하였으며 에어로졸 광학적 두께 산출물이 충분히 축적되었을 때 MODIS L2 AOD 산출물과의 정량적 비교분석 및 검증결과를 일반화할 수 있을 것으로 보인다.

5. 가정 및 제한

AOD 알고리즘에서는 다음과 같은 가정과 제한사항이 존재한다.

- AOD 알고리즘의 입력자료로 사용되는 모의자료와 보조 자료는 GK-2A/AMI의 관측자료로 가정함.
- 위성 센서의 관측화소보다 적은 구름이나 미확인 대상으로 인한 가시채널 반사도의 증가는 AOD 알고리즘의 오차의 원인이나, 이에 대한 명확한 보정방법은 현재 알고리즘에서는 제한적임.
- 에어로졸 입자크기의 산출은 에어로졸 광학적 두께 산출 불가 시, 산출이 불가하다.

5.1 성능

AOD 알고리즘의 성능 실험을 위한 가정은 다음과 같다.

- MODIS L2 에어로졸 산출물의 화소별 광학두께값은 알려진 정확도 내의 검증자료로 간주함.
- AOD 알고리즘에서 사용되는 물리적 변수값은 GK-2A 발사 이후 환경변화로 인한 수정보완이 가능함.

5.2 예상 센서 성능

AOD 알고리즘은 센서로부터 제공되는 L1B 관측값이 정확히 보정되어 제공되는 것으로 간주한다. 센서가 관측한 자료 중 조정 가능한 잡음과 보정 오차는 경계값 조정에 사용될 수 있다. 그러나 센서의 수행 능력 오류 및 기하보정 오차로 인한 입력자료 이상에 대한 문제는 연속성 점검에 오차를 발생할 수 있다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

GK-2A 위성 기상탐재체인 AMI 센서의 가시채널 및 적외채널을 활용한 AOD 알고리즘에 대한 개념 설계 및 예비 산출물에 대한 알고리즘 설계 및 개발을 수행하였다. AOD 알고리즘은 에어로졸 탐지결과에 크게 의존하므로 에어로졸 탐지 알고리즘이 개선될 경우 AOD 산출물 정확성도 크게 향상될 수 있다.

6. 참고문헌

- Bucholtz, A., 1995. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics*, 34(15), 2765-2773.
- Costa, M. J., Cervino, M., Cattani, E., Torricella, F., Levizzani, V., and Silva, A. M. 1999. Aerosol optical thickness and classification: use of METEOSAT, GOME and modelled data. In *PROC SPIE INT SOC OPT ENG.*, 3867, 268-279.
- Cox, C., and Munk, W., 1954. Statistics of the sea surface derived from sun glitter. *Journal of Marine Research*, 13(2), 198-227.
- Diner D. J., Braswell, B. H., Davies, R., Gobron, N., Hu, J., Jin, Y., Kahn, R. A., Knyazikhin, Y., Loeb, N., Muller, J.-P., Nolin, A. W., Pinty, B., Schaaf, C. B., Seiz, G., and Stroeve, J., 2005. The value of multiangle measurements for retrieving structurally and radiatively consistent properties of clouds, aerosols, and surfaces. *Remote Sens Environ*, 97, 495–518.
- Herman, J. R., Bhartia, O., Torres, C., Hsu, C., Seftor, C., and Celarier, E., 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/ TOMS data. *J. Geophys. Res.*, 102, 16911-16922.
- Hsu, N. C., Jeong, M.-J., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., Seftor, C. S., Huang, J., and Tsay, S.-C., 2013. Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research*, 118, pp. 9296-9315.
- Kaufman, Y. J., Wald, A., Remer, L. A., Gao, B. C., Li, R. R., and Flynn, L., 1997. The MODIS 2.1- μm channel—Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5), 1286–1298.
- Kaufman, Y. J., and Tanré, D., 1998. Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS. *NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document*, Goddard Space Flight Center, 85.
- Koepke, P., 1984. Effective reflectance of oceanic whitecaps. *Applied Optics*, 23(11), 1816-1824.
- Lee, K. H., and Kim, Y. J., 2010. Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted, and Asian dust storm days. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(6), 1771-1784.
- Lee, K. H., Kim, Y. J., von Hoyningen-Huene, W., and Burrow, J. P., 2007. Spatio-temporal variability of satellite-derived aerosol optical thickness over Northeast Asia in 2004. *Atmospheric Environment*, 41(19), 3959-3973.
- Lee, K. H., Ryu, J. H., Ahn, J. H., and Kim, Y. J., 2012. First retrieval of data regarding spatial

- distribution of Asian dust aerosol from the Geostationary Ocean Color Imager. *Ocean Science Journal*, 47(4), 465-472.
- Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., and Kaufman, Y.J., 2007. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 112, doi:10.1029/2006JD007811.
- Levy, R., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F., and Hsu, N. C., 2013. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 2989-3034.
- Monahan, E. C., and Muircheartaigh, I., 1980. Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed. *Journal of Physical Oceanography*, 10(12), 2094-2099.
- NOAA NESDIS/STAR, 2010. ABI suspended matter/aerosol optical depth and aerosol size parameter. Version 2.0, Sep. 30, 2010
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., and Sowle, D., 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2101-2114.
- Torres, O., Bhartia, P. K., Herman, J. R., Sinyuk, A., Ginoux, P., and Holben, B., 2002. A Long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *J. Atmos. Sci.*, 59, 398-413.
- Torricella, F., Cattani, E., Cervino, M., Guzzi, R., and Levoni, C., 1999. Retrieval of aerosol properties over the ocean using global ozone monitoring experiment measurements: method and applications to test cases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 104(D10), 12085-12098.