

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

운량
(Cloud Amount and Cloud
Fraction)

국가기상위성센터

Version 2.0

2021. 12. 31.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	작성	0.1.0.0	2017.09	옥정
0.2	문단의 수정, 알고리즘 개변 사항 추가	0.2.0.0	2018.01	손지영
0.4	알고리즘 방식의 변경 및 특기 사항 추가	0.4.2.1	2018.04	손지영
0.5	전체적으로 용어 및 문단 수정	0.5.5.1	2018.11	손지영
1.0	바뀐 포맷 적용 수정	0.5.6.1	2019.04	손지영
2.0	알고리즘 개선	2.1.2.4	2021.12	김현수

<목차>

1. 개요	1
1.1 목적	1
1.2 사용자	1
1.3 내용	1
1.4 관련 문서	4
2. 알고리즘 소개	5
2.1 개요	5
2.2 알고리즘 흐름도	5
2.3 입력자료	8
2.3.1 Level-1B	8
2.3.2 Level-2	8
2.3.3 보조 자료	8
2.4 이론적 배경	8
2.4.1 지상운량의 산출	9
2.4.2 위성운량의 산출	10
2.5 수학적 설명	10
2.5.1 산출 영역의 설정	10
2.5.2 지상운량의 산출	13
2.5.3 위성운량의 산출	15
2.6. 산출물	16
2.6.1 지상운량 (Cloud Amount, CA)	16
2.6.2 위성운량 (Cloud Fraction, CF)	16
3. 모의자료 및 검증	17
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	17
3.1.1 모의 입력자료	17
3.1.2 검증자료	17
3.2 검증 방법	17
3.3 검증 결과	17

4. 현업운영 시 고려사항	21
4.1 수치계산 고려사항	21
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	21
4.3 품질 평가 및 진단	21
4.4 검증 알고리즘	24
5. 가정 및 제한.....	25
5.1 성능	25
5.2 예상 센서 성능	25
5.3 개선을 위한 사전 계획	25
6. 참고문헌	26

<표 목차>

표 1. 산출물 개요.....	2
표 2. 지상운량 산출 보조자료 개요	8
표 3. 최적산출반경 설정 시험 결과	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
표 4. 운량 알고리즘 목표정확도	17
표 5. 월별 위성운량과 지상운량의 검증 결과: 목측운량에 대해	18
표 6. 산출물 품질 정보표	23

<그림 목차>

그림 1. 운량 알고리즘 전체 흐름도	5
그림 2. 지상운량 알고리즘 흐름도(방법1)	6
그림 3. 위성운량 알고리즘 흐름도	7
그림 4. 관측영역 중심의 구름 유무에 따른 위상운량과 목측운량의 차이,	10
그림 5. 산출창 및 산출 영역 예시	12
그림 6. 직교 좌표계와 구면 좌표계로 본 평행투영 구면투영의 기하학적 관계	14
그림 7. 2017년 5월 지상운량 및 위성운량의 확률밀도분포도	20
그림 8. 2017년 1월 지상운량 및 위성운량의 확률밀도분포도오류! 책갈피가 정의 되어 있지 않습니다.	
그림 9. 2017년 5월과 1월의 시간에 따른 운량의 분포	19

약어표

ACRONYM	MEANING
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
CA	Cloud Amount
CBH	Cloud Bottom Height
CF	Cloud Fraction
CLA	Cloud Analysis
CLD	Cloud Detection
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
COT	Cloud Optical Thickness
CY	Cloud Type
ELA	Extended Local Area
ETRI	Electronics and Telecommunications Research Institute
FD	Full-Disk
FOV	Field of View
GK-2A	GEO-KOMPSAT-2A
NCOT	Nighttime Cloud Optical Thickness
RMSE	Root Mean Square Error
SC	Sky Cover

1. 개요

1.1 목적

본 문서는 GK-2A 위성에 탑재될 운량 알고리즘 (Cloud Amount Algorithm, CA Algorithm)에 대한 이해를 돕기 위해 작성되었다. 사용자에게 알고리즘 및 산출물에 대한 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

1.2 사용자

본 문서는 GK-2A 위성 알고리즘 산출물 중, 지상운량과 위성운량을 이용하는 연구자 및 현업 실무자를 대상으로 한다.

1.3 내용

1.3.1 산출물

산출물은 두 종류로, 위성운량 (Cloud Fraction, CF)과 지상운량(Cloud Amount, CA) 이다. 현재 버전의 알고리즘에서는 전구 영역 (Full Disk)에 대해 산출을 진행하고 있다. 두 산출물 모두 10분위 (할)로 표현되는 자료로, 0에서 10까지의 값을 가진다. 두 산출물 모두 무차원이다.

표 1. 산출물 개요

Variable			Attribute		
Name	Type	shape	Name	Value	Type
CA	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud amount	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65535	short
			valid_min	0	short
			valid_max	100	short
			scale_factor	0.01	float
			add_offset	0	float
			units	–	string
			grid_mapping	GK-2A_imager_projection	string
			product_meanin gs	–	string
			ancillary_variab les	–	string
CF	short	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud fraction	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	65535	short
			valid_min	0	short
			valid_max	10000	short
			scale_factor	0.01	float
			add_offset	0	float
			units	%	string
			grid_mapping	GK-2A_imager_projection	string
			product_meanin gs	–	string
			ancillary_variab les	–	string

1.3.1.1. 산출물 정의 (Definition for the Products)

위성운량과 지상운량은 관측한 관점에 따라 정의된다. 위성에서의 관측에 의한 운량을 위성운량, 이를 지상 관측자의 시점으로 변환한 것을 지상운량이라고 한다.

일반적으로 운량 (Total Cloud Amount) 은 하늘을 덮고 있는 구름의 양으로 표현된다 (Hahn et al. 2001). 그러나 같은 Cloud Amount라는 표현을 쓴다고 해도 AMS (American Meteorological Society) 에서는 이를 위성에서 관측된 구름의 양으로 정의한다. 따라서 용어를 명확히 할 필요성이 있다. 통상적으로 위성에서 관측된 구름은 위성운량이라고 하며, 이때 Cloud Fraction이라고 정의하므로(Minnis 1989; Rossow et al. 1993), 본 알고리즘에서, 통상적인 위성운량을 Cloud Fraction(CF)이라고 한다. 지상에서의 관점으로 변경한 위성운량을 지상운량이라고 명명하였으며 이를 Cloud Amount(CA)라고 한다.

1.3.1.2. 산출 필요성 (Purpose of Production)

운량은 항해, 항공, 농업 등의 인간 활동에 깊게 영향을 미치는 요소이다. 관측 필요성에 의해 운량은 오래도록 관측되어 왔다. 크게 관측운량은 그 관측 위치에 따라 위성운량과 목측운량으로 나뉜다. 두 운량은 관측시점에 의한 차이가 발생하므로 사용되는 분야가 다르다. 예를 들어, 좋은 해상도를 가지는 목측운량은 일조량, 지역적인 에너지 측면에서 활용한다. 실제로, 일조량 등의 측면에서는 위성운량보다 목측운량이 더 활용성이 높다(Harshvardhan et al. 1989). Sun et al.(2015)에 따르면, 현재까지도 위성운량보다 목측운량이 지구에 도달하는 에너지를 더 잘 설명한다. 목측운량은 매우 중요한 자료이나, 지상의 관측소에서 관측되기에 시정불량, 관측소의 부재 등 결측치(Fill value)가 발생한다. 또한, 관측자의 주관이 반영될 수 있다는 단점이 있다.

위성운량의 경우 목측운량보다 월등히 높은 관측영역을 가진다. 지구 외부에서 원격으로 관측하기에 가능하며, 따라서, 해상도는 목측운량보다 다소 떨어진다. 그러나 넓은 관측영역을 가지고, 시간적인 연속성이 뛰어나기에 위성운량은 그 가치를 인정받는다.

본 알고리즘은 두 서로 성격이 다른 운량을 산출하는데 목적을 둔다. 위성운량과 지상운량은 관측시점의 차이로 인해 가지는 기하학적인 관계가 있다. 이에 주목하여, 위성관측자료를 바탕으로 목측운량과 같은 시점을 가진 자료를 산출하여 이를 지상운량이라고 한다. 또한, 전통적인 방식의 위성운량도 함께 산출하여, 다양한 목적에 대응할 수 있다.

1.3.1.3. 산출 특징 및 의의 (Features and Importance of the Products)

본 알고리즘에서는 평면의 격자 형태인 위성 구름 탐지 자료를 지상관측에서 관측자의 시야에 의해 한정되는 반구면 관측영역을 고려하여, 구면 좌표로 변환하는 방식을 이용하여 불확실성을 줄이고 알고리즘의 성능향상을 꾀하였다. 위성 자료를 바탕으로 산출되는 지상운량은 위성 자료가 존재하는 한 시간적, 공간적으로 연속적인

데이터를 얻을 수 있으며, 관측시간 사이의 간격이 지상 목측운량에 비해 작고, 더 큰 영역을 한번에 산출해낼 수 있다는 장점을 지닌다. 또한, 지상운량은 사람이나 운량계에 의해 기록되는 것이 아닌, 위성 자체에서 알고리즘으로 제작되기 때문에 관측을 자동화할 수 있어, 경제적이며 객관적이다.

1.4 관련 문서

본 알고리즘은 입력자료로 구름탐지자료를 이용하기에, GK-2A 구름탐지 알고리즘 ATBD를 통해 더 깊은 알고리즘의 이해가 가능하다.

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

운량 알고리즘은 기존의 위성운량과 동일한 위성운량(Cloud Fraction, CF)과 보다 지상의 목측운량에 잘 맞도록 개량한 위성운량인 지상운량(Cloud Amount, CA)의 2가지 산출물을 계산한다. 입력자료로서 구름탐지자료를 이용하고, 원형의 산출반경에 대해 산출을 진행한다. 한 산출반경은 입력자료에 의해 결정된다. CA 산출을 위해 총 3가지 방법을 고려하였으며, 모두 알고리즘에 포함되어 있으나 최종 채택한 방법은 기하학적인 방법이다. 따라서, ATBD의 알고리즘 설명은 기하학적인 방법을 중점적으로 서술한다. 산출물은 0 - 10(지상운량), 0 - 100(위성운량) 사이의 값을 가지며, 무차원이다.

2.2 알고리즘 흐름도

운량 알고리즘의 전체 흐름도는 그림 1.과 같으며, 본 운량 산출 알고리즘은 3가지 지상운량 산출 방법을 고안하였으나, 실제 산출에 적용되는 방법은 Method 1의 기하학적인 방법이므로 방법 1의 알고리즘 흐름도만을 그림 2.에 표시하였다. 위성운량의 산출 흐름도는 그림3에 표시하였다.

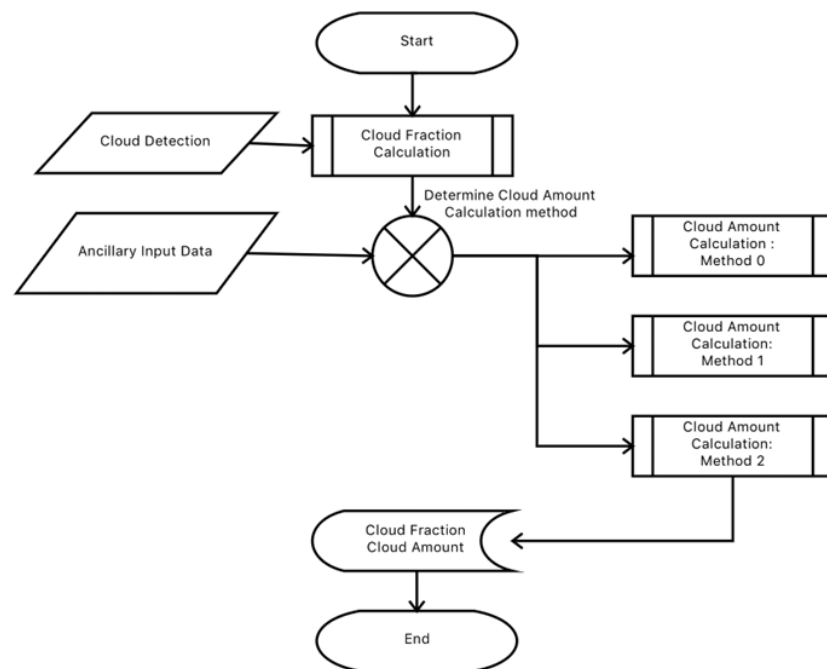


그림 1. 운량 알고리즘 전체 흐름도

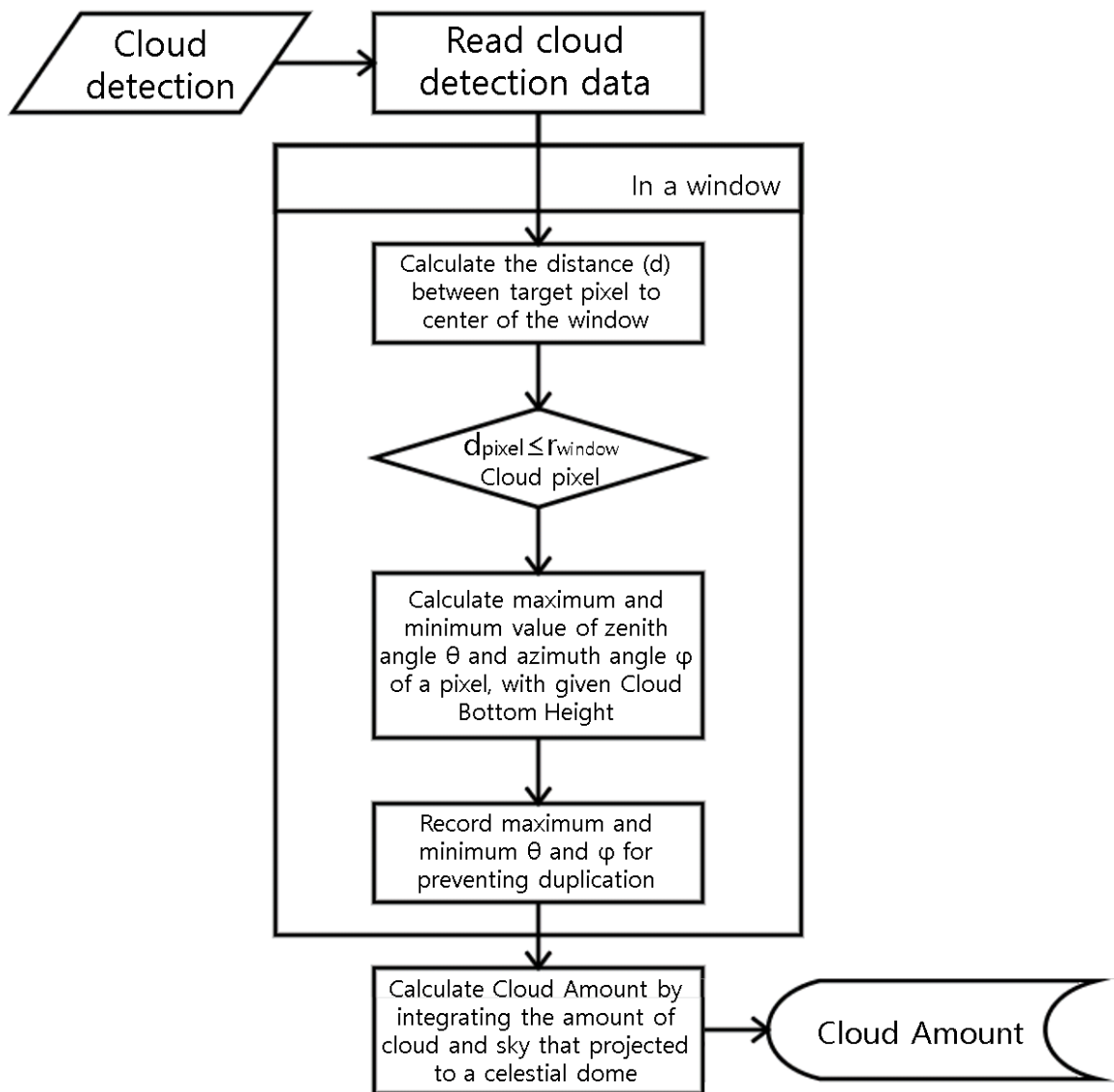


그림 2. 지상운량 알고리즘 흐름도(방법1)

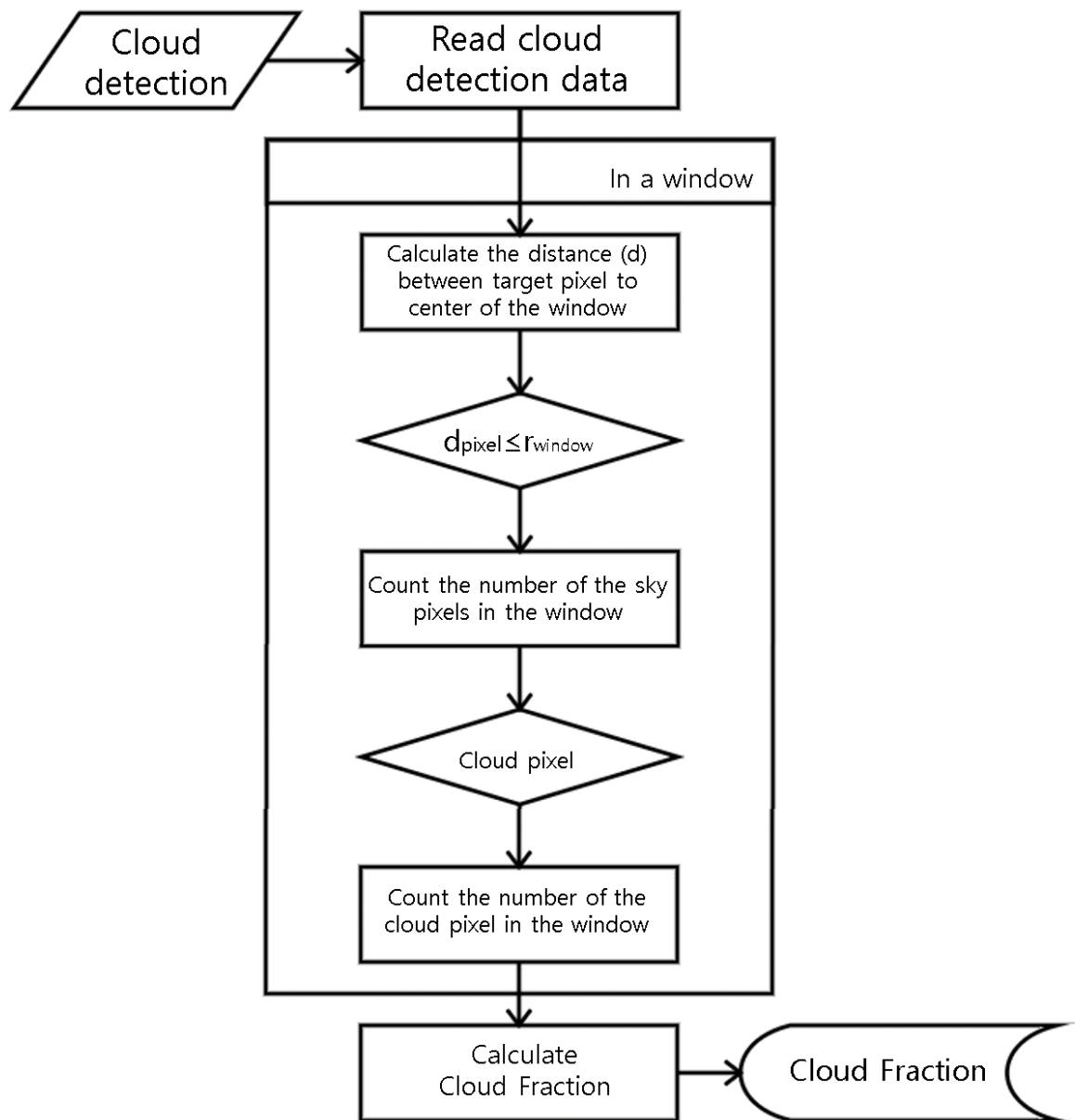


그림 3. 위성운량 알고리즘 흐름도

2.3 입력자료

2.3.1 Level-1B

본 알고리즘은 구름탐지자료를 이용하여 운량을 산출한다. L1B 자료는 사용하지 않는다.

2.3.2 Level-2

2.3.2.1 천리안위성 2A호 구름탐지

구름탐지(Cloud Detection, CLD)자료를 입력자료로 사용하며, 한 화소에 구름의 유/무를 나타낸다. 구름이 존재할 경우 구름(Cloud)과 구름 확률 높음(Probably Cloud)의 값으로 표기한다. 본 알고리즘은 구름 및 구름 확률 높음 두 값을 모두 적용해 산출한다.

2.3.2.2 천리안위성 2A호 운정산출물

운정산출물 알고리즘에서 부가적으로 생산하는 13번($10.4\mu\text{m}$) 채널을 활용하여 산출된 구름방출률(Cloud Emissivity)자료를 사용한다. 구름방출률($10.4\mu\text{m}$)은 대기에 의해 에너지 감쇠가 적은 대기의 창 영역으로 얇은 권운을 제외하고는 지표와 구름에서 1에 가까운 구름방출률을 나타낸다. 또한 구름방출률은 구름입자의 물리적성질에 따라 각기 다르게 나타나는 점을 이용해 산출된 운량에 반영한다.

2.3.3 보조 자료

계산 방법에 따라 보조 자료가 다르다. Method 0의 경우 목측-위성운량 간의 관계상수(SC-CF constant, $K_{\text{SC-CF}}$)를 구해 계절성을 고려하기 위함이고, Method 2의 경우 구름방출률자료를 보조자료로 이용한다. Method 1의 경우 구름방출률자료외 구름의 수직 위치에 대한 정보를 반영하기 위해 운저고도(Cloud Bottom Height, CBH)를 적용하려고 했으나 현재 알고리즘에서는 대류권계면고도(10km)로 정해 사용한다.

표 2. 지상운량 산출 보조자료 개요

	Ancillary Data	Type
Method 0	$K_{\text{SC-CF}}$	Text
Method 1	CBH(10km), Cloud Emissivity	Text, Net-CDF
Method 2	Cloud Emissivity	Net-CDF

2.4 이론적 배경

위성운량과 지상운량은 구름의 양을 나타내기 위한 산출물로 유사성 분석 또한 0.7 이상의 상관관계를 가진다. 이는 두 운량이 완벽히 일치한다는 의미가 아니다. 그 이유는 산출 해상도, 관측 시점의 차이 등에 의해 발생하게 된다.

2.4.1 지상운량의 산출

Method 0 방법은 위성운량과 목측운량은 선형관계가 있으나, 그 값이 다르게 산출됨에서 출발한다. 위성운량이 특정 값을 가질 때, 목측운량이 가질 수 있는 값으로 지상운량을 산출한다.

Method 1 방법은 두 운량이 가지는 기하학적 관계에서 출발한다. 목측운량은 지상의 한 점에서 관측자의 시야에 의해 생성된 반구형 돔(Hemispherical celestial dome) 형태의 관측영역에 구름을 투영하여 그 양을 계산한다. 즉, 목측운량은 반구면 투영이 이루어진다. 반면, 위성운량은 하늘에서 지구를 내려다보는 방식으로 진행되기에, 평면-평행 투영된 구름의 양을 관측한다. 두 관측운량은 결국 같은 구름을 관측하기에, 평면에 평행하게 투영된 구름 자료인 구름탐지자료와 원래 구름이 가질 높이인 운저고도(Cloud bottom Height; CBH)를 이용하면 목측운량의 관점을 가지는 지상운량과 전통적인 방식의 위성운량을 산출할 수 있다.

여기서, 평면 좌표계 (Cartesian Coordinate)에 해당하는 CLD자료를 구면 좌표계 (Spherical Coordinate)로 변환하는 것이 가장 중요하다. 산출 창 중심 화소에 대한 구름 화소의 거리와 높이로 인해 달라지는 방위각이 구면에 투영되는 구름의 양을 조절하게 된다. 중심화소로부터의 수평적인 거리는 정해져 있으므로, 수직적인 거리가 본 방법에서 가장 중요한 변수로 작용한다. 다음 Kassianov et. al(2005)논문에서의 그림은 이러한 구름의 수직, 수평적인 위치로 인해 발생하는 차이를 잘 보여준다.

수평정보인 CLD 자료와 높이정보를 가진 운저고도로 하여 목측운량과 같은 관점의 운량인 지상운량의 산출이 가능하다. 이를 위해, 각 화소가 가질 수 있는 방위각(Azimuth angle, θ)과 입체각(Solid angle, ϕ)의 계산이 필요하다. 본 알고리즘에서 이용하는 자료는 일정한 면적을 가지는 화소 단위이기에 화소가 가질 수 있는 각의 범위를 고려해야 한다. 화소가 가질 수 있는 방위각과 입체각의 범위에 대해 반구 표면에 대한 적분을 진행함으로써 지상운량을 산출한다. 또한 권운, 구름의 가장자리, 조각구름의 경우 위성과 목측으로도 정확한 값을 산출하지 못한다. 이에 물리적 특성을 반영하기 위해 구름방출률을 각 화소에 곱함으로써 지상운량을 보정하였다.

Method 2 방법은 Method 1방법에서 기하학적 방법을 제외한 구름방출률을 사용한다. 이 방법은 목측운량과 위성운량의 관측 차이 중 하나가 산출해상도에서 온다는 점을 이용한다. 위성운량은 최소 수 백 m에서 수 km의 분해능을 가지나, 목측운량은 그보다 세세하게 구름을 분리, 기록할 수 있다. 구름의 유무를 통해 계산한 전통적인 위성운량을 보정할 수 있다.

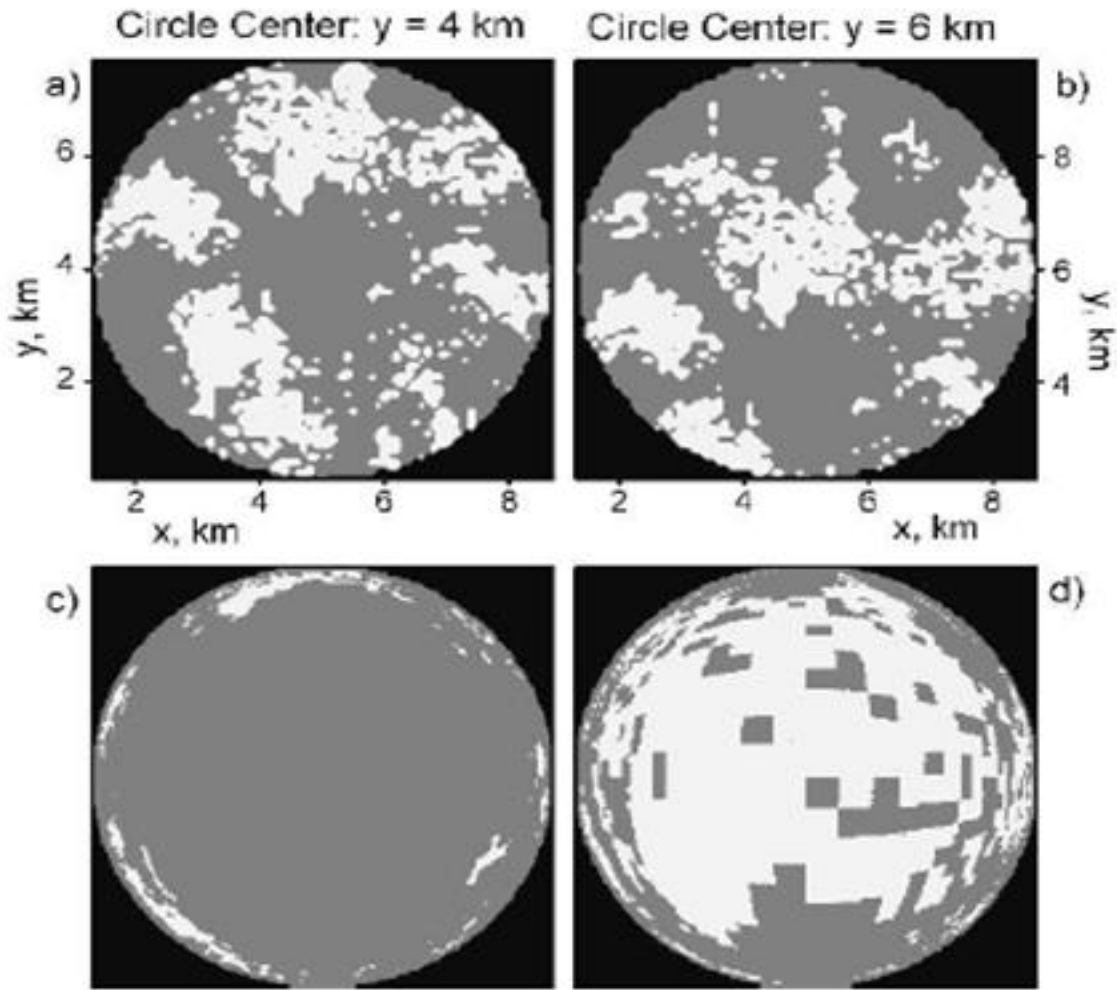


그림 4. 관측영역 중심의 구름 유무에 따른 위성운량과 목측운량의 차이,

Kassianov et al., 2005 에서 발췌

2.4.2 위성운량의 산출

전통적인 위성운량은 ‘관측 영역 내 구름 양을 뜻하며, 화소 단위인 위성운량은 ‘관측영역의 화소 수에 대한 구름 화소의 비로서 나타낸다.

2.5 수학적 설명

2.5.1 산출 영역의 설정

위성관측이 가지는 관측범위(Field of View, FOV)는 지표의 약 1/3으로, 지상관측에 비해 매우 넓다. 따라서, 지상관측에 비슷할 수 있는 값으로 설정해야 한다. 본 산출물의 목적은 지상의 목측운량을 대신하는 것 또한 포함한다. 따라서, 지상의 관점을 가장 잘 반영할 수 있는 산출영역으로서 원형이다. 이때의 산출반경은 입력자료인 구름탐지의 영향을 크게 받기에, 구름탐지자료마다 실험을 통해 가장 잘

맞는 최적산출반경을 설정한다. 표 3은 정량적 분석을 위해 2021년 1개월(4월) 사례로 산출반경 실험 결과 반경에 따른 상관성은 0.86이상 값을 나타내지만 30km 반경에서 -0.17로 Bias가 가장 0에 가깝다. 구름은 불연속적인 값이므로 성공률(Proportion Correct,PC) 검증 스코어로 이용했으며, $PC \pm 2$ 구간이 100에 가까울수록 산출 결과가 참값이라 여기는 관측값과 일치도가 높음을 의미한다. 82.4값을 가진 반경 5km 최적산출반경에 적합하다. 실제 구름현상에 적합한지 2020년 3월 26일 09:00 KST 사례로 최적산출반경 실험을 그림 5에 나타냈다.

표 3. 최적산출반경 설정 시험 결과

Radius (km)	Correlation	Bias	PC ± 2
5	0.88	0.59	82.4
30	0.87	-0.17	81.6
60	0.86	-0.41	80.5

천리안위성 2A호 RGB 주야간 합성 영상에서 한반도 서쪽에 구름이 존재하고 있고, 동쪽에는 일부 조각 구름이 존재 하며 대부분 청천역을 유지하고 있다. 산출 반경(5, 10, 20, 30, 40, 50, 60km)이 넓어지면서 조각 구름 및 구름영역이 확대 표현되고 있음을 확인했다. 실험 결과 최적산출반경 5km가 적합한 것으로 판단되어 본 알고리즘 반경

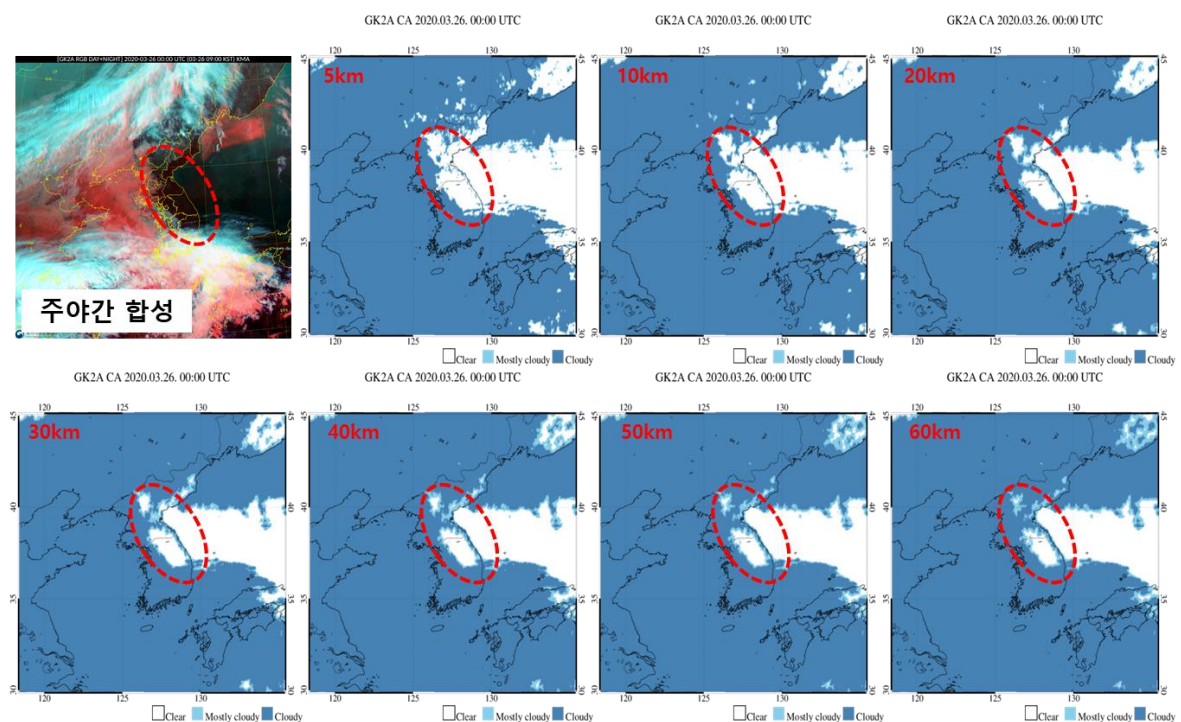


그림 5. 최적산출반경 설정 실험 결과(사례 2020년 3월 26일 09:00KST)

설정한다. 설정한 산출 반경을 위성자료의 해상도로 나눔으로써 몇 개의 화소가 산출 반경에 해당하는 지 계산할 수 있다. 단, 산출 영역의 중심 화소에 대해 계산이 이루어지기에, 산출영역을 결정하기 위한 산출창 (Calculation window)는 반드시 홀수 개의 화소로 이루어져야 한다. 따라서, 다음과 같은 방식으로 계산된다.

$$nx = 2 \times \frac{\text{Radius}_{\text{FOV}}}{\text{Resolution}_{\text{Pixel}, x}} + 1 \quad (1)$$

$$ny = 2 \times \frac{\text{Radius}_{\text{FOV}}}{\text{Resolution}_{\text{Pixel}, y}} + 1 \quad (2)$$

$$N(\text{Pixel}_{\text{Calculation window}}) = nx \times ny \quad (3)$$

본 알고리즘에서 산출 반경은 5 km, 화소 해상도는 중, 횡 모두 2 km이다. 따라서, 본 알고리즘의 산출창은 5 × 5 화소를 가지며, 중심 화소의 위치는 산출창의 (3,3)이다.

산출 창 의 화소 pixel(i,j)와 중심 화소 사이의 거리가 산출반경보다 작을 때, 해당 화소가 산출 영역에 포함된다.

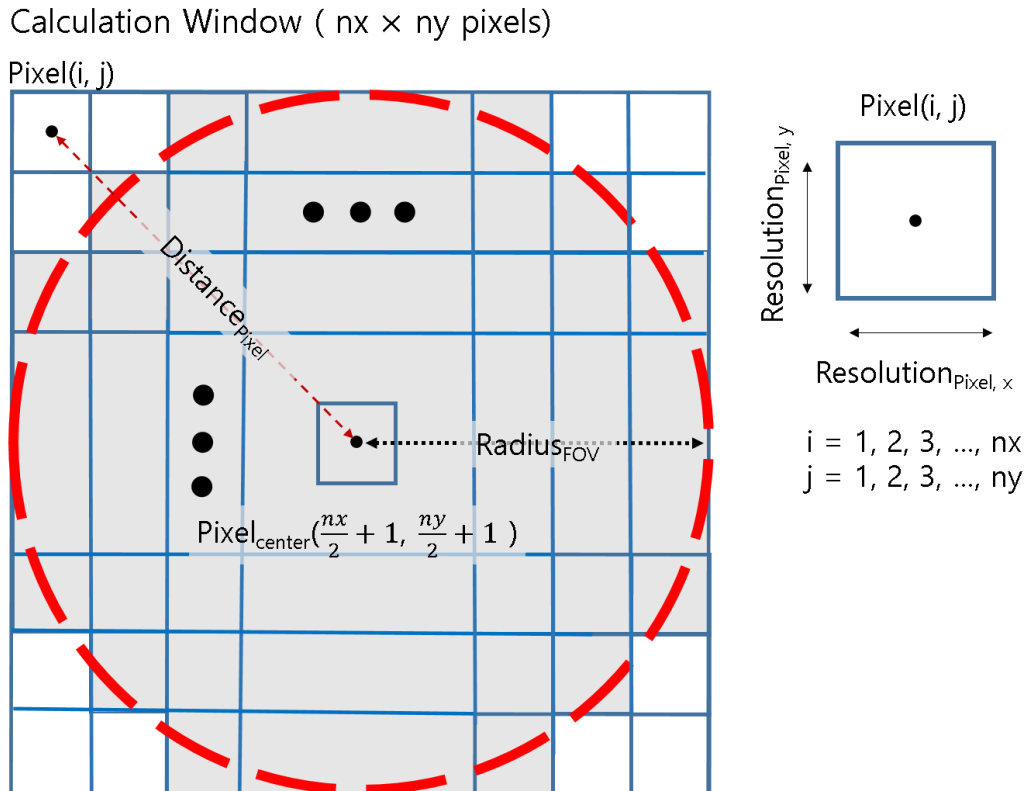


그림 6. 산출창 및 산출 영역 예시

2.5.2 지상운량의 산출

Method 0은 한국과 중국 영역에 대해 위성운량과 목측운량의 시공간일치를 진행하여 두 값이 가지는 관계를 세운다. 한국 및 중국 영역은 GK2A 위성의 산출영역의 북서방향에 치우쳐 있으나, 다양한 지표상태, 또, 넓은 영역의 정보를 주므로 다양한 위치에 적용하기 적합하다고 판단하였다.

$$SC = K_{SC-CF} \times CF \quad (4)$$

$$CA \approx SC \quad (5)$$

$$CA = K_{SC-CF} \times CF \quad (6)$$

이때, 위성운량과 목측운량이 서로 가질 수 있는 구간에 대해, K를 계산한다. 위성운량을 10 분위로 변환하여, 지상운량과의 같은 분위수를 가질 때의 K의 평균을 계산, 구간별로 곱하여 지상운량을 산출한다. 구름은 계절성을 가지는 자료이기에 월 별 다른 K값을 이용한다.

Method 1 핵심은 직교 좌표계에서 구면 좌표계로의 변환이다. 그림의 한 점 $P(x,y,z)$ 에 대해 평면 투영된 점 $P_p(x,y)$ 와 반구면에 투영된 점 $P_h(r, \theta, \varphi)$ 으로 평면 자료(P_p) 적절한 높이(z)를 부여하여 반 구면에 투영된 값(P_h)을 얻을 수 있듯, 구름탐지자료를 평면 자료로서, 높이값을 운저고도로 하여 목측운량과 같은 관점의 운량인 지상운량의 산출이 가능하다. 이를 위해, 각 화소가 가질 수 있는 방위각(Azimuth angle, θ)과 입체각(Solid angle, φ)의 계산이 필요하다(그림 6).

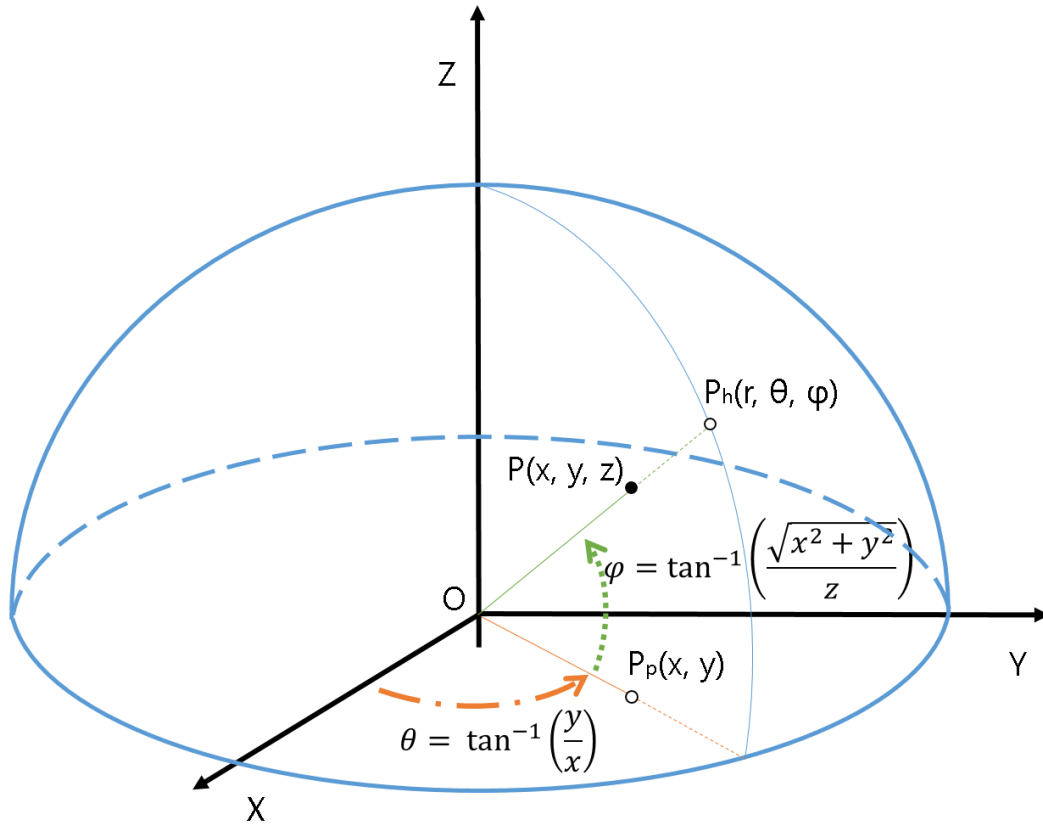


그림 5. 직교 좌표계와 구면 좌표계로 본 평행투영 구면투영의 기하학적 관계

산출의 편의를 위해, 중심 화소를 직교 좌표계의 원점 O에 둔다. 어떤 화소 pixel(i,j)가 구름일 때, 구름 화소의 수평, 수직적 위치인 x와 y는 다음과 같이 계산된다.

$$x = \text{Resolution}_{\text{Pixel}, x} \times (i \pm 0.5) \quad (7)$$

$$y = \text{Resolution}_{\text{Pixel}, y} \times (j \pm 0.5) \quad (8)$$

이때 방위각은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (9)$$

입체각의 계산을 위해 필요한 CBH는 z의 값이다. 본 알고리즘에서의 z는 계절적인 변동성을 지니는 값으로, 2 km에서 4 km 사이의 값을 가진다(알고리즘에 10km로 고정). 현재 천리안위성 2A호에서 운저고도를 생산하지 않고 있으므로 향후 운저고도를

산출하여 적용하면 좀 더 정확한 지상운량을 산출할 것으로 보고있다.

$$z = \text{Cloud Bottom Height} \quad (10)$$

화소의 위치 값, x, y, z를 이용하면 다음과 같이 입체각을 계산할 수 있다.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z} \right) \quad (11)$$

구해진 입체각과 방위각의 범위에 대해 반구 표면 적분을 진행하여 구름영역의 값을, 전체 반구에 대한 적분으로 관측하늘영역의 값을 얻을 수 있다. 구름영역을 하늘영역으로 나누어 지상운량을 계산한다. 식은 다음과 같다.

$$\text{Cloud area} = \text{Radius}_{\text{FOV}}^2 \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \cos \varphi \, d\varphi \, d\theta \quad (12)$$

$$\text{Sky area} = \text{Radius}_{\text{FOV}}^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \, d\varphi \, d\theta \quad (13)$$

$$\text{Cloud Amount} = \frac{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \int_{\varphi_{\min}}^{\varphi_{\max}} \cos \varphi \, d\varphi \, d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \, d\varphi \, d\theta} \quad (14)$$

추가적으로 맨눈으로도 구분하기 힘든 상층운, 조각 구름의 경우 불확실성한 값을 산출할 경우가 있어 Method 2에서 사용하는 구름 방출률 방법을 사용해서 최종 보정을 한다.

Method 2은 권운, 구름의 가장자리, 조각구름인 경우, 구름탐지자료가 과탐지 된 경우 효과를 크게 발휘한다. 구름의 개략적인 정보를 제공하는 구름 방출률 자료를 각 화소에 곱하여 그 값을 평균하여 값을 얻는다. 계산 식은 다음과 같다.

$$\text{ECF} = \frac{\sum N(\text{Pixel}_{\text{FOV, cloudy}} \times \text{Pixel}_{\text{FOV, Emissivity}})}{N(\text{Pixel}_{\text{FOV}})} \quad (15)$$

2.5.3 위성운량의 산출

산출 영역 내 전체 화소의 수로 관측하늘영역을, 구름 화소의 수를 세어 구름

영역의 값을 얻을 수 있다. 다음의 수식으로 계산 가능하다.

$$\text{Cloud area} = N(\text{Pixel}_{\text{FOV, cloudy}}) \quad (16)$$

$$\text{Sky area} = N(\text{Pixel}_{\text{FOV}}) \quad (17)$$

$$\text{Cloud Fraction} = \frac{N(\text{Pixel}_{\text{FOV, cloudy}})}{N(\text{Pixel}_{\text{FOV}})} \quad (18)$$

2.6. 산출물

출력자료는 입력자료와 마찬가지로 미리 정해진 옵션에 따라 전구 (Full Disk, FD), 혹은 동아시아 영역 (Extended Local Area, ELA)에 대해 산출된다.

2.6.1 지상운량 (Cloud Amount, CA)

Method 1 방법을 이용해 생산한 지상운량은 구름입자의 물리적성질에 따라 각기 다른 구름방출률을 이용해 보정함으로써 권운, 구름의 가장자리, 조각구름에서도 정확도 높은 지상운량 생산한다. 지상 운량은 0 - 1 까지의 값을 가진다. 0 일 경우 구름 없음을 의미하는 목측운량의 0, 위성운량의 0의 값과 같다. 또한, 지상운량이 1인 경우는 완전히 구름으로 덮인 값인 목측 운량의 10(혹은 8 Okta), 위성운량의 100에 해당된다. 값은 화소 단위로 생산되나, 위성관측영역의 가장자리는 산출 방법의 특성 상 산출하지 않는다. 단위는 없으며, 무차원이다.

2.6.2 위성운량 (Cloud Fraction, CF)

위성운량은 0 - 100 까지의 값을 가진다. 지상운량과 같이 화소 단위로 생산되나, 위성관측영역의 가장자리는 산출 방법의 특성 상 산출하지 않는다. 단위는 %, 무차원이다.

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

3.1.1 모의 입력자료

운량 생산을 위하여 모의자료로서 천리안위성 2A호 AMI 자료를 사용하였으며, 구름 유무 판단을 위한 구름탐지와 구름방출률 정보 역시 같은 위성자료로 산출된 자료를 사용하였다. 운량은 기하학 정보를 바탕으로 하여 구름의 물리적성질을 반영해 실황과 유사하게 산출하였다.

3.1.2 검증자료

운량 알고리즘의 목표는 지상운량에 가까운 구름 산출물이다. 따라서 본 알고리즘 검증에 이용한 자료는 현재 자동화로 히마와리 기계학습 운량값을 목적운량 값으로 사용하고 있다. 이중 유인관측소 23개 지점에서만 목적운량 값을 관측자가 보정해 기입한다. 본 알고리즘 정확성을 위해 유인관측소 지점으로 검증하였다.

3.2 검증 방법

검증자료와 모의입력자료의 시공간일치를 진행한다. 위성 자료는 UTC로, 관측소 자료는 KST 시간대이기에 9시간(UTC+9)의 시간차를 고려한다. 목적운량은 시간 자료이므로, 검증은 시간 단위로 진행된다. 또한, 목적운량의 신뢰도를 보장할 수 없는 저녁 시간 (지역 시간으로 오전 9시 이전과 오후 7시 이후, 10:10UTC - 23:50UTC)은 검증에서 제외한다. 공간 일치는 제공되는 관측소와 위성 자료의 위도 및 경도를 이용한다. 공간 일치는 각각의 관측소 값에 대해 위경도 차이 값이 최소가 되는 화소를 대응 값으로 하여 1:1 로 비교한다.

검증 기간은 2021년 4월부터 2021년 11월까지, 8개월에 대해 검증을 진행하였다. 산출물의 목표 정확도는 아래 표 4.와 같다.

표 3. 운량 알고리즘 목표정확도

Required accuracy
Bias = 10 % (1할)
RMSE = 3
Correlation = 0.7

3.3 검증 결과

알고리즘 정확도 검증을 위해 정성적으로는 히마와리 기계학습 운량 자료, 정량적으로는 유인관측소 자료 값을 이용해 8개월치 자료를 분석하였다. 정성적 분석

결과 대체적으로 히마와리 기계학습 운량과 유사 하지만, 미세먼지, 적설이 존재할 때 기계학습 운량보다 높은 정확도를 가진다. 두 위성 모두 조각구름을 과하게 잡는 부분이 있었으며, 천리안위성 2A호는 문제점을 해결해 정확도 높은 정보를 가진 산출물을 생산하게 된다. 정확도 면에서 자체 선정한 목표정확도에 도달하진 않지만 개선 시점 기준으로 개선 전(20년 4~11월: 0.79(Correlation), 1.09(Bias), 2.72(RMSE), $PC \pm 2$ 73.55%) 알고리즘보다 개선 후(21년 4~11월: 0.84(Correlation), -0.37(Bias), 2.23(RMSE), $PC \pm 2$ 78.63%)알고리즘이 개선된 것으로 보여졌다. 21년 4~11월 월별 검증 결과 분석을 위해 표5로 작성하였다. 구름이 갑작스럽게 발생하는 계절인 6~8월의 경우 상관관계수가 평균보다 낮고 RMSE, Bias가 높은 것으로 보여졌다. 시간대별 검증 스코어를 보기 위해 그림 7과 같이 나타냈으며, 검증 스코어 결과 RMSE(2.2), R(0.84), Bias(-0.35) 값을 가진다. 노란색 음영 부분은 0.8 이하의 상관관계 값을 가진 시간으로, 해가 지는 시기이다. 그림에서 표현은 안되었지만 해가 뜨는 시간대에도 비슷한 값을 나타낸다. 이는 여명/황혼기 시간대 구름 불연속으로 문제로 이처럼 낮은 정확도를 가짐을 알 수 있다.

	Cloud Amount					
	PC(%)	PC±1(%)	PC±2(%)	R	Bias	RMSE
2021.4.	43.90	69.12	82.38	0.88	-0.59	2.08
2021.5.	40.95	69.00	82.62	0.87	-0.33	2.11
2021.6.	27.02	56.47	75.53	0.79	-0.50	2.36
2021.7.	21.69	52.84	71.56	0.73	-0.61	2.47
2021.8.	27.97	60.95	78.22	0.75	-0.26	2.25
2021.9.	29.17	62.73	79.18	0.82	-0.32	2.19
2021.10.	42.44	66.59	80.93	0.87	-0.25	2.11
2021.11.	37.86	63.5	79.06	0.84	-0.04	2.23

표 4. 월별 지상운량의 검증 결과: 목측운량에 대해

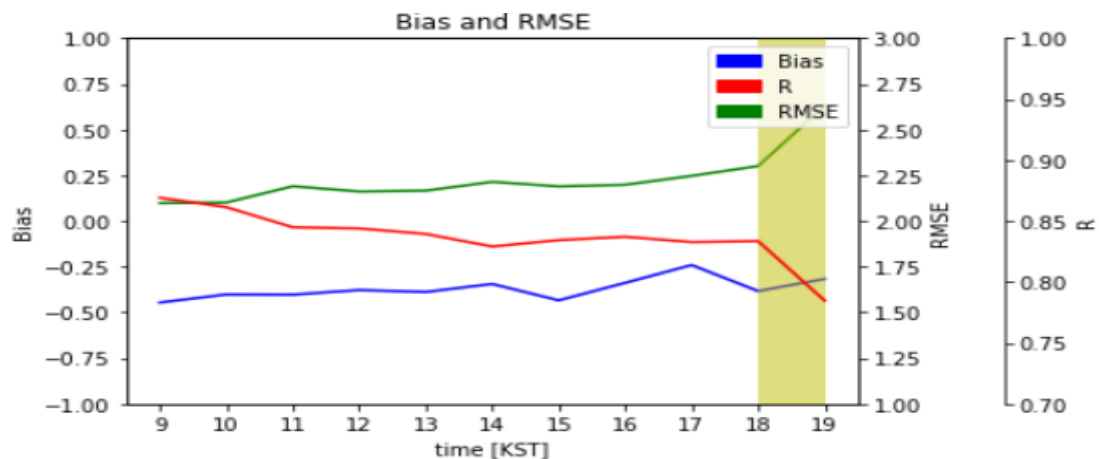


그림 7. 2021년 4월~11월 주간 시간대별 RMSE, R, Bias 검증 분석

그림 8은 실제 구름 영역에서 두 위성이 어떻게 표현되고 있는지를 보기 위한 그림이다. 두 위성 모두 대체적으로 실황에 맞게 표현이 되고 있으나, 조각구름, 적설, 에어로졸(황사, 미세먼지)에서 천리안위성 2A호 지상운량이 히마와리 기계학습 지상운량 보다 좋은 성능을 나타냈다. 또한, 히마와리 지상운량은 구름이 없는 지역 또는 조각 구름을 너무 과하게 표현하는 단점이 있지만 대체적으로 구름의 양을 잘 표현하는 반면, 천리안위성 2A호 지상운량은 특히 상층운이 얇게 존재할 때 구름의 양을 과다하게 표현하는 경향이 있는 것으로 보여졌다.

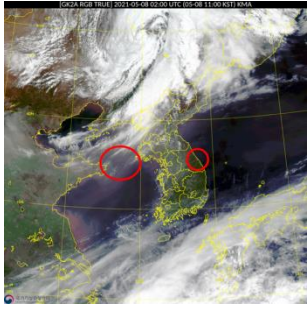
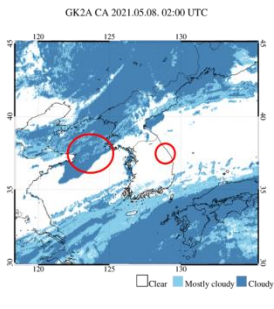
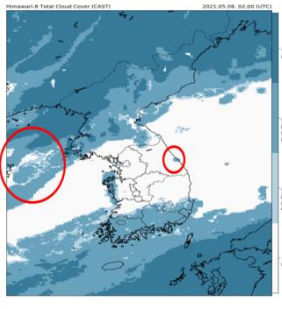
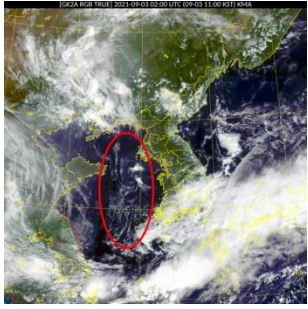
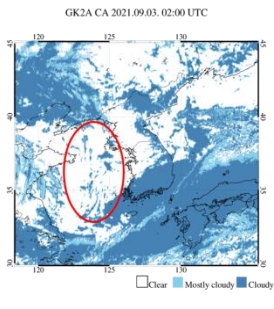
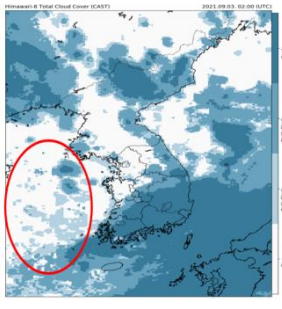
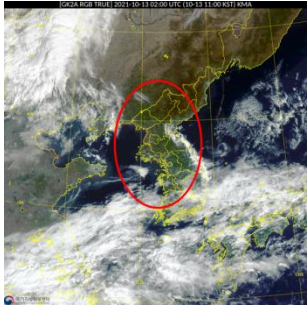
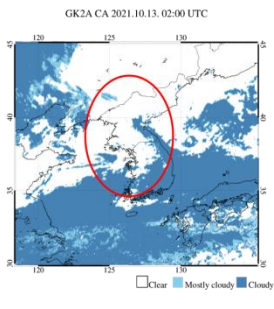
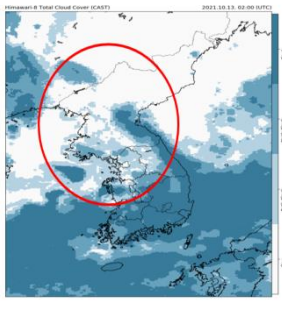
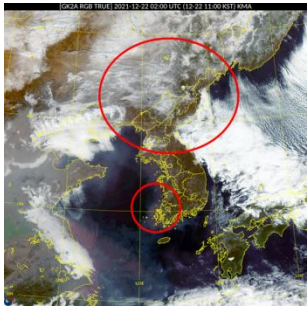
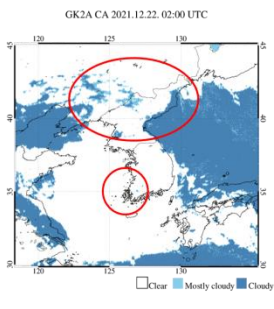
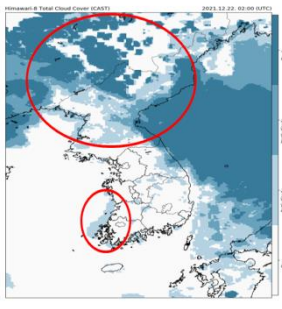
	RGB 천연색	지상운량(GK-2A)	기계학습운량(히마와리)
2021.5.8. 11:00KST			
2021.9.3. 11:00KST			
2021.10.13. 11:00KST			
2021.12.22. 11:00KST			

그림 8. 천리안위성 2A호 및 히마와리 기계학습 운량 비교

그림 9은 위에서부터 지상관측소 및 천리안위성 2A호 지상운량 비교한 밀도분포도, 성공률(PC) 그림으로 월별 검증 값이 높은 봄(4월), 낮은 여름(7월) 계절을 선택해 분석하였다. 4월의 경우 지상관측소와 1:1 대응하지만 7월의 경우 위성이 지상관측소에 비해 과소모의 형태를 보인다. 지상관측소가 6~8의 값일 때 위성은 3~5, 지상관측소 1~4 값일 때 위성은 청천으로 나타낸다. 이는 구름 가장자리, 옅은 상층운일 때 위성 지상운량은 청천으로 판단해 지상관측소보다 과소모의 된 것으로 분석된다.

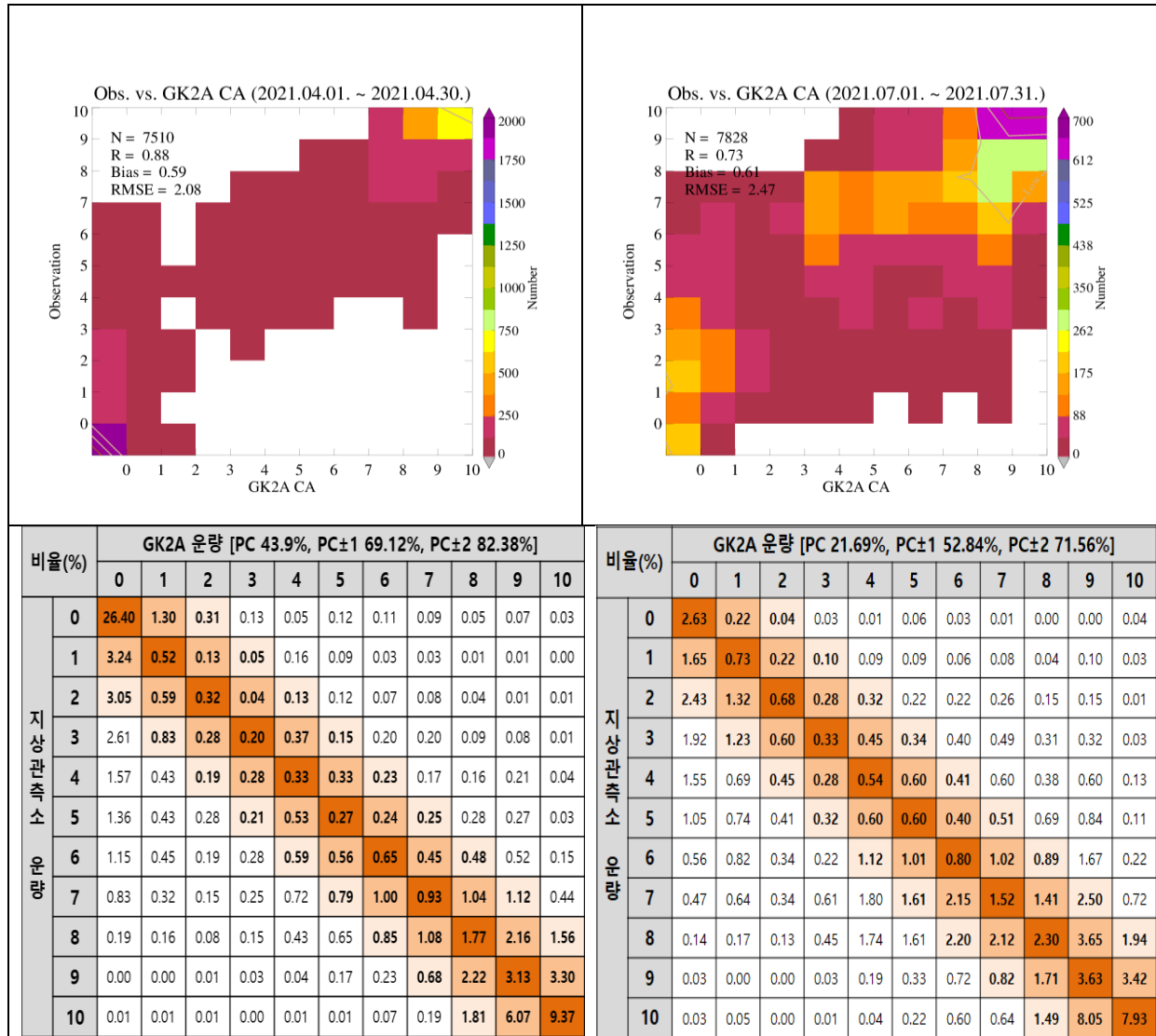


그림 9. 2021년 4월, 7월 지상운량 확률밀도분포도 및 PC

비슷한 효과는 일주 분석을 통해 확인할 수 있다. 같은 시기, 서울 관측소(108)에 대해 일주 분석을 실시한 경우, 그림 9와 같다. 5월은 밤 시간 동안 위성관측과 지상관측 값의 차이가 다소 보이나, 전반적으로 잘 맞으며, 위성운량이 목측운량에 비해 과소모의된 경우, 혹은 지상운량이 목측운량보다 과대모의된 경우에도 지상운량이 목측운량에 비해 지상운량에 가까운 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면, 1월의

경우, 목측운량은 구름이 없다고 나오나, 위성운량과 지상운량은 구름이 있다고 보고한 경우들을 확인할 수 있다. 이 시기, 서울에는 영하권이며 눈이 왔다는 기록이 있어, 겨울 기간 구름 탐지가 낮은 IR 온도, 역전층, 눈 등의 지표 상태에 의해 정확도가 다소 떨어지는 것이 원인으로 판단된다. 또한, 전체적으로 지상운량이 위성운량에 대해 과대모의되는 경향을 보인다. 이는 알고리즘의 기하학적인 변환에서 오는 특징으로 보인다. 현재 알고리즘의 CBH는 2 km에서 4 km 사이의 값으로, 중·저층 구름을 대표하는 높이이다. 보다 다양한 CBH를 고려함으로써 과대모의되는 경향을 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

위성운량과 지상운량은 그 정의 상 산출반경의 설정이 중요하다. 현업 운영 시 최적의 산출 반경을 먼저 설정하여야 한다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

본 알고리즘은 선행산출물로서 구름탐지자료와 구름 방출률 자료를 요구한다. 또한, 본 알고리즘은 운형 알고리즘(Cloud Type Algorithm)과 묶여 구름분석알고리즘(Cloud Analysis Algorithm)이라는 큰 단위로 움직인다. 운형 알고리즘의 경우 구름탐지자료와 운정 기압, 그리고 구름광학두께(Cloud Optical Thickness, COT)를 입력자료로 활용한다. 따라서, 구름탐지자료를 위한 구름탐지알고리즘과 운정 기압 및 구름 방출률 자료 산출을 위한 운정 산출물 알고리즘, 그리고, 구름광학두께 산출을 위한 DCOEW 알고리즘 이후에 작동해야 한다.

4.3 품질 평가 및 진단

각 산출물마다 품질 정보를 0 - 5까지의 숫자로 나타내었다. 산출물 별 품질정보는 표에 정리하였다. 위성운량은 0에서 4까지의 값을, 지상운량은 0에서 5까지의 값을 가지며 0부터 3까지의 품질정보는 두 산출물에서 공유된다.

산출이 잘 이루어졌을 경우는 0, 우주 영역에 대해서는 1의 값을, 또, 입력자료로서 쓰이는 구름탐지자료가 산출 창에 총 구름 화소의 50 % 이상일 경우에는 'Probably cloud'의 영향으로 과대모의될 가능성이 있음의 의미로 2번의 값을 가진다. 산출 창에 의해 생기는 가장자리의 불확실성은 3번 값으로 표시된다. 5 번의 값은 구름탐지의 가시영역에 의해 발생하는 오류, 예로 밤 낮의 전환과 Sun glint의 영향에 대한 정보를 제공한다. 마지막으로, 알고리즘 내 산출 오류의 경우는 '산출 실패를 의미하도록 위성운량에서는 4 번 값을 준다.

지상운량은 위성운량과 달리, 보조자료를 활용한다. 따라서 보조 자료에 의해 산출이 제대로 이루어지지 않을 가능성 또한 존재한다. 지상운량의 4번 산출정보는

보조자료로 인한 오류에 대해 나타내어지며, 5번 산출정보 값은 알고리즘 내 산출실패를 표현하도록 값을 설정하였다. 지상운량의 경우 구름탐지의 가시영역정보 영향은 6 번의 값으로 처리하였다.

표 5. 산출물 품질 정보표

Variable			Attribute		
Name	Type	shape	Name	Value	Type
CF_DQF	byte	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud fraction quality flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	255	byte
			valid_min	0	byte
			valid_max	4	byte
			units	—	string
			flag_meanings	0: Valid, good quality converged retrieval 1: Invalid pixel due to space view 2: Invalid due to cloud mask being probably cloud 3: Invalid due to window size 4: Failed retrieval 5: Due to CLD errors form using visible channels (i.e., sun glint, day/night transition)	string
CA_DQF	byte	xdim, ydim	long_name	AMI L2 cloud amount quality flag	string
			_Unsigned	TRUE	string
			_FillValue	255	byte
			valid_min	0	byte
			valid_max	5	byte
			units	—	string
			flag_meanings	0: Valid, good quality converged retrieval 1: Invalid pixel due to space view 2: Invalid due to cloud mask being probably cloud 3: Invalid due to window size 4: Invalid due to ancillary 5: Failed retrieval 6: Due to CLD errors form using visible channels (i.e., sun glint, day/night transition)	string

4.4 예외사항 처리

알고리즘은 ‘구름’ 인 화소를 세도록 작동한다. 따라서, 구름의 값으로 주는 ‘0’ 이 아닐 경우, 모두 구름이 없는 창천 화소로서 처리한다. 이때 운량은 산출되지 않는다. 만일 예외적인 상황이 발생하여 구름의 값을 0 % 미만 100 % 이상이 나올 경우, 산출물은 결측값으로, 품질정보는 산출실패의 값으로 처리한다.

4.4 검증 알고리즘

검증 알고리즘은 지상의 목측자료를 대상으로 한다. 목측 운량 자료를 얻어, 시공간일치를 진행한 뒤 각각의 값에 대해 검증을 진행한다. 이때, 목측운량자료가 시간 단위로 산출되기에, 검증은 시간단위로 진행된다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

알고리즘은 동북아시아에서 좋은 성능을 가짐이 확인되었다. 다만, 이외의 지역에서 지상과의 검증이 이루어지지 않은 점, 타 위성운량자료와의 상호 비교가 이루어지지 않은 점은 알고리즘 성능 평가의 한계로 존재한다. 이는 추후 타 위성자료와의 검증을 통해 확인할 필요성이 있다. 또한, 본 알고리즘은 입력자료에 따라 최적산출반경을 조절해야 할 필요성이 존재한다.

5.2 예상 센서 성능

알고리즘의 산출물 중 위성운량과 지상운량은 입력자료인 구름탐지자료의 성능에서 자유롭기 어렵다. 동북아시아의 겨울철은 구름탐지가 역전 층, IR 온도 변화로 인한 문턱값 실험에 영향을 미칠 가능성, 그리고 눈 등의 지표 상태 변화로 인한 시험값의 혼란 등이 있을 수 있기에 부정확한 결과를 보고하며, 이는 본 알고리즘의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

현재 알고리즘은 평면 구름을 가정하며 진행된다. 구름의 높이에 대한 정보를 구름광학두께(Cloud Optical Thickness, COT)를 이용하여 반영하려고 했으나, 가시채널을 사용하기에 낮 시간 동안만 산출되기에, 자료의 통일성을 위해 적용하지 못하였다. 추후 IR 채널을 사용하여 주/야간 산출되는 야간구름광학두께(Nighttime Cloud Optical Thickness, NCOT)를 이용하여 구름의 중형비에 대한 정보를 추가하여 보다 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

입력 자료로 산출되는 구름탐지자료를 활용할 때, 운량 알고리즘은 한 화소 전체가 한 덩어리의 구름이라고 간주한다. 본 알고리즘에서는 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 의 해상도를 갖기에, 제일 작은 구름은 적어도 4 km^2 의 면적을 가진다는 의미가 된다. 이는 조각구름이나 구름의 가장자리를 반영하기에 어려움이 따르며, 위성운량의 과대모의의 원인이 된다. 본 알고리즘에서는 방법 2의 구름 방출률을 통해 조각구름이나 구름 가장자리에서 발생하는 과대모의를 다소 해소할 수 있을 것으로 생각한다. 추후 알고리즘의 개발에 구름 방출률 자료를 활용함으로써 보다 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단한다.

6. 참고문헌

Ahn, M. H., Seo, E. J., Chung, C. Y., Sohn, B. J., Suh, M. S. and Oh, M., Introduction to the COMS meteorological data processing system, International Symposium on Remote Sensing 2005, Jeju, Korea.

American Meteorological Society, glossary of meteorology,
http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page.

Choi, Y.-S. and C.-H. Ho, Earth and environmental remote sensing community in South Korea: A review, Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2, 66–76, 2015.

Hahn, C., W. Rossow, and S. Warren, ISCCP cloud properties associated with standard cloud types identified in individual surface observation. J. Climate, 14, 11–28, 2001.

Harshvardhan, D. A. Randall, and T. G. Corsetti, Earth radiation budget and cloudiness simulations with a general circulation model. J. Atmos. Sci., 46, 1922–1942, 1989.

Kassianov, E. I., Long, C. N. and Ovtchinnikov, M., Cloud sky cover versus cloud fraction: whole-sky simulations and observations, J. Appl. Meteor., 44, 86–98, 2005.

Ma, J., Wu, H., Wang, C., Zhang, X., Li, Z., & Wang, X. (2014). Multiyear satellite and surface observations of cloud fraction over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(12), 7655–7666.

Minnis, P., Viewing zenith angle dependence of cloudiness determined from coincident GOES EAST and GOES WEST data. J. Geophys. Res., 94, 2303–2320, 1989.

Oh, H. R., Choi, Y. S., Ho, C. H. and Ahn, M. H., Developement of sky cover retrieval algorithm for the Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) imagery, J. Korean Meteor. Soc., 42, 389–396, 2006.

Rossow, W., A. Walker, and L. Garder, Comparison of ISCCP and other cloud amounts. J. Climate, 6, 2394–2418, 1993.

Sun, B., Free, M., Yoo, H. L., Foster, M. J., Heidinger, A., & Karlsson, K. G. (2015). Variability and trends in US cloud cover: ISCCP, PATMOS-x, and CLARA-A1 compared to homogeneity-adjusted weather observations. *Journal of Climate*, 28(11), 4373–4389.