GOCI-II 산출물 ATBD 요약서

2020. 12.

한국해양과학기술원

GOCI-II ATBD 요약서 목록

No.	산출물	페이지
1	원격반사도	1
2	대기산란보정반사도	1
3	하향확산감쇄계수	5
4	세키깊이(수중가시거리)	6
5	표층해류(해류벡터)	8
6	흡광계수	12
7	후방산란계수(역산란계수)	12
8	해양전선	15
9	저염분수	19
10	해빙	25
11	엽록소농도	34
12	적조지수	35
13	어장환경지수	36
14	해양일차생산력	54
15	부유조류	56
16	용존유기물	58
17	총 부유물질 농도	59
18	해무	60
19	황사	63
20	에어로졸타입	63
21	에어로졸 광학두께	63
22	정규식생지수(NDVI)	91
23	개량식생지수(EVI)	91
24	육상알베도	91
25	육상지표반사도	108
26	토지피복도	184

1. 대기분자산란 보정 반사도 (ρ_c) 및 원격반사도(Rrs)

가. 산출물의 정의

1) 대기분자산란보정반사도

천리안 해양위성 2호는 위성은 대기상층(top-of-atmosphere: TOA)에서 화소 별 복사휘도(radiance)를 12개의 분광파장에서 관측한다. 대기분자산란보정반사도는 TOA 복사휘도를 반사도로 변환하고 거기서 대기분자산란에 의한 반사도(Rayleigh reflectance)를 빼 준 값을 의미한다.

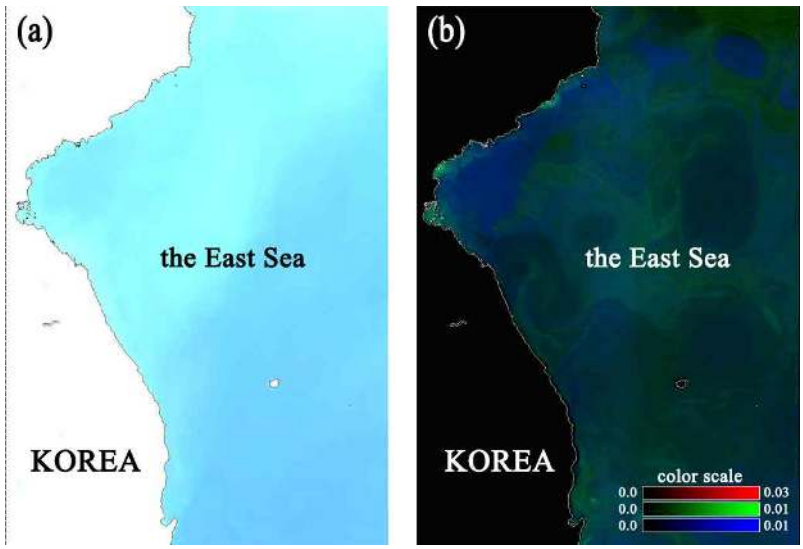
2) 해수원격반사도(remote-sensing reflectance: Rrs)

대기가 없다고 가정했을때의 해수표면 원격반사도이다. 해수원격반사도를 radiance로 변환해준 것이 정규수출광량(normalized water-leaving radiance: nLw)이며 Rrs에서 태양상수를 곱해주는 과정을 통해 nLw로 쉽게 변환이 가능하다. Rrs와 nLw 모두 대기보정의 산출물이지만 요즘은 Rrs가 nLw보다 해색알고리즘의 입력자료로 더 많이 활용되는 추세이다.

Rrs에 대한 좀 더 자세한 내용은 Ocean Optics Webbook의 다음 링크를 참고 (Normalized Reflectances :: Ocean Optics Web Book (oceanopticsbook.info)

나. 알고리즘 요약

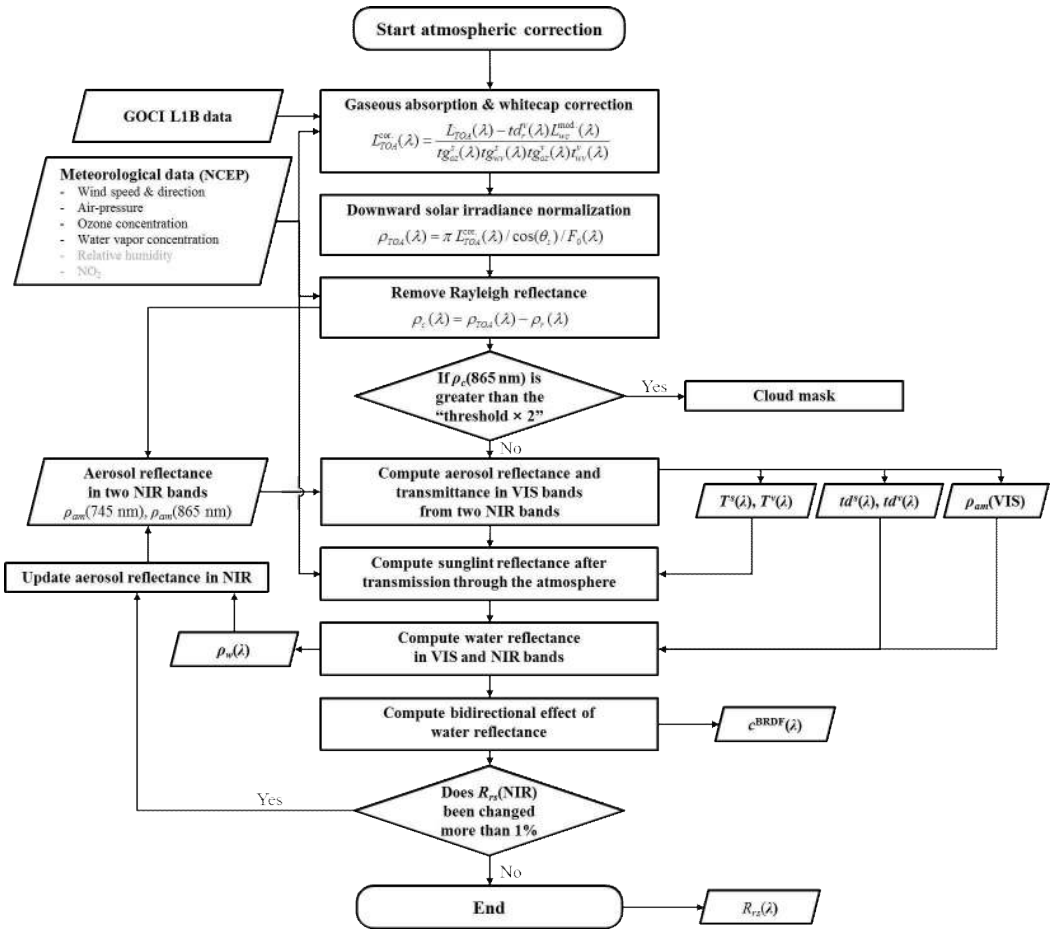
대기보정은 TOA radiance에서 대기에서 발생하는 반사도 신호값들에 의한 영향을 제거해주고 광원과 위성의 방향에 대한 영향을 보정해준 해수원격반사도(Rrs)로 변환해주는 과정을 의미한다.



대기보정 전 TOA 반사도(a), 대기보정 결과 산출된 해수반사도(b)

실제 해수반사도의 크기는 대기반사도의 10% 미만을 차지하고 있기 때문에 1%의 대기추정 오차는 10% 이상의 Rrs 추정 오차를 발생시킨다. 이런 이유로 대기보정은 최대한 많은 변수들을 고려하여 매우 정밀하고 엄격한 과정을 거쳐 수행되며, 정확한 대기보정을 위해 요구되는 센서의 보정 정확도 요구 정도도 다른 위성들보다 높은 편이다.(복사보정 요구 정확도 0.1% 이하).

대기보정의 과정은 크게 아래와 같이 나누어지며, 각각의 과정들에서 필요한 입력자료들이 서로 의존관계에 있기 때문에 반복적으로 알고리즘을 적용해 최적화된 값을 구해낸다 (optimization).



간략화한 대기보정 알고리즘 흐름도

1) TOA 복사휘도→반사도 변환

태양의 위치와 지구-태양의 거리를 고려해서 계산된다.

2) 가스흡광 보정

대기 중 이산화질소, 오존, 수증기에 의한 흡광의 영향을 미리 보정해주는 과정이다. 가스에 의한 흡광 모델은 복사전달이론을 기반으로 하고 있으며, 흡광성 가스의 농도 정보로 ECMWF 기상자료를 이용한다.

3) 백파 보정

바람에 의해 발생하는 해수표면의 백파(하얀 거품) 반사도를 미리 제거해 주는 과정이다. 이를 위해 ECMWF 바람장 기상자료를 사용한다.

4) 대기분자산란반사도 보정

대기분자산란반사도(Rayleigh reflectance)를 추정하기 위해서 vector기반의 복사전달 이론이 사용된다. 해양의 경우 위성-해수표면 사이에 존재하는 대기분자입자들의 반사도 뿐 아니라 해수표면에서 Fresnel 반사된 대기의 반사도 까지 모두 고려해서 제거해준다. 대기분자산란반사도 보정을 위한 오차 허용범위는 1% 이내이다. 이를 위해 태양과 위성의 기하각 정보, 대기압, 바람장(해수표면 Fresnel 반사 추정), 위도(중력의 영향) 정보를 필요로 한다. 대기압과 바람장 자료는 ECMWF 기상장 정보를 이용한다.

5) 에어로졸 반사도 보정

에어로졸의 보정을 위해서는 각 화소별로 에어로졸 종류와 농도를 추정해야 한다. 복사전달이론을 기반으로 에어로졸의 농도와 종류를 추정하게 되며, 복사전달이론은 forward 모델이기 때문에 정확한 backward모델을 만드는 것이 에어로졸 보정 방법의 핵심이다. 에어로졸 농도와 종류 추정을 위해서 GOCI-II의 745, 865 nm밴드를 이용하며, 산출된 에어로졸 농도와 종류를 입력으로 하는 복사전달이론을 적용하여 모든 가시광 파장대 에어로졸 반사도를 계산해 낸다. 에어로졸 반사도 보정을 위한 입력자료로는 두 NIR파장 (745, 865 nm) 반사도와 태양과 위성의 기하각 정보가 필요하다.
자세한 에어로졸 보정 방법은 다음 문서를 참고,
Ahn, J. H., Park, Y. J., Kim, W., & Lee, B. (2016). Simple aerosol correction technique based on the spectral relationships of the aerosol multiple-scattering reflectances for atmospheric correction over the oceans. Optics express, 24(26), 29659-29669.

6) 대기확산투과도 보정

빛이 대기를 투과하는 과정에서 산란에 의해 감소되는 정도를 보정해주는 과정이다. 산란에 의한 대기투과 정도는 광자의 방향에도 크게 영향을 받기 때문에, 대기의 종류와 농도 뿐 아니라 해수반사의 BRDF 특성까지 고려한 모델이 필요하다.

7) Sunglint 보정

대기-해수의 밀도차이에 의해서 해수표면에서 Fresnel 반사된 태양의 직접반사광을 보정해주는 과정이다. 보정모델은 Cox & Munk 이론을 기반으로 하고 있으며 이를 위해 바람장, 대기의 종류 및 농도(대기보정 과정에서 산출된 값) 정보를 필요로 한다. 입력 바람장 정보로는 ECMWF 기상자료를 활용한다.

8) 탁수에 의한 영향 보정

에어로졸의 종류와 농도 추정을 위해 두 NIR 파장대 (745, 865 nm)를 사용하는데, NIR파장에서 해수의 탁도가 높은 경우 해수 중 부유입자의 강한 역산란 지수로 인해 탁수의 반사도가 에어로졸 반사도로 잘못 판단되는 경우가 발생한다. 이런 경우 에어로졸 반사도를 과대추정하여 해수의 반사도를 과소추정하는 경우가 발생하는데, 이를 보정해주는 과정이다.
자세한 보정 방법은 다음 문서를 참고,
Ahn, J. H., & Park, Y. J. (2020). Estimating Water Reflectance at Near-Infrared Wavelengths for Turbid Water Atmospheric Correction: A Preliminary Study for GOCI-II. Remote Sensing, 12(22), 3791.

9) BRDF 보정

Rrs는 광원과 센서(위성)의 방향, 표층 바람장, 해수의 광특성에 따라 그 값이 달라질 수 있기 때문에 방향성(BRDF)에 대한 보정을 추가로 해주어야 한다. 방향성(BRDF)보정은 태양과 위성의 천정각이 0°일때의 값으로 보정해주는 것이 일반적이다. 표층 바람장 정보는 ECMWF 자료를 이용하며, 해수의 광특성 자료는 대기보정 중간 산출물 자료를 활용한다.

다. 산출물의 그림 예시

아래 그림은 동해를 대상으로 한 대기보정 전/후의 RGB (660, 555, 443 nm) 합성 영상 예시이다. 좌측 영상은 모든 대기신호가 포함된 TOA 반사도 영상, 가운데 영상은 대기분자 산란반사도 보정 영상, 우측영상은 원격반사도 영상이다.



대기보정 전/후 영상 예시

2. 하향확산감쇄계수

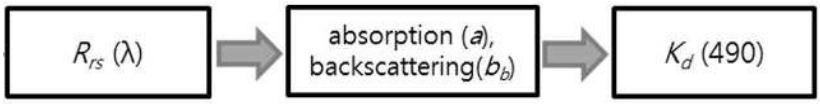
가. 산출물 정의

하향확산감쇄계수(Kd, m^{-1}): 수심이 증가함에 따라 하향복사조도가 흡광 또는 산란되어 감쇠되는 정도 지수에 대한 함수로 표현한 값이다. Kd 알고리즘으로 해수 구성 성분 및 농도에 따라 Kd 스펙트럼 및 값의 크기가 달라짐을 통해 깊이에 따른 해수 광환경의 변화를 알 수 있고, 해수의 투명도나 수중가시거리등을 산출하는데도 도움이 된다.

나. 알고리즘 요약

(1) 입력 자료: 490nm의 흡광계수와 후방산란계수를 사용하며 해당 위치의 태양천정각(θ_a)이 부가적으로 필요하다. 원격반사도(Rrs)로부터 정확도 높은 흡광 계수 및 후방산란계수가 선행적으로 계산되어야 높은 정확도의 Kd 알고리즘을 얻을 수 있다.

(2) Kd(490)을 도출하기 위한 기본적인 알고리즘 흐름은 아래 그림과 같다. Rrs를 사용하여 흡광계수(a), 후방산란계수(bb)를 계산하고 이를 통해 최종적으로 490nm의 Kd값을 도출한다.

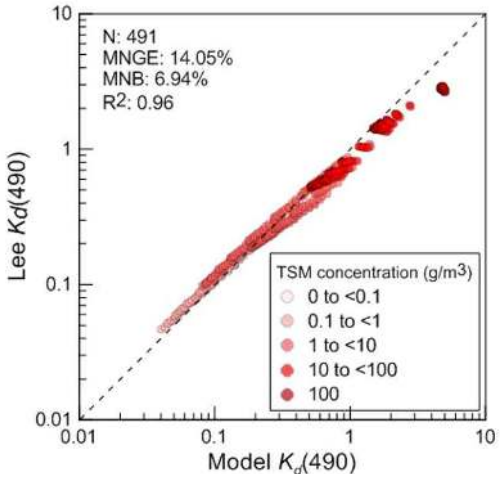


(3) Kd 산출식은 Hydrolight simulation을 기반으로 구축되었으며, 아래 수식과 같이 흡광계수(a)와 후방산란계수(bb)에 대한 수식으로 표현된다.

$$K_d = (1 + 0.005\theta_a)a + 4.18(1 - 0.52e^{-10.8a})b_b$$

다. 검증 결과

시뮬레이션 자료와의 검증 결과는 아래 그림과 같으며, 정확도는 약 86%로 도출되었다. 탁도가 높아짐에 따라 과소추정되는 경향을 보였다.



3. 세키깊이 (수중가시거리)

가. 산출물 정의

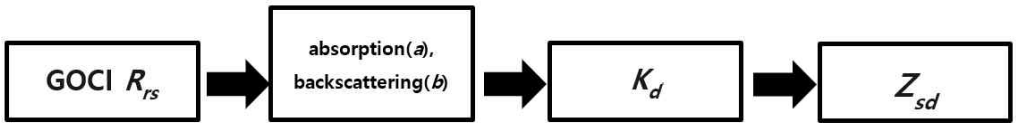
수중가시거리(세키깊이, Secchi disk depth: Zsd, m): 수중에서 물체 식별이 가능한 거리. Secchi disk를 수면 아래 연직 방향으로 하강하여 측정되는 거리로서 수중가시거리를 나타내는 물리량 중 하나이다.

나. 알고리즘 요약

(1) Zsd 알고리즘은 해수 중의 유기, 무기 입자 및 용존유기물의 농도에 따라 달라진다. Zsd를 계산하는 여러 가지 방법 중에서 본 알고리즘은 하향확산감쇠계수(Kd)를 이용하여 조출하는 방법을 사용한다. Zsd는 해수중에서 빛이 확산 감쇄되는 정도를 나타내는 Kd(λ)와 음의 상관관계를 가지며 대부분의 가시거리 알고리즘은 이에 대한 함수로 표현된다. Kd(λ)은 해수 구성물질 및 농도에 따라 가시광 파장대에서 스펙트럼이 달라지며 Lee et al. (2015) 알고리즘은 최소값을 가지는 파장의 Kd(λ)를 사용하여 가시거리를 도출한다.

(2) 입력 자료: Kd

(3) 알고리즘 흐름도(Rrs: 원격반사도)



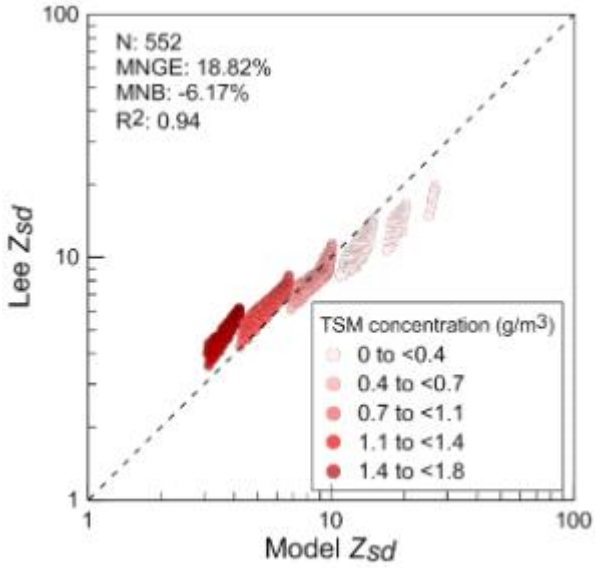
(4) 복사전달식과 visibility theory를 통해 아래 식(1)이 도출되었으며 이는 장기간 동안 수중가시거리의 기본 수식으로 사용되었다(Lee et al., 2015). 또한 Lee et al. (2015)에서 평균적인 수심에 대하여 인간의 눈이 인지하는 파장과 최소 Kd(λ)값이 1:1의 관계를 보임을 제시하였고, 이를 통해 식(2)를 도출하였다.

$$(1) \quad z_{sd} = \frac{ln\left(\frac{C_0}{C_{min}}\right)}{K_d(v) + c(v)}$$

$$(2) \quad z_{sd} = \frac{ln\left(\frac{|0.14 - {R_{rs}}^{pc}|}{C_t^r}\right)}{2.5Min(K_d(443, 490, 510, 555, 620, 660))}$$

다. 검증 결과

시뮬레이션 자료와의 검증 결과는 아래 그림과 같다. 산출 정확도가 약 81%로 도출되었으며 R-square=0.94로 높은 상관성을 보였다.

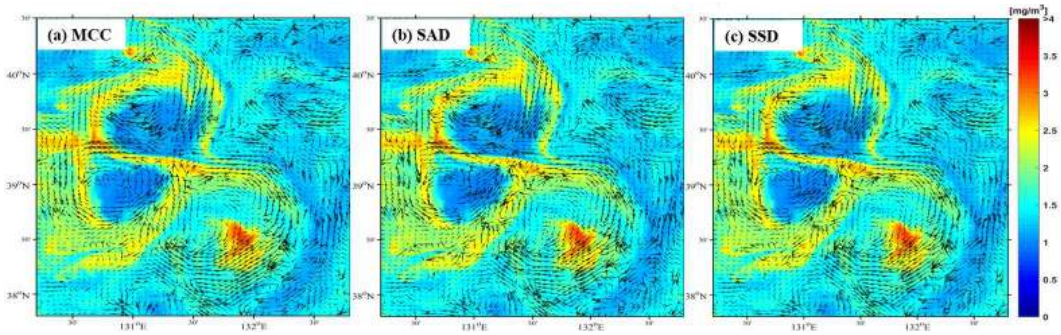


4. 표층해류(해류벡터)

가. 표층해류흐름 산출물 원형 알고리즘 개발

1) 기존 해류 산출 알고리즘 비교

형상 추적 기법을 기반으로 한 Maximum Cross Correlation (MCC) 알고리즘이 지난 수십년동안 가장 보편적인 표층 해류 산출 방법으로 사용되어 왔으나, 이를 대체할 수 있는 새로운 알고리즘으로 Sum of Absolute Differences (SAD), Sum of Square Differences (SSD) 알고리즘이 제시됨

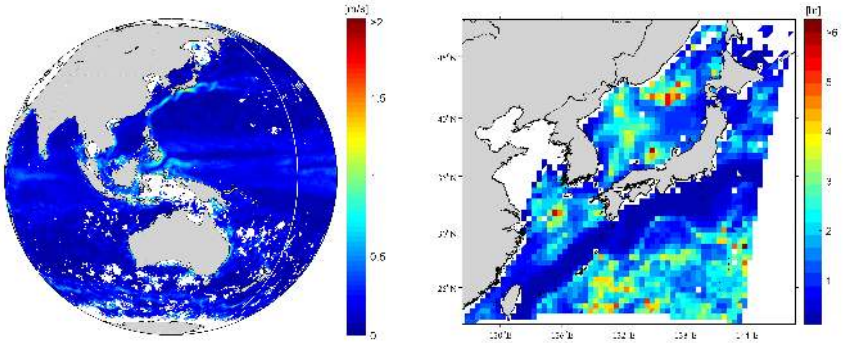


각 알고리즘(MCC, SAD, SSD)을 적용한 해류 산출 결과(2017년 5월 1일 02 UTC)

세 알고리즘을 적용하여 표층 해류장을 산출한 결과 서로 유사한 양상을 보였으며, 오차 발생 비율 역시 알고리즘에 따른 차이가 거의 나타나지 않음. 다만, 표층 해류 산출 연산에 소요되는 시간은 SAD와 SSD 알고리즘이 MCC 알고리즘에 비해 각각 10%, 13% 감소하여 표층 해류 산출에 더 유리한 측면이 있는 것으로 나타남.

2) GOCI-II 관측 해역 배경장 특성 분석

30년간의 인공위성 추적 표층 뜰개 관측자료로부터 계산한 전구 해류 평균 속도 자료를 활용하여 GOCI-II 관측 해역의 표층 해류 기후장을 분석함. 해당 기후 자료는 NOAA/AOML 에서 0.5 x 0.5 degree 격자의 월별 자료로 제공되고 있음.



전구 영역에 대한 해류의 평균 속도 분포(좌)와 GOCI 격자에서 한 픽셀을 벗어나는 데 소요되는 시간의 분포(우)

표층 해류의 속도는 해역별로 다양하게 나타나며, 0-1.5 m/s의 범위를 보임. 표층해류 기후장을 통하여 GOCI 격자상에서 하나의 화소를 이동하는데 소요되는 시간을 계산한 결과 해류의 속도가 빠른 해역(ex. 쿠로시오 해역)에서는 1시간 이내의 시간이 소요되지만, 그 외의 해류의 속도가 느린 해역에서는 소요 시간이 최대 6시간까지 증가함. 따라서 영상 간 적용되는 시간 간격이 오차의 요인이 될 수 있음.

3) 자료 전처리 및 품질관리 기법 개발

가) GOCI 해양 번수(클로로필-a) 자료 특성 분석

나) 자료 품질관리 기법 개발

4) 표층해류흐름 원형 알고리즘 개발

가) 표층 해류의 속력 분포를 고려한 template, search window size 선정

나) 영상 간 최적 시간 간격 판단 및 결정

다) 산출 결과물 품질관리 기법 개발 및 적용

5) 알고리즘 정확도 검증

가) 인공위성 추적 표층 뜰개 자료로 계산한 해류 벡터와 비교

나) RMSE 0.16 ms-1, Bias 0.02 ms-1

나. 표층해류흐름 알고리즘 최적화 및 산출과정 자동화

1) 표층해류흐름 알고리즘 수정 보완 및 최적화

가) 요구 자료처리시간 도달

(1) 자료처리시간 도달을 위한 연산 함수 수정(해류벡터 산출 10분 이내 도달)

나) subsampling 간격, 산출물 해상도 결정 최적화

(1) 표층 해류의 속력 분포를 고려한 template, search window size 최적화 (template window : 23 x 23, search window : 43 x 43)

(2) 영상 간 최적 시간 간격 결정 (△t : 2시간)

다) 실시간/준실시간 산출물 생산 설계 및 구현

(1) 실시간 표층해류 산출 알고리즘 개발 완료 및 자동화

(2) flag 정보 산출 (0: Clear, 1: Cloud mask, 2: Correlation coefficient < threshold, 4: Abnormal speed range, 8: Nearest neighbor comparison)

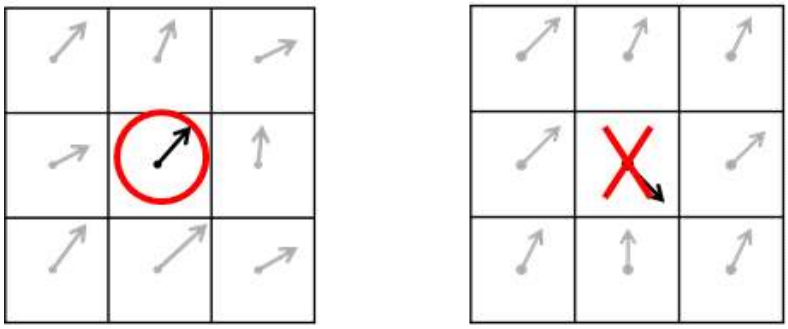
라) 해류 산출물 이상값 제거 기법 개발

(1) Correlation Test : 변위 벡터 이동 영역 사이의 상관계수 > 임계값(0.4)

(2) 최근접 비교 방식(Nearest-neighbor comparisons) : 표층 해류는 주변 해류와 속

력·방향성면에서 어느 정도의 일관성을 유지한다는 특성을 이용

(3) 3x3 window 내 중심에 위치한 해류의 속력과 방향을 기준으로 주변 해류의 속력이 0.5–2배 범위에 포함되며 방향 차이가 50° 미만의 값을 갖는 경우에만 통과



최근접 비교 방식의 원리

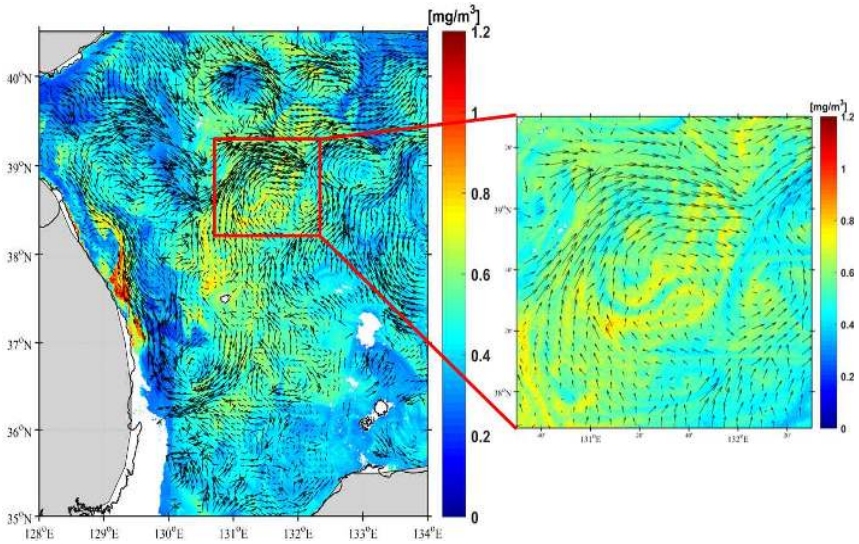
2) 알고리즘 정확도 향상 기술 개선

가) 최적 표층해류흐름 산출 알고리즘 확정 및 코드화

(1) 형상 추적 기법을 기반으로 한 Maximum Cross Correlation (MCC) 알고리즘 활용 (Python 내장 연산 함수 사용으로 연산 시간 단축)

(2) GOPF 코드 적용으로 입출력 함수 통일

(3) Python 코드 변환 완료



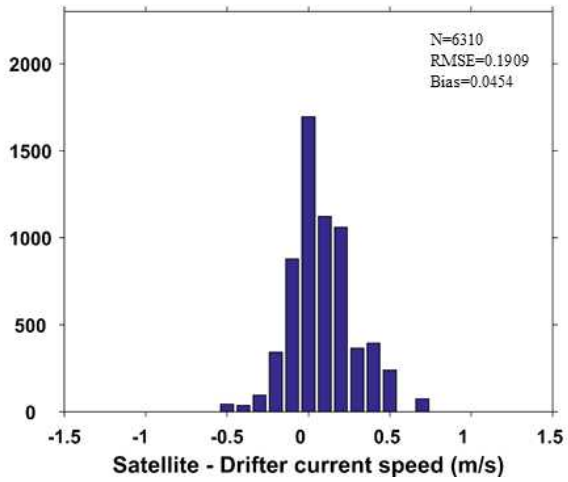
표층 해류 산출 결과

나) 표층 해류 알고리즘 정확도 검증

(1) 정확도 검증 자료: 표층 뜰개 (drifter) 자료 활용

(2) Drifter current에 대한 품질 관리 적용

(3) 목표 정확도 : Speed RMSE 0.5 m/s, Bias 0.3 m/s 이내 달성



표층 뜰개 자료로 계산한 표층 해류의 속도와 위성 산출 표층해류흐름 속도의 크기 비교

5. 흡광계수(a) 및 후방산란계수(bb): 고유광특성(IOP) 알고리즘

가. 산출물 정의

1) 고유광특성(inherent optical properties: IOP, m^{-1})

해수 고유의 특성을 나타내는 변수로써 빛의 흡수/산란/감쇠 정도를 나타내며 흡광계수, 후방산란계수 등이 있다. 외부의 광환경에 독립적이고 해수 성분의 농도에 따라 달라진다. 해수 성분에 따른 원격반사도(Rrs) 스펙트럼 형성 원리와 성분 별 해수 광 환경 기여도 파악 등을 위해 분석이 필요한 변수이다.

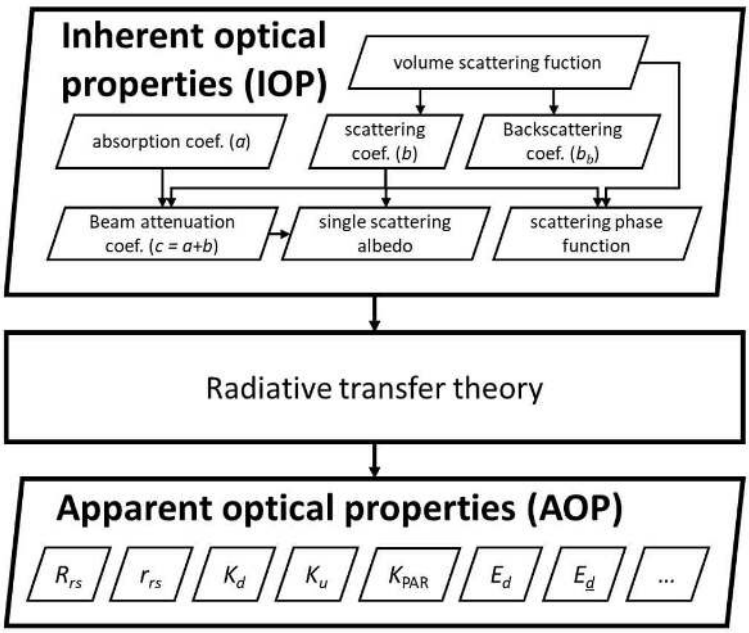
2) 흡광계수(a):

빛이 단위거리의 해수를 통과하면서 물, 입자성 및 용존성 물질에 의해 흡수되는 정도를 지수함수로 정의

3) 후방산란계수(bb):

빛이 단위거리의 해수를 통과하면서 물, 입자성 및 용존성 물질에 의해 후방(빛이 들어온 방향)으로 산란되는 정도를 지수함수로 정의

외형적 광특성(apparent optical properties: AOP)은 외부의 광 환경에 의해 변화할 수 있는 광특성이다. AOP에는 원격탐사를 통해 획득되는 해수원격반사도(Rrs)와 Kd490 등이 있다. IOP와 AOP의 관계는 아래 그림과 같다.



나. 알고리즘 요약

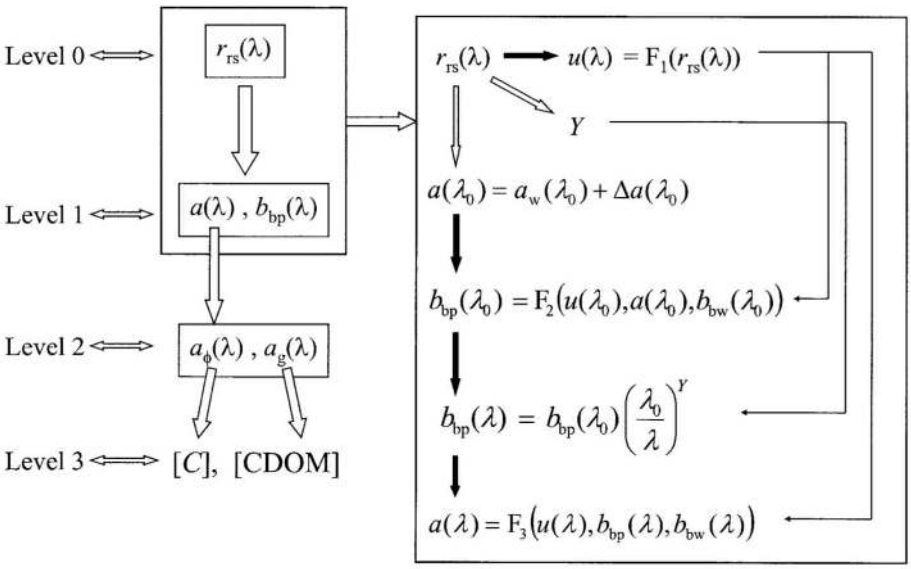
(1) IOP 알고리즘: GOCI-II 스펙트럼 대역의 흡수 및 역산란계수를 산출하는 알고리즘. Zhongping Lee(2014)의 Quasi-analytical algorithm(QAA) IOP 알고리즘을 기반으로 개발되었으며, GOCI-II의 4개 분광밴드(443, 490, 555, 660 nm)를 사용한다.

(2) AOP는 아래 식과 같이 IOP와 외부 광환경(태양 위치, 관측자 위치, 수심, 해수 표면 거칠기 등의 변수)에 의해 결정된다.

$$f : \frac{b_b}{a + b_b} \mapsto R_{rs}$$

a: 흡광계수, b_b: 역산란계수

(3) QAA IOP 알고리즘 흐름도(Lee et al., 2002)



(4) 반분석적 IOP 알고리즘은 첫 단계로 아래 식과 같이 Rrs를 해수표면아래 원격반사도(r_{rs}) 및 IOP에 관한 모델로 바꿔주는 과정을 거친다 (Lee et al., 2002).

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{(0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda))},$$

$$r_{rs}(\lambda) = g_0 u(\lambda) + g_1[u(\lambda)]^2, \quad g_0 = 0.0895,\ g_1 = 0.1247,$$

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4g_1 * r_{rs}}}{2g_1}.$$

여기서 $u = \frac{b_b}{a + b_b}$.

(5) 이후 경험적 방법으로 a(555 nm)를 산출하고 산출된 a(555 nm)와 u(555 nm) 값을 이용하여 bb(555 nm)값을 산출한다.

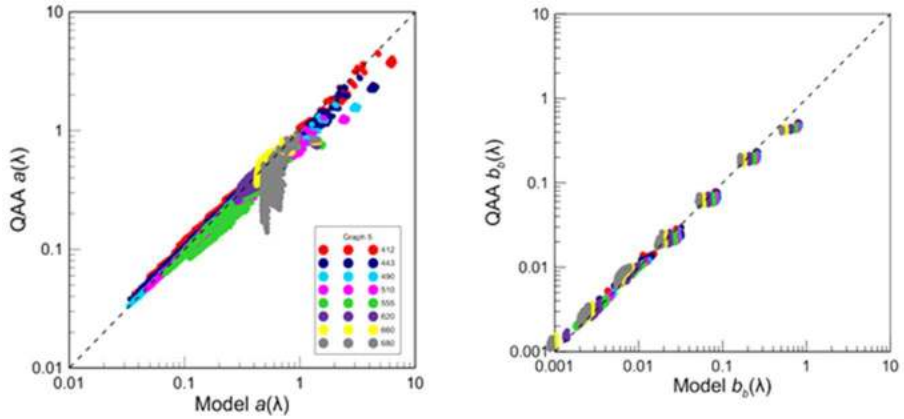
(6) 경험적 방법으로 모든 파장에 대한 bb값 스펙트럼 기울기를 구하고 이를 바탕으로 모든 파장의 bb(λ)를 계산한다.

(7) 모든 파장에 대한 bb(λ)와 u(λ)값을 이용하여 555 nm이외의 나머지 파장에 대한 a(λ)를 계산할 수 있다.

(8) 각각의 구성성분에 대한 IOP를 구하는 좀 더 자세한 방법은 QAA관련 문서 참고, Lee, Z., Carder, K. L., & Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. Applied optics, 41(27), 5755-5772.

다. 검증 결과

모의자료를 기반으로 한 산출물 검증 결과는 아래와 같다(좌: a, 우: bb).



6. 해양전선

가. 기존 해양 전선 산출 알고리즘 비교

(1) 일반적인 영상 Edge 판별 시 활용되는 Prewitt, Sobel, Roberts Cross, Frei-Chen, Laplacian, Gradient 알고리즘의 클로로필-a 농도 적용 및 비교 분석 (그림 6.1)

(2) Prewitt, Sobel,Frei-Chen 방식이 서로 유사한 결과를 나타내며, Roberts Cross, Laplacian, Gradient 방식이 서로 유사한 결과를 나타냄

(3) Gradient 방식이 다른 방식에 비하여 클로로필-a 농도 영상의 전선 미세구조를 잡아내며 알고리즘 구축이 비교적 단순한 측면이 있음

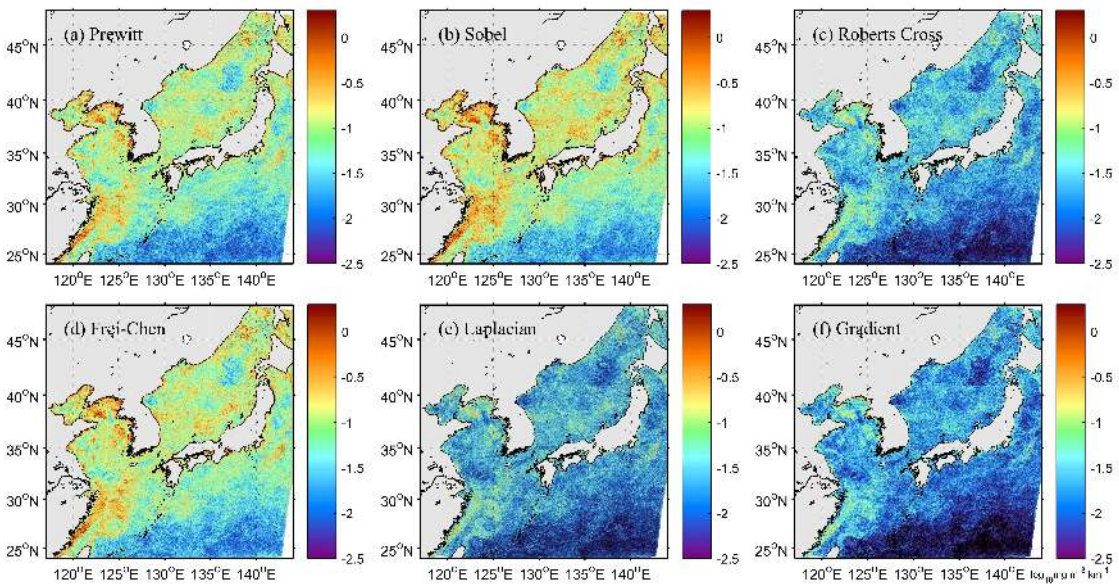


그림 6.1 전선 계산 방식에 따른 GOCI chlorophyll-a 농도 전선 값 분포

나. GOCI-II 관측 해역 배경장 특성 분석

(1) GOCI 클로로필-a 농도 자료로부터 산출한 클로로필-a 농도 자료 활용하여 GOCI-II 관측 해역의 클로로필-a 농도 배경장을 분석함 (그림 6.2)

(2) GOCI-II 관측 해역의 클로로필-a 농도 전선은 해역별로 다양하게 나타나며, -3.5~-1 log10mg m-3 km-1의 범위를 보임. 봄철에 전선이 강하게 나타나며 가을철에는 상대적으로 약하게 나타나 봄철 산출물 품질 관리의 경계 값을 가을철에 비하여 높게 설정함

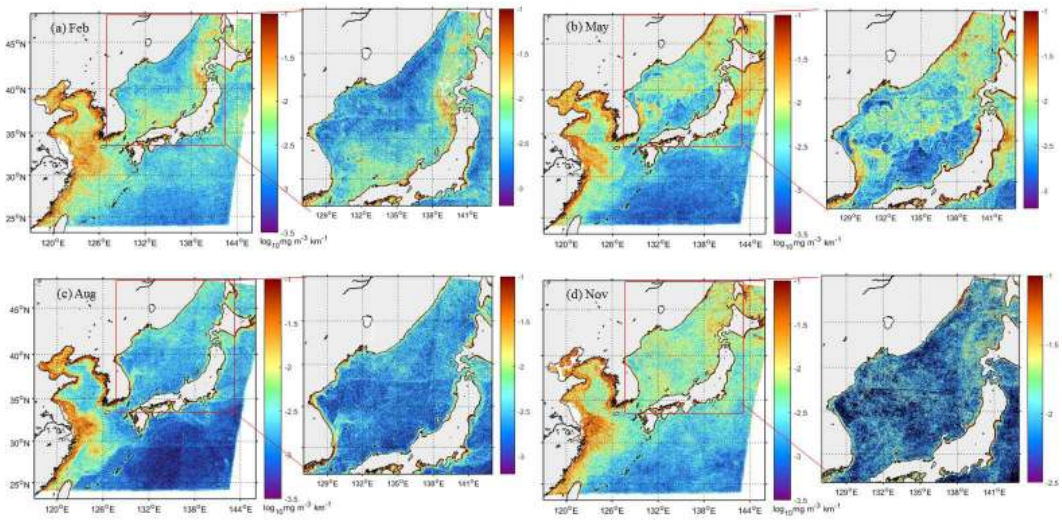


그림 6.2 계절에 따른 chlorophyll-a 농도 전선 값 분포

다. 영상 전처리 기법 개발

(1) GOCI 해양 변수(클로로필-a) 자료 특성 분석

(2) 영상 잡음에 대한 전처리 기법 개발

라. 해양 전선 크기 원형 알고리즘 개발

(1) GOCI-II 관측 영역의 해양 전선 시공간 변동성을 고려한 window size 선정

(2) 산출 결과물 품질관리 기법 개발 및 적용 (그림 6.3)

마. 알고리즘 정확도 검증

(1) MODIS Aqua 클로로필-a 농도와 비교하여 정확도 분석

(2) RMSE 0.5 mg m-3 km-1

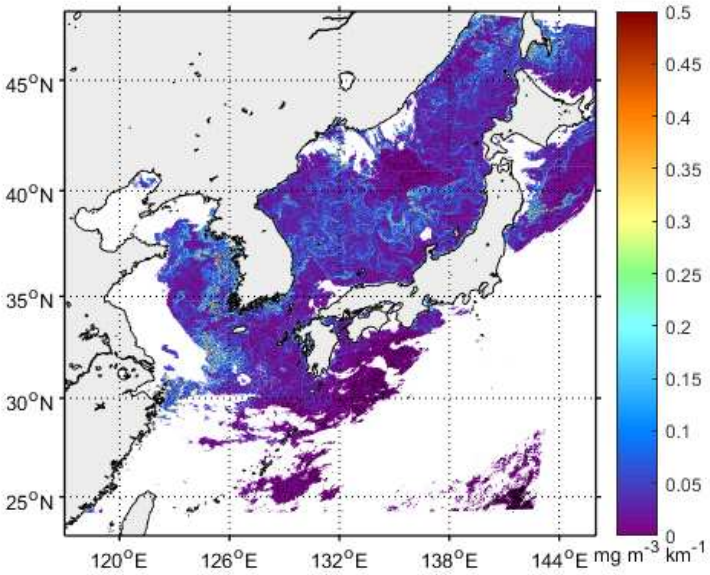


그림 6.3 GOCI 클로로필-a 농도 전선 크기 산출 영상 예시

바. 해양 전선 알고리즘 최적화 및 산출과정 자동화

1) 해양 전선 알고리즘 수정 보완 및 최적화

가) 요구 자료처리시간 도달

(1) 자료처리시간 도달을 위한 연산 함수 수정(해양 전선 산출 5분 이내 도달)

나) 실시간/준실시간 산출물 생산 설계 및 구현

(1) 실시간 해양 전선 산출 알고리즘 개발 완료 및 자동화

(2) flag 정보 산출 (0: clear, 1: CHL speckle, 2: cloud edge, 3: abnormal front magnitude)

다) 클로로필-a 농도 자료 전처리 코드화

(1) 관측해역에 최적화된 스펙클 탐지 및 제거 기법 개발

(2) 구름 가장자리 탐지

(3) contextual median filter 적용

라) 해양 전선 산출 알고리즘 코드화

(1) Gradient method 기반 알고리즘 적용

(2) 산출물 이상값 제거 코드 포함

2) 알고리즘 정확도 향상 기술 개선

가) 최적 해양 전선 산출 알고리즘 확정 및 코드화

(1) GOPF 코드 적용으로 입출력 함수 통일

(2) Python 코드 변환 완료

나) 해양 전선 알고리즘 정확도 검증

(1) 정확도 검증 자료: MODIS-Aqua 클로로필-a 농도 자료 활용

(2) 개발 알고리즘과 동일한 영상 전처리 및 산출물 품질관리 과정 적용

(3) 목표 정확도: RMSE 0.5 mg m-3 km-1 이내 달성 (검증 픽셀 개수: 34483585, RMSE: 0.4076 mg m-3 km-1, Bias:-0.1044 mg m-3 km-1) (그림 6.4)

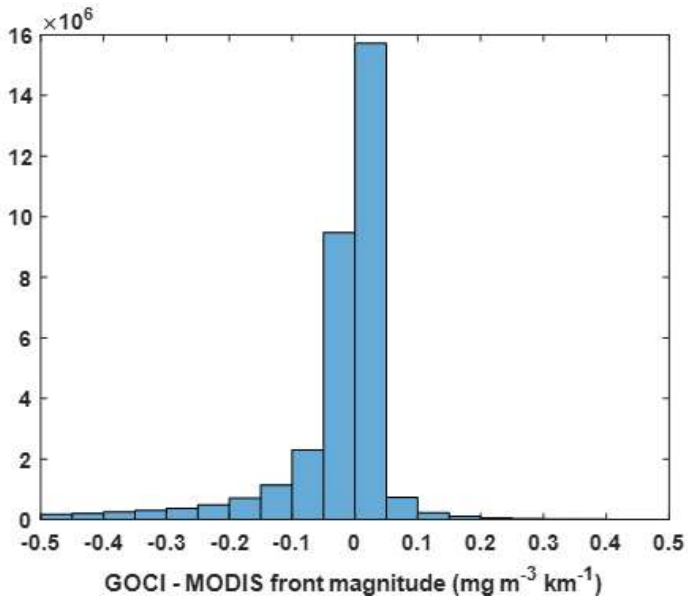


그림 6.4 GOCI-MODIS 클로로필-a 농도 전선 크기 비교

7. 저염분수

가. GOCI자료를 이용한 저염분수 산출 알고리즘 개발

1) 알고리즘 학습

가) 알고리즘 학습 방법

표층염분과 해색자료는 직접적인 관계가 없기 때문에 간접적으로 산출해야 하는데, 단순히 1차원 또는 2차원적인 수치모델로는 GOCI자료를 이용한 염분산출 알고리즘을 개발하기가 힘들다. 그러나 인공지능 알고리즘의 경우, 통계적인 방법으로 접근하기 때문에 자료의 수만 많으면 복잡한 관계를 찾기에 용이하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구개발에서는 염분산출 알고리즘을 개발하기 위하여 인공지능 알고리즘을 이용하였다. 여러 인공지능 알고리즘 중 본 연구에서는 fully connected deep neural network 방법을 이용했으며, 이는 인접한 층의 뉴런이 모두 연결되있는 구조를 가지고 있는 방식이다. 각각의 인접한 뉴런은 아래의 식과 같은 선형적인 관계를 가진다.

$$\bar{y}(x) = Wx + b \qquad (1)$$

여기서 $\bar{y}(x)$는 입력값 x에 대한 예측값을 나타내며 W는 가중치(weight), b는 편향치(bias)를 나타낸다. 본 알고리즘에 이용된 인공지능 알고리즘은 각 뉴런간의 선형적인 관계에서 학습을 진행함에 따라 점점 오차가 줄어드는 가중치와 편향치를 찾아낸다.

$$\mathrm{cost}(W,b) = \frac{1}{m}\sum_{I=i}^{m}(\bar{y}(x_i) - y_i)^2 \qquad (2)$$

식 (2)는 실제값과 예측한 값의 분산인 cost를 계산하는 식을 나타내며, 주어진 자료를 반복적으로 학습하여 가장 최소의 cost값을 나타내는 W와 b를 찾아낸다.

나) 알고리즘 학습 재료

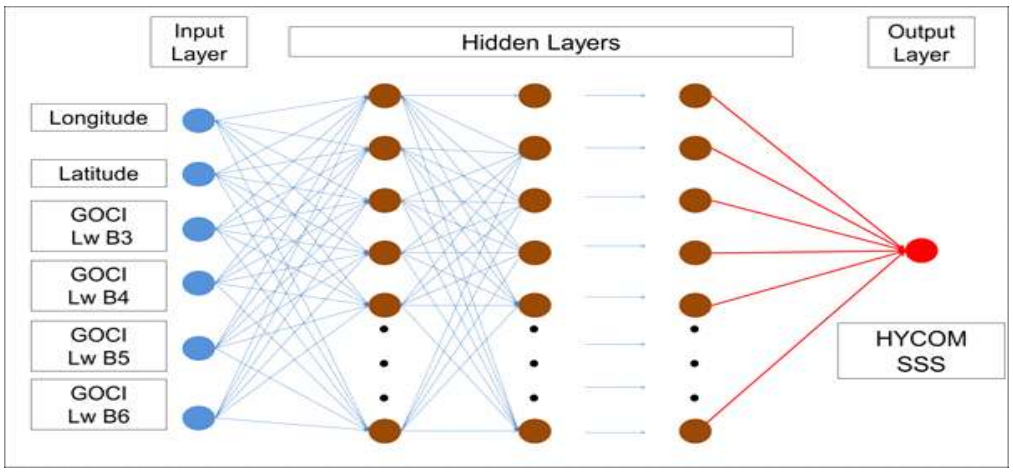


그림 7.1 GOCI-II 저염분수 산출 알고리즘의 모식도. 본 알고리즘에서 은닉층은 8개로 설정되었으며, 각 은닉층에는 20개의 뉴런이 존재함.

본 알고리즘은 그림 7.1에서 나타낸 것과 같이 GOCI의 위치정보 및 3번부터 6번 밴드의 수출광량(490 nm – 680 nm)자료를 입력 자료로 이용하였다. 은닉층(hidden layer)과 뉴런의 개수는 자료의 성격에 따라 최적의 성능을 나타내는 조합이 다르게 나타난다. 따라서 본 알고리즘에 적합한 은닉층과 뉴런의 조합을 찾아내기 위해 테스트한 결과 8개의 은닉층과 20개의 뉴런의 조합에서 상관관계가 0.9로 가장 좋은 성능을 나타냈다. 알고리즘 학습을 위한 출력자료는 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model) 표층 염분자료를 이용하였으며 자료의 크기 때문에 공간해상도는 2 km로 낮춰서 알고리즘을 학습하였다. 알고리즘은 최근에 저염분수가 가장 크게 발생한 2016년 자료를 이용하여 학습하였는데, 컴퓨터의 하드웨어적인 성능 문제 때문에 전체기간이 아닌 4일 간격으로 자료를 선택하여 알고리즘을 학습하였다. 알고리즘 학습은 전체 자료의 70%를 이용하였으며 나머지 30%는 알고리즘 학습 성능 검증에 이용하였다.

2) 알고리즘 학습 결과

가) 알고리즘 성능

알고리즘 학습 결과 4일 간격 자료 중 학습에 이용되지 않은 자료로 예측된 표층염분과 HYCOM 표층 염분간의 상관관계는 0.90, RMSE는 0.79 psu로 다른 선행연구결과보다 좋은 결과를 보였다. 그러나 그림 7.2(좌)에서 보이는 것과 같이 대부분의 자료가 저염분 범위(30 psu 이하)가 아닌 정상 염분 범위(30–35 psu)에 집중되어있기 때문에 저염분 구간에서의 성능은 상대적으로 떨어질 가능성이 있다.

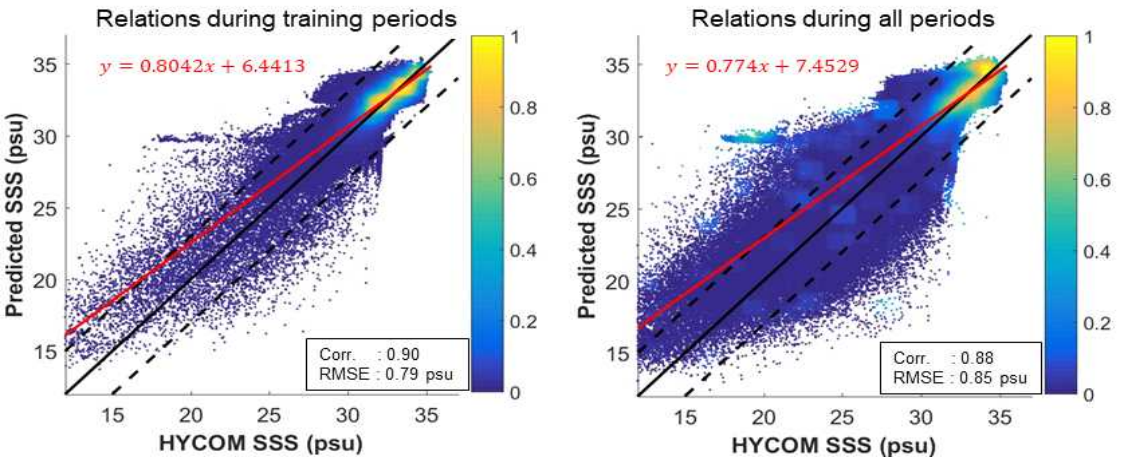


그림 7.2 (좌)알고리즘 학습기간(4일 간격)동안의 HYCOM과 예측된 표층 염분의 산포도. 두 값의 상관관계는 0.90, 그리고 RMSE는 0.79 psu로 나타났음. (우)2016년 전체기간(1일 간격)의 HYCOM과 예측된 표층 염분의 산포도. 두 값의 상관관계는 0.88, 그리고 RMSE는 0.85 psu로 나타났음.

개발된 알고리즘으로 4일 간격이 아닌 2016년 전체일의 표층염분을 GOCI로 계산하고, 이를 같은 날의 HYCOM 자료와 비교했을 때 상관관계는 0.88, RMSE는 0.85 psu로 학습기간 동안의 결과보다는 상대적으로 나쁜 성능을 보이지만 여전히 사전 연구에 비해서는 좋은 성능을 가지고 있다(그림7.2(우)). 그림 7.2에 나타나듯이 대부분의 자료는 저염분 구간(30 psu 이하)보다 일반염분 구간(30 psu 이상)에 집중적으로 분포하고 있기 때문에 알고리즘은

일반염분구간을 잘 예측하도록 학습이 되었다. 특히 그림 7.2과 그림 7.3에서 빨간색 선을 보면 알 수 있듯이 저염분 구간에서는 과대 추정하는 경향이 나타났다.

그림 7.3은 GOCI로 산출한 표층염분자료의 예시를 보여준다. 구름에 가려진 지역이 상대적으로 작게 나타났던 기간(가로)을 선정해서 3일 자료를 연속으로(세로) 제시하였다. 양자강 하구역 연안 지역에서는 항상 저염분이 유출되고 있음을 알 수 있으며 북서태평양 지역은 항상 고염인 것을 확인 할 수 있다. 특히 2월 9일의 경우 저염분수가 제주도 지역으로 확산되는 것이 확인되며, 여름철에는 동중국해 전체가 상대적으로 낮은 염분이 나타난 것이 확인된다.

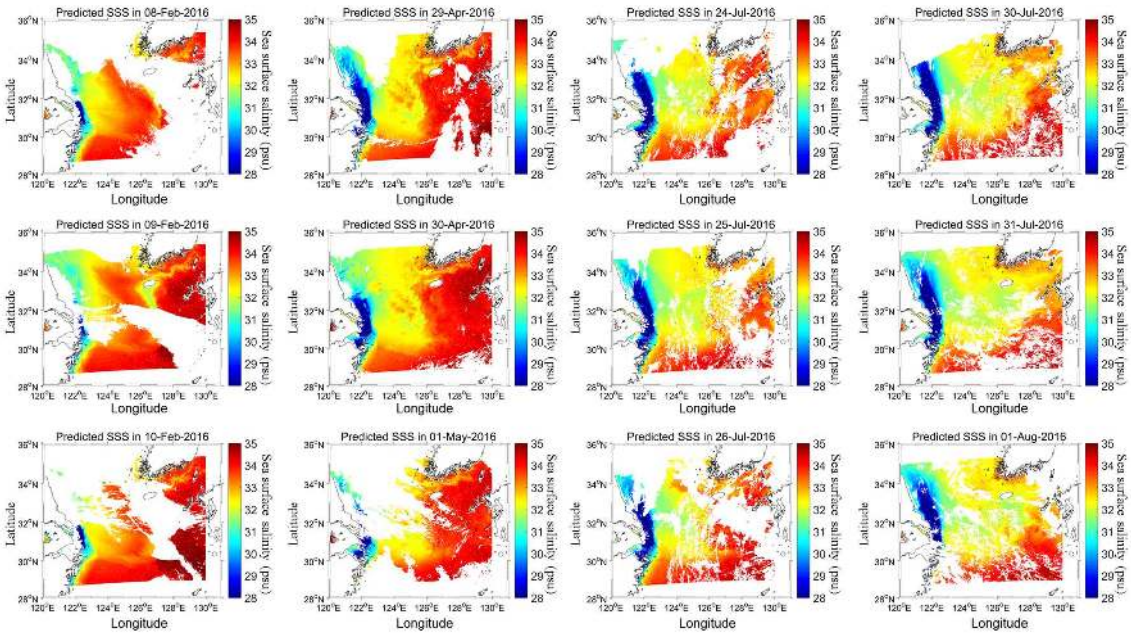


그림 7.3 GOCI로 예측한 표층염분의 예시 이미지. 양자강 하구역은 물론 동중국해에서 발생하는 저염분수를 확인 할 수 있으며, 저염분수의 분포가 연속적으로 잘 묘사되는 것을 확인할 수 있음.

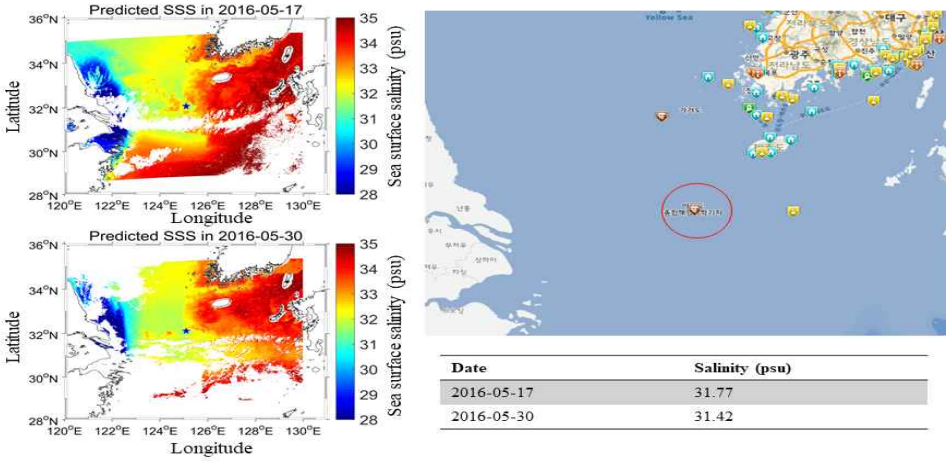
나. 알고리즘 성능 검증

1) 실측 자료와의 검증

가) 이어도 해양과학기지 관측자료

이어도 해양과학기지는 동중국해에 위치하고 있기 때문에 양자강 저염분수의 영향을 가장 빨리 파악할 수 있는 관측기지이다. 기지에 설치되어있는 CTD는 매분 수온과 염분을 측정하지만, 모든 자료가 다 공개되는 것은 아니다. 2016년의 경우 5월 한 달의 자료만 공개되었기 때문에 이 자료를 이용하여 GOCI 표층염분산출물을 검증하고자 했다. GOCI 이미지의 경우 이어도 해양과학기지 지역이 구름에 가려지지 않은 날이 17일과 30일 이틀밖에 되지 않았다. 그림 7.4에는 이 두 날짜의 GOCI 염분 산출물과 이어도 해양과학기지의 염분자료를 보여주고 있다. 이어도 해양과학기지 자료는 5월 17일에 평균 약 31.77 psu, 30일에 약 31.42 psu로 일반적인 해수보다 염분이 낮은 상태임을 알 수 있다. 같은 날의 GOCI 표층염분 이미지를 보면 해당지역(검은색 별표)의 염분이 약 31.5 psu 정도로 현장관측 자료와 거의 동일

하게 나타났음을 확인할 수 있다. 이는 비록 이틀뿐이긴 하지만 본 알고리즘이 표층염분을 잘 묘사하고 있음을 시사한다.



Date	Salinity (psu)
2016-05-17	31.77
2016-05-30	31.42

그림 7.4 이어도 과학기지 자료와의 검증 결과. 검은색 별로 표시되어 있는 지점이 이어도 과학기지의 위치. 2016년 5월 17일과 30일에는 실측자료와 거의 동일한 염분이 예측되었음.

나) 제주도 모슬포 조위관측소

우리나라에서 양자강 저염분수의 영향을 가장 많이 받고, 지리적으로도 가장 가까이 위치한 조위관측소는 제주도의 모슬포 조위관측소이다. 모슬포 조위관측소는 2003년 11월 01일부터 관측을 시작하였으며, 1분 간격으로 표층수온과 염분 등을 관측하고 그 자료를 공개하고 있다. 따라서 우리는 알고리즘 성능 검증을 위하여 모슬포 조위관측소 자료를 이용하였으며, 특히 GOCI로 예측한 표층염분과 HYCOM에서 산출된 표층염분 분포가 다르게 나타나는 날짜를 기준으로 검증해 보았다. 그림 7.5에서 2월 9일의 경우 GOCI에서는 제주도 주변에서 저염분수가 관측이 되었지만 HYCOM에서는 저염분수가 관측되지 않았다. 이때 모슬포 조위관측소 자료를 확인해본 결과 2월 9일의 평균 염분은 31.78 psu로 저염분수가 관측되었다. 따라서 이 결과는 HYCOM보다는 GOCI의 염분 자료가 더 정확함을 보여준다. 그리고 7월 25일의 경우 동중국해지역의 표층염분이 GOCI는 약 31 psu정도로 나타났지만 HYCOM에서는 약 29 psu로 저염의 강도가 다르게 나타났다. 이 날의 모슬포 조위관측소 염분자료는 29.63 psu였는데, 이는 HYCOM에 조금 더 가까운 수치이다. 이는 본 알고리즘이 저염분 구간에서 과대추정되는 현상 때문에 나타난 것으로 판단된다. 이러한 결과로 보았을 때, GOCI로 추정한 표층 염분은 HYCOM에서 관측하지 못하는 보다 세세한 저염분수의 확산과 고해상도의 변동을 파악하기에는 적절하지만, 실제 저염분수 구간에서 보다 정확한 염분수치는 정확하게 묘사하지 못한다는 점을 알 수 있다. 따라서 저염분 구간(30 psu)이하로 나타나는 지역은 저염분의 강도가 아닌 분포 패턴을 모니터링 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

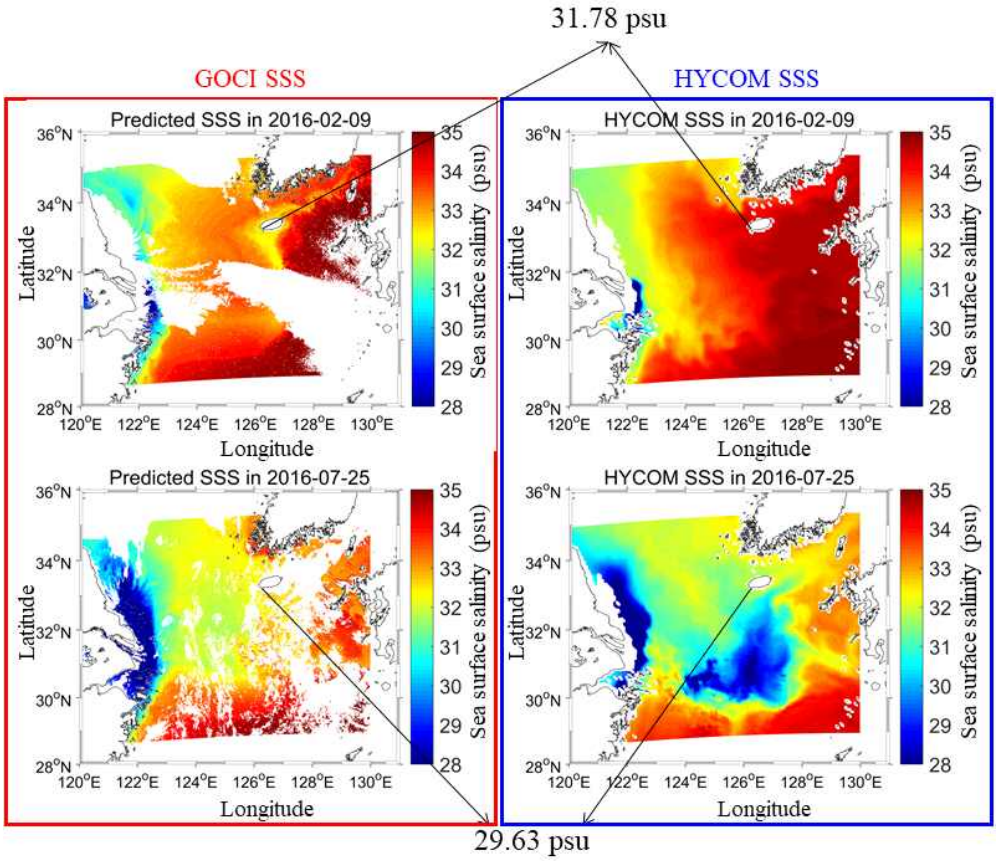
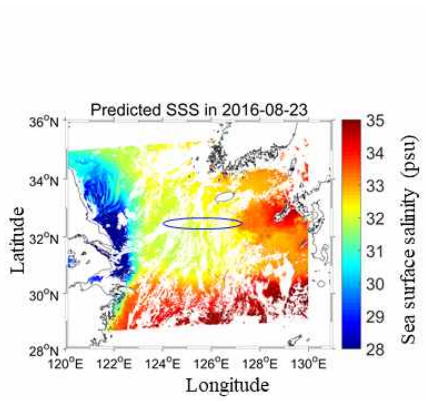
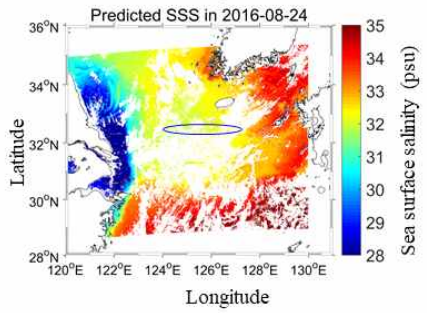


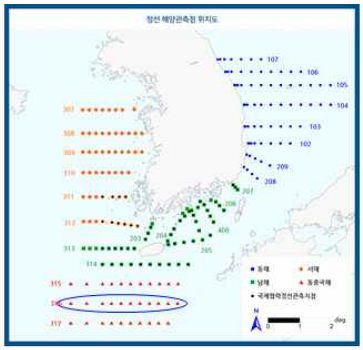
그림 7.5 GOCI와 HYCOM의 표층염분 분포가 다르게 나타난 날과 모슬포 조위관측소 염분값을 나타낸 그림.

다) 정선관측자료

마지막으로 검증한 자료는 국립수산과학원의 정선해양 관측자료이다. 정선 해양 관측은 동중국해에서 3개의 정선에 32개 정점을 연 4회 관측하고 있으며 관측항목은 수온, 염분, 용존산소, 영양염류, 플랑크톤 이다. 2016년 여름의 경우 정선관측은 8월 23일, 24일 이틀이 수행되었기 때문에 이 두 날의 표층염분자료와 GOCI 표층염분자료를 비교해 보았다. 그림 7.6에서 왼쪽 GOCI이미지에 파란색 타원으로 표시해둔 지역이 315 정선 라인의 위치이다. 오른쪽 표는 정선 관측자료를 나타내고 있다. 자료를 보면 이틀 동안 정선관측에서는 30 psu이하의 저염분수가 잘 관측이 되었는데, GOCI 산출물에서는 약 31 psu로 상대적으로 높은 염분이 관측되었다. 이는 GOCI 산출물에서 저염분 패턴은 잘 묘사하였지만, 30 psu 이하에서는 과대추정되는 경향이 있기 때문에(그림 7.2 참조) 30 psu 이하로 관측되지 않고 주변보다 상대적으로 저염분인 31 psu로 나타난 것으로 판단된다.







Provided by Korea oceanographic data center

Station No.	Date	Salinity (psu)
315-12	2016-08-23 10:05	32.4051
315-13	2016-08-23 11:40	30.6166
315-14	2016-08-23 13:55	28.8194
315-15	2016-08-23 15:15	28.6534
315-16	2016-08-23 17:30	27.3681
315-17	2016-08-23 19:05	27.3984
315-18	2016-08-23 21:00	26.7419
315-19	2016-08-23 22:30	26.2494
315-20	2016-08-24 00:15	26.4261
315-21	2016-08-24 02:05	27.4515
315-22	2016-08-24 03:50	28.7346

그림 7.6. 2016년 8월 23일, 24일의 GOCI 표층염분 이미지와 같은날 정선관측 염분 자료.

다. ADE환경에서 구현 가능한 코드 작성

가) 알고리즘 개발 코드 작성 및 제공

본 연구개발은 Python v3.5를 이용하였으며, 인공지능 알고리즘은 오픈소스 소프트웨어 중 가장 많이 이용되는 tensorflow를 이용하여 개발되었다. 본 연구개발에서는 표층염분 산출 알고리즘을 2016년 자료만을 이용하여 개발한 초기버전이기 때문에, 추후에 자료가 더 쌓이거나 GOCI-II 자료를 이용해서 업그레이드 할 필요가 있다. 따라서 본 연구과제에서는 알고리즘 적용 코드 뿐만 아니라 개발코드도 같이 제공하였다.

나) 알고리즘 적용 코드 작성 및 제공

개발된 알고리즘을 적용하는 코드를 작성하고 제공하였으며, ADE환경에 업로드하여 실제 GOCI 자료로 테스트 완료하였다. 최종 산출물은 이미지와 netCDF파일로 제공되도록 코드가 작성되어있다.

8. 해빙

가. 연구자료 및 사례

1) 연구자료

가) GOCI-II

본 연구는 GOCI-II자료를 이용하여 해빙탐지를 산출하는 것이 목표이다. 따라서 최종으로 GOCI-II자료를 입력 자료로 사용할 예정이다. GOCI-II는 동경 128.2도 적도상공의 정지궤도에서 해색을 관측하는 센서이며, 자료보정 단계에서 Level-0, Level-1A, Level-1B자료가 생성된다. 본 알고리즘은 해상의 얼음을 관측하므로 대기보정이 수행된 가시 및 근적외 채널의 반사도 자료 (Level-2)를 사용한다. GOCI-II 센서 정보는 아래와 같다.

표 8.1 GOCI-II 채널 정보

밴드번호	중심파장 [㎛]	파장범위 [㎛]	공간해상도 [m]
1	0.380	0.02	250
2	0.412	0.02	
3	0.443	0.02	
4	0.490	0.02	
5	0.520	0.02	
6	0.555	0.02	
7	0.625	0.02	
8	0.660	0.01	
9	0.685	0.01	
10	0.745	0.02	
11	0.765	0.02	
12	0.865	0.04	
13	0.650	0.5	

나) MODIS

GOCI-II센서를 탑재한 GK-2B위성은 2019년 발사예정이므로 아직 자료를 사용할 수 없어 GOCI-II와 비슷한 채널을 가진 MODIS를 이용하여 연구하였다. 본 연구에서 사용한 MODIS 자료는 대기보정이 된 가시 및 적외 파장의 지표반사도 자료이며 아래와 같다.

표 8.2. MODIS 채널 정보

밴드번호	중심파장 [㎛]	파장범위 [㎛]	공간해상도 [m]
1	0.645	0.02	1000
2	0.856	0.02	
3	0.469	0.02	
4	0.555	0.02	

2) 연구사례

아래 그림은 해빙탐지 연구를 위해 사용된 사례이다. 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역은 한파로 인해 해빙이 잘 발생하는 지역이다 (그림 8.1(a)). 그림 8.1(b)는 실험을 위해 사용된 2013년 1월 3일 02:15UTC 해빙사례이며, 한파로 인해 발생된 사례이다. 그림 8.1(c)는 실험 결과를 MODIS 해빙탐지결과와 비교검증을 위한 2018년 1월 26일 03:10UTC 사례로 2018년 초 한파로 인해 서해 및 인천에 해빙이 발생하여 어업 및 선박운영 등 직접적으로 영향을 주었다.

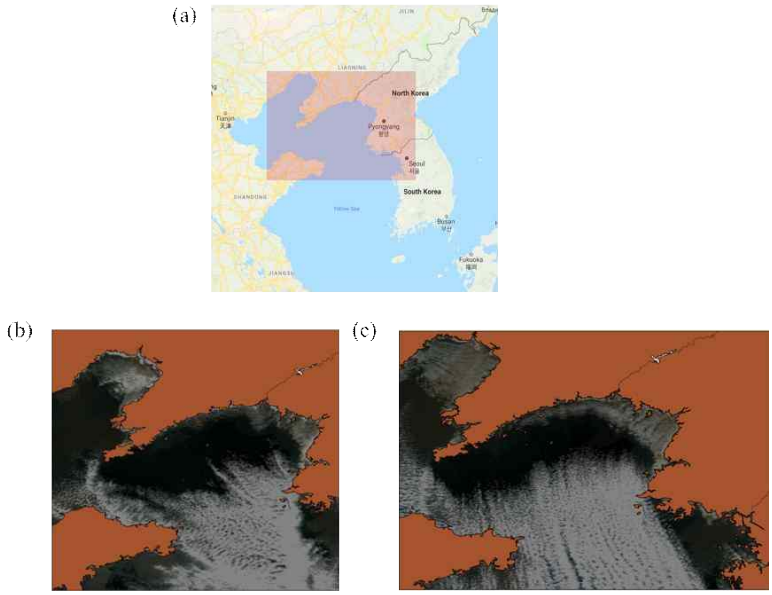


그림 8.1. 연구에서 사용된 영역 및 사례. (a) 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역. (b) 실험에 사용된 2013년 1월 3일 02:15UTC 사례의 RGB 영상 (c) 검증에 사용된 2018년 1월 26일 03:10UTC사례의 RGB영상

나. 연구 방법

1) 알고리즘 순서도

아래 그림은 GOCI-II 해빙탐지 알고리즘의 내용을 순서도로 나타낸 것이다. 먼저 해빙탐지 및 해빙면적 계산을 위해 가시 및 근적외 파장에서 해빙에 적합한 채널을 선택하여 단파적외 채널과의 관계를 이용하여 가상의 단파적외 반사도를 산출한다. 그리고 가시채널과 가상의 단파적외 채널의 NDSI를 산출하고 경계값을 이용하여 해빙을 탐지하고 해빙면적을 구한다. 다음으로 반사도를 수직, 수평 성분의 편광반사도로 나누고 이를 이용해 굴절률과 거칠기를 산출한다. 굴절률과 거칠기는 해빙을 얼음, 녹은 얼음, 눈, 물 등의 물질로 나누기 위한 기본적인 과정이며 연구용으로 추후 개선이 필요하다.

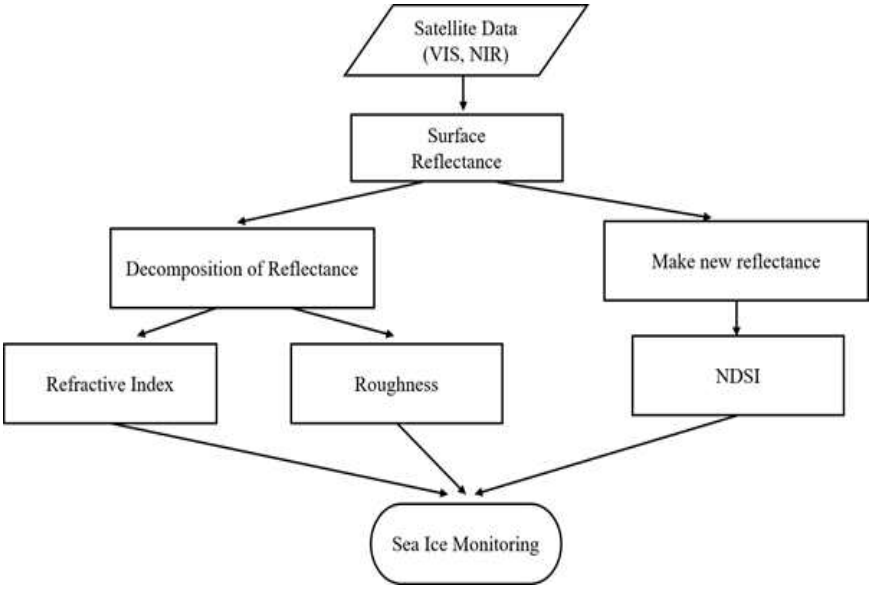


그림 8.2. GOCI-II 해빙탐지 알고리즘 순서도

2) 산포도방법

Kulkarni et al (2002)은 지표면의 다양한 물질을 분류하여 Normalized Difference Snow Index (NDSI)와 단파적외 채널 (그림 8.3 (a)), 가시채널 (녹색파장, 그림 8.3 (b))과의 산포도로 나타내었다. 그림 8.3을 보면 두 산포도에서 지상의 얼음(세모, 네모)과 구름 (다이아, 꽉찬 원)이 잘 구분됨을 볼 수 있다. 해빙탐지에서는 성질이 비슷한 구름과 지상의 얼음을 구분하는 것이 가장 중요하다. 따라서 본 연구에서는 위 방법과 같이 위성에서 관측된 자료를 이용하여 해빙을 포함한 해상의 물질을 나누었다. 그리고 NDSI와 가시 및 근적외 채널의 산포도를 통해 해빙탐지에 적합한 채널을 선택하였다.

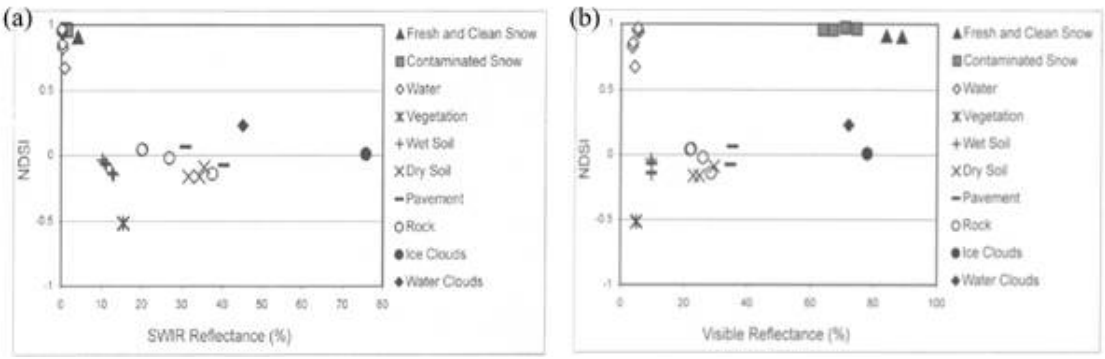


그림 8.3. Manali 지역의 산을 포함한 지표면의 다양한 물질들의 (a) NDSI와 단파적외 반사도 (b) NDSI와 가시 (녹색파장)채널의 산포도 (Kulkarni et al, 2002)

3) NDSI

광학위성을 이용한 해빙탐지 이전연구는 주로 녹색광에 해당하는 가시채널과 단파적외 채널을 이용한 지수를 이용하였다. 가시채널 중 녹색광 파장의 반사도가 표면의 얼음에서는 높고 구름에서는 낮으며, 반대로 단파적외 파장에서는 얼음은 낮은 반사도, 구름은 높은 반사도를 갖는다. NDSI는 이 두 채널의 특성을 이용한 것이며 Terra/Aqua 위성의 MODIS 센서를 이용한 NDSI는 아래 식 (1)과 같다. (Hall et al., 2001)

$$NDSI_{MODIS} = \frac{R_{0.56\mu m} - R_{1.64\mu m}}{R_{0.56\mu m} + R_{1.64\mu m}} \quad (1)$$

위 식에서 R0.56㎛는 녹색 파장에 해당되는 가시채널의 반사도이며, R.1.64㎛는 단파적외 채널의 반사도이다.

GOCI-II에는 단파적외 파장에 해당되는 채널이 없으므로 이를 대체할 채널이 필요하다. 따라서 위 산포도방법을 통해 선택된 해빙탐지에 적합한 채널과 단파적외채널의 특징을 이용하고자 회귀식을 이용하여 새로운 채널을 산출하였다. 이 가상의 단파적외 채널을 이용하여 GOCI-II의 NDSI를 산출하였으며 식은 아래와 같다.

$$NDSI_{GOCI-II} = \frac{R_{0.56\mu m} - Pseudo_R_{1.64\mu m}}{R_{0.56\mu m} + Pseudo_R_{1.64\mu m}} \quad (2)$$

위 식에서 R0.56㎛는 녹색 가시 파장의 반사도이며, Pseudo_R.1.64㎛는 가상의 단파적외 채널 반사도이다.

4) 굴절률과 거칠기

본 연구에서는 해빙의 특성을 얼음, 녹음 얼음, 물 등으로 나누기 위해 물리적 산출물인 굴절률과 거칠기 방법을 이용하였다. 아래 두 식은 위성으로부터의 원반사도를 수직, 수평 방향으로 편광 (Polarization)된 반사도로 분해하는 방법이다.

$$R = \frac{R_V + R_H}{2} \quad (3)$$

$$R_H = R_V^{\sec^2\theta} \quad (4)$$

위 식에서 R은 위성으로부터 관측된 원 반사도를, 첨자 V, H는 각각 수직방향, 수평방향의 편광, θ는 위성천정각 (satellite zenith angle)을 의미한다. 위 두 식을 이용하면 수직, 수평으로 편광된 반사도를 구할 수 있으며 자세한 절차는 Hong (2009, 2010, 2013) 의 선행연구들에 기술된 방식을 따른다.

위 두 식으로부터 산출된 편광된 수직, 수평 방향의 반사도로 굴절지수 (Refractive Index)와 거칠기 (Roughness)를 산출한다. (Hong, 2010)

$$\sigma \approx \frac{\lambda}{4\pi\cos\theta} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{R_{R,H}^{SEC^2\theta}}{R_{R,V}}\right)} \quad (5)$$

위 식에서 σ는 결과값인 거칠기, λ는 파장, θ는 위성천정각, RR,H는 수평방향의 편광반사도, RR,V는 수직방향의 편광반사도이다.

다. 연구결과

가) 산포도

아래 그림은 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙사례에 산포도방법을 적용한 결과이다. 위 사례의 RGB영상 (그림 8.1(b))을 통해 해빙, 구름, 바다, 탁수로 나누어 (그림 8.4(a)) 전체영역은 연두색, 해빙은 하늘색, 구름은 분홍색, 바다는 검은색, 탁수는 초록색으로 구분하여 산포도에 나타내었다. 아래 그림 8.4(b)는 MODIS NDSI와 해빙에서 반사도가 가장 높은 가시채널인 녹색파장 0.56㎛의 산포도로 구름과 해상의 얼음이 명확히 구분됨을 볼 수 있다. GOCI-II에는 MODIS의 단파적외채널이 없기 때문에 이를 대체할 채널을 실험을 통해 선택하였다. 그림 8.4(c)는 0.65㎛, 0.86㎛차와 0.56㎛의 산포도로 그림 8.4(b)와 같이 구름과 해빙이 잘 구분됨을 볼 수 있다.

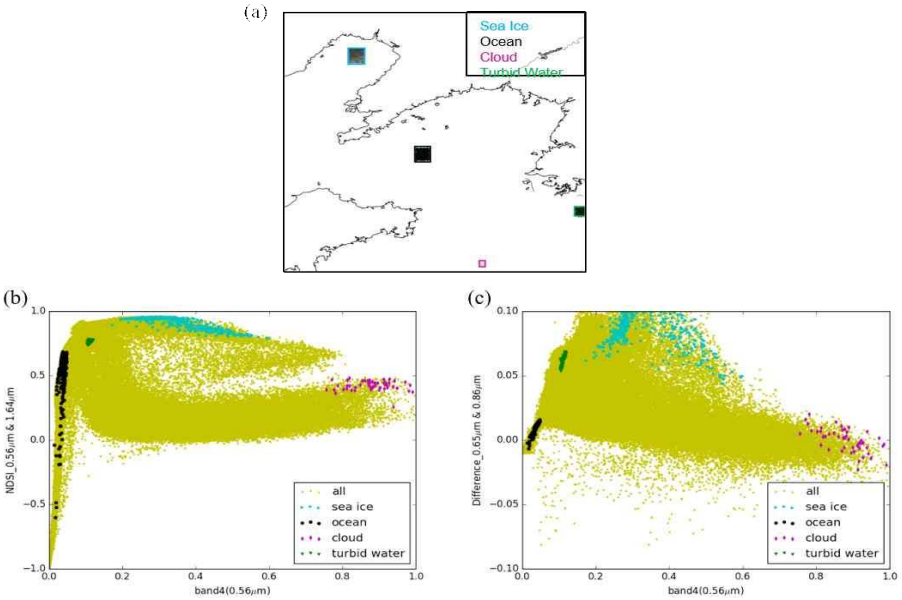


그림 8.4. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 (a) 해빙, 구름, 바다, 탁수 등으로 분류한 RGB 영상. (b) 0.56㎛와 MODIS NDSI의 산포도. (c) 0.65㎛와 0.86㎛차와 0.65㎛의 산포도.

나) 가상 단파적외채널과 NDSI

단파적외 파장 (MODIS 에서는 중심파장이 1.64㎛채널)에서 구름은 높은 반사도로, 해빙은 낮은 반사도로 명확히 구분된다. 단파적외채널의 이러한 특성을 이용하고자 위 산포도방법에서 해빙에 가장 적합한 채널인 0.65㎛와 0.86㎛ 반사도 차와 1.64㎛ 반사도의 관계 (그림 8. 5(a))를 이용하여 회귀방정식을 산출하였다. 위 회귀방정식을 통해 가상의 단파적외채널 (그림 8. 5(b))을 생성하여 GOCI-II NDSI (식 (2))에 적용하였다.

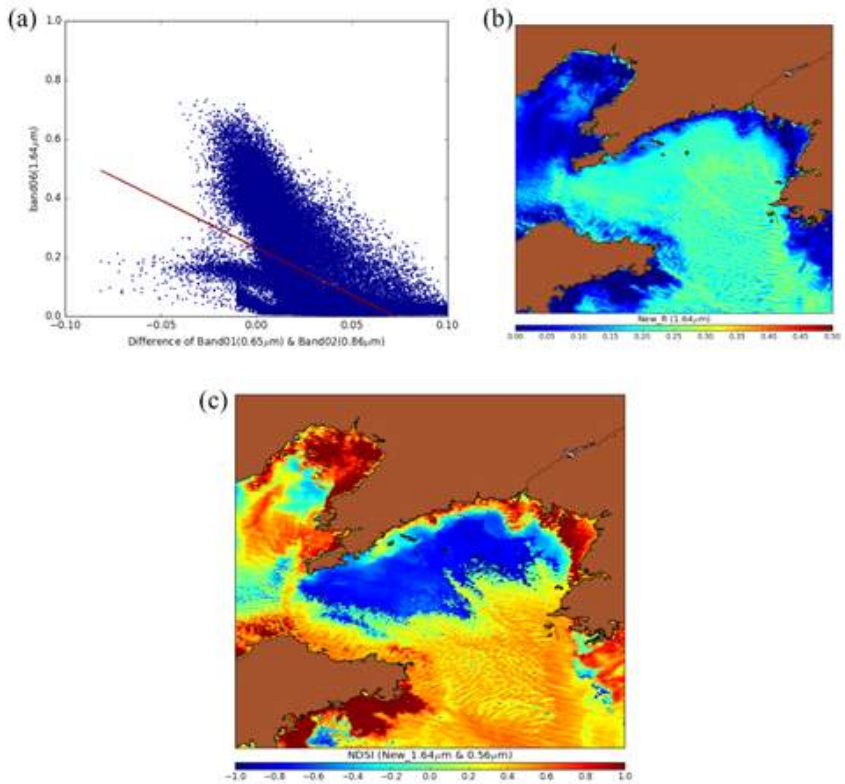


그림 8.5. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 (a) 0.65㎛와 0.86㎛ 반사도차와 1.64㎛의 산포도 (b) 가상의 단파적외 반사도 (c) GOCI-II NDSI

위 그림을 보면 가상의 단파적외 반사도 (그림 8.5(b))에서 구름은 0.2 이상의 반사도 값으로, 해빙은 낮은 반사도 값으로 두 물질이 잘 구분됨을 볼 수 있다. GOCI-II NDSI (그림 8. 5(c))에서 해빙은 높은 값을 보이며 구름과 잘 구분된다.

다) 해빙탐지 및 면적

해빙탐지는 GOCI-II NDSI (식(2))의 값에 실험을 통해 설정된 경계값과 MODIS NDSI에서 사용하는 근적외, 가시채널 반사도에 경계값을 설정하는 방법을 이용하여 산출하였다.(Riggs et al., 2006)

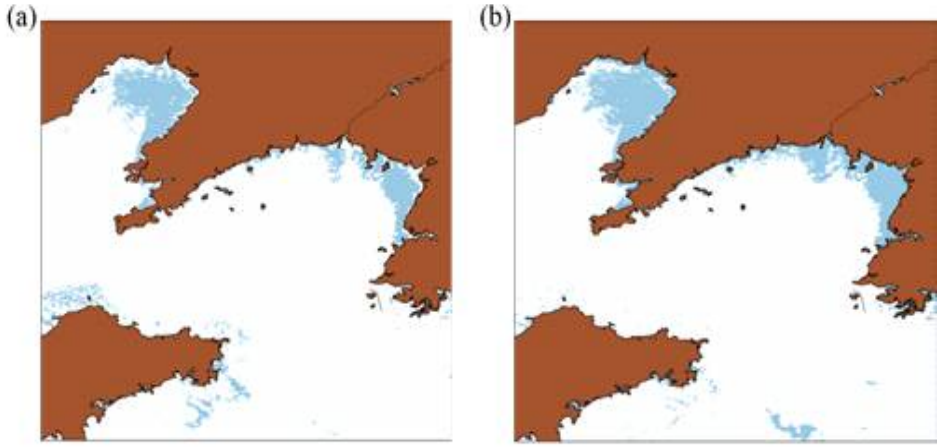


그림 8.6. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 (a) GOCI-II 해빙탐지 결과, (b) MODIS 해빙탐지 결과

그림 8. 6은 동일 사례에서의 GOCI-II 해빙탐지 결과 ((a))와 비교를 위한 MODIS 해빙탐지 결과 ((b))이며 해빙은 하늘색으로 해빙이 아닌 지역은 하얀색으로 그리고 육지는 갈색으로 표현되었다. 두 결과를 비교해보면 GOCI-II 해빙탐지결과의 산둥반도 주변에서 MODIS 결과에 비해 해빙으로 탐지한 부분이 보인다. 반면 RGB영상 (그림 8. 1(b))으로 보았을 때 구름으로 판단되는 부분 (그림 하단 중앙)에서 MODIS에서는 해빙으로 탐지하였지만 GOCI-II에서는 해빙이 아닌 지역으로 탐지하였음을 볼 수 있다.

GOCI-II 해빙탐지 (그림 8.6(a))를 이용하여 계산된 해빙의 면적은 6,902km2이다.

라) 굴절률 및 거칠기

식(3)과 (4)를 이용하여 가시부터 근적외 파장의 반사도를 수평, 수직방향으로 편광된 반사도로 계산하였으며 아래 그림은 NDSI에서 사용되는 녹색 가시 파장 (0.55㎛)의 수직, 수평 방향 편광반사도 결과이다.

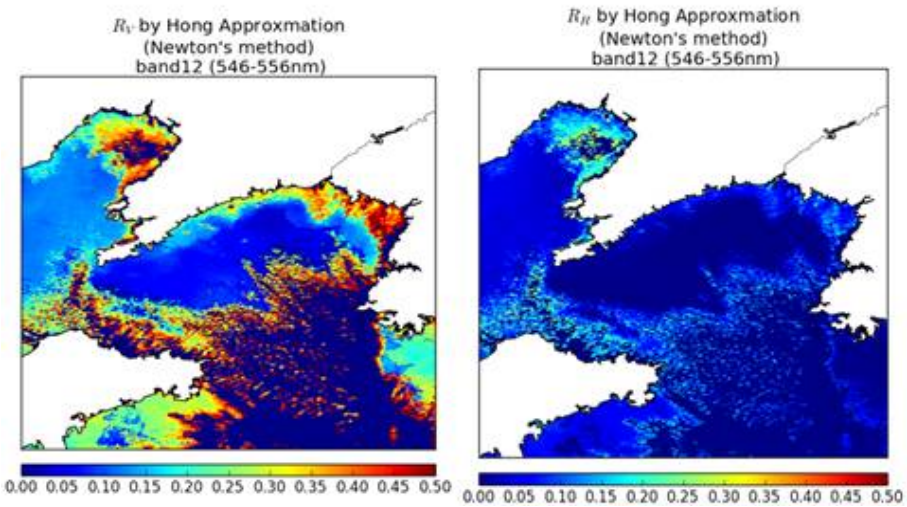


그림 8.7. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 MODIS 0.55㎛의 수직, 수평성분의 반사도

아래 그림은 위의 편광된 두 반사도를 이용하여 산출된 굴절률의 결과이다. 왼쪽은 0.55㎛, 오른쪽은 0.86㎛의 굴절률이다. 해빙의 굴절률은 약 1.3 (Hong, 2015)이며, 산출된 값은 1～2 값으로 다양하게 나타난다.

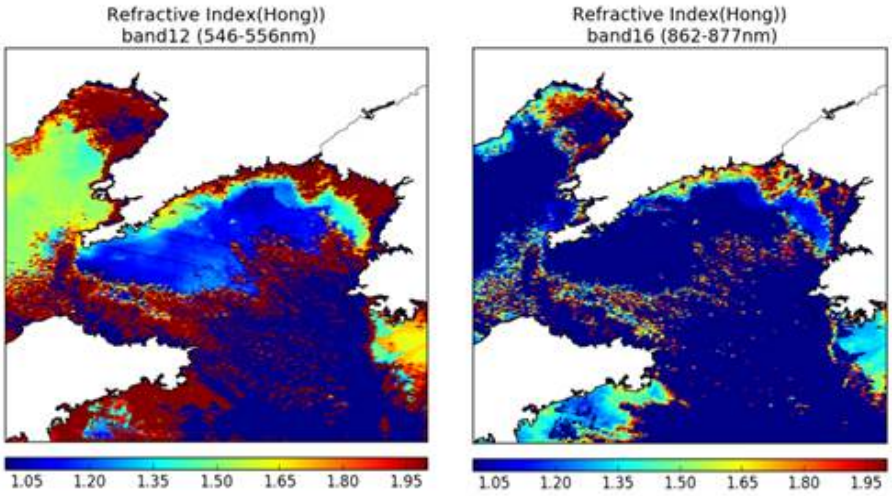


그림 8.8. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 MODIS 0.55㎛, 0.86㎛ 굴절률.

그림 8.9는 0.55㎛, 0.86㎛ 채널의 거칠기를 산출한 영상이다. 아래 그림에서 얼음의 거칠기는 0.5～1.0㎛로 매우 작은 값을 보인다.

굴절률, 거칠기 값들은 해빙의 물성 (얼음, 녹은 얼음, 물)을 파악하기 위한 것으로 연구용이며 추후 연구를 통해 더 발전시킬 예정이다.

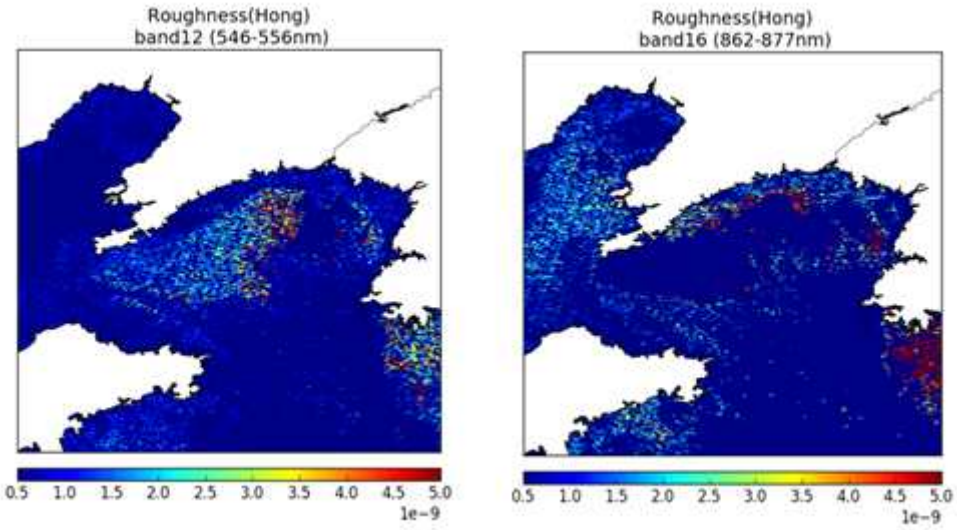


그림 8.9. 2013년 1월 3일 02:15UTC 한반도 서해 및 중국 Bohai바다 영역 해빙 사례의 MODIS 0.55㎛, 0.86㎛의 거칠기

라. 연구성과

본 연구는 해색센서인 GOCI-II자료를 이용하여 해빙탐지 알고리즘을 개발하는 것이 목적이다. 따라서 가시 및 근적외파장의 반사도를 이용하여야 하며 이러한 파장에서는 구름과 지상얼음의 반사도 모두 높다. 따라서 두 물질을 구분하는 것이 이 연구의 중요한 점이며 따라서 구름탐지 연구가 선행되었다. 본 연구를 통해 개발된 구름탐지 산출물을 MODIS 구름산출물과 비교검증한 결과 통계적인 수치로 매우 유사함을 확인하였다. 이러한 내용을 바탕으로 특허제출을 하였다.

구름탐지 및 해빙탐지 연구는 향후 GOCI-II자료를 이용한다면 GOCI에 비해 보다 고해상도로 전 지구영역을 준실시간으로 탐지하여 활용 가능성이 높다. 또한 본 연구의 기술은 해빙탐지 및 구름탐지뿐 아니라 해상의 다른 산출물 (구름, 황사, 탁수 탐지 등)에도 활용 가능하다.

9. 엽록소 농도

가. 개요

엽록소(Chlorophyll, CHL)은 해수에 존재하는 대부분의 식물플랑크톤이 함유한 색소로써, 광합성의 핵심분자로 빛에너지를 흡수하는 안테나 역할을 하는 색소이다. 이러한 엽록소는 파장 443 nm, 490 nm, 510 nm에서 흡광이 나타나고 파장 680 nm 에서 형광이 나타나며, 그 중에서 파장 443 nm에서 최대 흡광이 나타나는 특성이 있다. 그러나 파장 490 nm 이하의 단파장 영역에서는 부유물질 및 용존유기물의 흡광도 강하게 나타나고, 파장 510 nm의 엽록소 흡광은 다른 파장들에 비해 그 강도가 약하다. 또한 해수의 엽록소 농도가 높아질수록 원격반사도 형태가 변화하고 이에 따라 특정 밴드의 원격반사도 값이 증가 혹은 감소하는 특징을 나타낸다.

따라서 엽록소 농도 알고리즘은 해수 표층의 엽록소 농도를 파장 443 nm, 490 nm, 510 nm의 원격반사도 값과 부유물질의 산란에 의해 나타나는 파장 555 nm의 원격반사도 값의 밴드비를 이용하여 산출한다.

나. 수식

O'Reilly et al.(1998)의 원격반사도 밴드비를 기반한 엽록소 농도 알고리즘을 사용한다. 밴드가 4개 사용되었기에 OC4 algorithm이라고 한다.

$$CHL = 10^{a_0 + \sum_{i=1}^{4} a_i \left(\log_{10} \left(\frac{\max(R_{rs}(443,490,510))}{R_{rs}(555)} \right) \right)^i}$$

a0=0.3272, a1=-2.9940, a2=2.7218, a3=-1.2259, a4=-0.5683

10. 적조지수

가. 산출물의 정의

적조 현상(red-tide)이란 식물 플랑크톤의 대량 번식으로 바닷물의 색깔이 적색, 황색, 적갈색 등으로 변하는 자연 현상을 말하는 것이었으나, 최근 적조로 인한 직/간접적 피해가 발생하여 적조를 유해조류의 대번식(Harmful Algal Blooms: HAB)의 의미로 사용하고 있다(NIFS). 대표적인 유해 적조종으로는 코클로디니움 폴리크리코이데스(Cochlodinium polykrikoides = Margalefidinium polykrikoides)가 있으며, 무해 적조종으로는 녹틸루카 신틸란스(Noctiluca scintillans = Noctiluca miliaris)가 있다. 적조 지수는 적조의 발생 분포를 보여주는 지표이며, 천리안 해양 위성에서 관측된 해수신호(Rrs) 자료를 기반으로 딥러닝(합성곱 신경망 = CNN) 기법을 적용하여 분석한다.

나. 알고리즘 요약 - 딥러닝 분석 알고리즘

제안된 알고리즘은 GOCI-II 위성 이미지를 적조 탐지에 활용하기 위하여 AlexNet과 같은 널리 알려진 CNN 모델의 아키텍쳐를 활용하였다. AlexNet은 5개의 합성곱 계층(convolutional layer)과 3개의 완전연결 계층(fully connected layer)을 가지고 있는 반면, 제안된 알고리즘은 9개의 합성곱 계층과 1개의 완전연결 계층, 1개의 인셉션 모듈과 2개의 레지듀얼 모듈을 가지고 있다. 이 네트워크는 초다분광 이미지 분류에 먼저 적용되었던 것이며(Lee et al. 2017), GOCI/GOCI-II에 적용할 수 있도록 수정하였다. 입력자료로는 GOCI/GOCI-II 원격반사도(Rrs) 및 대기분자산란보정반사도(RhoC)를 이용하여, 픽셀별 적조 여부를 판단하도록 하였다. 적조가 주로 발생하는 7~8월의 GOCI 자료를 이용하여 시험했을 때, AUC(Area Under the ROC Curve)가 95.30%로 나왔다.

그림 10.1 GOCI-II 적조 알고리즘을 위한 CNN

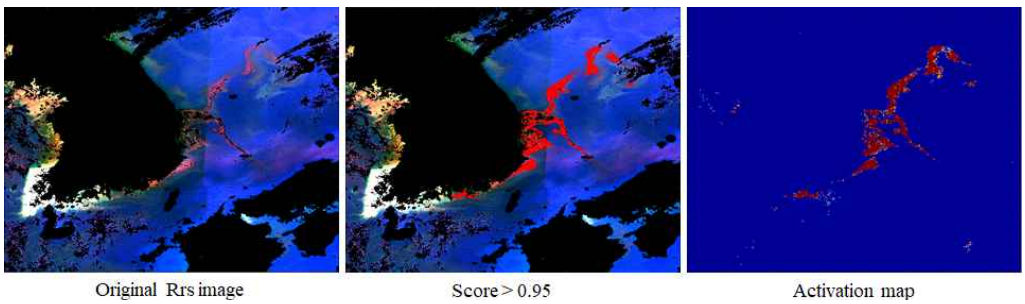


그림 10.2 적조 탐지 결과(예시)

11. 어장환경지수

가. 어업생산 자료를 바탕으로 고등어 서식지의 환경범위 파악

1) 어업 생산 자료 수집

위성자료를 이용하여 한국 연근해역에서 고등어의 잠재적 어장지수 알고리듬 개발을 위해 한국 대형선망 어업조합으로부터 어획자료를 수집하였다. 수집된 자료는 2010년부터 2016년에 걸친 어획자료를 포함하며, 총 6057건의 어획이 기록되어있다. 어획자료는 어획량(M/T), 어획일, 어획위치가 기록되어있으며 어획위치는 약 0.17 × 0.17° 의 소해구 단위로 기록되어있다(그림 11.1). 어장지수 알고리듬의 도출을 위해 어업생산자료 중 동일 시기에 동일 위치에서 어획된 기록은 모두 합산하여 환경조건을 파악할 때에 중복집계되지 않도록 처리하였다. 합산 결과, 어업생산 기록의 총 건수는 3440건으로 나타났다.

수집한 어획기록의 월별 분포를 살펴보면, 어획량의 대부분은 12월과 1월을 비롯한 겨울철에 이루어졌음을 알 수 있었다(그림 11.2). 비록 6월의 어획기록이 많기는 했으나, 높은 어획량은 나타나지 않았다.

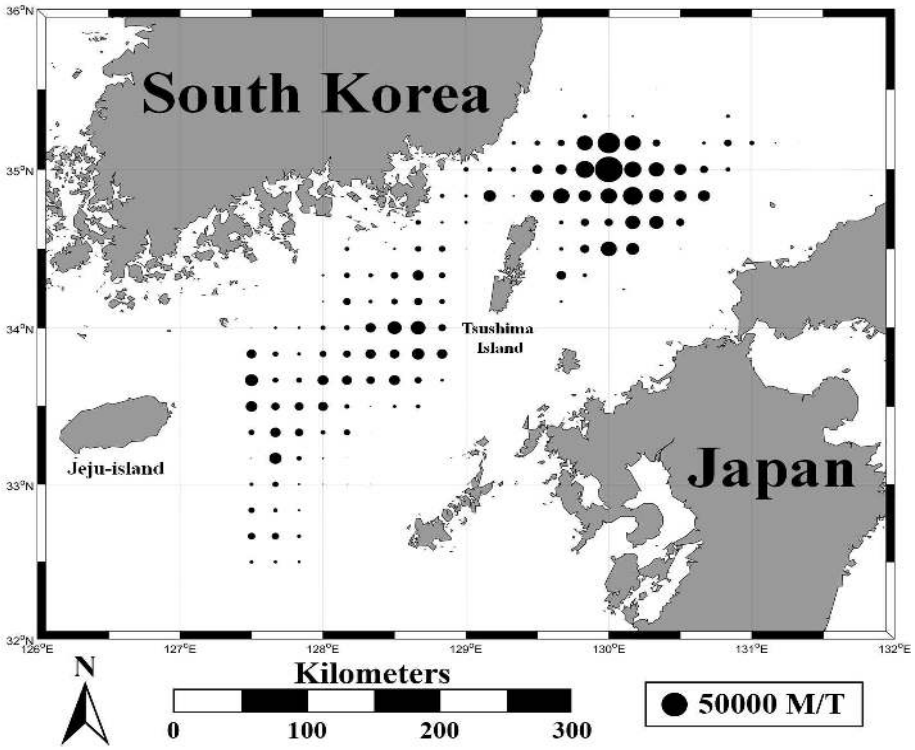


그림 11.1 2010년부터 2016년까지의 고등어 어획자료 요약

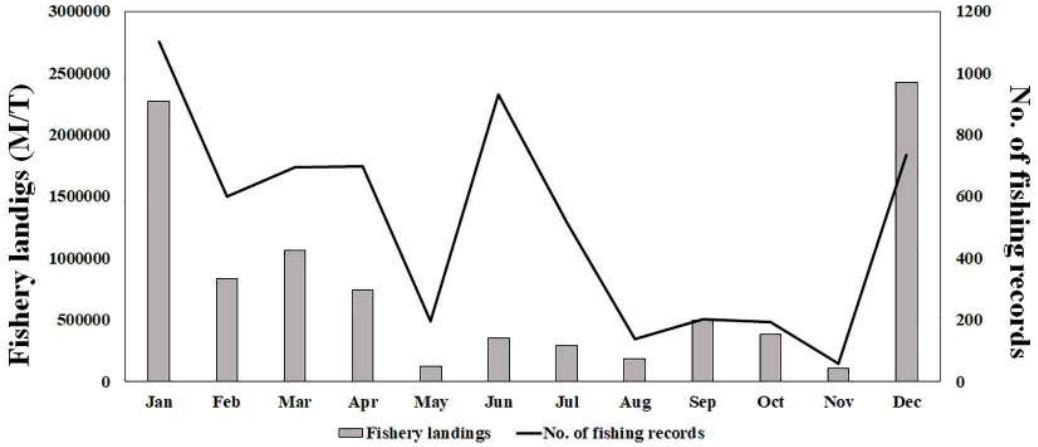


그림 11.2 월별 어획량과 어획기록의 분포도

2) 알고리즘 개발을 위한 위성자료 수집

가) MODIS-Aqua 자료

어장지수 알고리듬 개발을 위한 위성자료로서 MODIS-Aqua 위성으로부터 획득한 표층수온(SST), 엽록소-a(Chl-a), 광합성 유효복사(PAR), 490nm 파장대에서의 소광계수(Kd(490)) 자료를 수집하였다. 해당 자료는 NASA OBPG website (https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/)로부터 획득하였다. 위성자료는 4km의 공간해상도를 갖고있으며, 8일의 시간해상도를 갖는 자료를 이용하였다.

나) GOCI 자료

알고리듬 개발 이후 GOCI자료를 통한 산출물 생산을 위해 GOCI로부터 획득한 표층 엽록소a 농도 자료를 획득하였다. 해당 자료는 한국해양과학기술원의 해양위성센터로부터 제공받았으며, MODIS-Aqua 자료와 함께 이용하기 위해 MODIS-Aqua 자료와 동일한 시공간적 해상도로 처리하여 자료를 이용하였다.

다) 일차생산성 산출

어장지수 산출물의 주요 환경인자로써 이용하기 위해 위성자료를 이용하여 일차생산성을 산정하였다. 일차생산 산정 알고리듬은 Behrenfeld and Falkowski(1997)의 VGPM(Vertically Generalized Production Model)을 기반으로 한 Kameda and Ishizaka (2005)의 K&I 알고리듬을 이용하여 일차생산성을 산정하였다. 산정 식은 다음과 같다.

$$PP_{eu} = 0.66125 \times P_{opt}^{B} \times [E_0 / E_0 + 4.1] \times Z_{eu} \times Chl-a \times DL$$

여기에서 PPeu는 유광층 내에서의 일간 일차생산량 (mg C m-2 d-1), PBopt는 최적 탄소고정률 (mg C (mg Chl)-1 h-1), E0는 하루동안 해표면에 도달하는 광합성 유효복사량 (E m-2 d-1), Zeu는 유광층의 수심, Chl-a는 엽록소a의 농도, DL은 광주기(photoperiod; hours)이다. 기존 Behrenfeld and Falkowski (1997)의 VGPM 알고리즘에서 PBopt는 SST를 이용하여 회귀분석을 통해 7차 다항식으로 산출하였지만 본 알고리즘 (Kameda and Ishizaka, 2005)에서는 SST와 Chl-a를 함께 이용하여 PBopt를 산출하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$P_{opt}^{B} = \frac{0.071 \times T - 3.2 \times 10^{-3} \times T^2 + 3.0 \times 10^{-5} \times T^3}{Chl - a} + [1.0 + 0.17 \times T - 2.5 \times 10^{-3} \times T^2 - 8.0 \times 10^{-5} \times T^3]$$

여기에서 T는 SST (℃)이다. MODIS-Aqua를 통해 측정된 Kd(490)을 이용하여 Zeu = 4.6/Kd(490)을 통해 유광층의 깊이를 산출하였다.

3) 위성자료를 이용하여 고등어 어획시기의 환경조건 파악

가) 수온 환경조건

MODIS-Aqua 위성으로부터 측정된 표층수온 자료를 이용하여 어획시기의 수온범위를 파악하였다. 총 3440개의 기록 중 884건의 경우 구름 혹은 기타 다른 요인에 의해 위성자료가 Masking 처리되어 파악이 불가능했고, 나머지 2556건에 대해 수온분포를 파악하였다. 그 결과, 수온의 범위는 최소 11.48℃에서 최대 31.94℃으로 나타났고, 평균 18.39±4.18℃의 수온을 보였다. 최적수온범위를 찾기위해 수온에 따른 어획건수를 확인해보았다(그림 11.3). 또한, Kaschner et al. (2016)에 따라 10th 백분위수에서 90th 백분위수 까지의 환경범위를 최적 범위로 정의하였다. 그 결과, 15.5 - 16.0℃에서 가장 많은 어획이 이루어졌으며, 최적범위는 14.77 - 25.53℃로 나타났다.

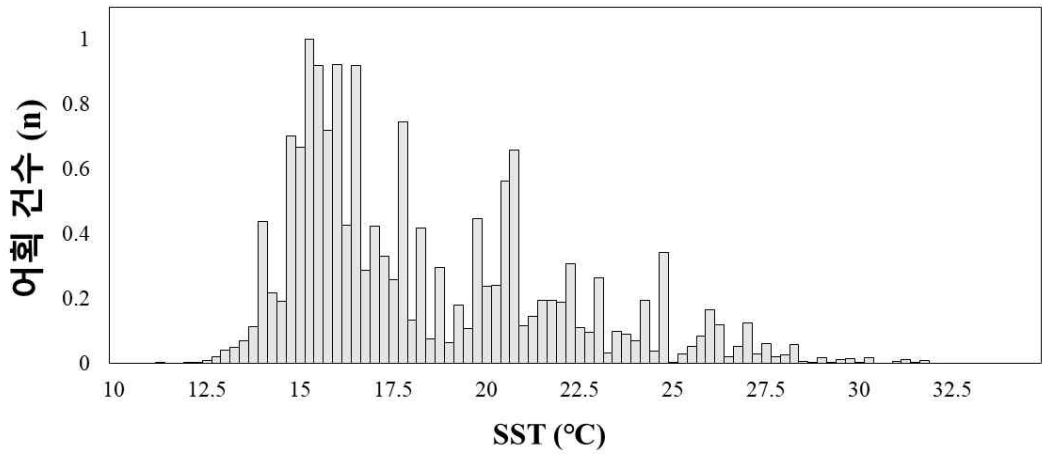


그림 11.3 수온에 따른 어획건수 분포도

나) 엽록소-a 환경조건

수온과 마찬가지로, GOCI 위성으로부터 획득한 표층 엽록소-a 농도 자료를 이용하여 고등어 어획시기의 엽록소 농도 조건을 파악하였다. 총 3440개의 기록 중 846건이 구름 등에 의해 Masking 처리되어 환경조건 파악이 불가능 하였으며, 나머지 2594건에 대해 엽록소a 농도를 확인하였다(그림 11.4). 그 결과, 표층 엽록소a의 농도는 최소 0.01 mg m-3에서 최대 3.79 mg m-3의 범위를 보였으며, 평균 0.25±0.16 mg m-3의 농도를 나타내었다. 최대 어획이 이루어진 엽록소a 농도는 0.19 - 0.20 mg m-3의 범위로 나타났다. 10th 백분위수와 90th 백분위수로 정의된 최적범위의 경우 0.15 - 0.37 mg m-3로 나타났다.

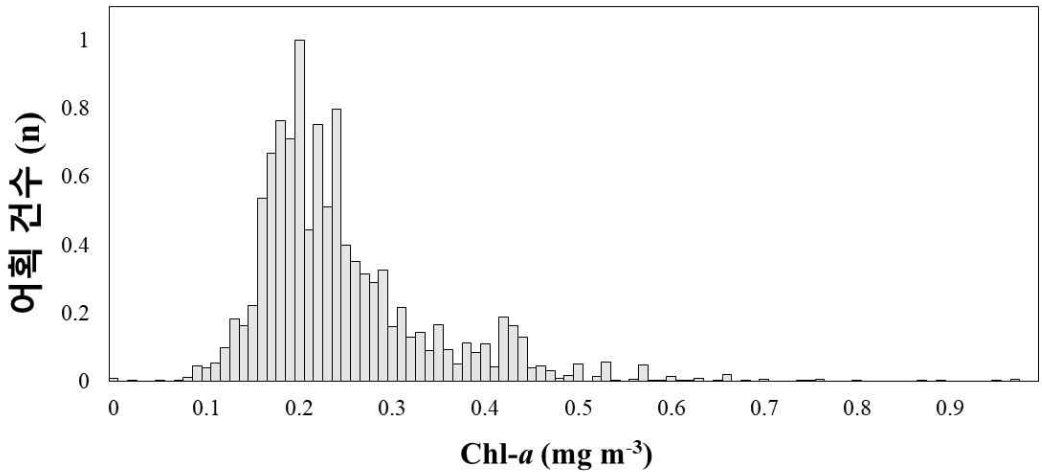


그림 11.4 엽록소-a 농도에 따른 어획건수 분포도

다) 일차생산성 환경조건

MODIS-Aqua 위성으로부터 획득한 표층수온 자료와 해색자료, 그리고 GOCI로부터 획득한 엽록소-a 농도 자료를 이용하여 산정한 일차생산성 자료를 이용하여 고등어 어획시기의 일차생산성을 파악하였다. 총 3440개의 기록 중 1839개의 기록에 대해 일차생산성을 파악하였다(그림 11.5). 그 결과, 고등어 어획시기의 일차생산성은 최소 26.06 mg C m-2 d-1에서 최대 2651.96 mg C m-2 d-1의 범위를 보였다. 평균 일차생산성은 451.73±191.29 mg C m-2 d-1 으로 나타났으며, 10th 백분위수와 90th 백분위수로 정의된 최적 환경조건의 경우 280.51 - 613.52 mg C m-2 d-1 로 나타났다.

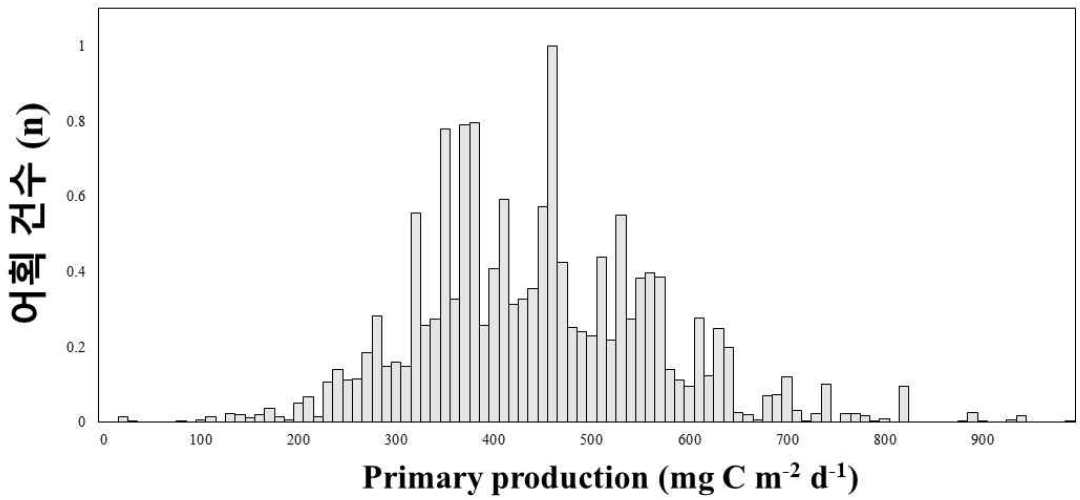


그림 11.5 일차생산성에 따른 어획건수 분포도

나. 환경조건과 서식지 사이의 경험적 관계식을 통해 고등어 어장 지수 추정 알고리즘 정립

1) 수온에 따른 적합도 추정 알고리즘

본 연구에서는 환경요인에 따른 적합도 추정 알고리즘을 정립하기 위해 동중국해에서 수행되었던 선행연구인 Chen et al.(2009)의 연구에서 사용하였던 적합지수 모델을 활용하여 본 연구에서 나타난 결과를 토대로 회귀분석을 실시하였다. 해당 적합지수 모델은 아래와 같다.

$$SI_{SST} = \exp(a(X_{SST}+b)^2)$$

여기에서 SISST는 수온에 따른 적합지수, XSST는 표층수온, 그리고 a와 b는 회귀분석을 통해 결정된 상수이다. 회귀분석을 통해 결정된 상수 a와 b는 각각 -0.267, -15.81로 나타났으며, 수온 적합지수 모델은 아래와 같다.

$$SI_{SST} = \exp(-0.267(X_{SST}-15.81)^2)$$

상기 적합지수의 회귀곡선은 그림 11.6에 나타내었다. 해당 적합지수 모델의 정확도를 살펴보기 위해 통계적 수치를 살펴보았을 때, R2는 0.6388, RMSE의 경우 0.1627로 나타났다.

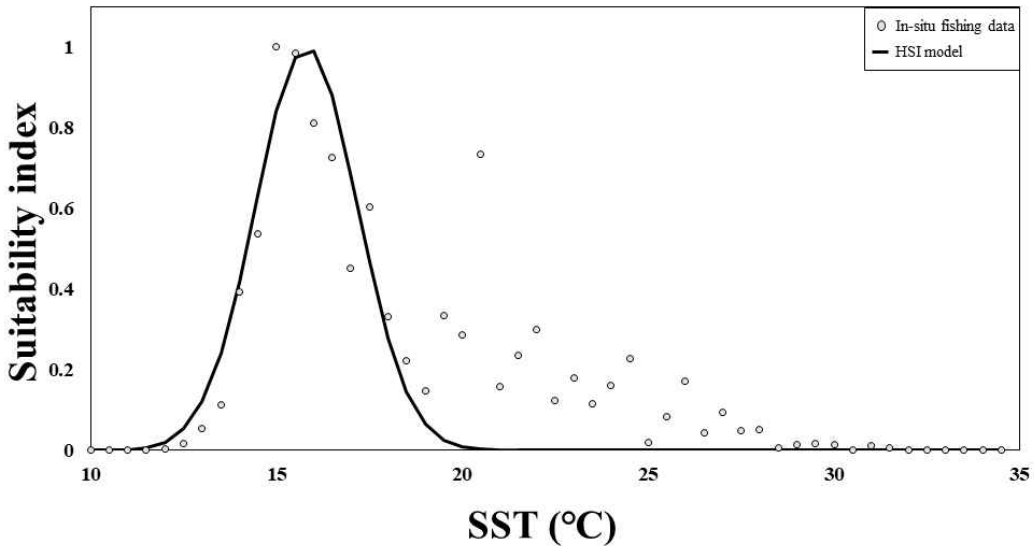


그림 11.6 수온분포에 따른 적합지수 모델의 회귀분석 결과

2) 엽록소-a 농도에 따른 적합도 추정 알고리즘

수온과 마찬가지로, 엽록소-a 농도에 따른 적합도 추정 알고리즘을 정립하기 위해 동중국해에서 수행되었던 선행연구인 Chen et al.(2009)의 연구에서 사용하였던 적합지수 모델을 활용하여 본 연구에서 나타난 결과를 토대로 회귀분석을 실시하였다. 해당 적합지수 모델은 아래와 같다.

$$SI_{Chl-a} = \exp(a(\ln(X_{Chl-a})+b)^2)$$

여기에서 SIChl-a는 엽록소-a 농도에 따른 적합지수, XChl-a는 엽록소-a의 농도, 그리고 a와 b는 회귀분석을 통해 결정된 상수이다. 회귀분석을 통해 결정된 상수 a와 b는 각각 -7.224, 1.625로 나타났으며, 엽록소a 농도에 대한 적합지수 모델은 아래와 같다.

$$SI_{Chl-a} = \exp(-7.224(\ln(X_{Chl-a}) + 1.625)^2)$$

상기 적합지수의 회귀분석 결과와 곡선은 그림 11. 7에 나타내었다. 해당 적합지수 모델의 정확도를 살펴보기 위해 통계적 수치를 살펴보았을 때, R2는 0.9584, RMSE의 경우 0.0561로 수온에 비해 상대적으로 매우 높은 정확도를 보였다.

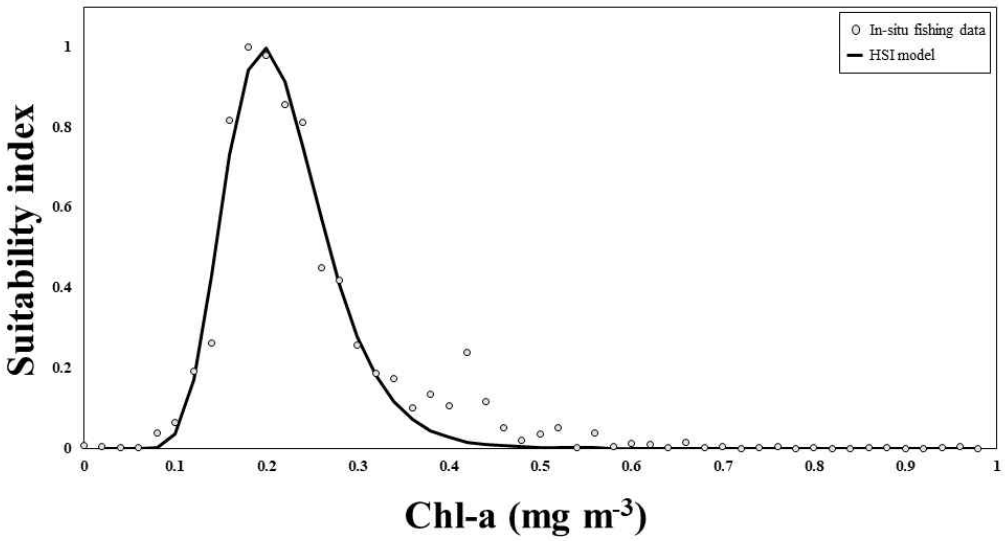


그림 11.7 엽록소-a 농도에 따른 적합지수 모델의 회귀분석 결과

3) 일차생산성에 따른 적합도 추정 알고리즘

일차생산성에 따른 적합도 추정 알고리즘을 정립하기 위해, 앞서 표층수온에 대한 적합도 추정 알고리듬과 동일한 적합지수 모델을 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 일차생산성에 대한 적합지수 모델은 수온과 동일한 모델로써, 다음과 같다.

$$SI_{PP} = \exp(a(X_{PP} + b)^2)$$

여기에서 SIPP는 일차생산성에 따른 적합지수, XPP는 일차생산성, 그리고 a와 b는 회귀분석을 통해 결정된 상수를 나타낸다. 회귀분석을 실시한 결과, 상수 a와 b는 각각 -0.6104×10-4, -419.6으로 나타났으며, 일차생산성에 대한 적합지수 모델은 다음과 같이 결정되었다.

$$SI_{PP} = \exp(-0.00006104(X_{PP} + 419.6)^2)$$

상기 일차생산 적합지수 모델의 회귀분석 결과와 곡선은 그림 11.8에 나타내었다. 해당 적합지수 모델의 정확도를 나타내는 통계적 수치를 살펴보았을 때, R2는 0.7270, RMSE는 0.1420으로 수온 모델에 비해서는 다소 정확도가 낮게 나타났다.

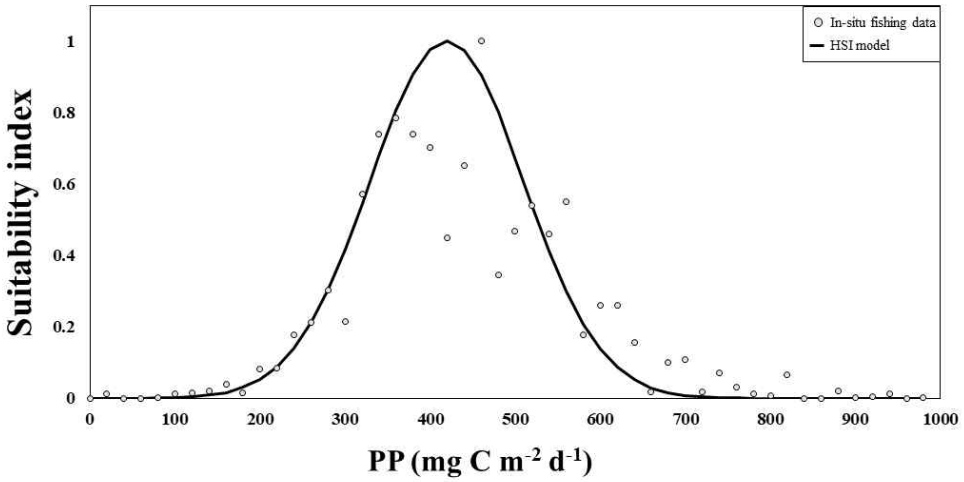


그림 11.8. 일차생산성에 따른 적합지수 모델의 회귀분석 결과

최종적으로, 각각 3가지 환경요인에 대한 서식적합지수 모델과 통계분석 결과를 표1에 나타내었다.

표 11. 1. 환경요인에 대한 적합지수 모델 산정 결과

변수	적합지수 모델	RMSE	R2
SST	$\exp(-0.267(X_{SST}-15.81)^2)$	0.1627	0.6388
Chl-a	$\exp(-7.224(\ln(X_{Chl})+1.625)^2)$	0.0561	0.9584
Primary Production	$\exp(-0.00006104(X_{PP}-419.6)^2)$	0.1420	0.7270

4) 3개의 환경요인을 통한 서식지 적합도 추정 알고리즘 정립

앞서 표층수온, 엽록소-a 농도, 일차생산성에 대한 적합지수 모델 산정결과를 이용하여 고등어의 어장 적합지수 모델을 산정하기 위해 3개의 적합지수(SISST, SIChl-a, SIPP)를 하나의 지수값으로 환산하였다. 여러개의 지수모델을 하나의 어장 적합지수 형태로 환산하는 과정에서 이용 가능한 방법으로는 Continued Product Model (CPM), Minimum Model (MINM), Arithmetic Mean Model (AMM), Geometric Mean Model (GMM) 등이 있다. 각각의 모델은 다음과 같다.

Continued Product Model (CPM; Grebenkov et al. 2006; Chen et al. 2008)

$$FGI = SI_1 \times SI_2 \times SI_3$$

Minimum Model (MINM; Van der Lee et al., 2006)

$$FGI = Min(SI_1, SI_2, SI_3)$$

Arithmetic Mean Model (AMM; Hess and Bay, 2000)

$$FGI = (SI_1 + SI_2 + SI_3)/3$$

Geometric Mean Model (GMM; Lauver et al., 2002)

$$FGI = (SI_1 \times SI_2 \times SI_3)^{1/3}$$

태평양 해역에서 이루어진 많은 선행연구들을 살펴보았을 때, 많은 연구에서 서식지 어장 적합지수 산정을 위한 모델은 AMM이 가장 적합하다고 보고된 바 있으며(Chen et al., 2009; Yen et al., 2012; Li et al., 2014), 이에 따라 본 연구에서 또한 AMM을 이용하여 어장 적합지수를 산정하였다. 따라서 한국 연근해역의 고등어에 대한 서식지 적합지수를 아래와 같이 산정하였다.

$$FGI = (SI_{SST} + SI_{Chl-a} + SI_{PP})/3$$

해당 과정을 통해 도출된 서식지 적합지수는 0에서 1사이의 값을 가지며, 높을수록 고등어의 서식지로서의 적합도가 높음을 의미한다.

다. 고등어 어장지수 추정 알고리즘의 성능 검증

1) 시각적 성능 검증

고등어 어장지수 추정 알고리즘을 이용하여 산출된 산출물의 정확도를 검증하기 위해, 먼저 산출물의 공간적 분포와 어획자료의 공간적 분포의 일치성을 확인하였다(그림 11.9). 그 결과, 대체로 어장지수가 높은 해역에서 어획이 이루어졌음을 확인할 수 있었으며, 어장지수가 낮은 해역에서는 낮은 어획량을 보이거나 어획이 이루어지지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 어장지수의 공간적 분포와 어획기록의 공간적 분포 사이에 어느 정도 일치성이 존재함을 확인 할 수 있었고, 대체로 높은 어획량을 보인 기록의 경우 어장지수가 높은 해역에 위치하는 모습을 보였다.

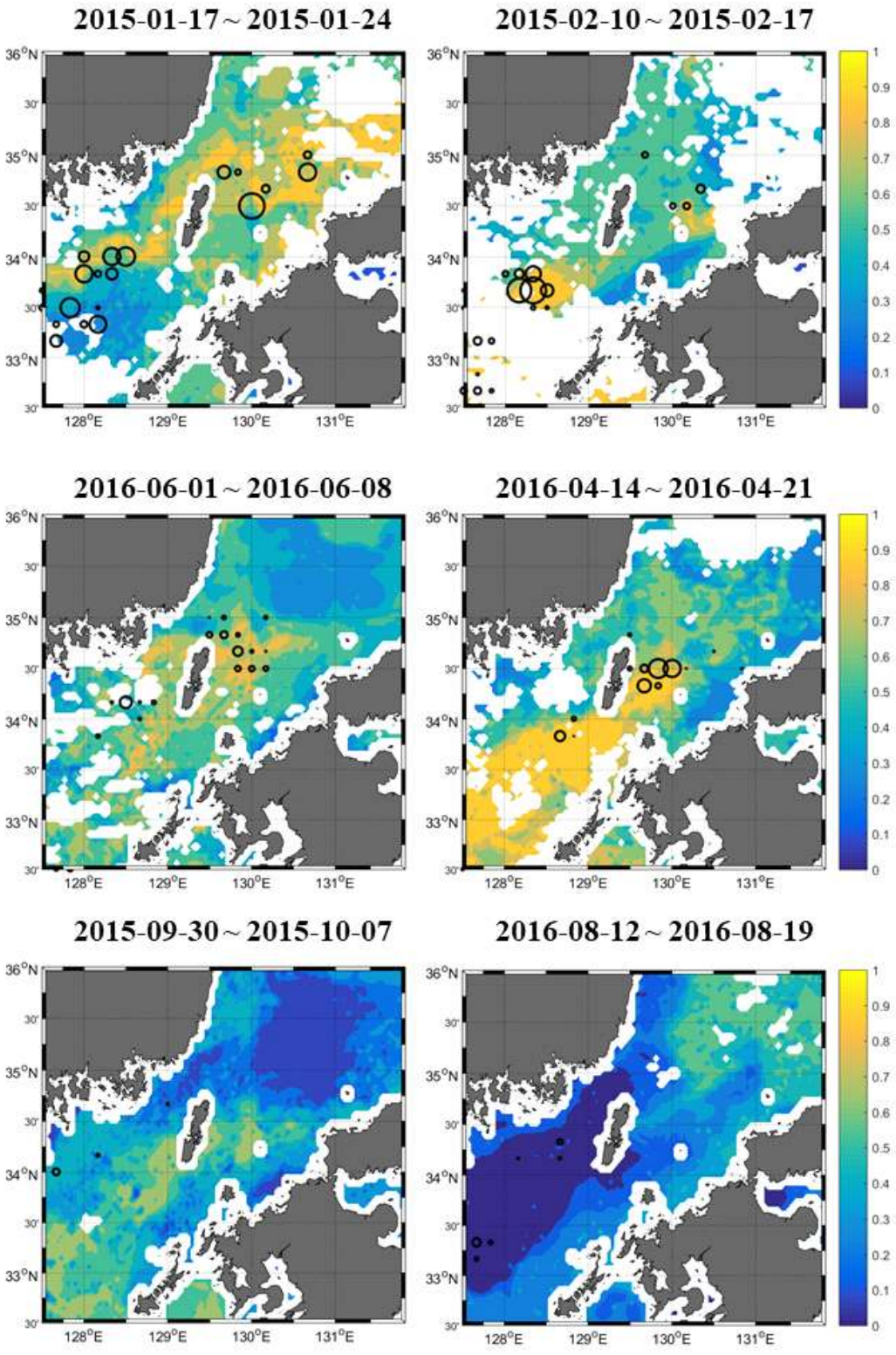


그림 11.9. 고등어 어장지수 산출물과 어획기록의 공간분포

2) 통계적 성능 검증

고등어 어장지수 알고리즘으로부터 도출된 산출물의 정확도를 검증하기 위해 산출물과 어획기록을 이용하여 분석을 실시하였다. 먼저 통계적 분석을 위해 0에서 1 사이의 서식지 적합지수를 0.1단위로 10구간으로 분할하여 각 구간별 어획량을 합산하였다(그림 11.10). 이후, 어장지수 알고리즘 산출물의 정확도를 정량적으로 판단하기 위해 어장지수와 어획량 간의 선형 상관분석을 실시하였다(그림 11.11). 그 결과, 0.7096의 높은 양의 상관관계가 나타났다. 이에 따라 본 연구를 통해 도출된 어장지수 산출 알고리즘의 정확도가 신뢰할 수 있을 만한 수준이라고 판단하였다.

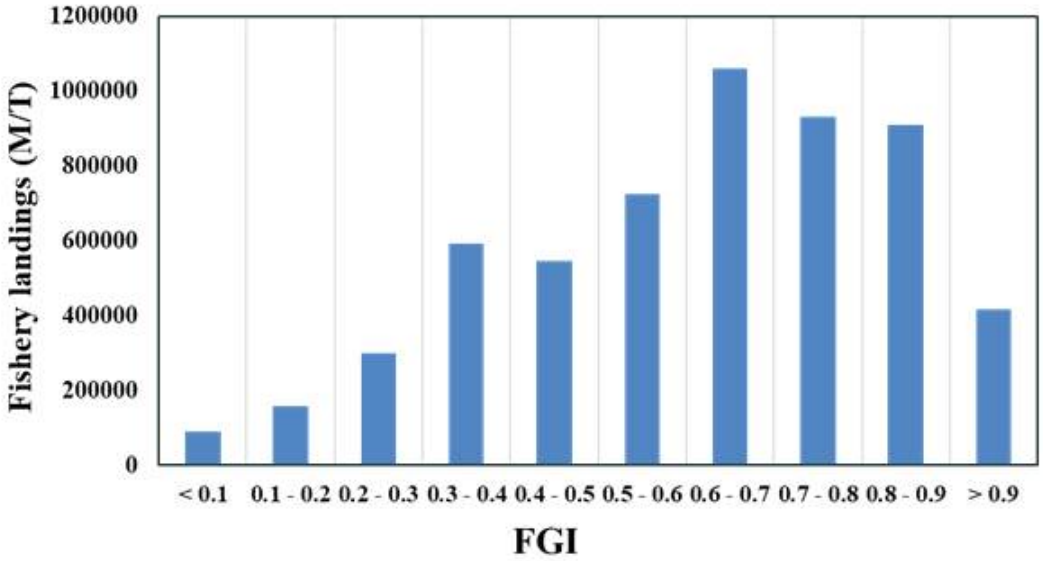


그림 11.10. 어장지수 구간별 어획량 분포도

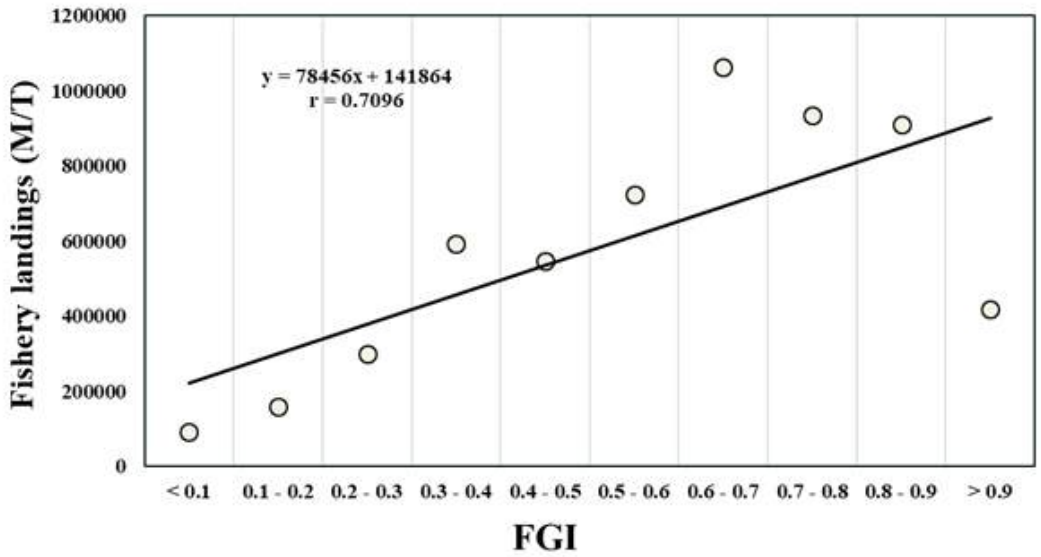


그림 11.11. 어장지수와 어획량간의 선형 상관관계

라. 어장지수의 시공간적 변동성 파악

1) 기후학적 월별 평균 어장지수 자료를 통한 월별 변동성 분석

한국 연근해역에서 고등어 어장지수의 시공간적 변동성을 파악하기 위해, 2011년 1월부터 2016년 12월까지의 월별 어장지수 산출물을 통해 기후학적 분석을 실시하였다 (그림 11.12-11.14). 그 결과, 대체로 겨울철에 남해 연근해역에서 상대적으로 높은 어장지수가 나타나는 것이 확인되었다. 또한, 5월부터 남해에서 높게 나타났던 어장지수가 감소하고, 동해 전역에 걸쳐 0.4-0.5 정도의 어장지수 분포를 보였다. 이후, 12월부터 다시 동해 남부해역의 어장지수가 높아지는 형태의 분포를 보였다. 이를 종합해 보았을 때, 겨울철 남해 해역에서 가장 높은 어장지수를 보였고, 이후 봄철부터 남해 해역의 어장지수가 감소하고 동해 북부해역까지 전역에 걸쳐 어장지수가 증가하는 모습을 보였다. 이후, 12월에 동해 남부해역부터 어장지수가 점차 증가하는 추세를 보였다.

일반적으로 남해는 한국 근해에 서식하는 참고등어의 월동장(Wintering ground)이자 산란장(Spawning ground)으로 알려져있다(Chyung, 1977; Yoon et al., 2008). 고등어의 산란은 일반적으로 봄에 발생하며 산란기 이후 고등어는 색이장(feeding ground)인 동해로 이동하여 11월까지 섭식활동이 이루어진다고 알려져있다(Cha et al., 2002). 또한, 섭식활동이 끝난 이후, 고등어는 남해로 돌아와 다시 월동준비를 하는 것으로 알려져있다(Choi et al., 2003). 이러한 알려진 고등어의 시공간적 분포 패턴을 살펴보았을 때, 본 연구에서 산출한 어장지수 산출물의 시공간적 분포와 높은 일치성을 보였으며, 고등어의 공간분포를 파악하기에 적합한 알고리즘이라고 판단하였다.

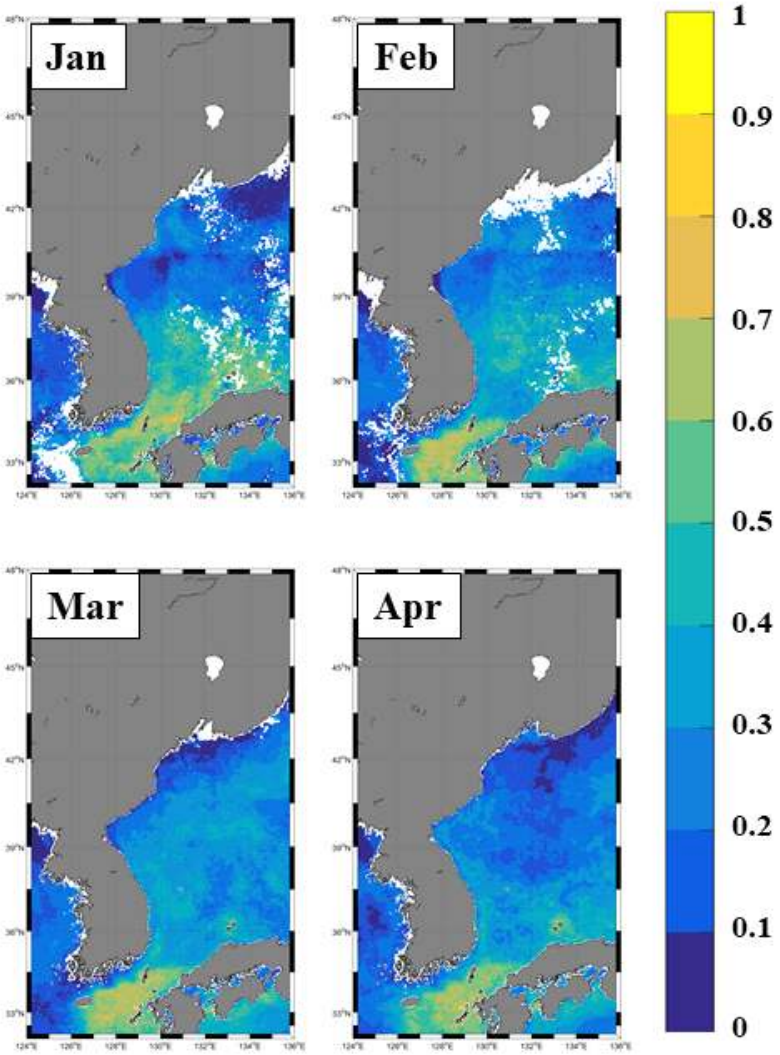


그림 11.12. 1월부터 4월까지 한국 동해 및 남해에서 고등어 어장지수의 월별 기후학적 분포도

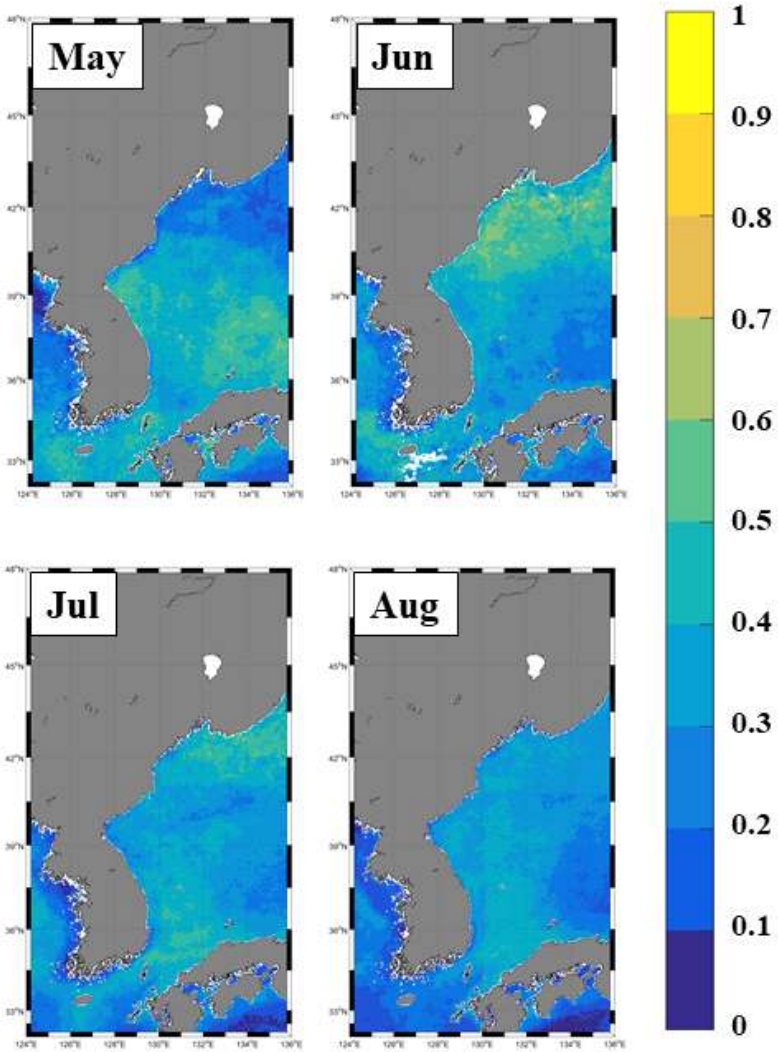


그림 11.13. 5월부터 8월까지 한국 동해 및 남해에서 고등어 어장지수의 월별 기후학적 분포도

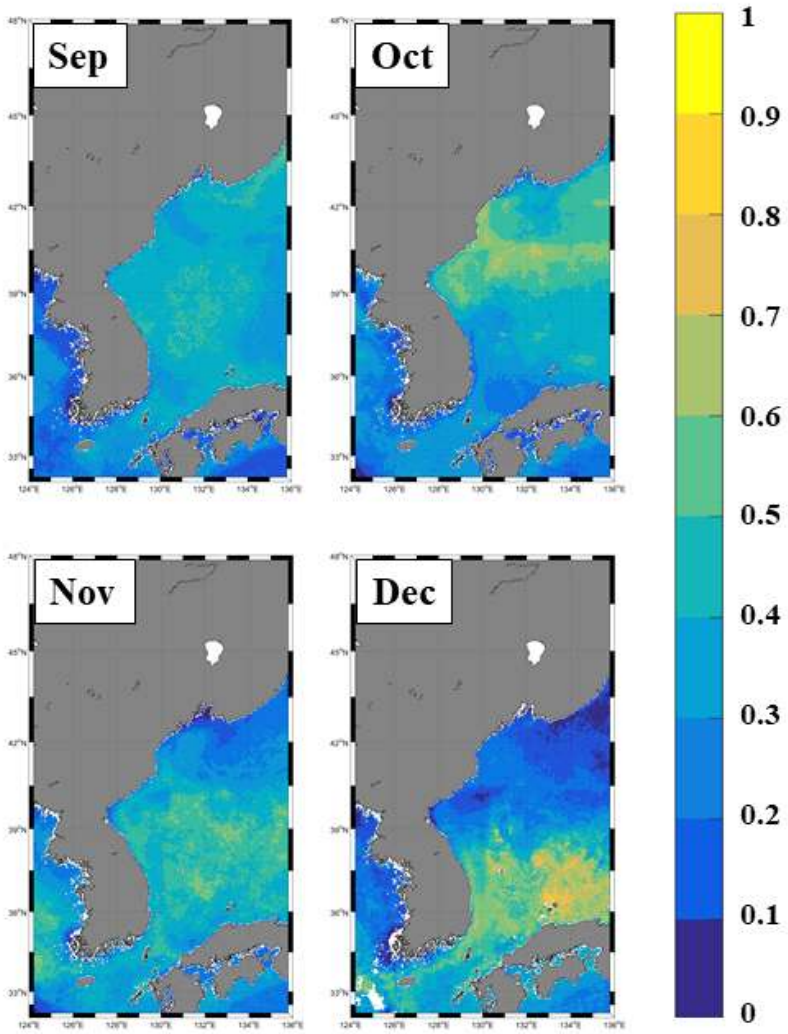


그림 11.14. 9월부터 12월까지 한국 동해 및 남해에서 고등어 어장지수의 월별 기후학적 분포도

2) 어장지수를 통한 Hotspot 분포 파악

어장지수를 통한 고등어 어장의 공간적 분포를 파악하고 Hotspot 분포를 파악하기 위해, 기후학적 어장지수 자료를 이용하였다. Hotspot 분포를 파악하기에 앞서, 이를 위해 0.1 단위의 어장지수 구간별 어획량을 계산하였다(표 11.2).

표 11.2. 어장지수에 따른 누적 어획량

어장지수	어획량(M/T)
< 0.1	90,850
0.1 - 0.2	159,295
0.2 - 0.3	299,296
0.3 - 0.4	591,243
0.4 - 0.5	547,518
0.5 - 0.6	724,347
0.6 - 0.7	1,061,237
0.7 - 0.8	932,557
0.8 - 0.9	910,809
> 0.9	416,577
합계	5,733,729

구간별 어장지수에 따른 어획량을 살펴보았을 때, 어장지수가 0.6보다 높은 구간에서 전체 어획량의 50% 이상이 이루어졌음을 확인하였다. 이에 따라 Hotspot을 어장지수가 0.6 이상인 해역으로 정의하여 분석을 실시하였다(그림 11.15-11.17). 분석 결과, Hotspot의 월별 분포를 살펴보면 겨울철과 봄철에 남해 인근과 동해 남부해역에서 Hotspot이 크게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 말한 남해에서 형성된 월동장의 영향으로 판단된다. 또한, 여름철에는 Hotspot이 전혀 나타나지 않았는데, Nishimura (1965)에 따르면 한국 연근해역에 서식하는 참고등어가 Feeding ground로 이동할 때에 여러 군집으로 나뉘어져 각기 다른 경로로 이동한다고 보고 된 바 있다. 이로 인해 뚜렷한 Hotspot이 형성되지 않는 것이 어장지수 산출물에 반영되어 나타난 결과라고 생각된다. 이후 10월에 동해 북부에서 비교적 큰 Hotspot이 나타나고, 12월 동해 남부해역에서 넓은범위에 걸쳐 Hotspot이 나타났다. Yasuda et al. (2014)에 따르면 많은 고등어의 어획이 12월에 Hotspot이 나타난 해역에서 이루어진다고 보고된 바 있으며, 이와 상응하는 결과로써 나타난 것으로 생각된다.

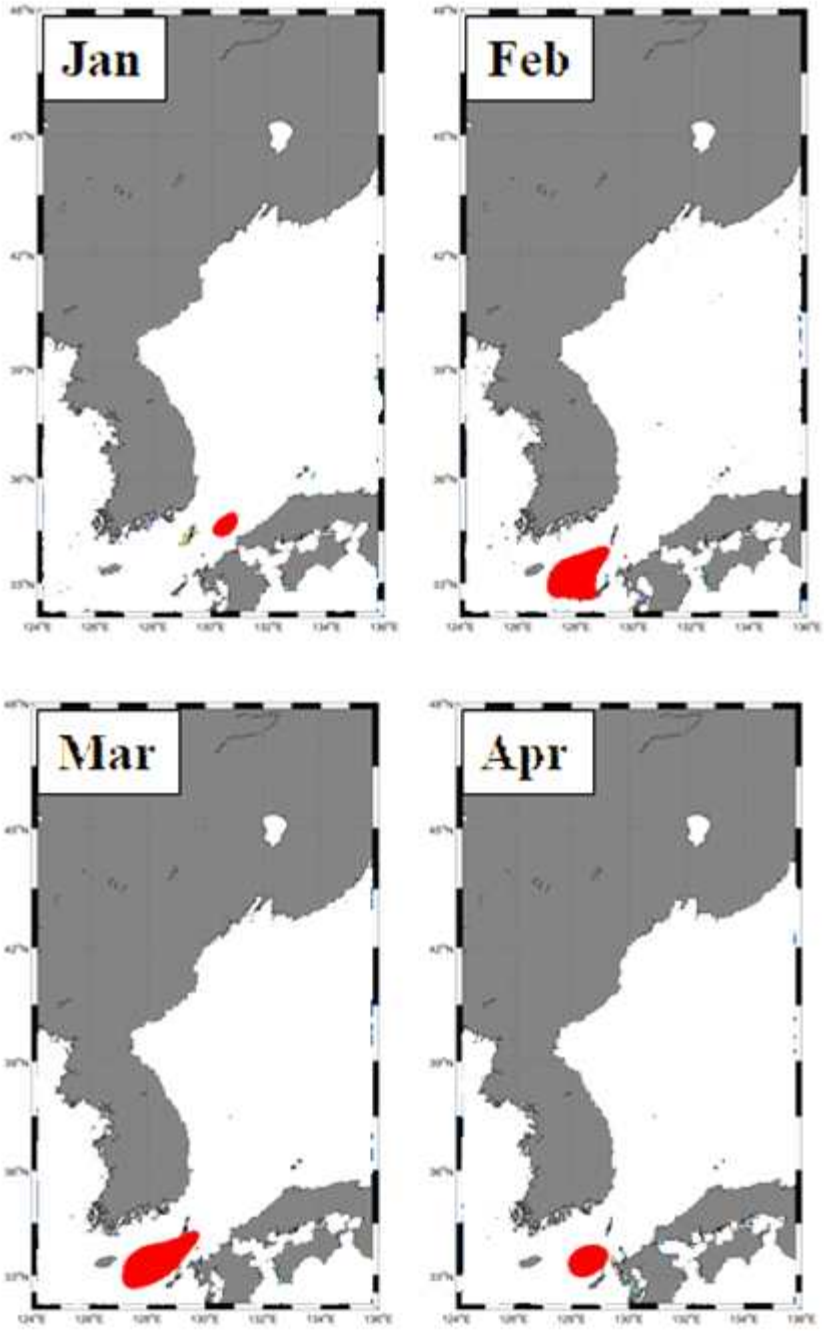


그림 11.15 1월부터 4월까지의 Hotspot 분석 결과 (붉은색)

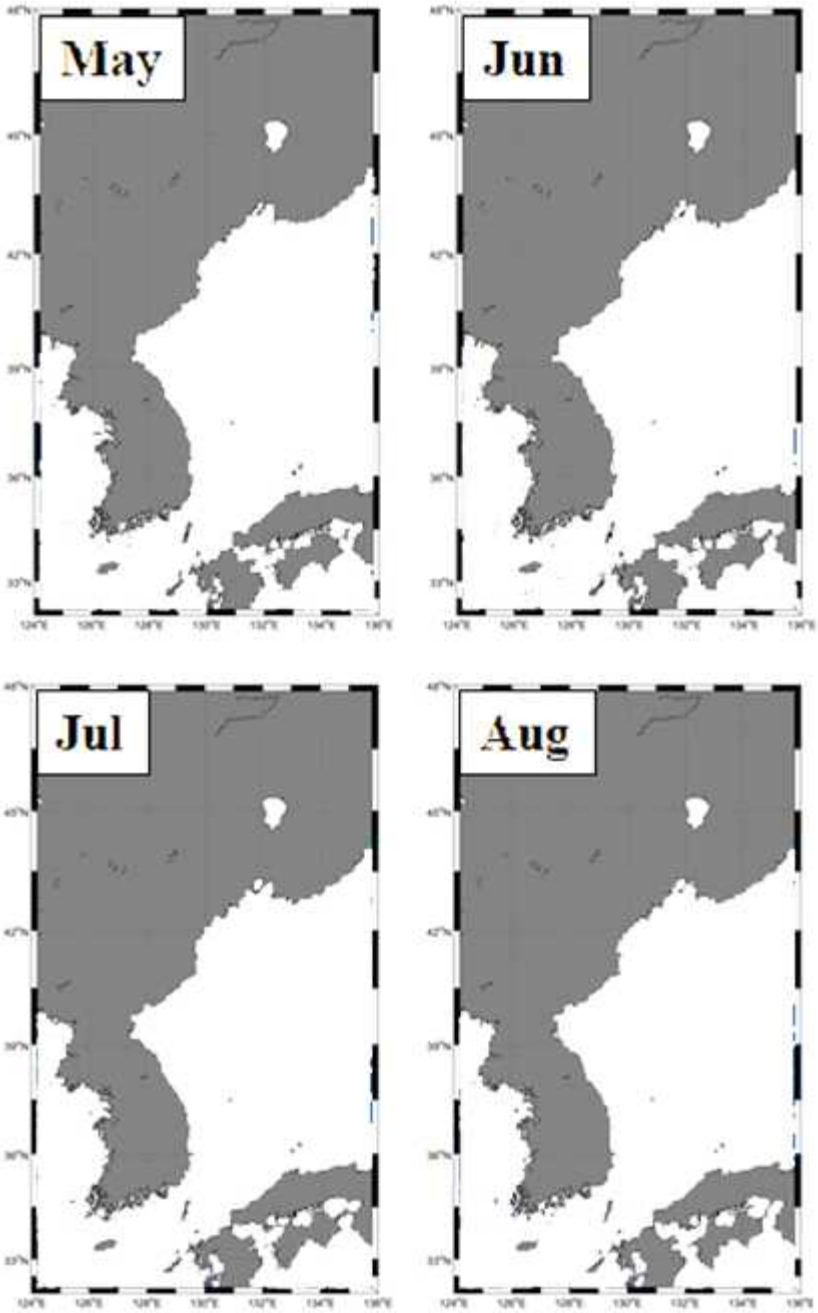


그림 11.16. 5월부터 8월까지의 Hotspot 분석 결과 (붉은색).

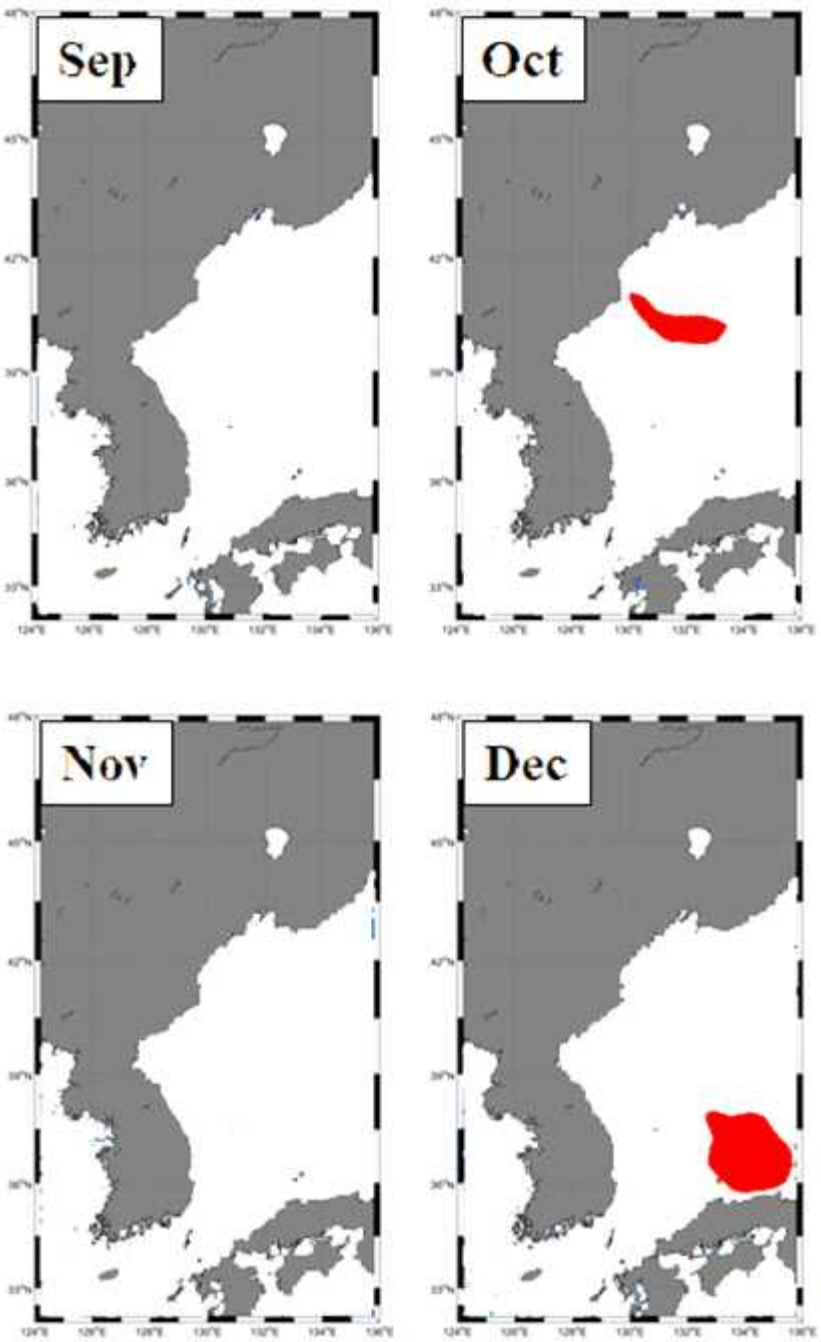


그림 11.17. 9월부터 12월까지의 Hotspot 분석 결과 (붉은색)

12. 해양일차생산력

가. 동해 울릉분지의 일차생산력

기존연구 요약: 우리나라 동해의 일차생산력 연구는 1980년대에 Shim 과 Park(1986)이 14C 동위원소를 이용 시작하였다. 2000년대 들어 일본학자들과 국내학자들에 의해 위성기반의 일차생산력 연구들이 울릉분지를 대상으로 진행되었다(kameda&Ichizaka 2015; Ju et al 2016).

나. 동해 울릉분지의 일차생산력 모델:

동해울릉분지에 적용된 일차생산력 모델은 Vertically generalized production model(VGPM) 모델이 유일하다(식 1).

$$PPeu = 0.66125*PBopt*[E0/(E0+4.1)]*Zeu*Chl\text{-}a*DL \quad (1)$$

Abbreviation	Meaning	Unit
*PP*eu	Daily C fixation integrated from the surface to Zeu	(mg C m^{-2} day^{-1})
P^{B}_{opt}	Chl-a normalized optimal photosynthetic rate in the water column	(mg C (mg chl a)$^{-1}$ h^{-1})
E0	Sea surface daily PAR,	mol quanta m^{-2}
Zeu	Physical depth receiving 1% of E0	m
Chl-a	Surface Chl-a concentration derived by satellite,	(mg Chl-a m^{-3})
DL	Day length	hour

PBopt를 제외한 모든 변수들이 위성자료로 획득될 수 있으나 Zeu 와 Chl-a도 지역해에 맞는 알고리즘 개선이 필요하다.

다. 일차생산력 정밀도 비교(P^{B}_{opt} 와 Z_{eu} 알고리즘 개선 결과)

- 위성기반: 264(gCm-2year-1) (Ju et al. 2016)
- in situ study: 178 (gCm-2year-1) (2016-2019년 현장관측, 미발표 자료)
- this study: 185 (gCm-2year-1)

라. 결과의 중요성

일차생산력은 탄소순환, 물질순환, 먹이망, 수산자원 조절, 기후변화 조절 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 담당한다. 현재까지 기존의 알고리즘을 이용 동해의 일차생산력을 추정하였으나, 현장 실측값과는 큰 차이를 나타냈다. 이번 연구결과는 아직 진행 중인 알고리즘의 개선 과정이지만 현장 측정값에 비해 50% 과대측정 되던 연 일차생산력을 3% 과대 측정으로 정밀도를 높이는 결과를 얻었다.

마. 향후 계획

추가적인 알고리즘 개선을 통해 울릉분지를 포함한 우리나라 주변해의 일차생산력 개선을 단계적으로 진행할 예정

13. 부유조류

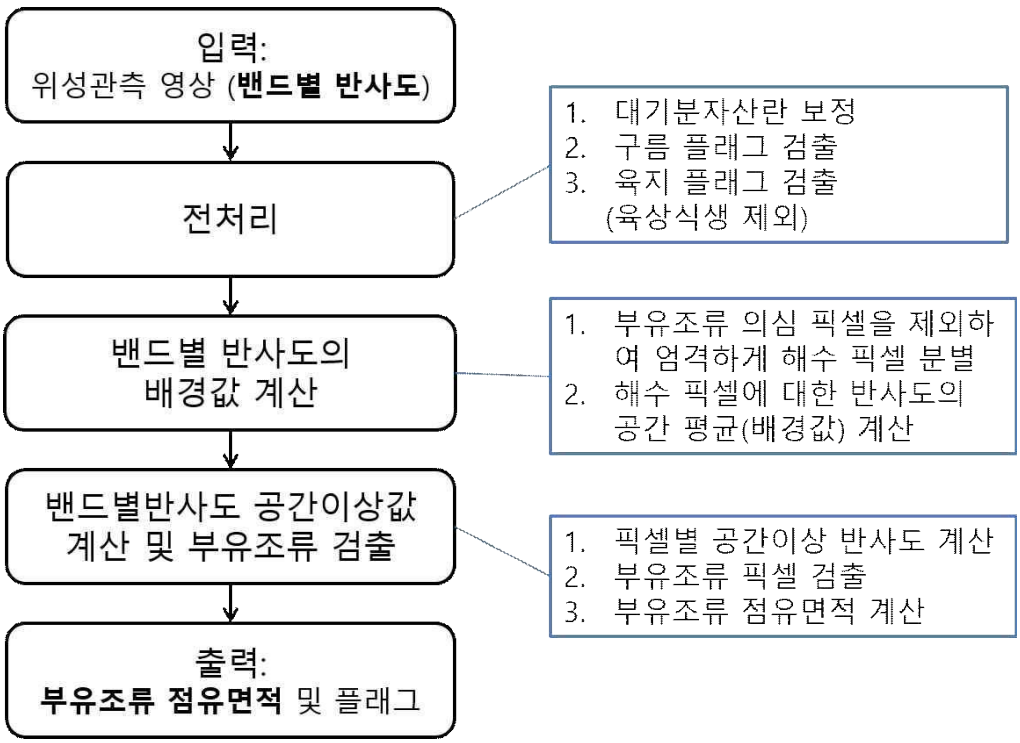
가. 산출물 정의

부유조류(floating macroalgae)는 갈조인 괭생이모자반과 녹조인 가시파래가 바닥에서 이탈하여 해수표면에 떠서 이동하는 것을 의미하며, GOCI-II의 부유조류 산출물은 각 화소에서 부유조류가 점유하는 면적비를 나타낸다. 점유면적비가 잡음 수준으로 낮아 유의미하지 않은 경우 미검출(점유면적비 0)로 설정되고, 육지, 구름, 선박, 탁수 등 부유조류 탐지가 불가능한 경우 무효(invalid) 픽셀로 처리된다. 단, 육상의 식생인 경우에도 해상의 부유조류와 유사한 반사도 특성을 나타내어 부유조류로 검출될 수 있으므로 가능하면 육지마스크를 적용한다.

나. 알고리즘 요약-공간이상 스펙트럼(Spatial Anomaly Spectrum) 알고리즘

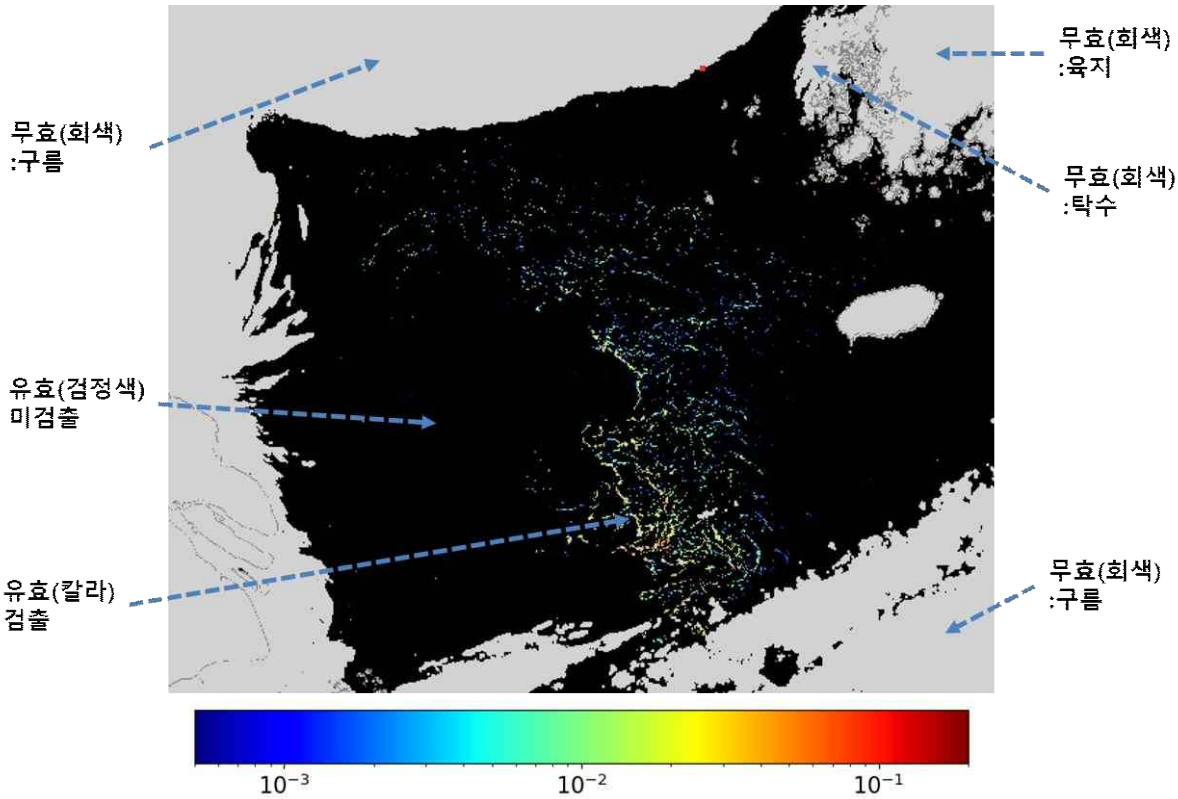
기존의 알려진 알고리즘(NDVI, FAI 등)과 마찬가지로, 공간이상 스펙트럼 알고리즘에서도 식물성플랑크톤을 포함하는 조류의 두드러진 특징인 적색-근적외선 영역에서 반사도가 급격히 증가하는 red-edge 현상을 이용한다. 다만, 공간이상 알고리즘은 해양 및 대기의 지역적 변동성의 영향을 고려하기 위해 밴드별 반사도의 배경 값을 제거한 공간 이상 반사도(Spatial Anomaly Reflectance)스펙트럼을 이용하여 부유조류를 판단하고, 부유조류 포함 화소에 대하여 red-edge 반사도 차이에 비례하는 점유면적비 계산함.

○ 간단한 알고리즘 흐름도



다. 산출물의 그림 예시

아래 그림은 GOCI-II의 부유조류 알고리즘을 GOCI(2020년 5월 12일 11시 촬영영상)에 적용한 부유조류 산출물을 표출한 것으로 제주도 서쪽에 남북 방향으로 대규모 부유조류 띠가 분포하고 있으며 일부는 제주연안으로 근접해 있음을 알 수 있다.



부유조류 산출물 표출 예. 칼라는 점유면적비(0-1)를 나타냄. 검정색은 미검출, 회색은 구름, 높은 탁도, 육지(고정 마스크 사용) 등의 무효 픽셀을 나타냄.

14. 용존 유기물

가. 개요

용존유기물(Dissolved Organic Matter, DOM)은 해수에 용해되어 존재하는 유기물질을 총칭하며, gelbstoff, yellow substance, gilvin등의 다른 이름으로 불려지기도 한다. 그 중에서 light-absorption과 연관이 있는 용존유기물을 유색용존유기물(Colored Dissolved Organic Matter, CDOM)이라고 한다. 연안 해역의 CDOM는 주로 육지의 담수, 오수, 퇴적물 등으로부터 공급되고, 외해역의 CDOM는 주로 박테리아에 의한 식물플랑크톤의 분해나 동물플랑크톤의 배설물, 동물플랑크톤을 비롯한 동물들의 sloppy feeding 등으로부터 생성되는 것으로 알려져 있다(Urban-Rich, 1999). CDOM은 주로 태양광에 의해서 약 57~84% 정도가 분해되며 (Moran et al., 2000; Zanardi-Lamardo et al., 2002), 플랑크톤도 CDOM의 분해에 기여하는 것으로 알려져 있다(Hessen et al., 1994; Morris and Hargreaves, 1997; Nelson et al., 1998).

CDOM의 광학적 특성은 자외선(UV-A, UV-B)과 청색 파장 범위의 빛을 흡수하여 유해한 자외선으로부터 수중생태계를 보호하지만, 동시에 광합성 유효광(photosynthetically available light, PAR)을 감소시키기 때문에 해양 생태계의 주요 변수이기도 하다. 일반적으로 CDOM의 흡광 스펙트럼 특성은 파장이 증가할수록 지수함수적으로 감소한다. 따라서 청색 파장 범위에서 강한 흡광 특성을 나타낸다.

CDOM 알고리즘은 파장 400 nm, 412 nm, 440 nm 등 청색 파장 범위의 특정한 파장에서 발생되는 흡광계수 값을 산출하며 단위는 m-1이다.

나. 수식

용존유기물의 흡광이 강한 청색 파장 영역에서는 부유물질과 엽록소도 흡광이 강하다. 이 두 구성성분의 영향을 최소화하기 위해서, 청색 파장 범위의 443 nm, 490 nm과 녹색 파장 범위의 555 nm의 원격반사도 비율을 사용하였다.

YOC 알고리즘 (Siswanto et al., 2011)을 기반으로 아래와 같이 계수를 조정하여 알고리즘을 도출하였다.

$$a_{dom}440 = 10^{(a_0 + a_1 \log_{10}(R) + a_2 \log_{10}^2(R))}$$

$$R = \left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)} \right) R_{rs}(443)^{0.059}$$

$$a_0 = -1.23, a_1 = -2.311, a_2 = -2.16$$

15. 총 부유물질 농도

가. 개요

총부유물질(Total Suspended Material, TSM)은 해수에 부유하고 있는 모든 무기물질과 유기물질들을 총칭한다. 이러한 부유물질의 농도가 높아질수록 부유입자의 산란과 흡광이 증가하고 이에 의해 원격반사도 값도 증가한다. 따라서 총부유물질 농도 알고리즘은 해수 표층에 부유하는 총부유물질들의 농도를 원격반사도 값을 이용하여 산출한다.

나. 수식

총부유물질 농도 알고리즘은 밴드비를 사용하지 않고 단일 밴드를 사용하는데, 기준 밴드 620 nm의 원격반사도 값의 크기에 따라 다음과 같은 세 가지 알고리즘을 적용한다.

(1) 낮은 탁도에서의 TSM 농도(Rrs_620 값이 0.017보다 작을 때):

$$TSM_{LT} = \sum_{i=1}^{4} c_i R_{rs}(620\,nm)^i,$$

c_i={1.067E+03, -8.36E+04, +5.95E+06, -1.88E+07}

(2) 높은 탁도에서의 TSM 농도(Rrs_620 값이 0.0245보다 클 때):

$$TSM_{HT} = \sum_{i=0}^{3} c_i R_{rs}(709\,nm)^i,$$

c_i={3.19E+01, -1.10E+03, -7.73E+03, 9.64E+06}

(3) Rrs_620 값이 0.017~0.0245 구간에서 weight 값(wLT)을 이용하여 위의 낮은 탁도에서의 TSM 농도 알고리즘과 높은 탁도에서의 TSM 농도 알고리즘을 혼합(switching)하여 적용함

$$TSM = w_{LT} TSM_{LT} + (1 - w_{LT})\, TSM_{HT},$$

$$w_{LT} = \frac{0.0245 - R_{rs}(620\,nm)}{0.0245 - 0.017}$$

16. 해무

해무는 수평 시정 1km 미만의 바다 위에서 낮게 발달한 안개로 대략 32% 의 해양 사고가 짙은 해무와 연관되어 있다 (Tremant, 1987). 우리나라의 경우 해안선이 복잡하고 해안 항만, 공항, 대교 등에서 발생하는 해무가 해양 교통안전에 문제가 되기 때문에 해무 발생을 모니터링 하는 것이 중요하다. 그럼에도 불구하고, 기존 해안 관측의 시공간적 한계로 인해 해무에 대한 연구는 제한적으로 수행되어왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 높은 공간 분해능(500 m)을 기반으로 하는 GOCI 위성은 해양 지역 교통안전을 위한 정보로써 유용하게 활용되고 있으며 GOCI-II의 경우 GOCI 위성보다 4배 정도 개선된 해상도를 갖고 있으므로 해양 교통안전 특히 해무 발생 탐지 및 모니터링 개선에 도움이 될 것으로 기대된다.

본 연구는 주간 해무 탐지를 위해 12개의 가시 및 근적외 밴드로 구성되어있으며 높은 시공간적 해상도를 갖는 정지궤도 해색탑제체인 GOCI-II (Ahn et al., 2010) 가시채널 자료를 사용하여 결정나무 기계학습에 기반한 해무 탐지 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘에서 산출 된 해무 정보를 사용하여 한반도 주변의 해무를 탐지하고 지상 시정계 정보와 비교검증을 통해 개발된 알고리즘 성능 확인을 실시하였다.

가. 해무 알고리즘 개발

1) 입력자료

GOCI-II는 1개의 UV 파장대(370~390 nm), 8 개의 가시광 파장대(402~422, 433~453, 480~500, 500~520, 545~565, 610~630, 650~670, 675~685 nm), 3 개의 근적외 파장대(704~714, 735~755, 845~885 nm)로 총 12개의 분광 밴드가 있고 추가로 1개의 전정색(402~885 nm)파장대를 갖는다. 본 연구에서는 해무 현상에 분광학적 특성이 가장 민감하게 반응하는 412 nm 밴드를 사용하였다. GOCI-II 반사도 성분만 활용한 접근법은 해무의 고도 정보가 포함되지 않기 때문에 Himawari-8 CLoud Top Height(CLTH)자료를 보조 자료로 활용하였다.

2) 원리 및 변수 개발

GOCI-II에서 관측된 가시채널 태양 복사량은 대기 중 에어로졸이나 흡수 기체들에 의한 산란 효과를 받는데 이는 해무, 하층운, 에어로졸을 식별하는데 유용하게 이용 될 수 있다. 해수면 위에서 대기 현상을 탐지하기 위해 본 연구에는 산란 효과가 제거된 GOCI-II 레일리보정반사도(Rrc)를 입력 변수로 활용하였다. 구름과 달리 해무의 경우 반사도 편차가 적어 매끈한 표면으로 표출되는데 이러한 공간적 특성을 정량화하기 위해 공간 다양성 인자인 Normalized standard deviation(NLSD)를 추가 입력 변수로 활용하였다.

3) 결정나무 기반 해무 알고리즘

GOCI-II 해무 알고리즘은 다음과 같은 단계로 개발되었다. 첫째, 과거 해무 사례에 대한 수집 및 위성과 지상 시정계의 match-up 자료를 생산한 뒤 훈련/검증 샘플로 분리하였다. 둘째, 훈련 자료를 사용하여 결정나무 기계학습 기반의 해무 알고리즘 개발하였다. 이 과정에서 만들어진 알고리즘은 그림 16.1과 같다. 알고리즘 산출물은 각 픽셀의 해무 유무로 나

타내며, Himawari-8 CLTH 자료를 보조자료로 사용하여 구름 픽셀도 분류하였다. 셋째, 검증 자료를 사용하여 준-실시간 검증을 위한 알고리즘 성능 평가를 수행하였다.

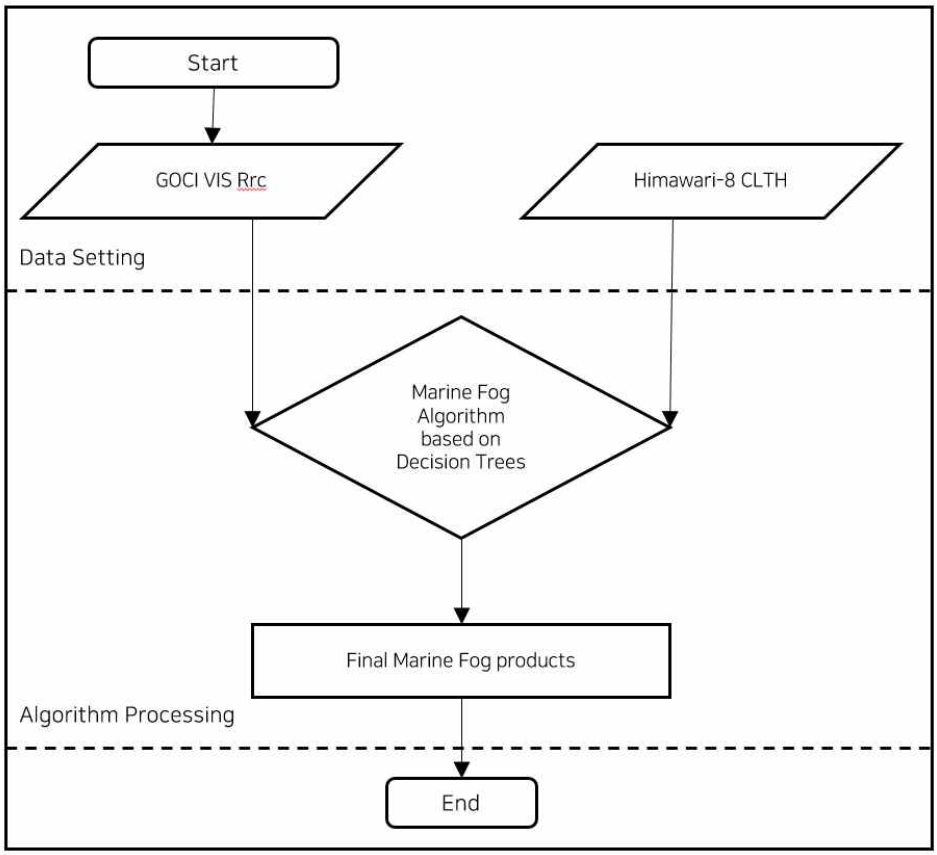


그림 16.1. GOCI-II 해무 알고리즘 모식도

나. 해무 알고리즘 검증

1) 해무 사례를 통한 준실시간 검증

GOCI-II 해무 알고리즘의 준실시간 활용 가능성을 확인하기 위해 그림 3.2.2와 같이 2018년 5월 14일 00UTC GOCI RGB영상(좌)와 GOCI-II 해무 알고리즘 결과(우)를 비교 검증하였다. 검증 자료는 3 개의 섬 관측소에 위치한 시정계 값을 사용하였다. 2018년 5월 14일 00UTC(그림 16.2)에는 서해안 전역에 넓게 해무가 발생한 것을 확인 할 수 있다. 백령도 관측 결과 380 m 의 낮은 시정이 관측되며 해무 알고리즘 또한 해무로 탐지하고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 위성 영상과 해무 산출 결과에서 알 수 있듯이 서해안의 해무는 흑산도 위쪽까지만 분포하고 있으며 지상 시정 관측 또한 일관된 결과를 나타내고 있다. 흑산도 주변의 얇은 구름으로 인해 12,600 m 시정 값을 보이지만 해무 알고리즘에서는 해무가 아닌 것으로 정확히 구분하고 있다. 울릉도 지점에서 해무가 발생하지 않았기 때문에 시정 값은 청천임을 나타내고 있다.

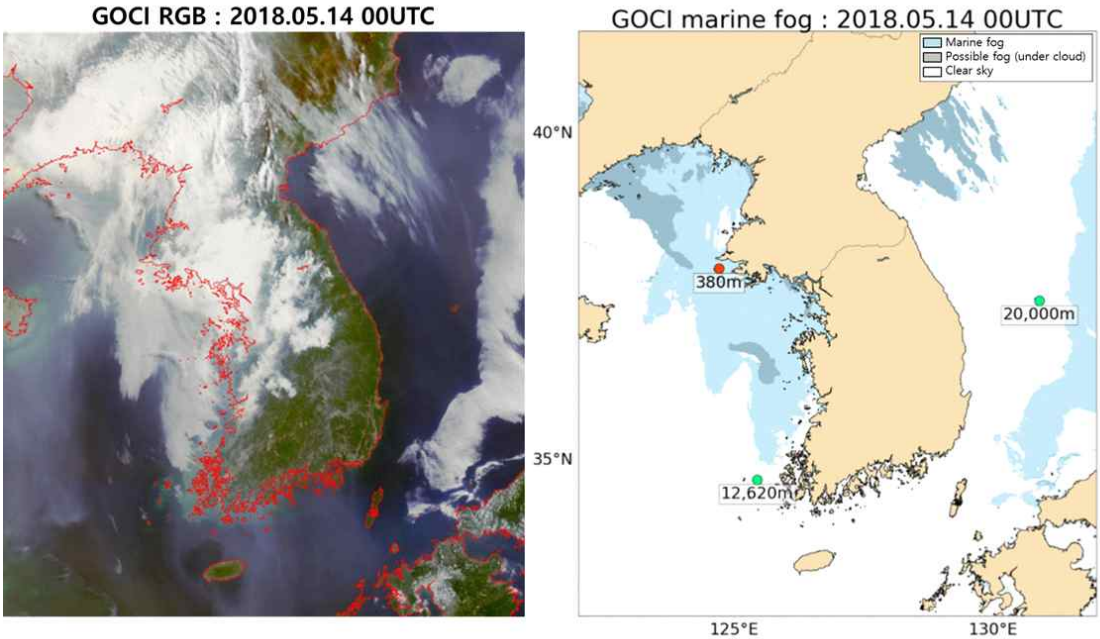


그림 16.2. 2018년 5월 14일 00UTC GOCI RGB영상(좌)와 GOCI-II 해무 알고리즘 결과(우)

하늘색 영역은 해무, 회색 영역은 구름 또는 구름아래 해무가 위치한 지역이다. 원이 위치한 지점은 지상 시정 관측 지점을 나타내며, 빨간색은 시정 1 km 미만으로 해무가 위치한 지역, 녹색은 시정 1 km 이상으로 해무가 없는 지역을 나타내며 점 아래 숫자는 해당 지점의 시정 값을 나타낸다.

2) 해무 알고리즘 검증 수행 결과

검증 기간(2018년) 자료를 사용하여 GOCI-II 해무 알고리즘 검증을 수행하였다. 표 16.1는 해무 알고리즘 검증 결과로 비해무(0), 해무(1), 구름 또는 구름 아래 해무(2)로 분류한 contingency table이다. 검증 결과 Hit rate는 0.95, False alarm rate는 0.21, Miss는 0.05, Negative hit rate=0.79의 성능을 냈다. 위성의 한계로 인해 구름 아래의 정보를 얻을 수 없기 때문에 구름 아래 해무가 있는 영역은 따로 산출하였다.

표 16.1. 2018년 GOCI-II 해무 알고리즘 검증 수행 결과

		관측	
		비해무	해무
해무 알고리즘 결과	비해무 (0)	339	1
	해무 (1)	90	20
	구름 또는 구름 아래 해무 (2)	139	37

17. 황사(에어로졸 타입, 대기광학두께)

가. GOCI-II 에어로졸 광학 특성 산출 민감도 시험

1) 편광 효과와 구각 대기가 고려된 복사전달모델

위성 관측 자료를 이용한 에어로졸 광학 특성을 산출은 일반적으로 위성에서 관측된 대기 상한 반사도와 복사전달모델로부터 계산된 대기 상한 반사도와의 비교를 통해 이루어진다. 기존의 GOCI 연세 에어로졸 산출 알고리즘은 libRadtran 복사 전달 모듈을 이용하여 평행 대기를 가정하고, 전자기파의 세기(Intensity)만을 모의하였다 (Mayer and Kylling, 2005). 그러나 실제 대기는 구형에 가까우며, 지표 혹은 에어로졸에 의해 반사된 복사는 광학적으로 편광(polarization) 특성을 지니고 있다. 따라서 구각 대기를 고려하고(pseudo-spherical computation), 편광 효과를 모의하는 복사전달모델의 사용은 필수적이다.

이에 따라 본 연구에서는 편광 효과와 구각 대기가 고려된 A LInearized pseudo-spherical Vector Discrete Ordinate Radiative Transfer (VLIDORT) version 2.7을 이용하여 대기 상한 반사도를 모의하였다. 특히, 그림 17.1의 (a)에서 나타난 것처럼 태양에서 입사하는 빛은 구면 대기가 가정되지만 반사되는 빛은 평행 대기를 가정하는 일반적인 구각 대기 계산과 달리, VLIDORT는 그림 17.1의 (b)와 같이 반사되는 빛도 구면을 고려하는 sphericity correction 모듈이 포함되어 있다 (van Oss and Spurr, 2002).

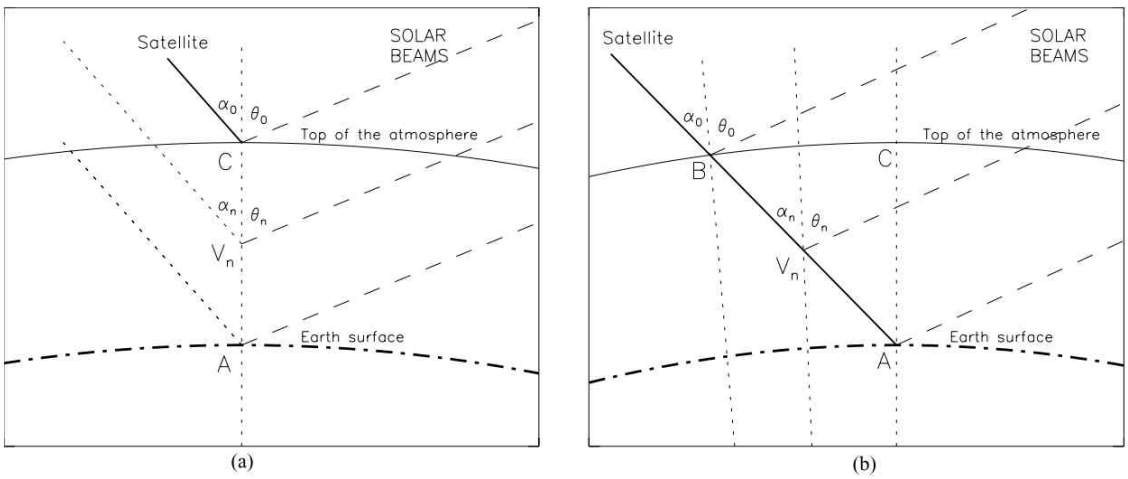


그림 17.1 (a) Geometry for the regular pseudo-spherical computation of backscatter radiation; (b) geometry for the sphericity correctio (Van Oss and Spurr, 2002)

같은 고도에서 매질의 성질이 같다고 가정하는 평행 대기(plane parallel assumption)는 태양의 고도가 커질수록 적용하기 힘들어진다. 따라서 GOCI 에어로졸 산출 알고리즘에서 libRadtran으로 계산된 조견표는 평행 대기를 가정하였기에, 이를 VLIDORT로 계산하게 되면 높은 태양 고도각에서 보다 정확한 산출을 수행할 수 있다. 그림 17.2는 libRadtran과 VLIDORT로부터 계산된 조견표를 이용하여 산출한 AOD의 태양 고도각에 따른 오차를 나타

낸다. 위성 원격 관측 검증 시 참값으로 여겨지는 지상 AERONET AOD를 이용하여 오차를 계산하였다. 태양 고도각이 증가할수록 AOD의 오차가 증가하는 모습을 보이며, VLIDORT를 이용하여 산출하였을 때 AOD가 libRadtran을 사용하였을 때보다 작은 오차를 가진다. 따라서 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘 개발을 위해 복사전달모델로 VLIDORT를 이용하였다.

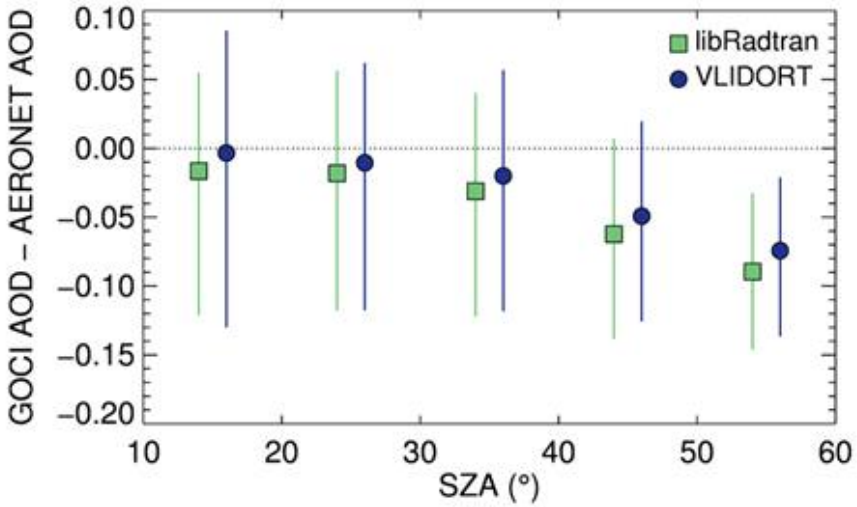


그림 17.2 Difference of AOD retrieved using libRadtran and VLIDORT

2) VLIDORT 복사 전달 모델을 활용한 민감도 실험

가) 해수면 반사도 민감도 실험

기존 GOCI-I 에어로졸 산출 알고리즘은 해양의 지면 반사도 계산을 위하여 관측 각도와 풍속을 고려한다(Cox and Munk, 1954). 그러나 풍속 및 관측 각도 이외에도 클로로필과 염분 등 해수면의 지면 반사도를 결정하는 요인들이 존재한다. 따라서 VLIDORT version 2.7을 이용하여 풍속, 클로로필, 염분 등 해양 지면반사도에 영향을 줄 수 있는 요인들에 대하여 민감도 시험을 수행하였다.

그림 17.3은 클로로필 농도 변화에 대한 대기 상한 반사도의 차이를 AOD 구간 별로 계산하여 나타낸 것이다. 초록빛을 띄는 클로로필은 주로 500-600 nm 구간의 빛을 반사시킨다. 특히 AOD 값이 작을 때 클로로필 농도가 변화함에 따라 대기 상한 반사도 값의 변화가 크게 나타난다. AOD 값이 0일 때 클로로필 농도가 0.01에서 1로 증가하면 약 10%의 대기상한반사도 변화가 일어난다. 따라서 낮은 AOD 구간에서의 정확도를 높이기 위하여 클로로필 농도를 반영하여 조견표를 구성하였다.

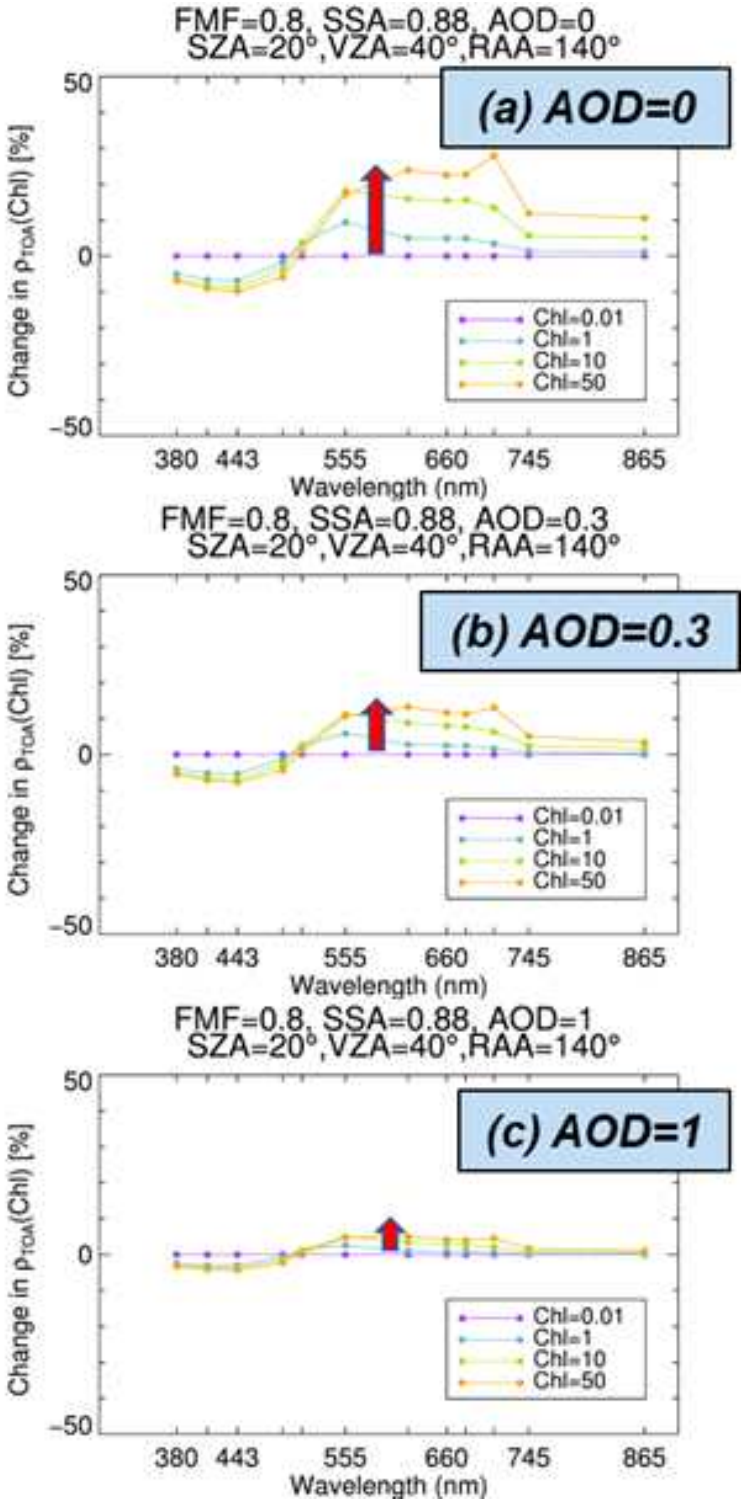


그림 17.3 Change in TOA reflectance depending on chlorophyll and AOD: (a) AOD = 0, (b) AOD = 0.3, (c) AOD = 1

다음으로 해수면 반사도 특성에 관여하는 풍속과 염분 변화에 따른 대기 상한 반사도의 민감도 시험을 수행하였다. 그림 17.4는 풍속과 염분 변화에 따른 380 nm 에서의 대기 상한 반사도 변화를 나타낸다. 클로로필 농도와 마찬가지로 낮은 AOD 구간에서 풍속과 염분의 변화에 대기 상한 반사도가 민감하게 반응하였다. 그러나 염분의 변화에 따른 대기 상한 반사도의 변화는 0.03 % 이하로 낮은 값을 보였으며, 최종적으로 GOCI-II 에어로졸 산출물을 위해 풍속, 클로로필, 관측 각도를 고려하여 해양의 지면반사도를 계산하였다.

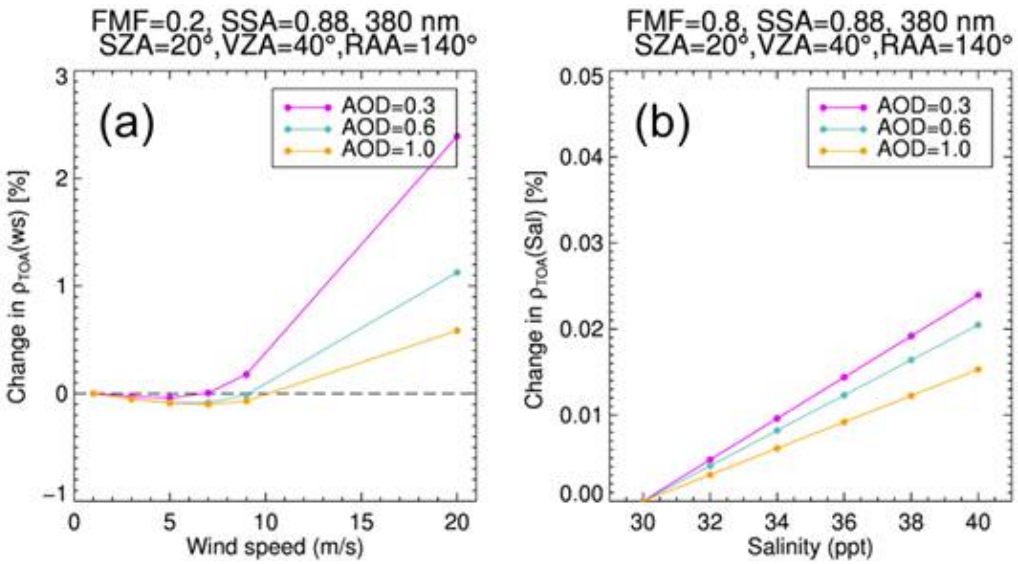


그림 17.4 Change in TOA reflectance depending on (a) wind speed and (b) salinity

나) 가시광 채널 민감도 실험

표 17.1 Instrument details for GOCI-I and GOCI-II

	GOCI-I	GOCI-II
Data period	2011.03 ~ current (over 7yr)	Launched in 2019 (~2029)
Number of spectral bands	8 (VIS/NIR)	13 (UV/VIS/NIR, Wideband)
Coverage	North-East Asia around Korea	North-East Aisa + Event Area, Full disk
Temporal resolution	1 hour (8 times/day)	1 hour (10 times/day)
Spatial resolution	500 m (Local Area Mode)	250 m (Local Area Mode) 1 km (Full Disk Mode)

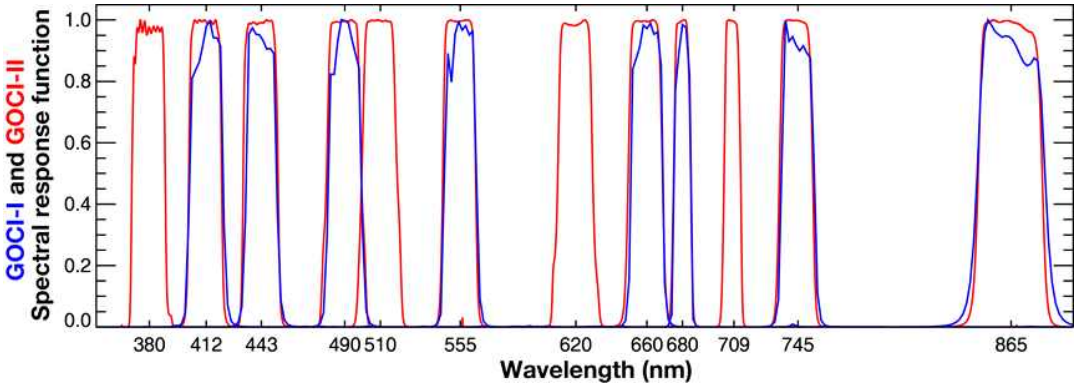


그림 17.5 Spectral response function for GOCI-I and GOCI-II observation bands

GOCI-I이 가시광부터 근적외를 어우르는 8개의 밴드를 가지는 것과 달리 GOCI-II는 GOCI-I 관측 파장에 5개의 밴드가 추가되어 총 13개의 분광 밴드에서 관측을 수행할 예정이다(표 17. 1). 그림 17.5는 GOCI-I과 GOCI-II의 채널별 반응 함수를 나타낸 것으로, GOCI-I의 밴드와 비교하여 GOCI-II 밴드가 가지는 특징 중 하나는 자외선 파장대(380 nm)가 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

대기 중 에너지의 흡수 및 산란 작용은 입사하는 에너지의 파장과 대기 구성 성분에 따라 다르게 나타난다. 특히 에어로졸의 광학 특성에 따라 자외선-가시광 영역에서 관측되는 대기 상한 반사도가 민감하게 변화한다. 그림 17.6는 AOD가 1과 0인 경우 대기 상한 반사도 차이를 FMF와 SSA에 따라 나타낸 것이다. 380 nm에서 관측된 대기 상한 반사도는 FMF 변화에 따라 크게 변하지 않지만, SSA 변화에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 반면, 파장이 길어질수록 에어로졸의 흡수성에 대한 민감도는 감소하고 에어로졸 크기에 대한 민감도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 자외선 파장대(380 nm)가 추가되는 GOCI-II 관측 자료를 이용하면 에어로졸의 입자크기 정보와 광학적 흡수성질을 동시에 산출할 수 있다는 이점을 지닐 수 있다.

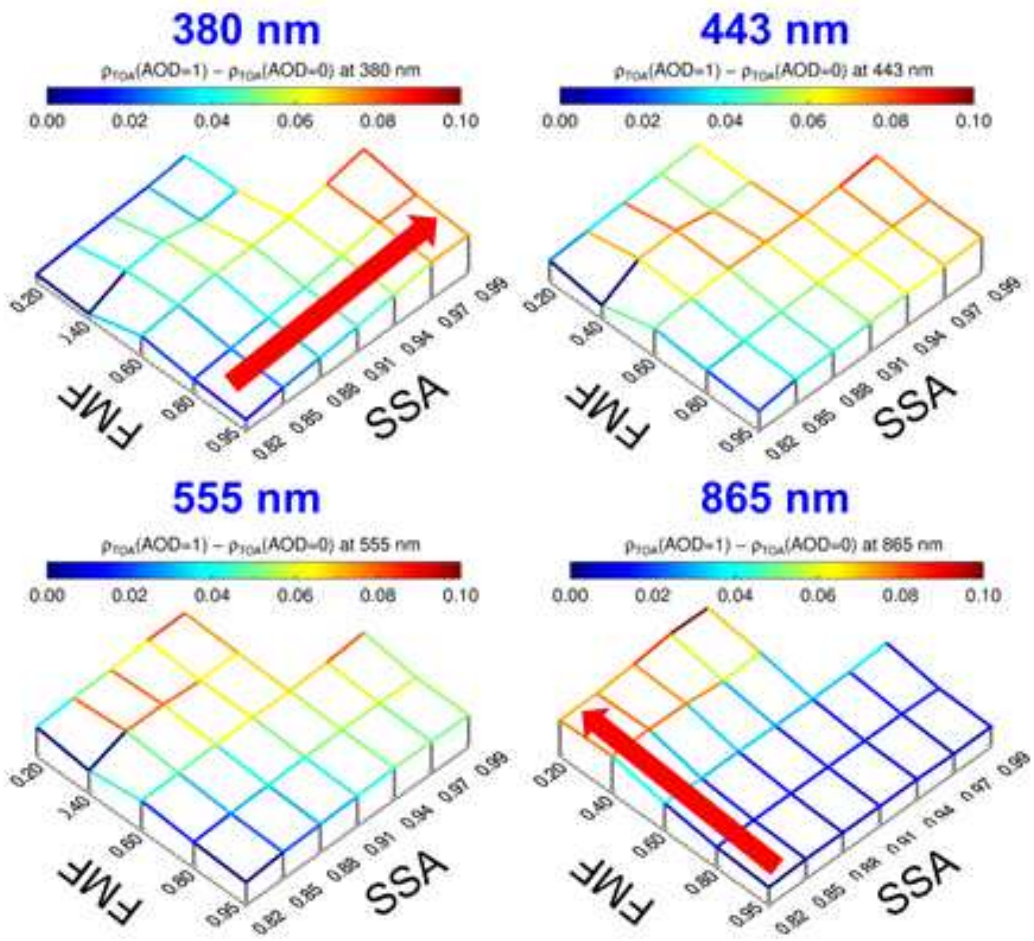


그림 17.6 Difference of TOA reflectance between AOD = 1 and AOD = 0

자외선 파장대는 에어로졸의 흡수성에 민감하다는 장점 이외에도 지표면 반사도의 영향을 적게 받는다는 장점을 가진다. 그림 17.7은 육지와 해양 위에서 대기 상한 반사도를 구성하는 성분을 파장대별로 나타낸 것이다. 육지 위에서 관측된 대기 상한 반사도는 레일리(Rayleigh) 산란 반사도, 에어로졸 반사도, 지표 반사도 등으로 구성된다. 이 때 레일리 산란에 의한 반사도는 단파에서 높은 값을 보이고, 장파로 갈수록 그 값이 작아진다. 레일리 산란은 전방 산란과 후방 산란의 비율이 일정하고, 다른 항들에 비해 상대적으로 쉽게 계산될 수 있다. 이에 반해 지표면 반사도의 경우 장파로 갈수록 그 값이 커지고, 단파로 갈수록 값이 작아짐을 확인할 수 있다. 그림 17.8에서 확인할 수 있듯이 지표면 반사도가 증가할수록 에어로졸의 양에 대한 민감도가 감소한다. 이는 지표면이 밝은 경우, 즉 지표면 반사도 값이 높은 경우 에어로졸에 대한 대기 상한 반사도의 민감도가 줄어들기 때문에 에어로졸 산출이 어렵다는 것을 의미한다. 따라서 자외선 채널을 이용하면 가시광 채널에 비해 지표면 반사도의 영향을 적게 받을 수 있다.

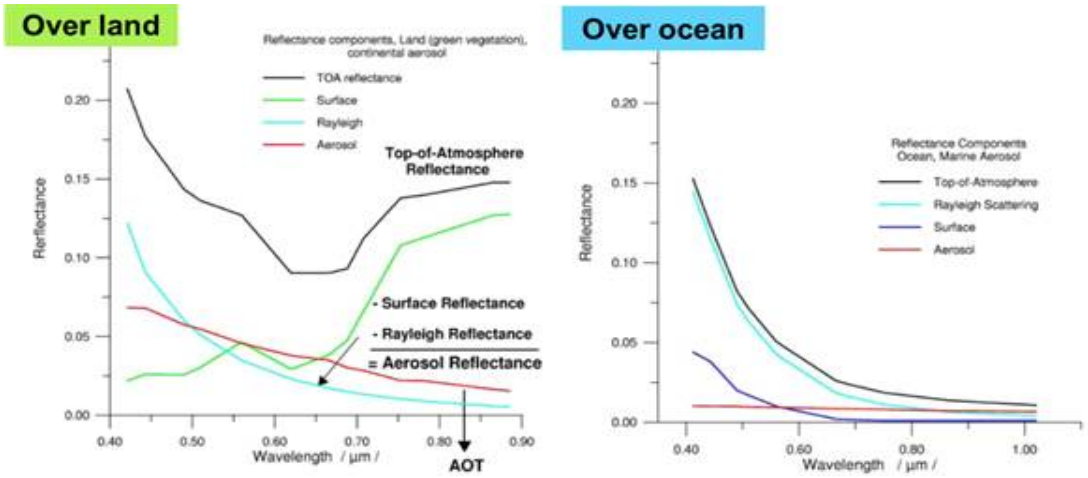


그림 17.7 Main spectral properties of land and ocean surface and its TOA reflectance (von Hoyningen-Huene et al., 2011)

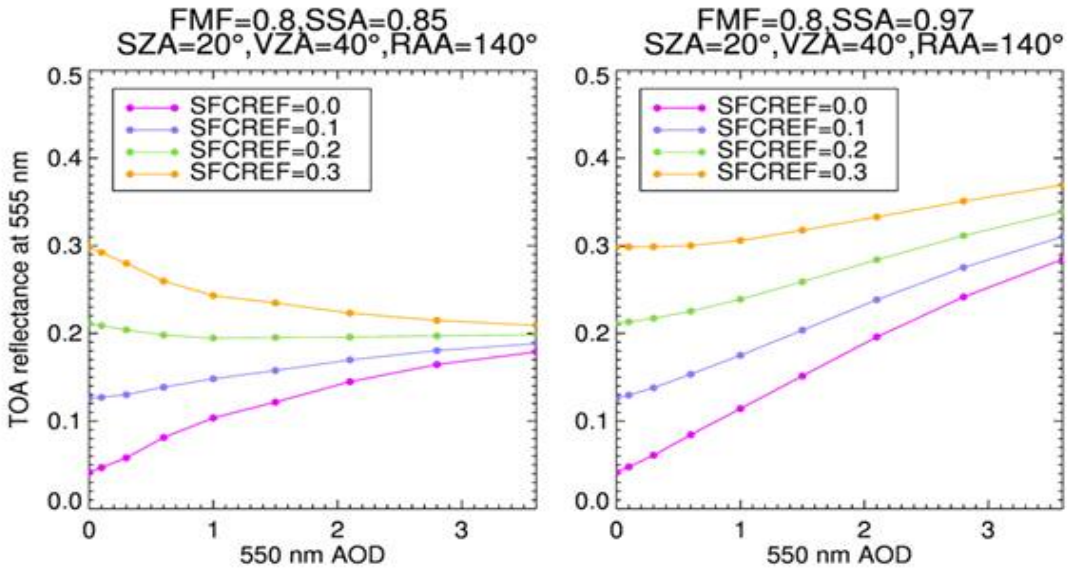


그림 17.8 TOA reflectance according to AOD at 550 nm and surface reflectance

다) GOCI-II 에어로졸 산출 정보량 분석

위성 자료를 이용한 산출 시스템을 구축하고자 할 때, 계산의 정확도와 효율성을 높이기 위하여 시스템의 정보량을 분석하는 단계가 선행되어야 한다. GOCI-II의 가시광 채널(380 nm) 관측은 앞서 살펴본 바와 같이 에어로졸 산출에 있어 에어로졸의 흡수성에 관한 정보를 제공할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GOCI-I의 밴드와 비교하여 GOCI-II 밴드를 이용하였을 때 에어로졸 산출 시 가질 수 있는 정보량을 UV 채널의 추가(380 nm)에 초점을 맞추어 분석하였다.

에어로졸 특성에 대한 정보량 조사를 위하여 상태 벡터(state vector)로 550 nm AOD, 443 nm SSA, Aerosol Loading Height (ALH)를 고려하였다.

$$x = [AOD_{550}, SSA_{443}, ALH]$$

다음과 같은 선형적인 시스템을 고려하였을 때, 해당 시스템이 가지는 정보량을 조사하고자 하였다. 이 때 y는 GOCI-I와 GOCI-II로부터 얻어진 각 파장에 대한 관측 값, ε는 measurement error, K는 weighting function matrix를 의미한다.

$$y = Kx + \epsilon$$

Degree of Freedom for Signal (DFS)는 관측 값들을 이용하여 산출 할 때, 시스템이 가지는 정보량을 나타내는 스칼라 값이다. 시스템의 정보량은 관측 오차의 상대적인 크기와 산출하고자 하는 변수의 자연적인 변화량에 의해서 결정되며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(Rodgers, 2000).

$$DFS = tr(A) = tr(GK) = tr((K^T S_\epsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\epsilon^{-1} K)$$

$$A: Averaging\ Kernel\ (m \times m)$$

$$G: Gain\ matrix\ (n \times m)$$

S_a는 a priori covariance matrix로 2017년 7월 이전에 전구에서 관측된 AERONET Level 2 자료로부터 얻어진 AOD와 SSA를 이용하여 구성하였으며, ALH에 대한 값은 1로 가정하였다. 또한 계산의 편의를 위하여 각 변수들 간의 상관관계는 0으로 가정하였다. S_ϵ는 measurement error covariance matrix를 의미하며 기기의 관측 오차에 따른 정보량 비교를 위하여 관측된 복사휘도의 1%와 4%의 값으로 설정하였으며, GOCI-I의 관측 특성 상 각 밴드 간의 상관관계는 없다고 가정하였다.

$$K_{i,j} = \alpha y_i / \alpha x_j$$

$$K = \begin{pmatrix} \frac{\alpha y_1}{\alpha AOD_{550}} & \frac{\alpha y_1}{\alpha SSA_{443}} & \frac{\alpha y_1}{\alpha ALH} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\alpha y_m}{\alpha AOD_{550}} & \frac{\alpha y_m}{\alpha SSA_{443}} & \frac{\alpha y_m}{\alpha ALH} \end{pmatrix}$$

K는 Weighting function matrix 혹은 Jacobian matrix라 불리며 각 상태 변수에 대한 관측 값의 편미분을 의미한다. K의 계산을 위하여 사용된 복사전달모델은 VLIDORT version 2.7이다. 복사전달모델 계산 시 파장에 따른 지표면 반사도의 변화는 고려하지 않고 GOCI-II 밴드 전체에서 하나의 값을 이용하였다. State vector로 Black Carbon의 AOD, SSA를 고려하였으며, 계산에 이용된 number size distribution의 파라미터는 표 2에 제시하였다.

표 11.2 Summary of number size distribution, which was represented by r and σ for each mode

Type	r1	r2	σ1	σ2	FMF
Black Carbon	0.1082	0.6994	1.4988	1.9961	0.99909

그림 17.9는 앞서 설명한 내용처럼 State vector로 AOD, SSA, ALH를 고려했을 때의 DFS를 나타내며, measurement vector로는 GOCI-I bands와 GOCI-II bands 각각을 고려하였다. 먼저 관측 값으로 GOCI-I만을 고려하였을 때 AOD 증가에 따라 DFS가 약 2.2까지 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 그러나 GOCI-II 관측 밴드를 measurement vector로 고려하였을 때 약 2.5까지 DFS값이 증가하였다.

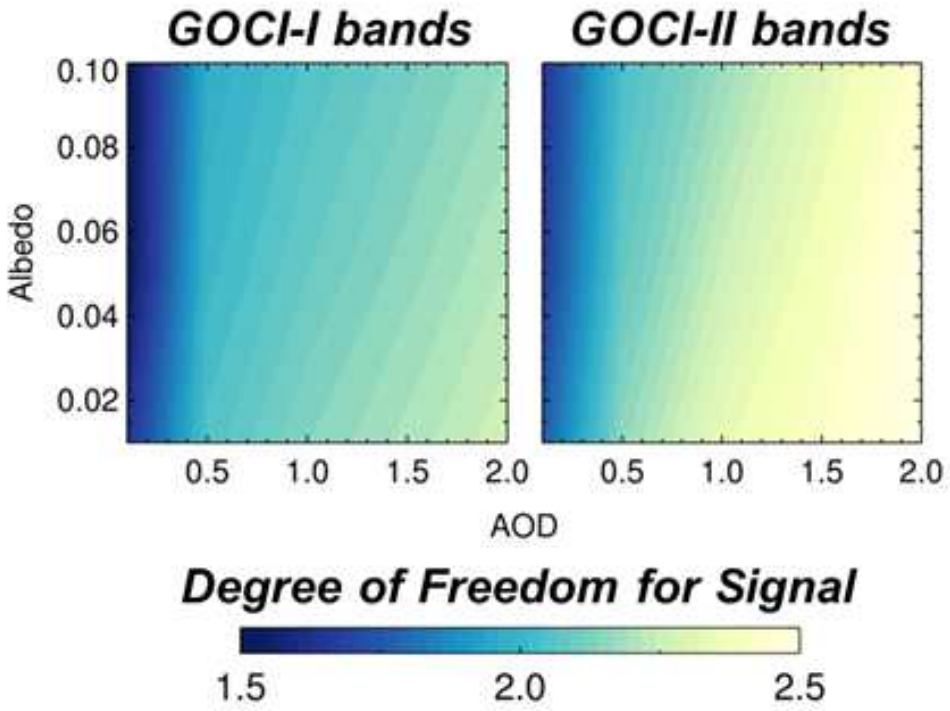


그림 17.9 Degree of freedom for signal using GOCI-I bands and GOCI-II bands as measurement vector.

그림 17.10은 관측 벡터로 GOCI-II에 추가될 각각의 밴드를 GOCI-I 밴드와 함께 이용하였을 때의 결과를 나타낸다. 시스템의 DFS를 분석한 결과, 380 nm 채널 추가에 대한 DFS의 변화가 가장 크게 나타났다. 이는 두 가지 요인으로 인하여 나타난 결과로 볼 수 있다. 먼저, 상태 벡터로 에어로졸의 흡수성과 관련된 파라미터를 사용하였기 때문에, 에어로졸의 흡수성에 민감한 380 nm의 추가로 인해 DFS의 증가가 크게 나타났을 것이다. 다음으로 GOCI-I는 가시광부터 근적외 영역의 밴드로 구성되어 있어, 이미 존재하는 가시광 채널에 의하여 정보량이 충분하기에 추가적인 가시광 및 근적외 채널은 DFS에 큰 영향을 미치지 않았다고 볼 수 있다.

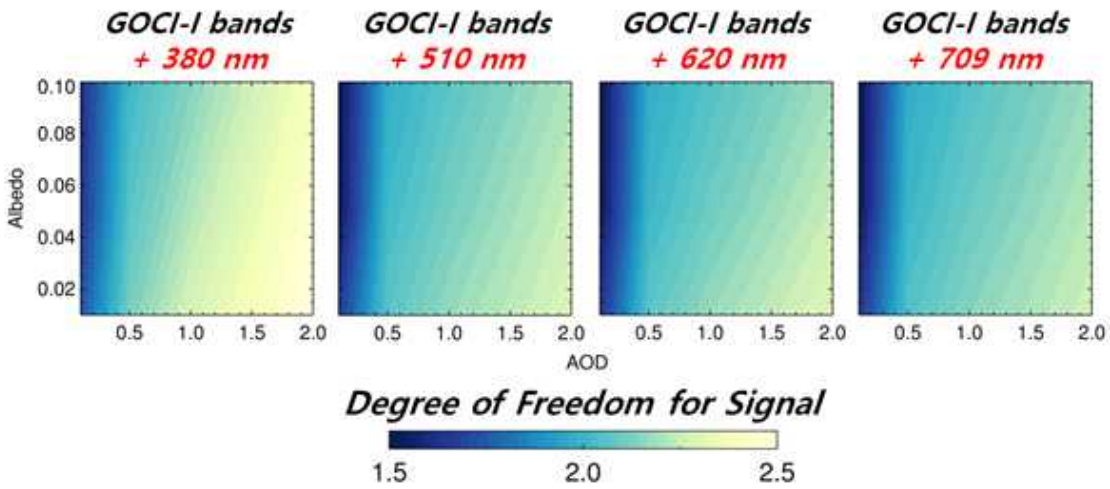


그림 17.10 Degree of freedom for signal in case of adding 380, 510, 620 and 709 nm band to GOCI-I bands.

1%와 4%의 관측 오차를 고려하였을 때 각 상태 변수에 대한 정보량을 그림 17.11에 나타내었다. AOD에 대한 DFS는 대부분의 조건에서 1에 가까운 값을 나타내어 현재 시스템에서 충분한 정보량을 가지고 있다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 AOD가 약 0.4 이상인 구간에서 SSA에 대한 DFS도 거의 1에 가까운 값을 나타내었다. 이는 현재 시스템에서 SSA를 산출하고자 할 때, AOD의 값이 일정 수준 이상이 되어야 충분한 정보량을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 ALH에 대한 DFS는 GOCI-I과 GOCI-II 관측 밴드에서 모두 0.5 이하의 값을 보였다. 이는 에어로졸 고도의 산출값은 참값에 대한 민감도가 매우 적다는 것을 의미하며, 현재 시스템에서 에어로졸 고도를 산출하고자 할 때 초기값에 매우 큰 의존성을 나타낼 것이다.

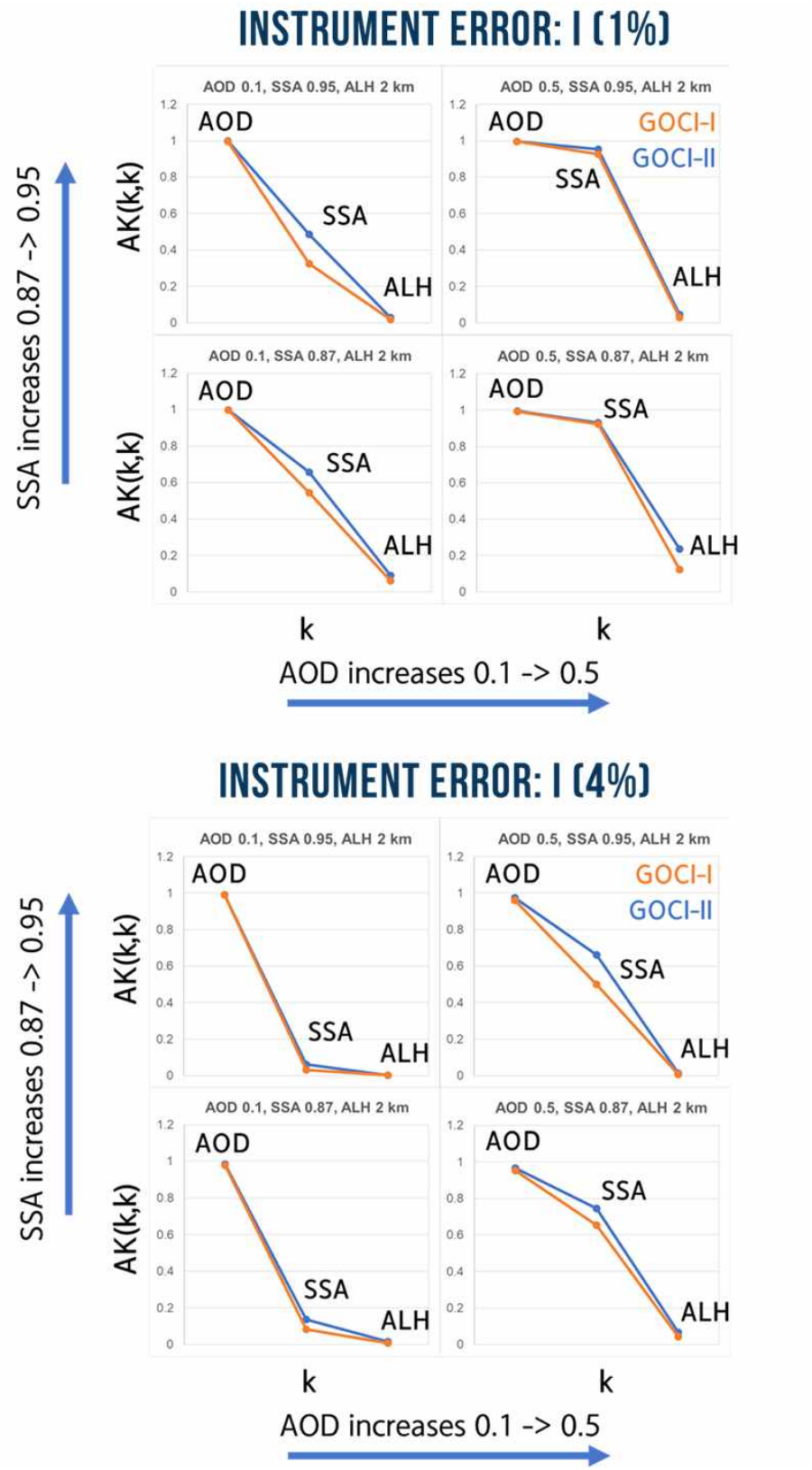


그림 17.11 The DFS value for each aerosol parameter with the same aerosol loading height (2 km)

라) 고해상도 에어로졸 산출물

GOCI-II는 GOCI-I에 비해 약 2배 정도 성능이 좋아진 250 m의 공간해상도에서 관측 자료를 제공하게 될 것이다 (표 1). 따라서 고해상도로 에어로졸 산출 시 얻을 수 있는 이점 및 정확도를 분석하기 위하여, 6 km 해상도의 산출물을 제공하던 기존 에어로졸 산출 알고리즘을 기반으로 고해상도(500 m) 에어로졸 광학 깊이 산출 알고리즘을 개발하였다(Lee et al., 2017). 그림 17.12는 6 km와 500 m의 공간해상도에서 산출한 에어로졸 알고리즘 흐름도를 나타낸다. 6 km 공간해상도 산출물의 경우, 산출에 불필요한 화소들을 제거한 후, 대기 상한 반사도의 값이 20 퍼센타일 이상 60 퍼센타일 미만에 해당하는 화소들을 6 km 해상도로 평균하여 산출에 이용해왔다. 이는 오차를 불러일으킬 수 있는 화소의 제거 후에도 남아있는 구름의 영향이나 구름에 의한 그림자 등을 추가적으로 제거하기 위한 과정이다(Choi et al., 2016). 그러나 500 m 해상도에서 산출 시 픽셀 병합 과정을 수행하지 않으므로 픽셀에 구름의 영향이 잔존할 가능성이 높아진다. 따라서 추가적인 구름 제거 수행을 통하여 산출물 정확도를 확보하고자 하였다 (표 17.3).

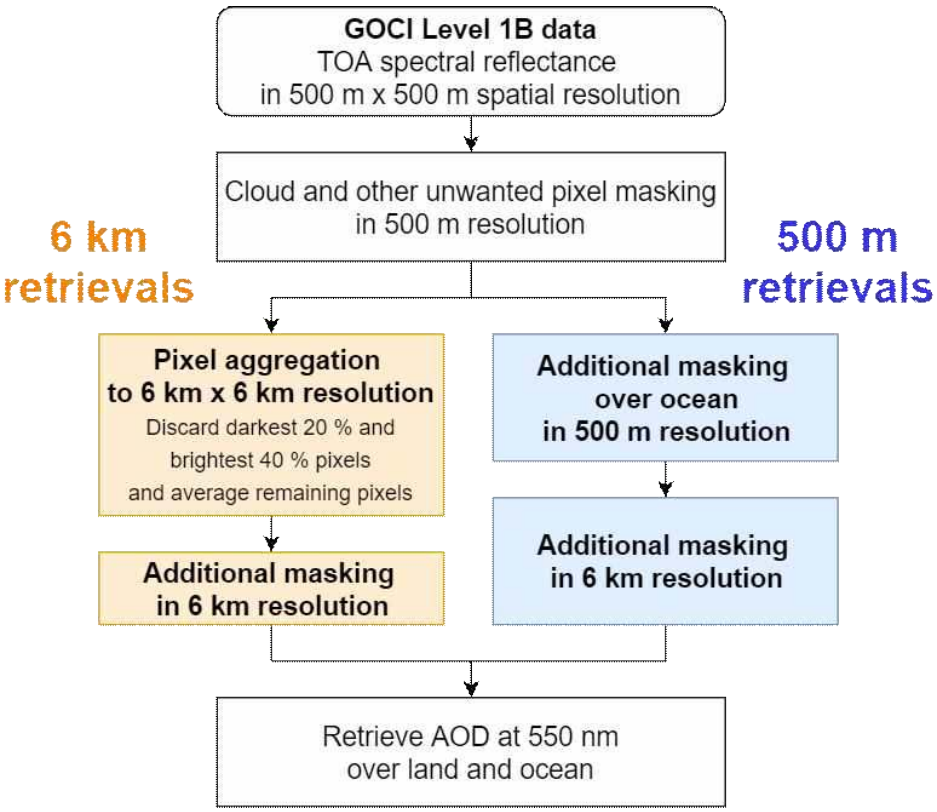


그림 17.12 Flowchart of the GOCI Yonsei aerosol retrieval algorithm in 6 km and 500 m spatial resolution.

표 17.3 Additional cloud masking in 500 m aerosol retrieval algorithm

Resolution	Conditions	Classifications	Reference
500 × 500 m2	NDVI >−0.13	Cloud over ocean	Ishida *et al.*(2011)
6 × 6 km2	Stddev of TOA reflectance at 412 nm >0.003 and mean TOA reflectance at 412 nm in 11 by 11 pixels > 0.27	Cloud over land and ocean	Choi *et al.*(2018)

그림 17.13은 2016년 5월 25일 04:30 UTC의 500 m와 6 km 산출물의 예시이다. 5월 25일은 중국에서 출발한 에어로졸이 서해를 지나 한반도로 유입되는 장거리 수송 사례로, 6 km 와 500 m 해상도의 AOD 분포에서 서해상의 에어로졸이 한반도로 유입되는 모습을 확인할 수 있다. 6 km와 500 m 산출물은 유사한 크기 및 공간적 분포를 보여주고 있다. 그러나 500 m 산출물은 6 km 산출물보다 더욱 세밀한 AOD의 공간 변화를 보여주고 있다. 뿐만 아니라 작은 규모의 구름이 존재할 때 6 km 산출물에 비해 500 m 산출물이 보다 많은 화소에서 산출을 수행하여 구름 가장자리 부분 혹은 구름 사이의 작은 규모 화소에서 AOD 값이 존재한다. 그러나 500 m 산출물의 경우 구름 가장자리에서 구름 제거가 정확히 이루어지지 않아 6 km 산출물에 비해 다소 높은 AOD 값을 보인다.

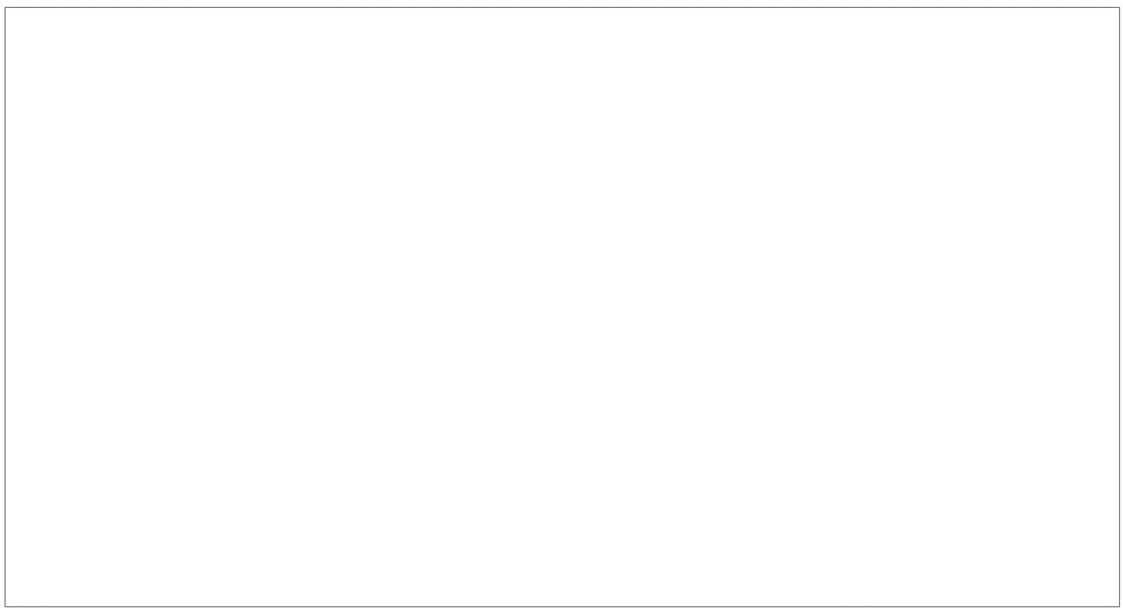


그림 17.13 Aerosol optical depth at 550 nm retrieved using the GOCI-YAER algorithm on 25 May 2016 at 04:30 UTC. Left: AOD of the 6 km resolution. Right: AOD of the 500 m resolution.

그림 17.14는 AERONET이 위치한 위도의 에어로졸 농도 변화를 경도에 따라 나타낸 것이다. (a)와 (b)는 각각 2016년 5월 25일 04:30 UTC와 2016년 6월 5일 05:30 UTC의 산출결과이며, AERONET이 설치된 익산과 안면도 측정소가 위치한 위도의 AOD를 나타내었다. 6 km 산출물에 비해 500 m 산출물의 수가 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히 (a)에서 500 m 산출물은 AERONET 측정소 주변에서 값이 존재하지만, 6 km 산출물은 존재하지 않음을 볼 수 있다. 다만 구름 가장자리에서의 불완전한 구름 제거, 육지 지표면 반사도의 화소간 변화 등으로 인하여 500 m 산출물의 공간변동성이 다소 큰 모습을 보인다.

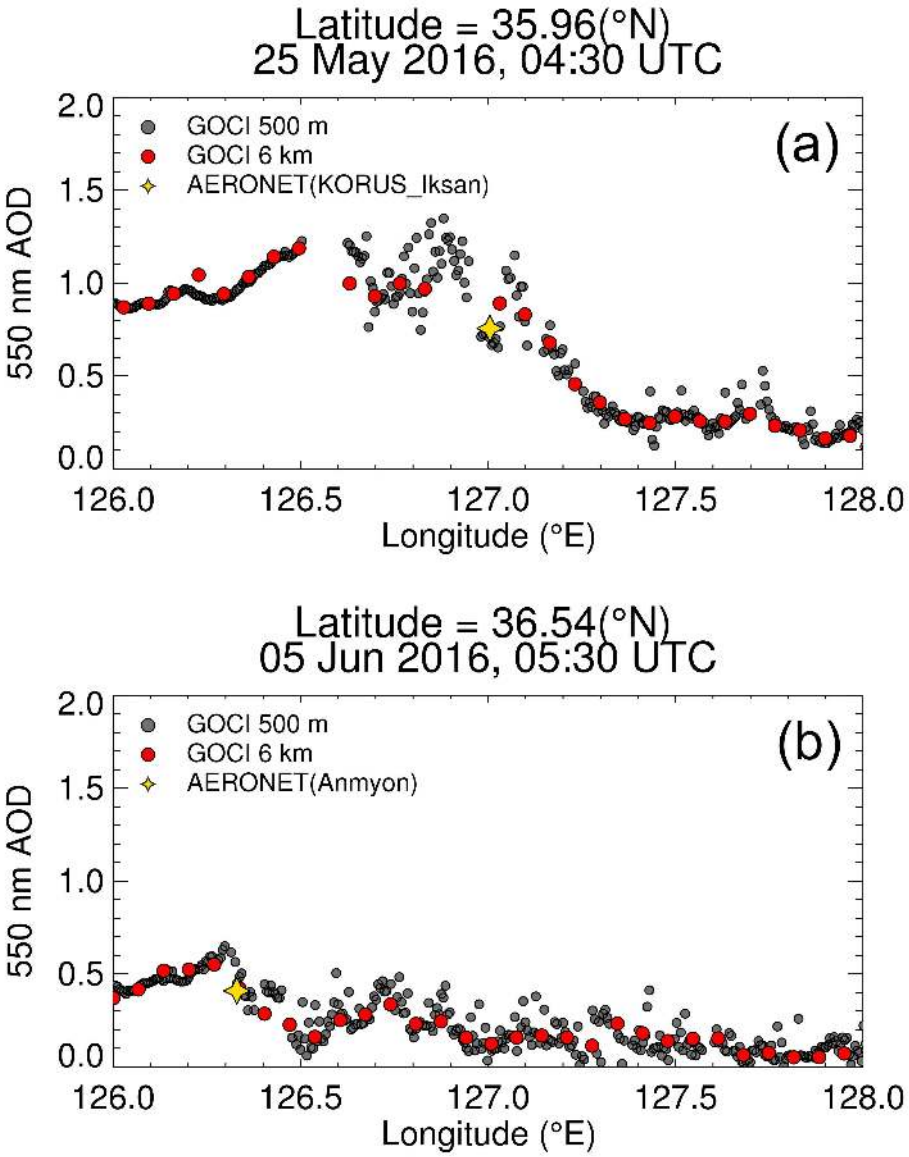


그림 17.14 Zonal variations of 500 m and 6 km AOD at the latitudes of AERONET sites: (a) KORUS_Iksan (Latitude=35.96°N, Longitude=127.00°E) and (b) Anmyon (Latitude=36.54°N, Longitude=126.33°E). AERONET AOD is shown with yellow filled star.

500 m 산출물의 성능을 평가하기 위하여 AERONET AOD와의 비교 및 검증을 수행하였다. 그림 17.15는 2016년 5월 1일부터 6월 12일까지 약 한달 반 동안 관측된 AERONET Level 2.0 자료를 이용하여 6 km, 500 m 산출물을 검증한 결과이다. 검증은 한반도 내에 위치한 19개의 측정소에 대하여 수행하였으며, (a)는 6 km 산출물에 관한 결과, (b)와 (c)는 500 m 산출물에 대한 검증 결과이다. 두 가지 기준을 이용하여 AERONET AOD와 GOCI AOD의 시·공간적 일치(collocation)를 이루었다. 먼저, (a)와 (b)에 제시된 GOCI AOD는 AERONET이 설치되어 있는 지점으로부터 25 km 이내에 위치하는 GOCI 픽셀의 AOD를 평균한 값이고, AERONET AOD는 GOCI 관측 시간 전후 30분 이내에 관측된 AERONET AOD를 평균한 값이다. (c)는 지상 관측 장비가 위치한 GOCI 화소의 AOD와 GOCI 관측 시간 전후 10분 이내에 관측된 AERONET AOD의 평균 값을 비교한 그림이다.

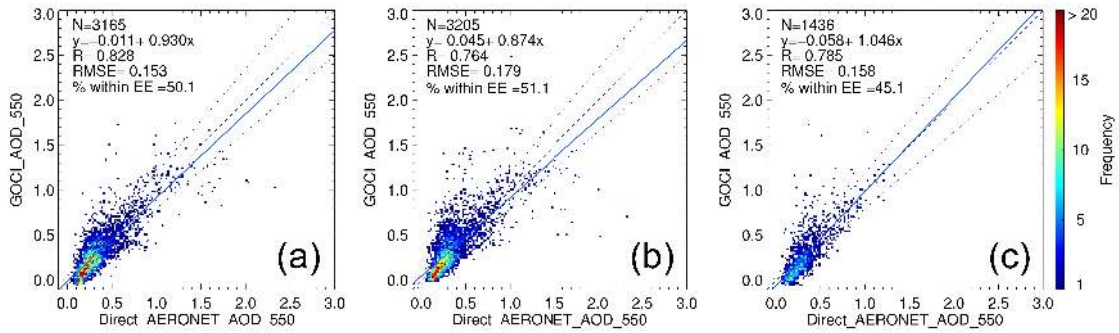


그림 17.15 Comparison of AOD between AERONET and (a) GOCI YAER 6 km AOD, (b, c) 500 m AOD. (a, b) GOCI AOD pixels located within 25 km radius circle around AERONET site are averaged and AERONET observations within 30 minutes around GOCI observation time are averaged. (c) Averaged AERONET AOD within each GOCI pixel and 10 minutes around GOCI observation time is compared with GOCI AOD.

동일한 검증 기준을 적용하였을 때 6 km와 500 m 산출물의 AERONET과의 상관관계는 각각 0.828, 0.764로 나타났다. 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Error, RMSE)는 500 m 해상도에서 0.179로, 6 km 해상도의 0.153보다 높은 값을 보였다. 이는 추가적인 구름제거를 수행하였음에도 불구하고 잔존하는 구름의 영향으로 생각된다. 그러나 기대오차(Expected Error, EE)보다 작은 오차를 가지는 비율은 51.1%로 6 km 산출물의 50.1%보다 높게 나타났다. 다음으로 AERONET 관측소를 포함하는 GOCI 화소와 직접적으로 비교한 결과 상관관계는 좋아지고, RMSE는 감소하였다. 이는 구름제거가 보다 정확하게 이루어지는 AERONET 주변의 픽셀만 이용하였기에 구름의 영향이 적게 나타난 것으로 생각된다. 종합적으로 보면, 500 m 해상도의 산출물은 많은 수의 자료를 제공할 뿐만 아니라 6 km 해상도 산출물의 정확도와도 견줄만하다고 이야기 할 수 있다.

나. GOCI-II 에어로졸 광학 특성 산출 알고리즘 원형 개발

1) GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘

가) 알고리즘 개요

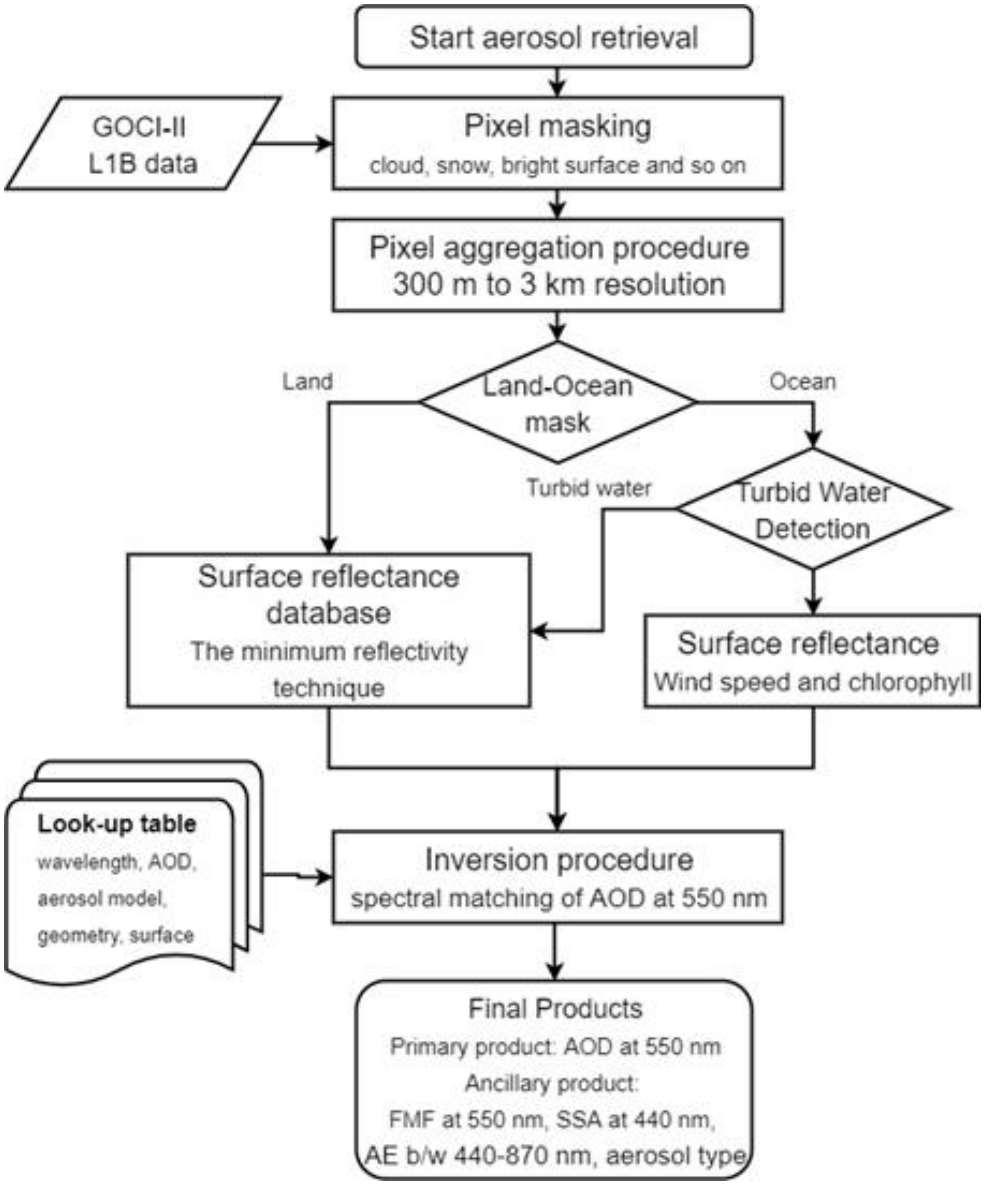


그림 17.16 Flowchart of GOCI-II aerosol retrieval algorithm

그림 17.16은 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 에어로졸 광학특성 산출을 위해 사용되는 자료는 GOCI-II 채널의 대기상한반사도 값이며, 이외에 보조적인 자료들이 이용된다(그림 17.17). 우선적으로 구름과 눈, 밝은 지표 등 에어로졸을 산출하기에 부적합한 화소를 제거한 후 3 km 해상도로 화소를 병합하는 과정을 거친다. 그 후 해양과 육지

로 화소를 구분하여 지면반사도를 산정한다. 육지에서는 최소 반사도법을 통해 계산된 지면 반사도를, 해양 위에서는 풍속과 클로로필을 고려한 해수면 반사도를 이용한다. 최종적으로 복사 전달 모델을 이용하여 미리 계산된 조견표와 관측된 대기 상한 반사도의 비교를 통해, 각 파장에서 얻어진 550 nm AOD의 표준 편차가 작은 에어로졸 모형을 선택하여 AOD를 산출한다. 알고리즘을 통해 최종적으로 산출되는 자료는 그림 17.18에 나타난 것처럼 주 산출물인 AOD와 부가 산출물인 AE, FMF, SSA, 에어로졸 유형이다.

1. GOCI-II Level 1B data
Spectral TOA reflectance for each GOCI-II band
2. Look-Up Table (LUT)
wavelength, AOD, aerosol model and so on
3. Climatology database
1) Surface reflectance (the minimum reflectivity technique)
2) Wind speed (ECMWF)
3) Chlorophyll (GOCI or MODIS)
4. Geolocation Fields
Solar zenith angle
Relative azimuth angle
Viewing zenith angle
Terrain Height
Longitude
Latitude
Observation time

그림 17.17. Input data for GOCI-II aerosol retrieval algorithm

1. Primary product
AOD at 550 nm
2. Ancillary product
FMF at 550 nm
SSA at 440 nm
AE b/w 440-870 nm
Aerosol type

그림 17.18. Primary and ancillary product for GOCI-II aerosol retrieval algorithm

Rayleigh scattering 계산에 중요하게 이용되는 기존 4 km 공간해상도 지면 고도 자료를 고해상도 자료 (500 m)로 변환하여 구축하였다. 그림 17.19는 250 m 공간해상도를 가지는 Global Multi-resolution Terrain Elevation Data (GMTED) 지표면 고도 자료를 이용하여 GOCI 격자에 맞게 재계산한 고해상도 지표면 고도를 나타낸다.

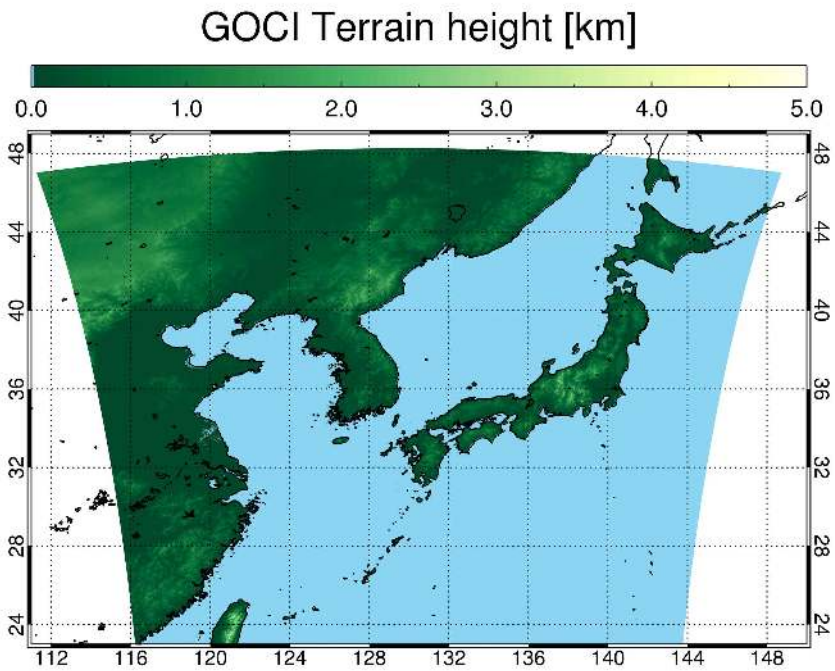


그림 17.19. Terrain height for GOCI geometry

나) 구름 및 산출 부적합 화소 제거

GOCI-II 채널을 이용한 에어로졸의 광학 특성 산출은 구름, 눈, 얼음이 없는 지역에 대해서 적용된다. 특히 구름이 있을 경우 대기상한반사도가 높게 나타나고, 구름입자 크기가 에어로졸 입자에 비해 매우 크기 때문에 구름이 충분히 제거되지 않은 상태에서 산출이 된다면 에어로졸 광학 깊이와 크기 정보를 과대 모의하는 결과가 발생하게 된다. GOCI-II는 적외 채널의 부재로 권운 등을 탐지하기가 어려우므로 여러 방법을 도입하여 구름에 의한 영향을 최소화하고자 하였다. 구름 화소 제거를 위하여 경계값 테스트와 공간균질성 테스트가 이루어졌으며, 이를 표 17.4에 정리하였다.

표 17.4 Cloud and other pixel masking steps

Steps	Conditions	Classifications	References
	Masking in 0.3 × 0.3 km^2resolution		
1	*Stddev* of TOA reflectance at 555 nm in 3 × 3 pixels > 0.0025	Cloud over ocean (whole 9 pixels)	Remer et al. (2005), Choi et al. (2016)
2	A ratio of maximum and minimum TOA reflectance at 412 nm in 3 × 3 pixels > 1.1	Cloud over land (whole 9 pixels)	Hsu et al. (2013)
3	*Stddev* of TOA reflectance at 490 nm in 3 × 3 pixels > 0.015	Cloud over land (whole 9 pixels)	Wang et al. (2016)
4	Mean-weighted *Stddev* of TOA reflectance at 490 nm in 3 × 3 pixels > 0.0025	Cloud over land (whole 9 pixels)	Wang et al. (2016)
5	TOA reflectance at 490 nm > 0.4	Cloud over ocean and land	Remer et al. (2005)Choi et al. (2016)
6	Pseudo GEMI index < 1.87	Cloud over land	Pinty and Verstraete (1992) Kopp et al. (2014)
7	NDVI using TOA reflectance at 660 and 865 nm < −0.01	Inland water over land	Hsu et al. (2013)
8	Ratio of TOA reflectance at 490 to 660 nm < 0.75, and*Stddev* of TOA reflectance at 490 nm < 0.015 (or mean-weighted *Stddev* of TOA reflectance at 490 nm < 0.0025)	Homogenous dust call-back over land and ocean	Remer et al. (2005)
	Aggregation to 3 × 3 km^2resolution		
9	The number of available pixels after masking among 10 × 10 pixels > 50	Discarding darkest 20 % and bright 40 % pixels (reference: TOA reflectance at 490 nm), and average of remaining pixels	Remer et al. (2005) Levy et al. (2007) Choi et al. (2016)
	Additional masking in 3 × 3 km^2resolution		
10	*Stddev* of TOA reflectance at 412 nm > 0.003 and mean TOA reflectance at 412 nm in 12 by 12 pixels > 0.22	Cloud over land and ocean	
11	Mean TOA reflectance in 412 nm > 0.33 and mean TOA reflectance in 555 nm > 0.33	Cloud over land and ocean	
12	Mean TOA reflectance in 412 nm < 0.30 and mean TOA reflectance in 660 nm > 0.2	Low aerosol signals and arid area masking	
13	Difference of TOA reflectance at 660 nm between direct one and linear-interpolated one from 412 and 865 nm < −0.01	Highly turbid pixels masking over ocean	Li et al. (2003) Choi et al. (2016)

다) 지표면 반사도

지표면 반사도는 대기 상한 반사도의 신호 중 큰 부분을 차지하고 있으므로, 지면반사도 설정은 알고리즘의 성능을 크게 좌우한다. 해양과 육지의 지면반사도 성질은 큰 차이를 보이기 때문에 이에 대한 알고리즘 구성이 다르게 적용된다. 뿐만 아니라 해양 픽셀 중 탁도가 높은 픽셀의 지면반사도는 일반적인 해양의 지면반사도와 또 다른 경향을 보인다. 오히려 육지와 더 유사한 특성을 지니기 때문에 탁도가 높은 해양 픽셀의 경우 육지의 지면반사도 설정을 따른다.

GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘에서는 최소반사도법(minimum reflectivity technique)을 이용하여 육지와 탁수 위에서의 지면반사도를 추정한다(Herman and Celarier 1997; Koelemeijer, de Haan and Stammes, 2003). 먼저, 관측된 대기상한반사도로부터 Rayleigh 산란이 보정된 Rayleigh-corrected reflectance (RCR) 계산을 수행한다(Hsu et al., 2013). 30일의 기간에 대해서 지면반사도는 변화가 거의 적고 30일 중 적어도 하루는 에어로졸이 없는 상태라고 가정할 수 있다(Lee et al., 2010). 따라서 RCR의 값이 가장 작은 날에 대하여 에어로졸이 없다고 가정한 후 지면반사도를 계산할 수 있다. 본 알고리즘에서는 잔류할 수 있는 구름 그림자 효과를 제거하기 위하여 값이 작은 순서대로 1%에서 3% 사이에 해당하는 RCR을 각 파장에 대하여 평균하였다(Choi et al., 2016).

GOCI-II 채널 별 지표면 반사도 자료 구축을 위해, 파장이 동일한 GOCI-I 자료를 이용하였다. 380 nm 채널의 지표면 반사도의 경우 GOCI 자료로부터 계산된 443 nm 채널의 지표면반사도와 OMI에서 제공하는 지표면 반사도 기후값을 이용하여 자료를 생성하였다. OMI의 지표면 기후값은 380 nm와 443 nm 값에 대하여 제공하기에 두 값의 비율을 이용하여 GOCI 격자에 맞는 380 nm 지표면 반사도 자료를 구축하였다. 그림 17.19는 GOCI 격자에 대해 계산된 3월 13시의 443 nm와 380 nm 지표면 반사도를 나타낸다. 앞서 언급한 것처럼 443 nm 자료는 GOCI 자료와 최소반사도법을 이용하여 계산되었으며, 380 nm 자료는 OMI 기후값을 이용하여 계산되었다. 향후 GOCI-II가 발사되고 장기간의 자료가 축적된다면 OMI 자료를 이용하여 계산해두었던 자료를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

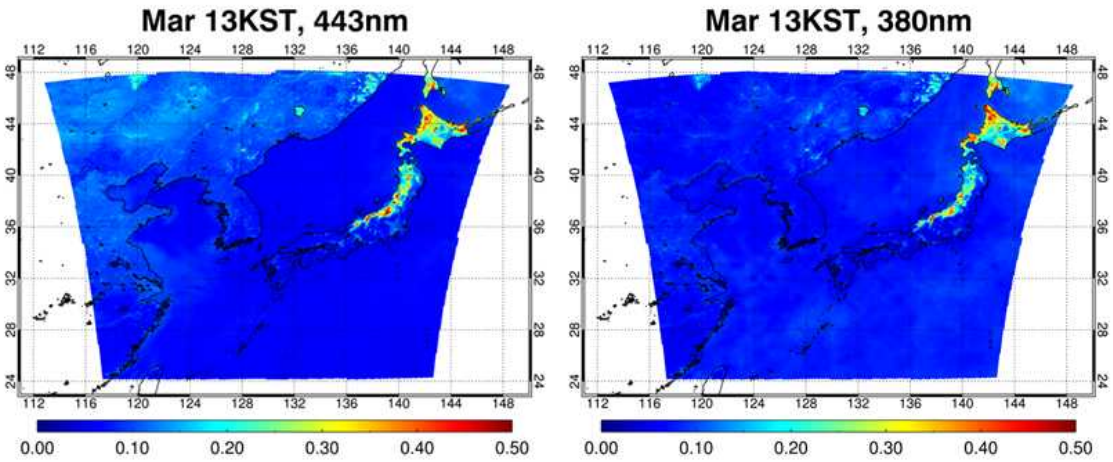


그림 17.20. Surface reflectivity at 443 nm and 380 nm for GOCI-II aerosol retrieval algorithm

육지와 달리 해양의 지면반사도는 관측 각도와 풍속에 의한 함수로 알려져있다(Cox and Munk, 1954). VLIDORT Version 2.7에서는 해양의 지면반사도 계산을 위해 클로로필, 염분 등 새로운 변수들이 적용 가능하다. 염분에 따른 대기상한반사도의 변화는 크지 않기 때문에, 풍속, 클로로필, 관측 방향에 관해 해양의 지면반사도를 계산하였다. 클로로필 농도와 해수면 위 풍속 자료는 알고리즘 현업화 시 실시간으로 입력 받기 어려울 경우를 대비하여 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 재분석 자료와 MODIS 산출물 자료를 이용하여 GOCI 격자에 맞는 기후 자료를 생성하였다. 그림 17.21과 17.22는 각각 GOCI 격자에 맞게 재구성된 클로로필, 풍속 기후값 예시를 나타낸다.

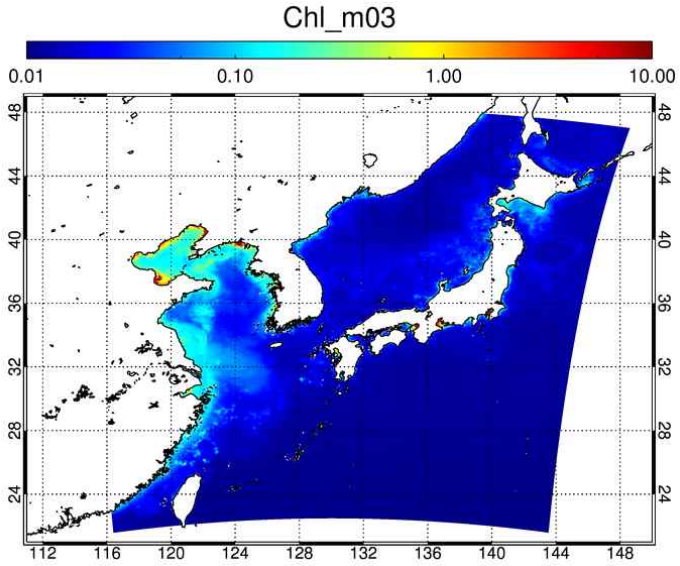


그림 17.21 Climate data for chlorophyll-a at March

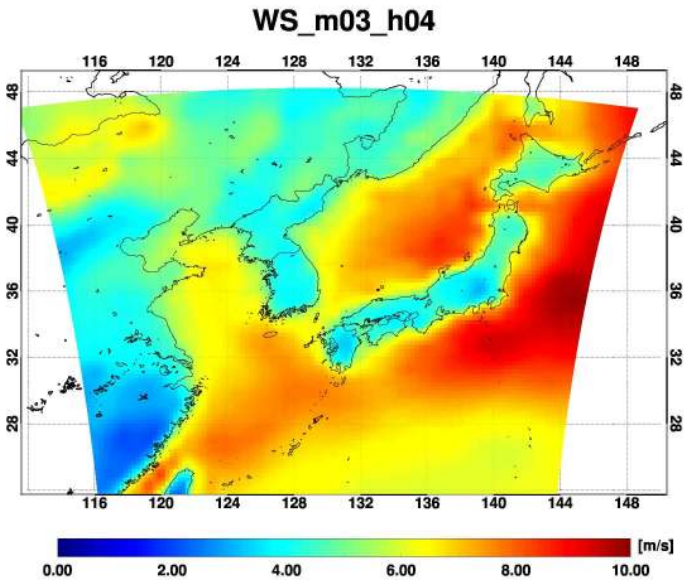


그림 17.22 Climate data for wind speed at March

라) 조견표 (Look-up table)

Variable	Number of entries	Entries
Wavelength	12	380, 412, 443, 490, 555, 620, 660, 680, 709, 745, 865 nm
Solar zenith angle	8	0, 10, ..., 70° (10° interval)
Viewing zenith angle	8	0, 10, ..., 70° (10° interval)
Relative azimuth angle	19	0, 10, ..., 180° (10° interval)
AOD	9	0.0, 0.1, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.1, 2.8, 3.6, 5.0 at 550 nm
Aerosol model	6	Dust, Highly-absorbing, Moderately-absorbing, Slightly-absorbing, Mixture, Non-absorbing
Surface reflectance (Only for land LUT)	4	0.0, 0.1, 0.2, 0.3
Terrain height (Only for land LUT)	2	0, 5 km
Wind speed (Only for ocean LUT)	6	1, 3, 5, 7, 9 and 20 m/s
Chlorophyll (Only for ocean LUT)	5	0.01, 0.1, 1, 10 and 50

그림 17.23 Look-up table variables for GOCI-II aerosol retrieval algorithm

GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘에서는 에어로졸 광학특성 산출에 걸리는 시간을 단축하기 위해 조견표를 미리 계산해두었다. 위성 관측에 영향을 주는 변수들에 대하여 실제 관측에서 나타날 수 있는 범위를 고려하여 복사전달모델 계산을 수행하였다. 그림 17.19는 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘의 조견표의 차원을 나타낸다. VLIDORT를 이용하여 계산되었으며, 조견표 계산에 이용된 변수는 파장, 태양천정각, 위성천정각, 태양-위성 상대방위각, AOD, 에어로졸 유형, 지표 고도, 지면반사도 관련 변수이다. GOCI-II 밴드에 대하여 spectral response function을 고려하여 계산하였으며, 태양천정각과 위성천정각은 0°에서 70°까지 10° 간격, 상대방위각은 0°에서 180°까지 10° 간격에 대하여 계산하였다. 에어로졸의 고도분포는 2km의 peak height를 가지는 가우시안 분포를 가지도록 가정하였다.

마) 역추산 방법

GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘은 Lee et al., (2012), Choi et al., (2016), Choi et al., (2018)에서 제시한 역추산 방법을 이용한다. 조견표의 선형 내삽을 통해 GOCI-II 전체 파장, 모든 에어로졸 유형에 관하여 AOD가 계산된다. 정확한 에어로졸 유형이 선택되었다면, 모든 파장의 AOD 값을 550 nm로 환산하였을 때 동일한 AOD 값을 보여야한다. 따라서 각 파장으로부터 얻어진 550 nm AOD의 표준편차가 작은 에어로졸 모델이 선택된다.

GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘은 밝은 지표에 대해서는 산출을 수행하지 않으므로, 지면반사도가 0.15 이하인 파장만을 선택한다. 이 때 선택된 파장이 2개 이상이면 해당 화소에 대하여 산출을 진행한다. 태양천정각, 위성천정각 등 관측된 조건에서 미리 계산해둔 조견표와 관측된 대기상한반사도를 비교하여, 각각의 파장에 대해 550 nm AOD를 얻는다. 이 때, 550 nm AOD의 표준편차가 가장 작은 3개의 에어로졸 유형이 선택되며, 최종 AOD는 아래의 식과 같이 표준편차를 이용해 가중하여 얻어진다.

$$Final\,AOD\,at\,550\,nm = \sum_{i=1}^{3} C_{Model,i} \times Averaged\,AOD_{Model,i}$$

$$C_{Model,i} = \frac{\frac{1}{\sigma_{Model,i}}}{\frac{1}{\sigma_{Model,1}} + \frac{1}{\sigma_{Model,2}} + \frac{1}{\sigma_{Model,3}}}$$

AOD 이외의 440-870 nm AE, 550 nm FMF, 440 nm SSA도 마찬가지로 각각의 에어로졸 유형이 지니는 값을 표준편차를 통해 가중하여 얻어진다. 마지막으로 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘은 Lee et al. (2010)에서 제시한 에어로졸 유형 구분 방법을 이용하여 여섯 개의 에어로졸 유형으로 분류한다. 산출된 550 nm FMF와 440 nm SSA를 이용하며, 구분 방법은 표 17.5에 기술되어 있다.

표 17.5. Aerosol type classification

No.	Aerosol Type	FMF at 550nm	SSA at 440nm
1	Dust	0.0≤FMF<0.4	SSA ≤ 0.95
2	Non-absorbing coarse type	0.0≤FMF<0.4	0.95 < SSA < 1.00
3	Mixture	0.4≤FMF<0.6	
4	Highly-absorbing fine type	0.6≤FMF<1.0	SSA<0.90
5	Moderately-absorbing fine type	0.6≤FMF<1.0	0.90≤SSA<0.95
6	Non-absorbing fine type	0.6≤FMF<1.0	0.95≤SSA

2) 산출물 정확도 평가 및 알고리즘 코드 검증 수행

알고리즘 작동 여부 확인을 위하여 특정 조건을 가정하여 reference test를 수행하였다. 태양천정각, 위성천정각, 태양-위성 상대 방위각은 각각 20, 40, 140을 가정하였고, 지표면 반사도는 0.05를 가정하였다. 에어로졸의 peak height를 2km로 가정하여 reference test를 수행하였을 때, 그림 17.24와 같은 결과를 얻었다. 기준 값으로 설정한 AOD와 알고리즘을 통해 산출된 AOD가 1대1 선에 놓여 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘이 정상적으로 작동함을 확인하였다.

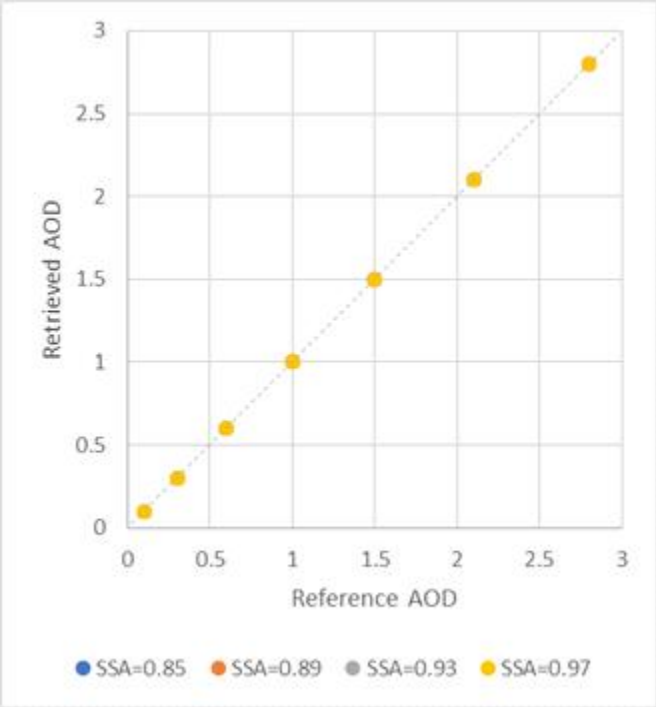


그림 17.24. reference test for GOCI-II aerosol retrieval algorithm

추가적으로 복사 전달 모델을 이용하여 GOCI-II 알고리즘 검증을 위한 다양한 조건의 모의 자료 생성하여 reference test를 진행하였다. 모의 자료의 입력 자료로 기하 정보와 지표면 반사도 정보는 GOCI 자료를 이용하였으며, 동아시아 지역의 대기 상태를 반영하기 위하여 GOCI AOD의 기후 값을 이용하였다. Reference test 결과, 모의 자료와 비교하여 8.1% 오차를 보이며, 당초에 계획하였던 목표 성능(< 10%)에 부합하였다.

다음으로 지상 원격 관측 네트워크인 AERONET 관측 값을 true value라고 가정하여, 위성에서 산출된 자료와 시공간 일치 후 비교를 통해 산출물 정확도를 판단하였다. 2018년 4월 18일부터 6월 8일까지 약 한달 반 기간에 대해 GOCI 자료와 계산된 조견표, 작성된 알고리즘을 이용하여 검증한 결과와 4월 18일에 산출된 AOD의 공간적인 분포를 그림 17.25에 나타내었다. AERONET과 검증을 위하여 AERONET 픽셀 주변으로 25 km 반경 이내에 들어오는 GOCI AOD를 평균하였으며, GOCI 관측 시간에 대해 앞뒤로 30분 이내에 들어오는 AERONET AOD를 평균하여 비교하였다. AERONET AOD와의 비교 결과 상관관계는 0.9로 나타났다. 기대 오차(Expected Error, EE)보다 작은 오차를 가지는 산출 포인트의 비율은 50%로 나타났으며, 이는 당초에 계획하였던 목표 성능(50%)에 부합하였다. 기대 오차로는 MODIS Dark Target 팀의 기준값(Remer et al., 2005)이 이용되었다.

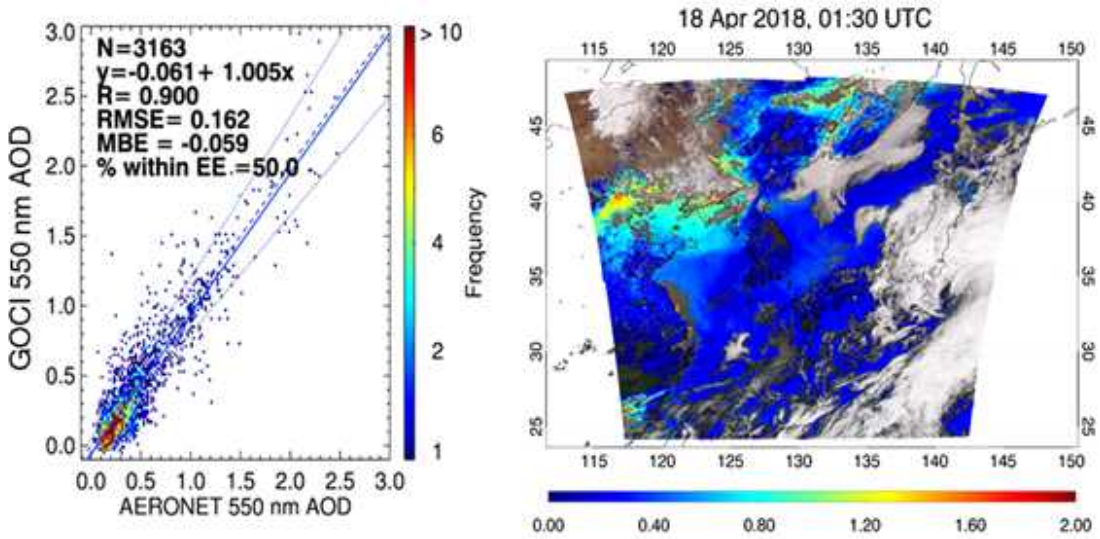


그림 17.25 (Left) Validation result of AOD obtained from GOCI-II aerosol algorithm using AERONET AOD (Right) retrieved AOD for 18 April, 2018

다음으로 자외선 채널을 모의하기 위하여 GOCI-II spectral response function을 TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) 자료에 적용하여 GOCI-II 380 nm 밴드를 모의하였다. TROPOMI 자료는 hyper-spectral 자료이며, 그림 17.26에 나타난 것처럼 밴드 3을 기준으로 0.54에 해당하는 spectral resolution을 가진다. 따라서 GOCI-II 380 nm 밴드의 반응 함수를 TROPOMI 자료에 적용하여 380 nm 자료를 모의하고자 하였다.

TROPOMI	UV		UVIS		NIR		SWIR	
Band	1	2	3	4	5	6	7	8
Spectral coverage [nm]	270 – 320		320 – 495		675 - 775		2305 – 2385	
Full spectral coverage [nm]	267 - 332		303 - 499		660 - 784		2299 - 2390	
Spectral resolution [nm]	0.49		0.54		0.38		0.25	
Spectral sampling ratio	6.7		2.5		2.8		2.5	
Spatial sampling [km²]	7 x 28	7 x 3.5					7 x 7	

그림 17.26. Spectral band definition, spectral properties and spatial resolution for TROPOMI (from KNMI)

우선적으로 GOCI와 TROPOMI의 위치, 공간 해상도 및 관측 시간을 고려하여 pixel collocation을 수행하였다. 그림 17.27은 GOCI와 TROPOMI 픽셀의 상대적인 크기를 나타내는데, TROPOMI 픽셀의 크기가 GOCI에 비해 큰 것을 확인할 수 있다. GOCI는 500 m x 500 m의 공간해상도를 가지고, TROPOMI는 밴드 3을 기준으로 7 km x 3.5 km의 공간해상도를 가지기 때문에 TROPOMI 픽셀 하나 당 GOCI 픽셀이 약 170개 포함된다. 따라서 두 자료를

함께 이용할 시에 TROPOMI 픽셀 내부의 구름 영향을 최소화하기 위하여 GOCI 자료를 이용하여 우선적으로 구름 제거 과정을 수행하였다. 그림 17.28에 나타난 것과 같이 GOCI 자료를 이용하여 500 m 공간해상도에서 구름 제거를 수행하고, TROPOMI 픽셀에 포함되는 GOCI 픽셀들을 선택하여 평균하였다. 따라서 VIS-NIR 채널의 대기 상한 반사도는 GOCI 자료로부터 얻어지고, 380 nm 채널의 대기 상한 반사도는 TROPOMI로부터 얻을 수 있다. 두 위성 자료로부터 얻은 대기 상한 반사도를 미리 계산해둔 조견표와 비교하여 에어로졸 모델별 AOD 계산을 각각 수행하였고, 역추산 과정에서 두 자료를 병합하여 파장에 따른 AOD의 표준편차가 작은 두 개의 모델을 선택하여 AOD를 산출하였다. 최종적으로 산출된 에어로졸 자료는 TROPOMI 자료의 공간해상도를 가진다.

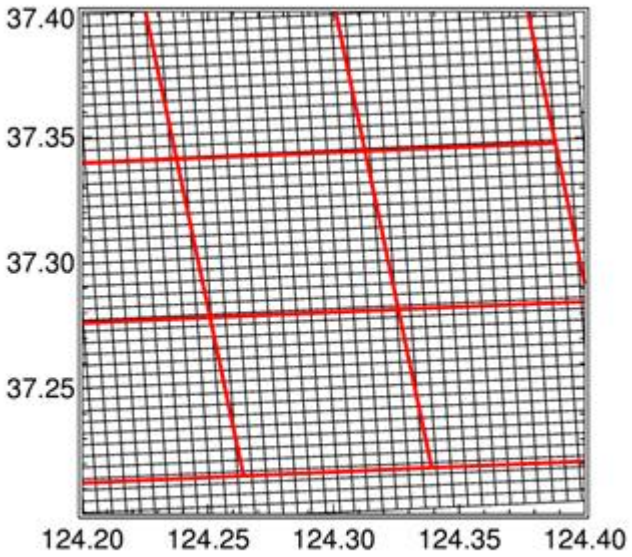


그림 17.27. pixel grid for GOCI (black) and TROPOMI(red)

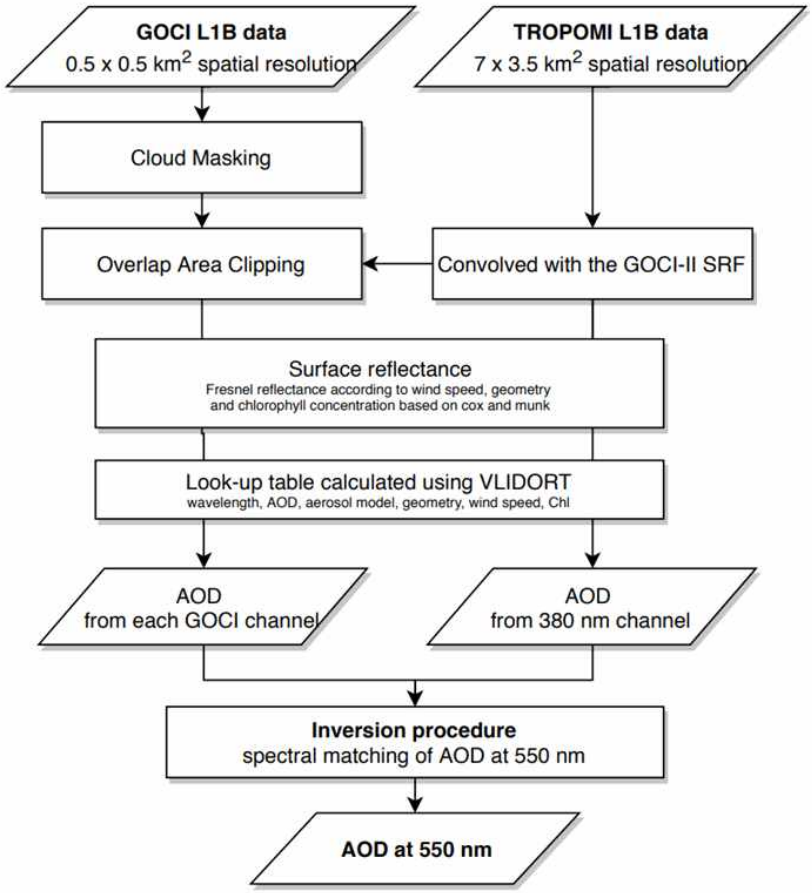


그림 17.28. Flowchart of the aerosol retrieval algorithm over ocean using GOCI-I and TROPOMI data

모의된 합성 자료를 이용하여 에어로졸 광학 두께 산출을 수행한 결과가 그림 17.29에 나타나있다. 왼쪽은 기존 GOCI 에어로졸 산출물 결과이며, 기존 자료와 유사한 공간 분포를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

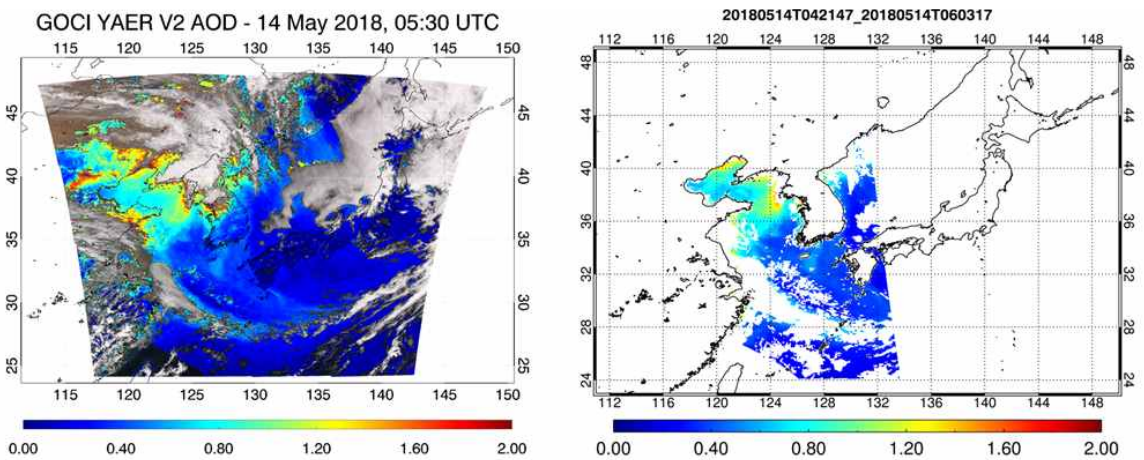


그림 17.29. (Left) GOCI YAER V2 AOD at 550 nm on May 14, 2018 (Right) AOD retrieval with GOCI-I and TROPOMI L1b data for simulation of GOCI-II retrieval result

3) GOCI-II 알고리즘 개발 환경

IDL 7.1 버전으로 작성되어 있던 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘을 지상 시스템의 테스트환경(Algorithm Development Environment, ADE)에서 동작 가능하도록 Python으로 변환하는 작업을 진행하였다. 그림 17.30은 IDL로 작성되어 있던 알고리즘을 Python으로 변환한 후에도 산출 결과가 일치하는 모습을 보여준다. IDL과 Python으로 작성된 GOCI-II 에어로졸 산출 알고리즘은 오픈소스 없이 모든 라이브러리를 직접 구현하였다. 서브루틴의 구체적인 설명은 헤더파일에 주석으로 기재하였으며, 코드 내 각 변수 및 함수들의 역할을 직관적으로 알 수 있도록 변수 및 함수 이름을 작성하였다.

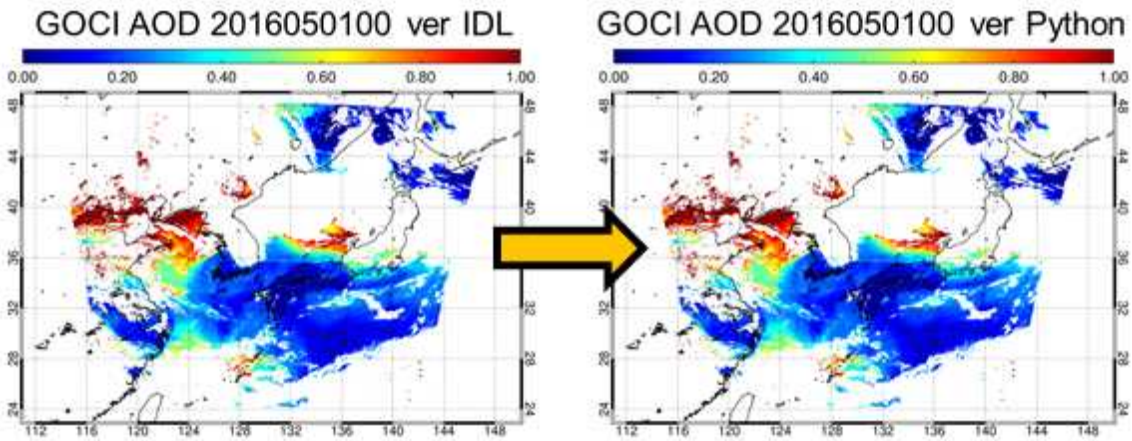


그림 17.30. Algorithm conversion result

18. 정규식생지수, 개량식생지수, 육상 BRDF/Albedo

가. 연구 자료

본 연구에서는 GOCI-II에 적합한 육상 BRDF/Albedo/NDVI/EVI를 산출하기 위하여 현재 GOCI-II와 가장 유사한 채널자료를 가지고 있는 GOCI 자료를 이용하였다. 연구기간은 2013년 1년 동안 진행하였으며, 연구영역은 한반도(111.32 ~ 146.68 E, 21.54 ~ 46.99 N)이다. GOCI는 2010년 발살된 천리안 위성이 가지는 탑재체 중 하나로, 한반도를 중심으로 2500 km × 2500 km 영역의 해양환경을 관측하는 세계최초로 정지궤도에서 운영되는 해양관측위성이다. 지구적도 상공 36000 km, 동경 128.2° 에 위차하여 하루에 8번 낮시간동안 동북아시아 지역을 관측한다. 본 연구에서 사용된 GOCI의 센서 특징은 표18.1와 같다.

표 18.1. GOCI의 센서 특성

Band no.	Center (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial resolution(m)	Temporal resolution(h)
1	412	20	500	1
2	443	20	500	1
3	490	20	500	1
4	555	20	500	1
5	660	20	500	1
6	680	20	500	1
7	745	20	500	1
8	865	20	500	1

본 연구의 알고리즘은 본 알고리즘에서는 BRDF 모델링, Narrow-to-broadband conversion, NDVI/EVI로 나눌 수 있으며 각각의 과정에서 필요로 하는 입력자료는 표18.2와 같다.

BRDF 모델링을 수행하기 위하여 태양 천정각(Solar Zenith Angle, SZA), 태양 방위각(Solar Azimuth Angle, SAA), 위성 천정각(Viewing Zenith Angle, VZA), 위성 방위각(Viewing Azimuth Angle, VAA) 및 지표면 (Top Of Canopy, TOC) 반사도가 필요로 하다. 이것은 Level-1B channel data가 아닌 대기보정 과정이 수행된 자료로써 현재 공식산출물의 부재로 인하여 자체적으로 대기보정을 수행하여 TOC reflectance 자료를 생산하였다.

Narrow-to-broadband conversion 과정에서는 위성 천정각, Kernel Integration Look-Up Table(LUT), BRDF parameters가 필요하다. Kernel Integration LUT는 BRDF 모델을 구성하고 있는 geometric kernel과 volumetric kernel을 각도 성분에 따라 적분한 값으로 Black sky, White sky 분광 Albedo를 산출에 사용된다. 본 알고리즘에서는 kernel 적분 값을 SZA 및 VZA에 따라 미리 계산하여 LUT을 구축하였다. NDVI/EVI를 산출하기 위하여 위성 천정각 및 정규화 반사도(Red, NIR, Blue)가 사용된다.

표 18.2. 입력자료

산출물 명	자료 타입	자료 명
BRDF 모델링	GOCI 센서 자료	위성 천정각
		태양 천정각
		상대 방위각
	Level 2 자료	TOC 반사도 (8개 채널)
Narrow-to-Broadband Conversion	GOCI 센서 자료	위성 천정각
	정적 보조 자료	Kernel Integration LUT (Geometric, Volumetric)
	동적 보조 자료	BRDF parameters
NDVI/EVI	GOCI 센서 자료	위성 천정각
	Level 2 자료	정규화 반사도 (Red, NIR) - NDVI 정규화 반사도 (Red, NIR, Blue) - EVI

나. 연구내용 및 결과

본 연구의 전체적인 알고리즘 흐름은 그림 18.1과 같다. 공식산출물이 아닌 자체적으로 생산한 TOC 반사도의 산출과정은 해당 흐름도에서 제외하였다. 알고리즘의 순서는 먼저 BRDF 모델링,Missing gap filling을 통해 정규화반사도를 산출한다. 이것을 바탕으로 NDVI/EVI를 산출하게 되며, Narrow-to-broadband conversion 과정을 거쳐 최종적으로 Albedo를 산출하게 된다. 본 연구에서 사용한 BRDF 모델은 반 경험적 모델로 지표의 이등방성 반사율은 등방성 산란과 표면산란 그리고 체적산란의 합으로 이루어진다고 가정하며, 각각의 산란은 모델의 커널과 경험적 계수로 결정된다. 따라서 BRDF 모델링을 통해 BRDF parameter를 산출하기 위해서는 구름이 없는 조건에서 최소 3회 이상의 관측이 되어야 하며 다양한 각도 조건에서 관측 된 자료가 필요하다. 하지만 GOCI-II는 multi-angle 센서가 아니기 때문에 일정 기간의 자료를 합성하여 BRDF 모델링을 수행하게 되며 본 연구에서는 합성기간을 16일로 선정하였다. 또한 지속적인 구름으로 인해 발생하는 공백 화소에 대해서는 이전 4일까지의 BRDF parameter를 이용한 Missing Gap Filling을 수행하였다. 일정 기간의 자료를 합성하고 BRDF parameter를 산출하는 것은 시간이 많이 걸리는 과정이기 때문에 효율적인 처리를 위하여 전체적인 알고리즘을 offline mode과 online mode으로 나누었다. Offline mode에서는 합성 기간 동안의 시계열 자료를 이용하여 BRDF 모델링을 통해 BRDF parameter, 정규화 반사도를 산출 및 저장하게 된다. online mode에서는 offline mode에서 미리 산출된 BRDF parameter를 이용하여 Full Disk 영역의 지표면 광대역 Albedo를 Daily의 시간 간격으로 산출하게 된다.

NDVI는 NIR 영역의 반사도와 Red 영역의 반사도의 차이를 정규화하여 산출하며, EVI는 NDVI에서 추가적으로 에어로졸 산란계수와 Blue 영역의 반사도 자료를 사용한다. 원격탐사에 의해 획득된 반사도 자료는 구름 및 에어로졸에 의한 산란, 굴절, 반사 등의 영향과 태양입사각의 변화 등의 영향으로 인하여 왜곡 현상이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 BRDF의 중간 산출물인 정규화반사도(Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance, FVBAR) 자료를 바탕으로 NDVI와 EVI를 생산하였다.

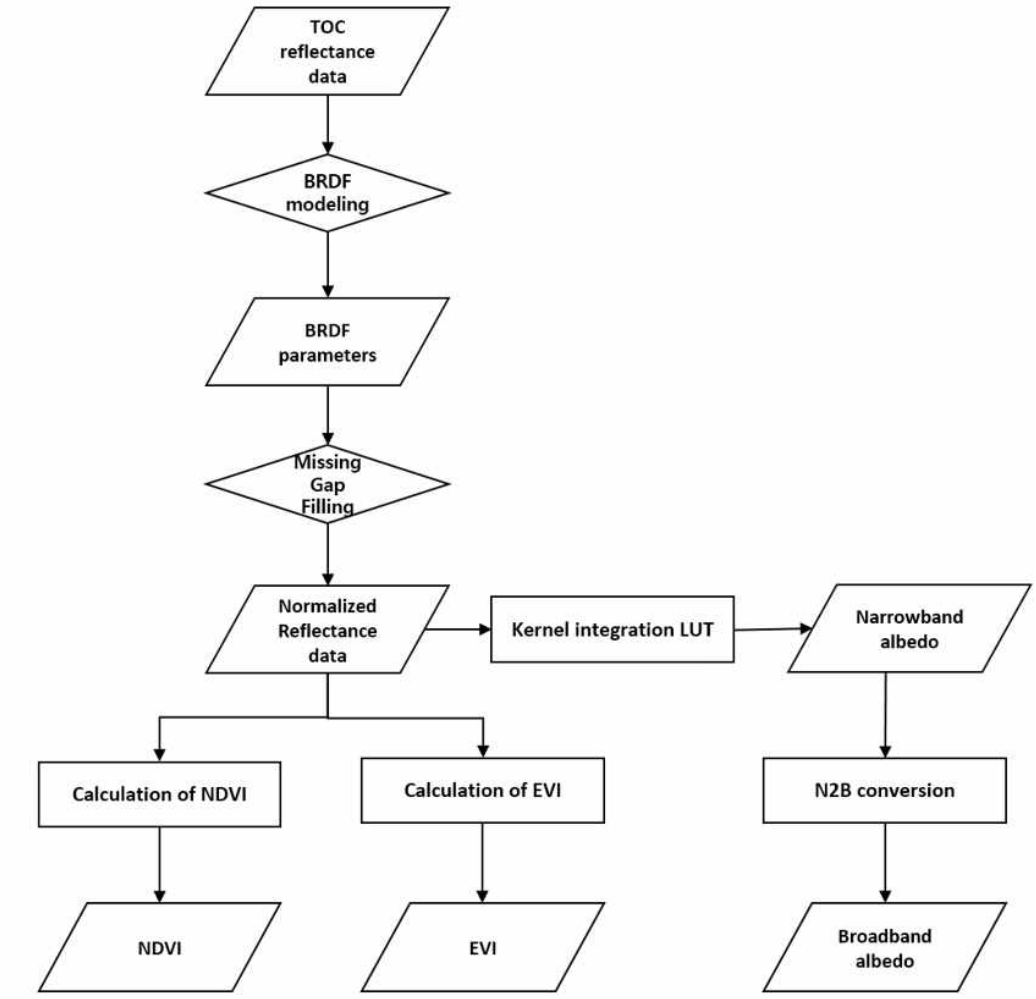


그림 18.1. BRDF/Albedo/NDVI/EVI 알고리즘의 흐름도

1) 대기보정

앞서 설명한 것과 같이 본 연구에서는 L1B channel data가 아닌 TOC 반사도가 필요하다. 하지만 현재 공식산출물이 존재하지 않아 자체적으로 생산하여 사용하였다. 본 연구에서는 다양한 연구에서 사용되었고 현재 MODIS의 대기보정에 사용 중인 Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)을 이용하였다 (Vermote et al., 1997; Kotchenova et al., 2006; Zhao et al., 2000). 6S는 특정위성의 밴드나 지역에 특화되지 않아 다양한 위성에 적용이 가능하며 GOCI의 대기보정에도 적용이 가능하다. 식은 다음과 같다.

$$\rho_{toc} = y/(1 + xc \times y),$$
$$y = xa \times L - xb$$

식의 L은 위성으로 관측된 대기상단의 Radiance(Wm-2sr-1㎛-1)이며, ρtoc는 대기보정 후의 지표면 반사도이다. 3가지 계수 중 xa는 태양광의 대기경로에 따른 대기의 radiance, xb는 태양광의 대기 투과경로에 따른 총 산란 투과도, xc는 대기하단에서 등방성 빛의 입사로 인한 산란을 나타낸 것이다.

대기보정을 수행하기 위하여 Land/Sea Mask, Cloud mask, Total Precipitable Water (TPW), Total Ozone Column (TOZ), Aerosol Optical Depth (AOD) 자료를 사용하였다. Land/Sea Mask는 육지 화소가 아닌 지역을 masking하는데 사용하였으며, Cloud mask는 현재 공식산출물이 존재하지 않아 Top Of Atmosphere (TOA) 반사도 자료를 이용한 자체 경계값을 이용하였다. 그 기준은 다음과 같다.

(TOA Band2≥0.25, Band05 ≥0.35, Band06≥0.35
TOA Band8≥0.55, 0.75≤TOA8/TOA6≤1.25)

TPW 및 TOZ는 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) daily 자료를 이용하였고, AOD는 2013년 CAMS자료 전체적으로 Missing value로 이루어져 기후값으로 대체하였다. 해당 기후값의 산출식은 다음과 같다.

$$\tau_{aer} = 0.2[\cos(lat) - 0.25]\cos(lat)^3 + 0.05$$

위 수식은 위도별로 대륙형 에어로졸의 광학두께의 산출하는 것으로 EUMETSAT의 LAND SAF에서 MSG기반의 지표면 알베도를 산출할 때 사용되었다 (LSA SAF, 2012).

2) BRDF 모델링

일반적인 지표는 태양광의 입사각도와 관찰자의 시야각에 따라 동일한 지표라도 다른 반사율을 가지는 비등방성 반사특성을 가진다. Albedo는 각도에 따라 변하지 않는 대상 지표가 가지는 일정한 반사율을 말한다. 따라서 모든 각도에 대한 비등방성 반사율을 고려할 수 있는 BRDF 모델링은 지표면 Albedo 생산에 필수적인 과정이며 현재 Terra/Aqua, SPOT, Suomi NPP 등과 같은 극궤도 위성뿐만 아니라 Goes-R, MSG와 같은 정지궤도 위성에서도 BRDF 모델링을 통해 지표면 광대역 Albedo를 산출하고 있다.

현재 지표면 Albedo 자료를 지속적으로 산출하고 있는 The National Aeronautics and Space Administration (NASA)와 European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)에서는 동일한 형태의 선형 반경험적 BRDF 모델을 사용하고 있다. 반경험적 모델은 물리모델에 비해 계산이 빠르며, 다양한 토지피복에 적용이 가능하며 경험적 모델에 비해 적은 수의 관측자료를 가지고 BRDF 모델링이 가능한 장점이 있다 (Wanner et al., 1995). NASA와 EUMETSAT에서 사용하는 BRDF 모델을 구성하는 kernel중 geometric의 경우 NASA는 Li and Strahler (1986)에 의해 제시된 Li-Sparse kernel을 사용하며 EUMETSAT은 Roujean et al. (1992)에 의해 제시된 Roujean geometric kernel을 사용하고 있다. 본 알고리즘에서는 Roujean model을 사용하여 BRDF 모델링을 수행하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$\rho(\theta_s,\theta_v,\phi) = K_0 + K_1 f_1(\theta_s,\theta_v,\phi) + K_2 f_2(\theta_s,\theta_v,\phi)$$

식의 좌측항인 $\rho(\theta_s,\theta_v,\phi)$은 위성에서 관측한 반사도이며, f1,2는 물리적 의미를 가지는 커널함수이며 각각 지표면에서 일어나는 geometric 산란과 volumetric 산란을 표현한다. K0,1,2는 BRDF의 경험적 계수이며, 그 중 K0는 등방성 산란을 나타낸다. 커널의 입력자료로 표시된 θs,v는 태양과 위성의 천정각 이며, Φ는 태양과 위성의 상대방위각이다.

f1과 f2를 태양-지표-위성의 각도성분으로 표현하였으며 아래와 같다.

$$f_1(\theta_s,\theta_v,\phi)=\frac{4}{3}\frac{1}{\cos\theta_s+\cos\theta_v}\times[(\frac{\pi}{2-\xi})\cos\xi+\sin\xi]-\frac{1}{3},$$

$$\cos\xi=\cos\theta_s\cos\theta_v+\sin\theta_s\sin\theta_v\cos\phi$$

$$f_2(\theta_s,\theta_v,\phi)=\frac{1}{2\pi}[(\pi-\phi)\cos\phi+\sin\phi]\tan\theta_s\tan\theta_v-$$
$$\frac{1}{2\pi}(\tan\theta_s+\tan\theta_v+\sqrt{\tan^2\theta_s+\tan^2\theta_v-2\tan\theta_s\tan\theta_v\cos\phi})$$

그림 18.2는 각기 다른 SZA 조건에서 VZA에 따른 geometric 커널과 volumetric 커널을 나타낸다.

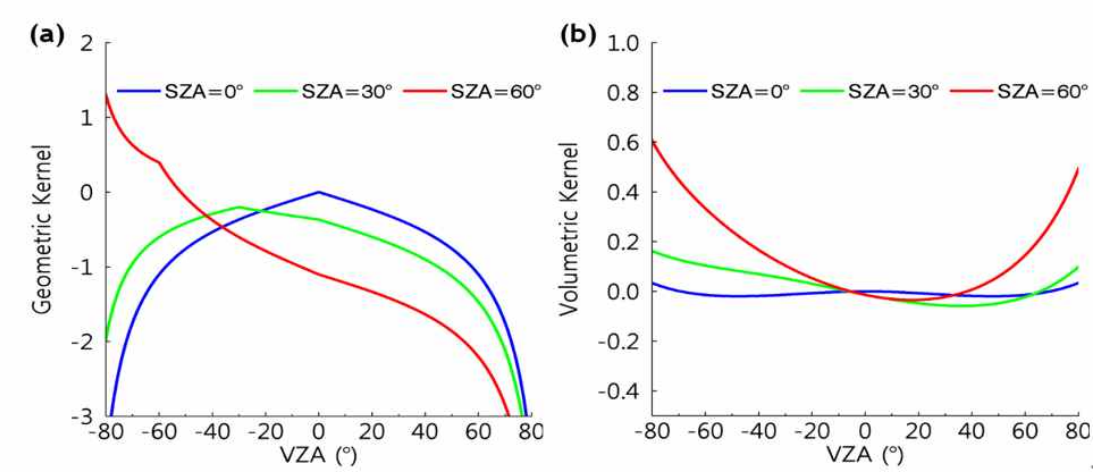


그림 18.2. Roujean et al.(1992)에 의해 제시된 BRDF 모델의 geometic kernel (a)과 volumetric kernel. 음의 VZA : RAA = 0° (backward scattering), 양의 VZA : RAA = 180° (forward scattering).

극궤도 위성은 BRDF 모델링 합성기간 동안 다양한 VZA조건에서의 반사도를 관측하는 반면 GGOCI와 같은 정지궤도 위성은 각각의 pixel에 대하여 고정된 VZA조건에서 지표면 반사도를 관측한다 (그림 18.3). 따라서 BRDF 모델을 통해서 반사도를 재생산 할 때, 정지궤도 위성은 극궤도에 비해 관측된 반사도에 더욱 민감하게 반응하며 비물리적인 경험적 계수를 산출할 가능성이 있다. 이러한 효과를 최소화하기 위해 본 알고리즘에서는 BRDF 모델링을 통해 생산된 정규화 반사도를 이용하여 optimizing을 수행하였다.

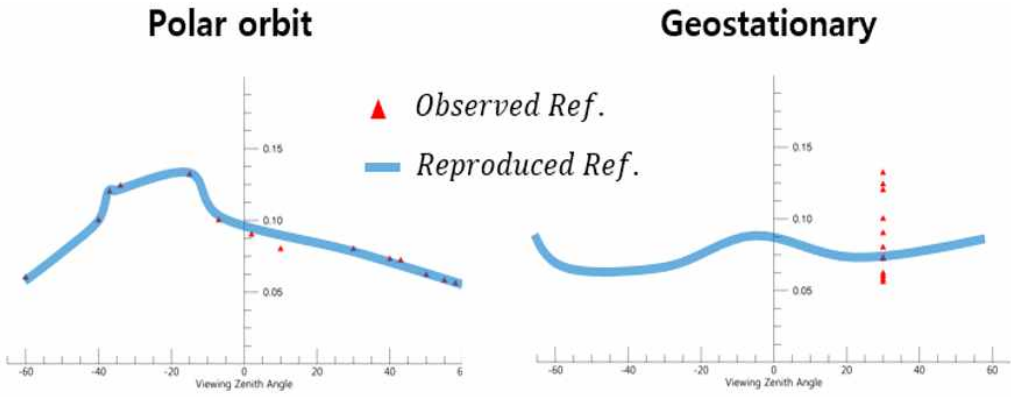


그림 18.3. 극궤도 위성(좌)과 정지궤도 위성(우)에서의 관측된 반사도와 BRDF 모델링을 통해 재생산된 반사도. 붉은 삼각형 : 관측된 반사도, 푸른 실선 : 재생산된 반사도.

기존의 극궤도 위성을 기반으로 개발된 BRDF 모델링은 kernel 내부에 각도 성분을 변조하여 (θv = 0°, θs = mean SZA) 반사도 정규화 과정을 수행한다 (Duchemin and Maisongrande, 2002). 위성관측 지표반사도와 BRDF 모델로 모의된 반사도, 그리고 각도성분을 변조한 반사도간의 합차를 통해 정규화를 수행하며 다음 식과 같다.

$$\rho_{norm} = \rho_{\mathrm{model}}(\theta_s = mean\ /\ \theta_v, \phi = 0^\circ) + \rho_{measured} - \rho_{\mathrm{model}}(\theta_s, \theta_v, \phi)$$

ρnorm은 변조된 반사도이며, ρmodel는 주어진 각도에 대해 kernel로 모의된 반사도이다. ρmeasured은 위성으로 관측된 지표반사도를 말하며 합성기간 동안의 평균을 통해 최종적으로 합성된 정규화 반사도를 산출하게 된다. 정지궤도 위성의 반사도 정규화 과정에서 VZA을 nadir (0°)로 변조할 경우 통계적 제한으로 인해 비물리적인 정규화 반사도가 산출될 가능성이 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 정규화 반사도 산출을 위한 반사도 정규화 과정에서 VZA을 nadir로 변조하지 않고 해당 pixel의 VZA을 사용하였으며 SZA과 RAA는 합성 기간 동안의 평균을 사용하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance(FVBAR)를 산출하였다. 이렇게 산출된 FVBAR는 식생지수 및 BRDF model에 사용하였다.

$$\rho_{norm} = \rho_{\mathrm{model}}(\theta_s = mean,\ \theta_v = \theta_v, \phi = mean) + \rho_{measured} - \rho_{\mathrm{model}}(\theta_s, \theta_v, \phi)$$

그림 18.4는 본 연구에서 수행된 BRDF 모델링 optimizing의 개념도이다. 먼저 BRDF 모델의 경험적 계수 (K0, K1, K2)를 BRDF 모델 inversion 과정을 통해 계산하고 이를 이용하여 정규화 반사도를 산출한다. 이 후, 이등방성 반사를 나타내는 K0를 정규화 반사도로 변조한다. 그리고 다시 BRDF 모델 inversion을 거쳐 K1, K2를 산출하고 다시 산출된 BRDF 모델의 경험적 계수를 이용하여 정규화 반사도를 산출하는 일련의 과정을 반복하여 BRDF 모델링 optimizing을 수행하였다.

그림 18.5는 Red(band5),NIR(band8)에 대한 FVBAR의 여름 및 겨울의 공간적 분포이다. 해당 그림에서 겨울 기간이 여름 기간에 비하여 공백 화소가 다수 발생하였다. 이는 겨울 기간 동안 눈으로 인하여 Missing value가 산출되었기 때문이다.

그림 18.6은 Landcover에 따른 FVBAR의 시계열 그래프이다. 여름철에 NIR(band8) 반사도가 높아지고 Red(band5)가 낮아지는 경향을 확인할 수 있으며, 겨울철에는 NIR 반사도가 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 식생의 활동을 잘 반영한다고 할 수 있다.

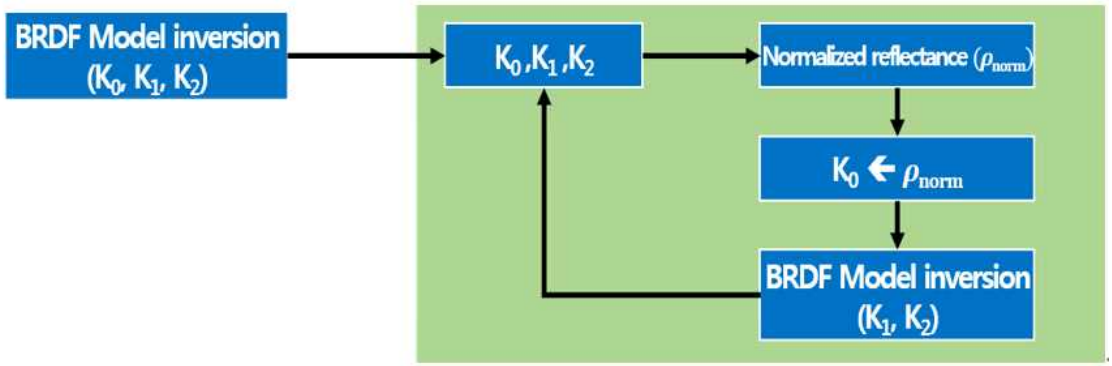


그림 18.4. BRDF 모델링의 optimizing 개념도

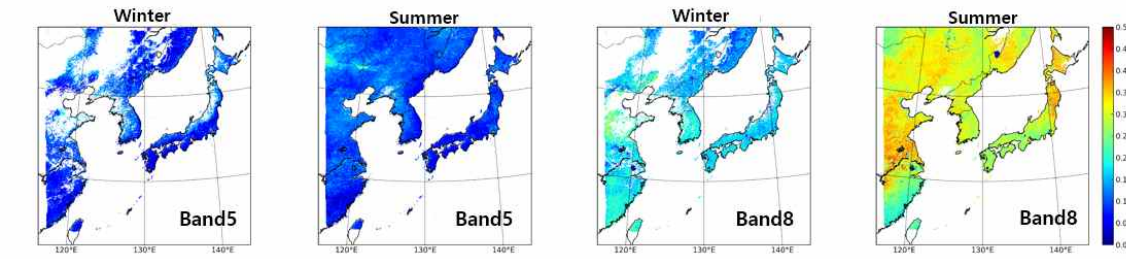


그림 18.5. FVBAR의 공간적 분포

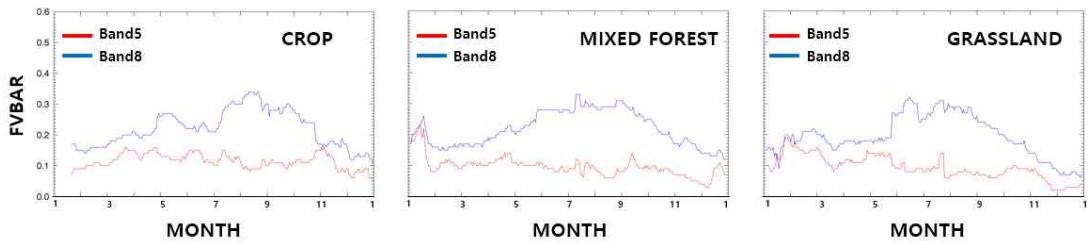


그림 18.6. landcover에 따른 FVBAR의 시계열 분포

3) Narrowband Albedo 산출

Albedo를 산출하기 위해서는 태양, 위성, 지표 사이의 모든 geometry를 고려해야 한다. 지구는 구형을 이루고 있으며 구형 Albedo를 생산하기 위해서는 각도성분에 대한 커널의 적분 과정이 필요하다. 위성기반의 Albedo는 실제 Albedo인 blue sky albedo를 직접적으로 계산하지 않고 대기의 상대를 극과 극으로 가정한 상태의 Albedo인 black sky albedo와 white sky albedo로 구분하여 생산한다. Black sky albedo는 대기 중에서 태양광의 산란이 없이 모두 투과하는 상태를 뜻하며, white sky albedo는 대기 중에서 태양광이 모두 산란되는 상태를 뜻한다. 이러한 black sky albedo와 white sky albedo는 BRDF를 구성하는 geometric kernel과 volumetric kernel의 적분을 통해 산출된 반구특성함수를 이용하여 생산된다.black

sky 생산을 위해 black sky 반구특성함수를 생산해야하는데 이는 BRDF의 각 커널을 위성의 천정각과 상대방위각으로 적분하여 산출된다. 그 식은 다음과 같다.

$$h_{b,k}(\theta_s) = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2} f_k(\theta_s,\theta_v,\phi)\sin(\theta_v)\cos(\theta_v)d\theta_v d\phi$$

black sky는 대기중에 태양광이 완전 투과되는 상황을 가정하고 있기 때문에 태양천정각의 성분을 제외한 나머지 두 가지 각도 성분으로 적분을 수행하게 된다. 이렇게 적분된 값을 다시 태양 천정각으로 적분하여 white sky 알베도 생산을 위한 white sky 반구특성 함수를 생산하게 된다. 식은 다음과 같다.

$$h_{w,k} = 2\int_0^{\pi/2} h_{b,k}(\theta_s)\sin(\theta_s)\cos(\theta_s)d\theta_s$$

그림 18.7, 표 18.3은 각각의 black sky와 white sky의 반구 특성 함수를 나타내고 있다. Black sky의 반구 특성 함수는 BRDF의 각 커널을 위성 천정각과 상대 방위각에 대해 적분하여 태양 천정각에 대한 함수로 나타나며 white sky의 반구 특성 함수는 black sky의 반구 특성 함수를 다시 태양 천정각에 대해 적분하여 상수로 나타난다. black sky의 반구 특성 함수에서는 천정각이 높아짐에 따라 비등방성 반사율이 낮아지거나(geometric), 높아지는(volumetric) 전형적인 커널의 변화를 보여주고 있으며, geometric 커널에서 발생했던 비물리적 값은 상대방위각 적분의 영향으로 사라진 것을 알 수 있다. black sky와 white sky의 반구 특성 함수는 고정된 커널을 적분 하여 생산되기 때문에 반복된 계산을 지양하고 계산 속도를 향상시키기 위하여 LUT 형태로 저장하여 사용하였다.

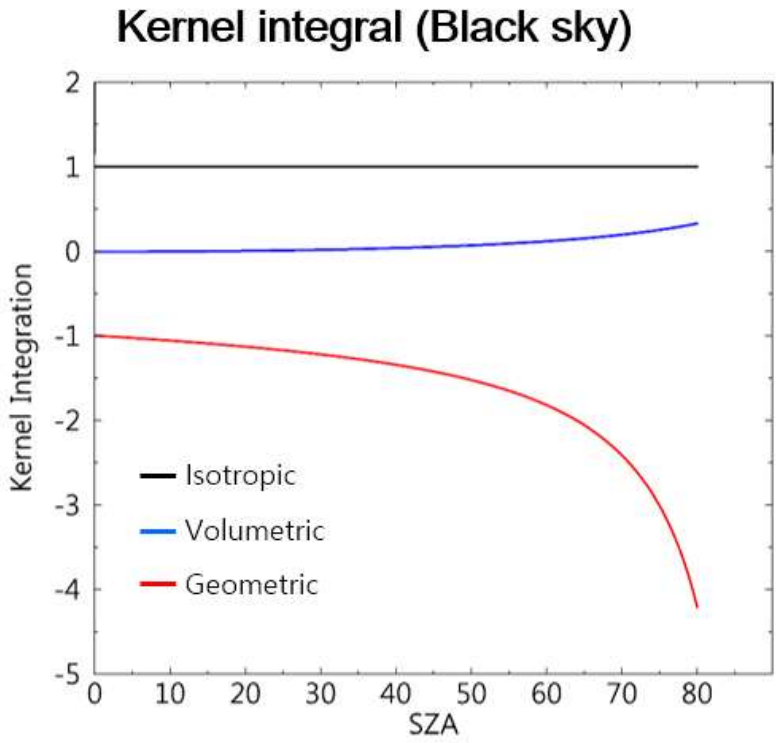


그림 18.7. Black sky의 반구 특성 함수

표 18.3. White sky의 반구 특성 함수

Isotropic	Geometric	Volumetric
1	−1.28159	0.080283

분광 Albedo는 위성에 탑재된 채널의 폭에 해당하는 Albedo이며 BRDF 경험적 계수와 커널 적분을 통해 산출된 black sky와 white sky의 반구특성함수를 이용한 선형 다항식으로 산출된다. GOCI-II의 각 반사도 채널의 black sky와 white sky 분광 Albedo 산출식은 각각 다음과 같다.

$$\alpha_{bs}(\theta_s) = \sum_n K_n h_b(\theta_s)$$

$$\alpha_{ws} = \sum_n K_n h_w$$

Black sky 분광 알베도는 SZA에 대한 식으로 표현된다. 이때 알베도 결정을 위한 reference angel이 필요로 하다. 본 연구에서는 Local Noon 일 때의 태양 천정각을 사용하였다.이것은 hour angle이 0° 일때의 SZA를 나타난다. 아래 그림 18.8은 계절 별 Local noon angle의 계절별 공간적 분포를 의미한다.

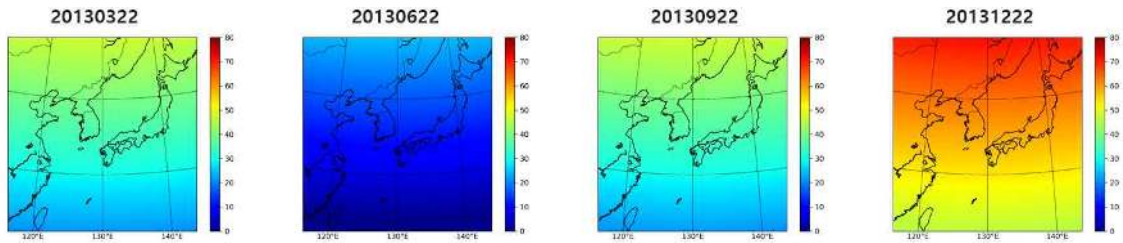


그림 18.8. 계절 별 Local noon angle.

그림 18.9는 Black sky, White sky에 대한 각 밴드별 분광 알베도이다. 중국 북동쪽 지역에 사막이 존재하는데 해당지역에 모든 밴드에서 상대적으로 높은 알베도 값이 산출되는 것을 확인할 수 있다.

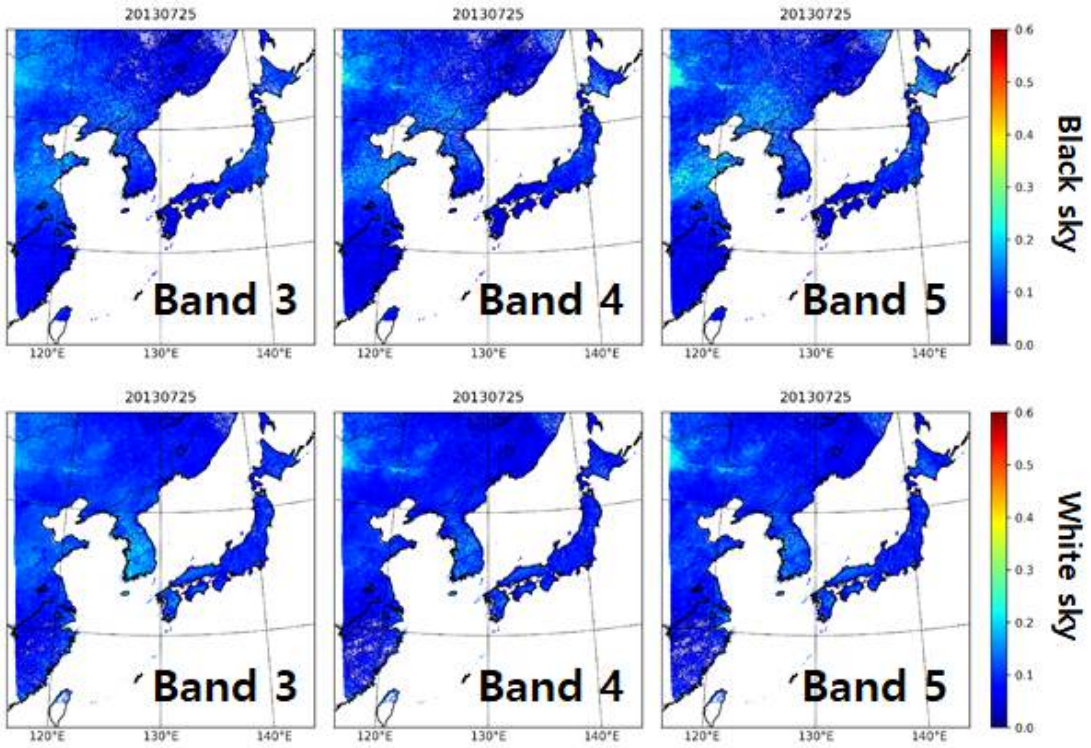


그림 18.9. 분광 알베도 산출 결과

4) Narrow-to-Broadband conversion

Narrowband albedo는 위성센서의 관측폭에 대한 알베도이다. 하지만 실제 지구의 에너지 및 수분 균형을 결정하고 Numerical weather model, hydrology model, circulation model 등의 입력자료로 사용되는 것은 단파 영역 (0.3 ~ 5.0 μm)의 광대역 알베도 (broadband albedo)이다. 따라서 각 채널의 spectral albedo를 broadband albedo로 전환하는 Narrow-to-broadband conversion 과정은 필수적이다. broadband albedo로의 전환은 spectral albedo와 참고가 되는 타위성의 broadband 알베도와 통계분석을 통해 이루어지게 된다. 이 방법은 Liang et al. (1999)에 의해 제시되었으며 현재 MODIS의 광대역 알베도 전환에도 적용되는 방법이다 (Luchet et al., 2000).

본 연구에서는 회귀분석을 위한 reference 자료로 MODIS broadband albedo (MCD43A3)를 사용하였다. Systematic sampling 기법으로 black sky와 white sky에서 각각 약 4,000,000,000 개의 spectral albedo와 MODIS broadband albedo를 수집하여 dataset 구축하였으며 이 중 절반은 training dataset으로 사용하였으며 나머지 절반은 validation dataset으로 사용하였다. training dataset을 이용하여 도출된 broadband albedo 전환 모델은 다음 식과 같다.

$$\Lambda = const. + c_1\alpha_1 + c_2\alpha_2 + c_3\alpha_3 + c_4\alpha_4 + \cdots + c_8\alpha_8$$

위 식에서 Λ는 broadband albedo를 의미한다. a_i는 GOCI 채널 i에서의 분광 알베도이며 ω는 각 채널의 광대역 전환계수는 의미한다. 본 연구에서는 snow-free 지역을 대상으로 Broadband albedo를 산출한다. 표 18.4는 해당 조건에서 도출된 모델의 정확도와 모델을 구성하는 계수를 나타낸다.

그림 18.10은 위의 자료를 이용하여 산출된 Broadband albedo의 공간적 분포이다. 앞서 설명한 것과 같이 겨울철 눈으로 인한 missing value로 인하여 broadband albedo에서도 그와 마찬가지고 적설역 masking으로 인하여 산출되지 않은 것을 확인할 수 있었다.

표 18.4. black sky 및 white sky 광대역 전환계수

	Parameter	coefficient	R	Std. error of estimation
Black sky	Constant	0.056	0.832	0.01575
	C1	−0.022		
	C2	−0.125		
	C3	−0.301		
	C4	−0.727		
	C5	0.592		
	C6	0.846		
	C7	0.269		
	C8	0.605		
White ske	Constant	0.063	0.804	0.0187
	C1	−0.075		
	C2	−0.108		
	C3	−0.219		
	C4	−1.206		
	C5	0.920		
	C6	0.954		
	C7	0.328		
	C8	0.606		

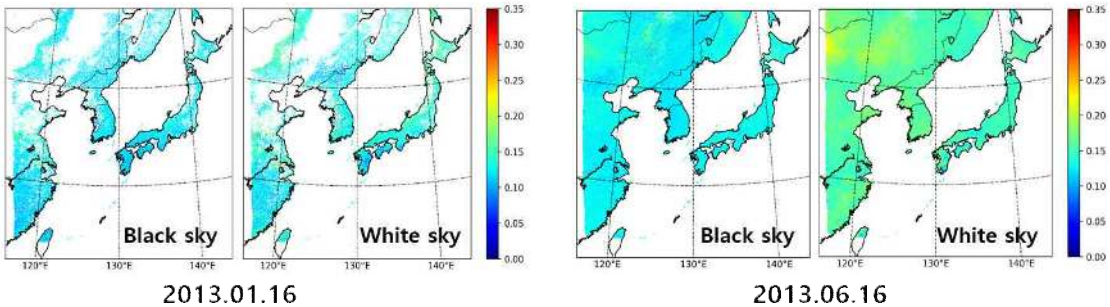


그림 18.10. GOCI black/white sky 광대역 알베도 공간 분포
(왼쪽 : 2013년1월16일, 오른쪽 : 2013년 6월 16일)

5) NDVI/EVI

식생지수는 NIR 영역의 반사도와 Red 영역의 반사도의 차이를 정규화하여 산출하게 된다. 원격탐사에 의해 획득된 반사도 자료를 이용하기 전에, 구름 및 에어로졸에 의한 산란, 굴절, 반사 등의 영향과 태양 입사각의 변화 등의 영향으로 인하여 왜곡 현상이 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위해, 대기보정, 지리보정, 기하보정을 통한 위성 전처리 과정을 거치게 된다. 위성 전처리 과정을 수행 한 이후에도, 정지궤도 위성의 특성에서 나타나는 태양 방향성 감소를 위해 Bi-directional Reflectance Distribution Function(BRDF) 모델링을 수행한다. 본 연구에서는 이러한 처리과정이 수행된 Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance (FVBAR) 자료를 사용하여 식생지수 산출에 영향을 끼치는 다른 요소들을 모두 고려하였기 때문에 본

연구에서는 추가적으로 다른 전처리 과정은 수행하지 않았다. 산출식은 다음과 같다.

$$NDVI = \frac{\hat{\rho}_{NIR} - \hat{\rho}_{Red}}{\hat{\rho}_{NIR} + \hat{\rho}_{Red}}$$

$\hat{\rho}_{\ni R}$ = Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance of NIR

$\hat{\rho}_{Red}$= Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance of Red

NDVI 값이 1에 근접할수록 식생이 건강한 상태이다. 그와 반대로 0에 근접할수록 식생이 거의 존재하지 않으며 대부분 죽어있는 상태를 나타낸다. 물과 구름지역에서 음의 값이 계산될 수 있다. 그러한 상황일 경우, 본 알고리즘에서는 0으로 대체한다.

식생지수는 대기에 민감하게 반응하며 Huete and Liu (1994) 토양에 의한 영향도 크다. 그리고 에어로솔이 많을 경우 배경영향을 더욱 줄일 수 있음이 알려져 있다. Liu and Huete (1995)는 이러한 오차를 줄이기 위해 Feedback 기반의 기법인 EVI를 개발 하였으며 이는 토양, 식생, 대기의 영향에 의한 오차를 줄일 수 있었다. 해당 식은 다음 식과 같다.

$$EVI = \frac{\hat{\rho}_{NIR} - \hat{\rho}_{Red}}{\hat{\rho}_{NIR} + C1\,\hat{\rho}_{Red} - C2\,\hat{\rho}_{Blue} + L}$$

$\hat{\rho}_{\ni R}$ = Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance of NIR

$\hat{\rho}_{Red}$= Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance of Red

$\hat{\rho}_{Blue}$= Fixed Viewing BRDF Adjusted Reflectance of Blue

C1, C2 : The coefficients of the aerosol resistance term

L : The canopy background adjustment for correcting the nonlinear

그림 18.11는 NDVI와 EVI의 계절별 공간적 분포이다. 정규화 반사도에서 나타난 공백 화소 부분에 대하여 값이 missing 됨을 확인 할 수 있다.중국 북동쪽 지역에 존재하는 사막지역에서 식생지수가 낮게 나타나고 있으며, 여름철 한반도 지역을 중심으로 다른 계절에 비해 식생지수 값이 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

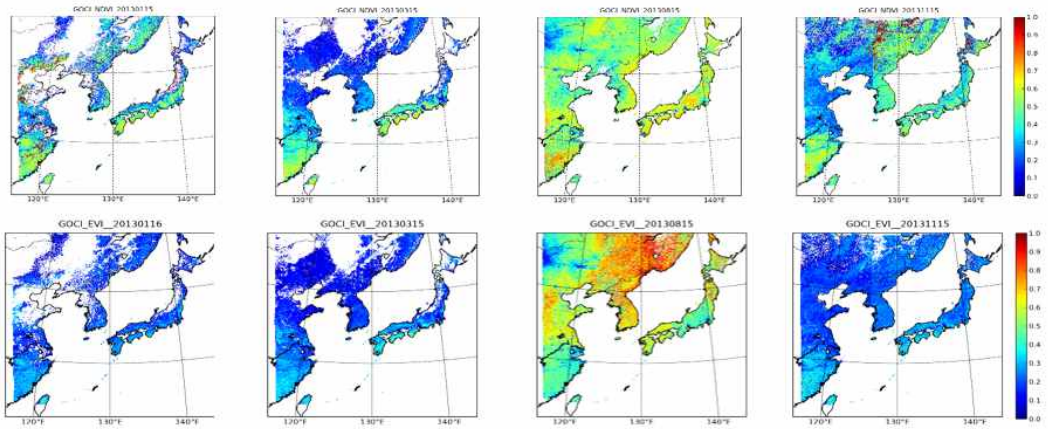


그림 18.11. NDVI (윗줄 좌로부터2013.01.15;2013.04.15;2013.08.15;2013.11.15)
EVI (윗줄 좌로부터2013.01.15.;2013.04.15;2013.08.15;2013.11.15)

6) 산출물 검증

가) Albedo

모의자료를 산출된 broadband albedo를 평가하기 위하여 산출 기간 중 동일 날짜에 해당하는 MODIS broadband albedo 자료와의 검증을 수행하였다. 목표 정확도는 RMSE 0.05 이하로 설정하였다. 알베도는 Global Climate Observing Sysyem (GCOS)에서 요구하는 정확도가 5% 이내 (GCOS, 2006)이며, 현재 NASA와 EUMETSAT에서 운영하고 있는 MODIS 및 SPOT 광대역 albedo 정확도의 정확도는 MAE 0.06, RMSE 0.05이기 때문에 일반 지표에서의 정확도는 RMSE 0.05 이하로 설정하였다. 또한 적설역의 경우, 대기 보정 알고리즘의 산출물인 지표면 반사도의 부재로 인해 BRDF 모델링 수행 및 알베도 산출이 이루어지지 않으며 적설역에서의 알베도 정확도는 설정하지 않았다.

검증방법은 그림 18.12와 같다. 먼저 Validation data와 Match-up을 수행한다. 이 때, half-pixel 이내의 화소에 대해 수행하게 되는데, 최근접 화소 기준으로 3-by-3 평균을 진행한다. 다음과정으로 검증화소를 선정하는 filtering 과정을 수행한다. VZA이 70도 이상인 지역, fill value 지역, snow-covered 지역을 검증 화소에서 제외한다. filtering을 수행 후 최종 선정된 pixel을 대상으로 RMSE를 산출하게 된다.

그림 18.13은 Black/White sky에 검증 결과이다. Black sky 알베도는 RMSE 0.1886, White sky 알베도는 RMSE 0.01867으로 MODIS 자료와 유사한 경향을 보이고 있다.

오차가 발생하는 다양하게 존재한다. 가장 영향을 크게 미치는 것은 TOC 반사도이다. 본 알고리즘은 대기 보정된 TOC 반사도를 입력자료로 사용하기 때문에 대기보정의 정확도에 의한 차이가 가장 크게 발생한다. 특히 본 연구에서는 구름탐지 영역에 관련된 공식 산출물을 제공받지 않아 자체 경계값을 이용하여 구름을 제거하고 대기보정을 수행한 TOC 반사도 자료를 사용하였다. 이는 상대적으로 낮은 정확도를 보이고 있다. 대기보정에서 구름탐지 영역이 제대로 제거되지 않을 시에 해당 화소의 반사도가 실제 지표보다 높게 형성되어 BRDF를 통해 생산된 알베도 값 또한 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 대기 보정시 사용한 ECMWF의 TPW, TOZ, AOD 자료등 입력 자료의 차이로 인해 발생할 수 있다. 그리고 BRDF 모델링 과정 중 MODIS와 AHI의 관측 횟수의 차이, 합성기간의 차이 등으로 인하여도 오차가

발생 할 수 있다.

향후 공식 산출된 TOC 반사도를 사용하게 된다면 보다 높은 정확도를 산출할 것으로 사료된다.

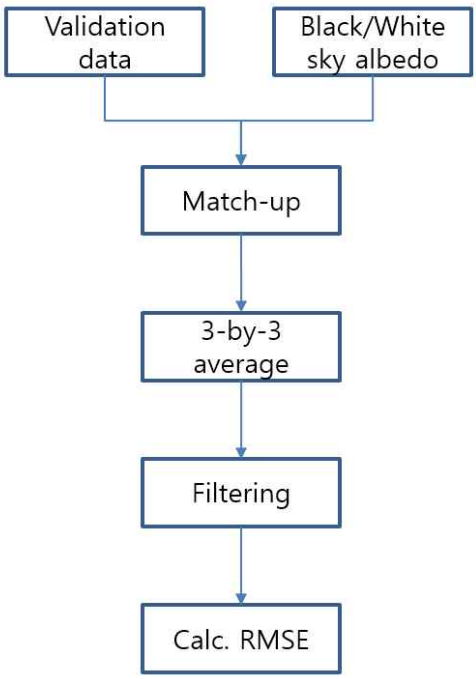


그림 18.12. 알베도 검증 흐름도

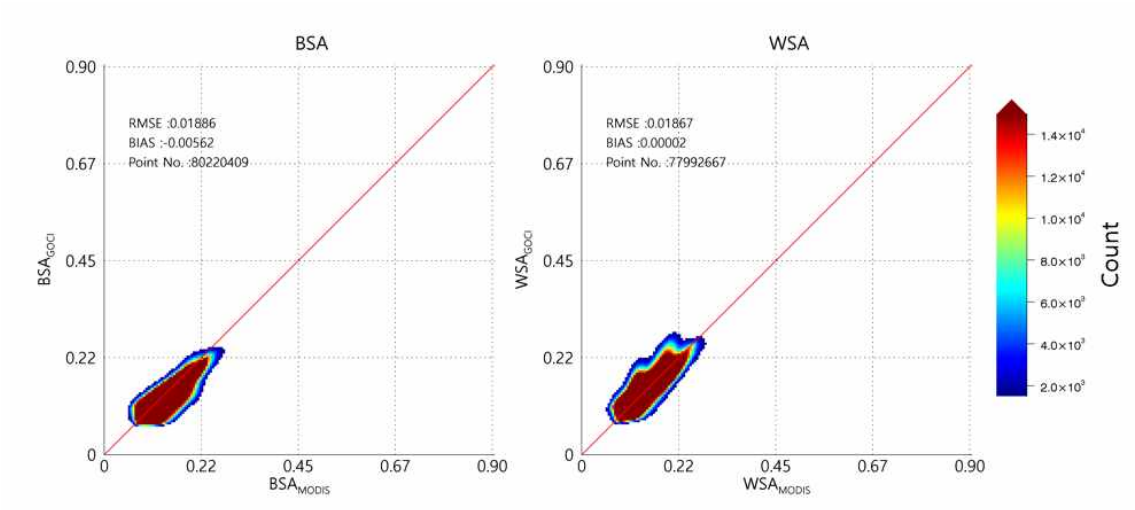


그림 18,13. Black sky(왼쪽), White sky(오른쪽) broadband albedo 검증 결과

나) NDVI/EVI

식생지수는 실측자료가 존재하지 않아 타 위성자료와의 검증을 수행한다. 목표 정확도는 RMSE 0.12 이하로 설정하였다. Park et al.(2013), Yeom and Kim(2013), Park et al.(2014) Ke et al.(2015) 등 기존 연구에서 한반도 지역을 대상으로 GOCI기반 식생지수와 MODIS 기반 NDVI 비교하였을 경우 RMSE 1.2 ~ 1.5의 정확도가 보고되고 있다. Ke et al.,

(2015)의 연구에 따르면 , Landsat NDVI와 GOCI 기반의 NDVI를 비교하였을 경우, RMSD 0.072 ~ 0.148 수준으로 산출된다.

검증 방법은 그림 18.14와 같다. 먼저 Validation data와 시간해상도를 일치시키기 위하여 본 연구의 알고리즘으로 산출된 NDVI/EVI를 Maximum Value Composite (MVC) 합성을 수행한다. MVC 합성은 식생은 짧은 시간 내에 크게 변화하지 않는 특성을 이용하여, 합성기간 중 최대값을 기준으로 합성하는 방법이다. 다음으로 이렇게 합성된 자료를 방법으로 Match-up을 진행한다. 다음으로 최근접 화소를 기준으로 3-by-3 평균을 수행하고 검증화소 선정을 위한 filtering을 진행한다. 해당 방법은 검증 자료와 산출물 모두 적용하며 공간 균질 테스트를 통해 3-by-3 픽셀에 대하여 표준편차가 0.03 이상 나타나는 불규칙한 픽셀은 검증에서 제외하였다. 추가적으로 fill value에 대한 검증도 제외하였다. 이렇게 선정된 픽셀을 바탕으로 RMSE를 산출하였다.

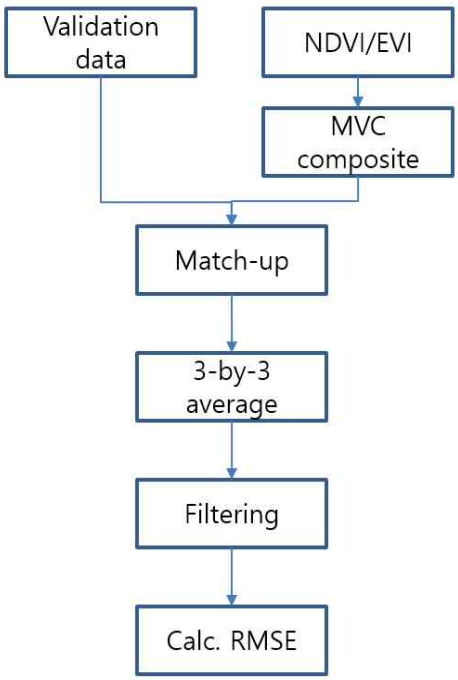


그림 18.14. 식생지수 검증 흐름도

그림 18.15는 NDVI의 검증 결과이다. RMSE 0.117으로 목표 정확도를 달성하였다. 해당 결과는 Bias correction을 수행한 결과로, 대기보정 시 사용되는 AOD의 공식산출물의 부재로 인하여 본 연구에서는 기후값을 사용하여 TOC 반사도를 산출하였다. 이 때 해당 기후값으로 인하여 NIR 채널의 반사도값이 상대적으로 낮게 측정되는 경향이 나타났다. 이러한 영향으로 MODIS NDVI에 비해 값이 낮게 산출되어 Bias correction을 진행하였다.

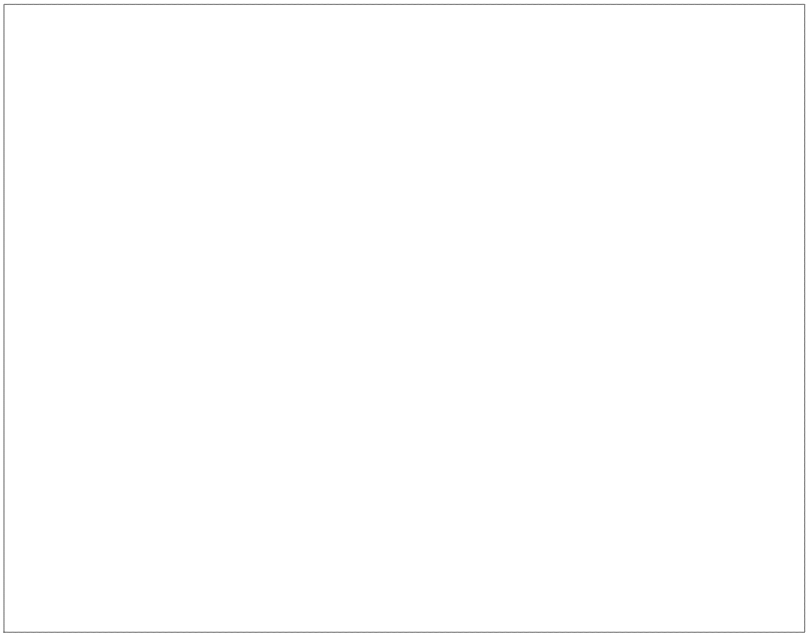


그림 18.15. NDVI 검증 결과

그림 18.16은 EVI의 검증 결과이다. RMSE 0.116으로 목표정확도를 달성하였다. 해당 결과도 NDVI와 마찬가지로 Bias correction을 수행하였다. EVI 산출에도 NDVI와 마찬가지로 NIR 채널자료가 크게 영향을 미치게 된다. 앞서 말한 것과 같이 해당 자료의 값이 상대적으로 낮게 산출되어 Bias correction을 수행하게 되었다.

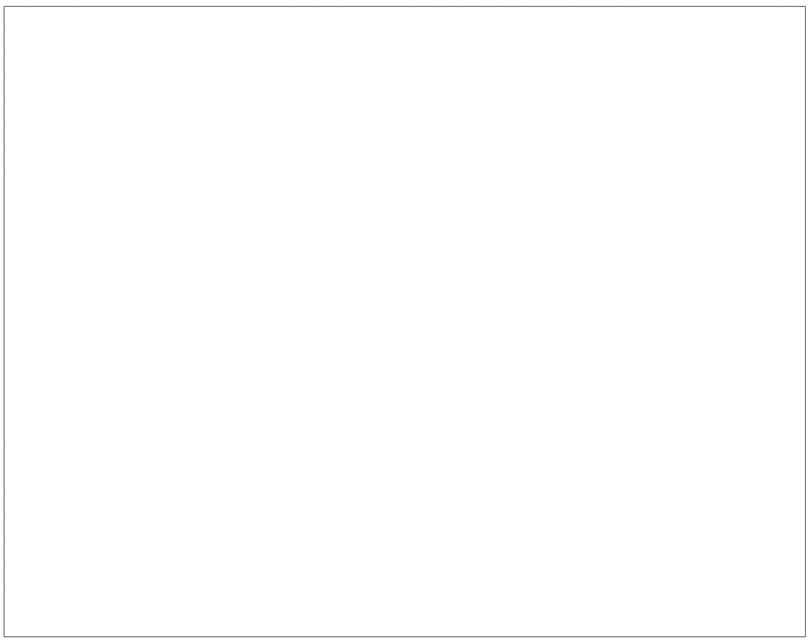


그림 18.16. EVI 검증 결과

그림 18.17은 MODIS & SPOT/Vegetation NDVI와 비교 분석 수행 결과를 시계열로 표현한 그래프이다. GOCI 관측 영역 내 가장 많이 분포하는 토지피복(Mixed Forest, Grassland, Cropland)에 대해 각각 모든 pixel을 평균하여 Time seires로 표현하였다. GOCI NDVI가 비교적 낮게 산출하고 있지만 유사한 변동 패턴을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

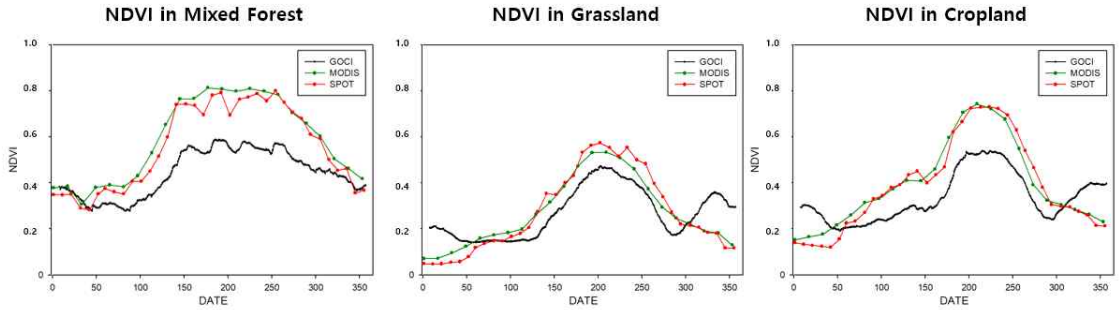


그림 18.17. NDVI 시계열 분석

그림 18.18은 MODIS EVI와 비교 분석 수행한 결과이다. EVI도 NDVI와 마찬가지로 GOCI 관측 영역 내 가장 많이 분포하는 토지피복(Mixed Forest, Grassland, Cropland)에 대해 비교하였다. NDVI에 비해 값의 차이가 적으며 유사한 변통 패턴을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.

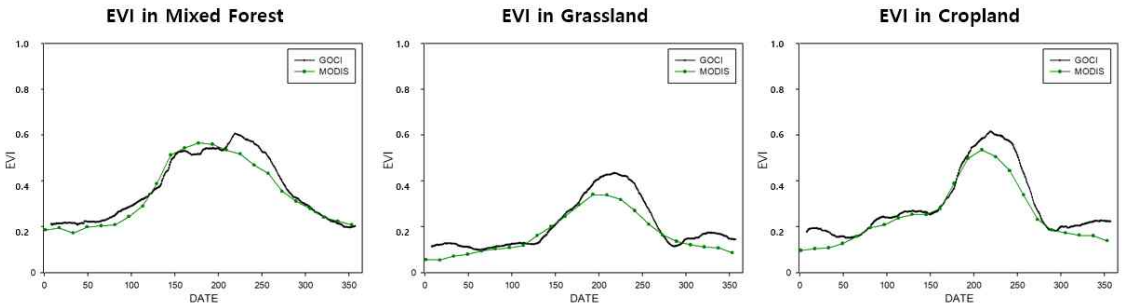


그림 18.18. EVI 시계열 분석

식생지수는 또한 다양한 요소로 인하여 오차가 발생할 수 있다. 식생지수는 단위가 없는 복사값으로 반사도의 차이를 바탕으로 설명된다. 이 때문에 센서의 특성 (관측 geometry, 채널의 SRF, 시공간 해상도)에 따른 차이가 필연적으로 발생한다.그리고 가장 크게 영향을 미치는 것은 TOC 반사도이다. 알베도와 마찬가지로 본 연구의 식생지수는 BRDF 모델링의 결과로 산출하게 된다. BRDF 모델링의 입력자료인 TOC 반사도의 정확도에 따라 결과는 상이하게 나타난다.

향후 정확한 구름제거 및 대기 효과를 고려한 공식적으로 제공되는 TOC 반사도 자료를 이용하게 된다면 보다 높은 정확도가 나타날 것으로 판단한다.

19. 육상지표반사도

가. 지표반사도 산출 알고리즘 기초 설계

1) 지표반사도 산출물의 정의

지표 반사도는 지표면에 도달하는 태양복사에너지와 지표에 흡수되지 않고 반사되는 에너지의 비율로 정의된다. 이 비율은 태양-위성 센서의 기하학적 위치에 따른 광 경로에 따른 각도, 지표의 조성 및 형상, 그리고 광학적 특성에 따라 달라진다. 그림 19.1과 19.2는 LANDSAT 영상을 이용한 대기보정된 반사도 산출결과 사례로서 대기보정 전과 후의 영상자료는 위성영상의 채널별 물리량의 변화로 인하여 보다 정확한 지표정보만 추출하는 것이 가능하다 (Lee et al., 2011).

지표 반사도는 기상, 환경, 기후변화, 에너지 수지에 영향을 끼치는 중요한 인자이며(Chin et al., 2009; Dickinson, 1983), 지구물리, 화학 및 생물학적 변수들을 도출하는데 있어서 중요한 입력자료로 이용된다(Veefkind et al., 2006; Noguchi et al., 2014). 따라서, 보다 정확한 지표 반사도 산출물은 위성원격탐사 알고리즘 개발뿐만 아니라 각종 산출물의 활용연구에 필수적으로 요구되는 사항이다.

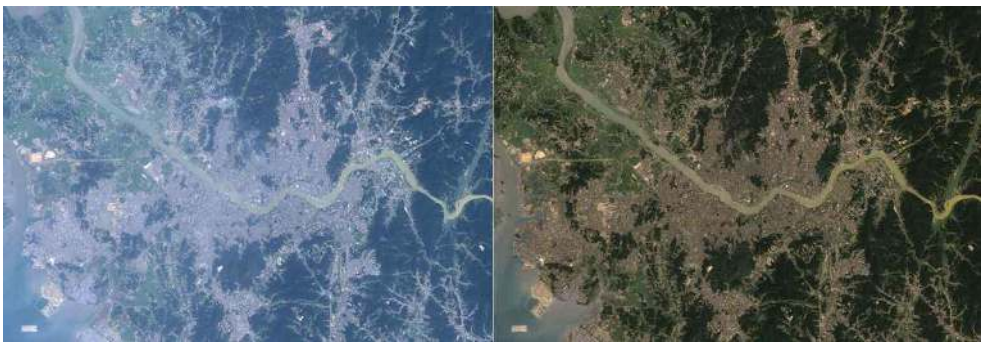


그림 19.1 2002년 9월 10일 LANDSAT 칼라합성영상 사례
(좌: 대기 상한 반사도, 우: 대기보정된 반사도)

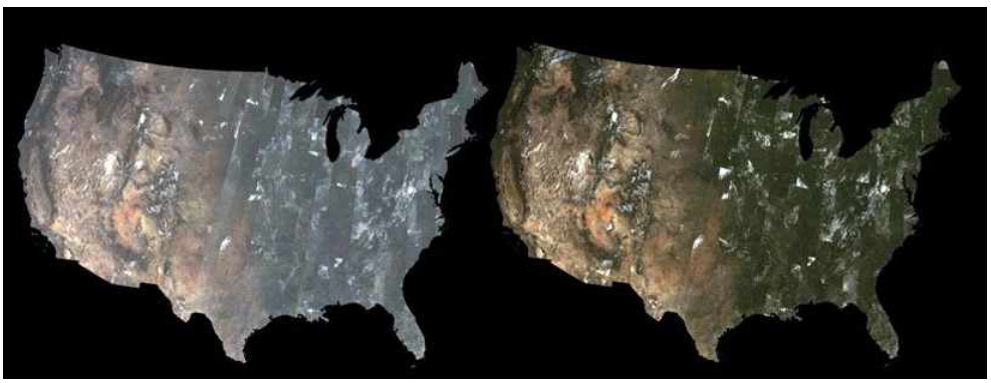


그림 19.2 Mosaics created using Landsat 8 Level 1 data (left) and Provisional Landsat 8 Surface Reflectance data (right). Images created December 2014.(Image Source: USGS)

2) 지표반사도 산출물 요구사항

GOCI-II 의 대기보정된 반사도는 지표반사도와 동일한 물리량을 의미하며, GOCI-II 지표반사도 산출물의 요구사항과 산출물 개발 방안은 표 19.1과 같다. 본 연구의 개발요구사항은 ⅰ) GOCI-II 전구(full-disk)영상에서 관측되는 높은 태양 및 관측 천정각의 영향 고려할 것, ⅱ) 산출물 특성에 따라 시간 합성이 필요할 경우(일일 합성, 주간합성 등) GOCI-II의 시간해상도를 고려하여 적정 합성주기 제시할 것, 그리고 ⅲ) 요구 자료처리시간(실시간으로 자료 배포 예정)이 10분 이내인 것이다. 각 요구사항에 대하여 본 연구의 개방방은은 가장 최적의 개발방안(표 19.1 참조)을 마련하여 알고리즘 및 자료처리 과정이 개발되었다.

표 19.1. GOCI-II 지표 반사도 산출물의 요구사항과 산출물 개발 방안

개발 요구사항	개발 방안
GOCI-II 전구(full-disk)영상에서 관측되는 높은 태양 및 관측 천정각의 영향 고려	기존 저궤도 위성에서는 직하점 근처영역에서만 L1B 자료가 생산되어 제한적인 대기보정 및 지표반사도 산출이 이루어졌으나, 본 연구에서는 정지궤도 위성 특성이 반영되어 태양 천정각<70, 위성관측각 <70에 해당하는 영역이 모두 고려되어 개발되었음. 그러나, 현 알고리즘은 최소반사도 기법과 외부 입력자료 처리 등이 지역 영상에 최적화되어 있으므로, 불특정 시간에 관측되는 전구영상(Full disk) 영상의 자료처리에 적합하지 않음.
산출물 특성에 따라 시간 합성이 필요할 경우(일일 합성, 주간합성 등) GOCI-II의 시간해상도를 고려하여 적정 합성주기 제시	대기보정 과정에 필요한 최소반사도 전정에서 일주기 합성시간은 최대 16일(현재 관측 포함)로 제시되었음.
요구자료처리시간(실시간으로 자료 배포 예정): 10분, G2GS 알고리즘 개발 환경(ADE)에서의 시험 기준	16일 기간의 자료처리 시 걸리는 시간이 다소 증가하게 되므로, 알고리즘 코드의 최적화를 위하여 전처리 과정과 실시간 처리과정으로 나누어 처리하는 방안을 제시하였음. 15일 이전 자료의 처리에 걸리는 시간은 10분 이상이나, 실시간으로 자료를 처리하는 후처리 과정은 10분 이내로 자료처리 완료됨을 확인하였음.

표 19.1에서 제시된 GOCI-II 지표반사도 산출물의 개발 방안에 따라, 본 연구에서 개발된 산출물의 목표 성능 정확도는 다음의 표 2와 같이 타 위성자료와 비교를 통한 정확도로서 72%를 제시하였다. 이러한 수치는 지표반사도 산출물이 세계 최고 수준(최고수준대비 약 85%)과 GOCI-II 관측 영역의 평균적인 대기 에어로솔 광학두께 값의 평균 범위(약0.4-0.6) 등 고려할 때(세계 최고 수준 95% × 최고수준의 85% × 지역 환경 수준 90% = 약 72 %)로 설정하였다.

표 19.2. GOCI-II 지표 반사도 산출물 목표 정확도 성능

입력자료	출력자료	검증자료	목표 정확도(%)	설정근거
GOCI-1 L1B data	L2 SRP	MODIS L2 지표반사도 자료	72% 이내*	목표의 세계 최고 수준(최고수준 대비 약85%)과GOCI-II 관측 영역의 평균적인 대기 에어로솔 광학두께 값의 평균 범위(약0.4-0.6) 등 고려

* 세계 최고 수준 95% × 최고수준의 85% × 지역 환경 수준 90% = 약 72 %

3) GOCI-II 기기 특성

GOCI-II 센서는 1개의 UV파장대(380 nm), 8개의 가시광 파장대(412, 443, 490, 510, 555, 620, 660, 680 nm), 3개의 근적외 파장대(709, 745, 865 nm)로 총12개의 분광 밴드가 있고 추가로1개의 광대역 (400~900 nm) 밴드를 가진다(표 19.3, 그림 19.3). 이 중 파장이 짧은 UV와 청색채널은 상대적으로 대기투과도가 작지만 지표반사도가 적지만, 적색 채널이나 근적외 채널은 상대적으로 높은 지표 반사도 값을 나타낸다.

GOCI-II는 지표반사도산출을 위하여 청천화소(clear pixel)의 선정이 필요하며, 이는 일정 기간 동안의 최소반사도를 찾는 방법을 통하여 가능하다. 그리고 UV 채널을 이용하여 광 흡수성 에어로솔의 존재 가능성이 높은 지역에서 산출물의 정확도를 향상시킬 수 있다. 기존의 해색센서(GOCI, SeaWiFS 등) 에서는 이러한 성능의 개선이 불가능하였기 때문에 대기 투과도가 낮은 지역에서의 지표반사도 산출에 한계가 존재하였으나, GOCI-II에 추가된 밴드를 활용하여 정확도 향상을 도모할 수 있다.

표 19.3. GOCI II 밴드별 상세 특성.(Detailed characteristics of the GOCI II.)

Central wavelength	Bandwidth	SNR @ specified input spectral radiance
380 nm	20 nm	998 @ 93.0 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
412 nm	20 nm	1050 @ 100 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
443 nm	20 nm	1145 @ 92.5 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
490 nm	20 nm	1228 @ 72.2 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
510 nm	20 nm	1180 @ 64.9 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
555 nm	20 nm	1124 @ 55.3 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
620 nm	20 nm	1102 @ 53.3 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
660 nm	20 nm	1060 @ 32.0 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
680 nm	10 nm	914 @ 27.1 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
709 nm	10 nm	914 @ 27.7 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
745 nm	20 nm	903 @ 17.7 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
865 nm	40 nm	788 @ 12.0 W $m^{-2}\mu m^{-1}sr^{-1}$
wideband	N/A	N/A

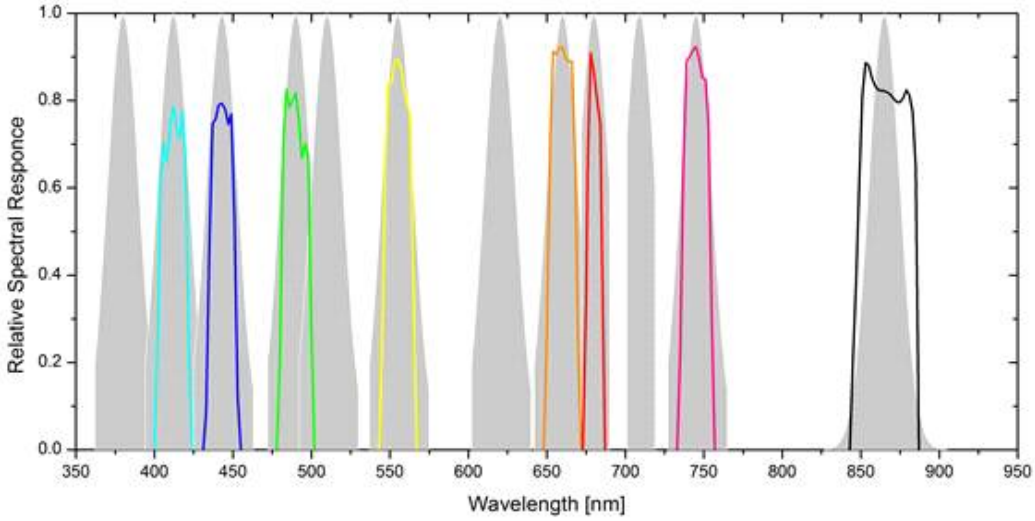


그림 19.3. Relative spectral response (RSR) functions of GOCI (colored solid lines) and assumed RSF for GOCI-II (gray shade).

4) 민감도 실험

가) 복사전달 과정에서 태양과 위성센서의 기하조건, 대기 및 육상 요소에 관한 상호 민감도 실험

(1) GOCI-II 밴드 특성을 이용한 대기 광학특성 DB구축

복사전달모델을 이용하여 GOCI-II의 각 밴드별 대기투과도를 계산하였으며, 여기서 사용된 복사모델은 SBDART 와 6SV와 같은 범용 복사전달 모델을 사용하여 수행도를 비교하였다. 특히, 동아시아지역의 비교적 고농도의 분포를 나타내고 있는 두 가지의 미량기체(NO2, O3)에 대한 투과도 계산을 수행하였으며, 각 입력자료에 대한 조건별 복사모의를 통하여 산출된 결과를 조견표로 작성하였다. 향후, GOCI-II 전용 복사전달모델이 개발된다면, 본 연구에서 사용된 입력자료를 이용하여 전용 조견표 작성이 가능할 것으로 예상된다.

대기투과도 계산에 필요한 대기 미량기체 중 GOCI-II 관측 파장영역과 관측영역에서 주요한 NO_2와 O_3에 대한 광 흡수계수(light absorption coefficient)는 그림 19.4와 같다.

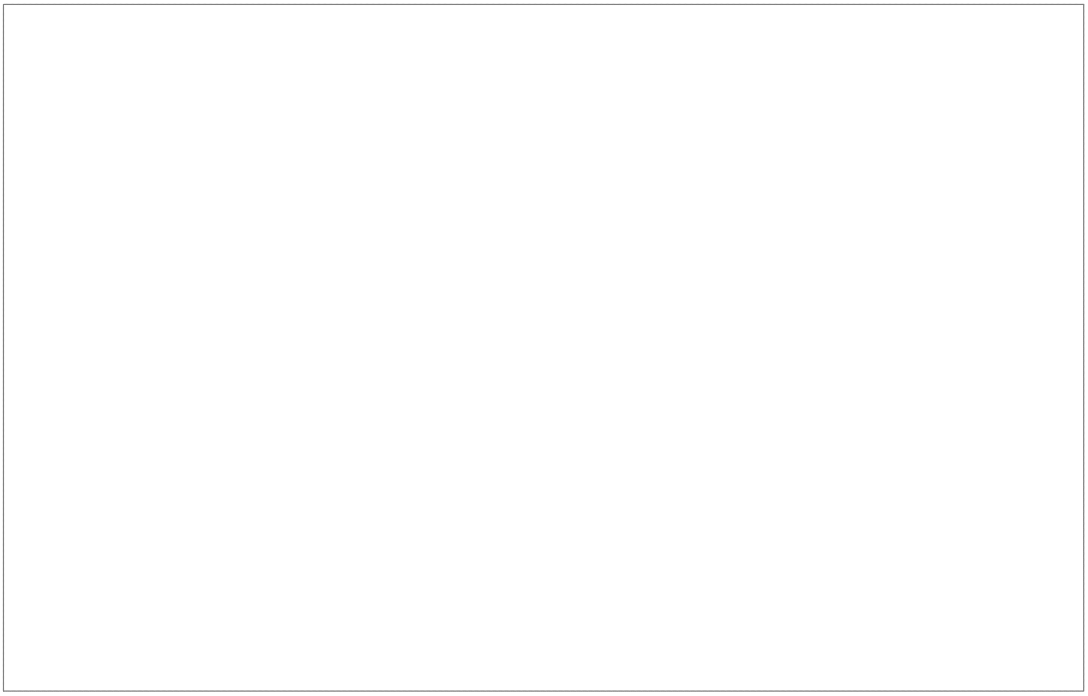


그림 19.4. NO2와 O3의 파장별 광 흡수계수(Bougumil et al., 2003; Scheneider et al., 1987; Anderson et al., 1993; Burkholder & Talukdar (1994))

그리고 수증기에 대한 광 흡수계수(light absorption coefficient)와 광 산란계수(light scattering coefficient)는 그림 19.5과 같다.

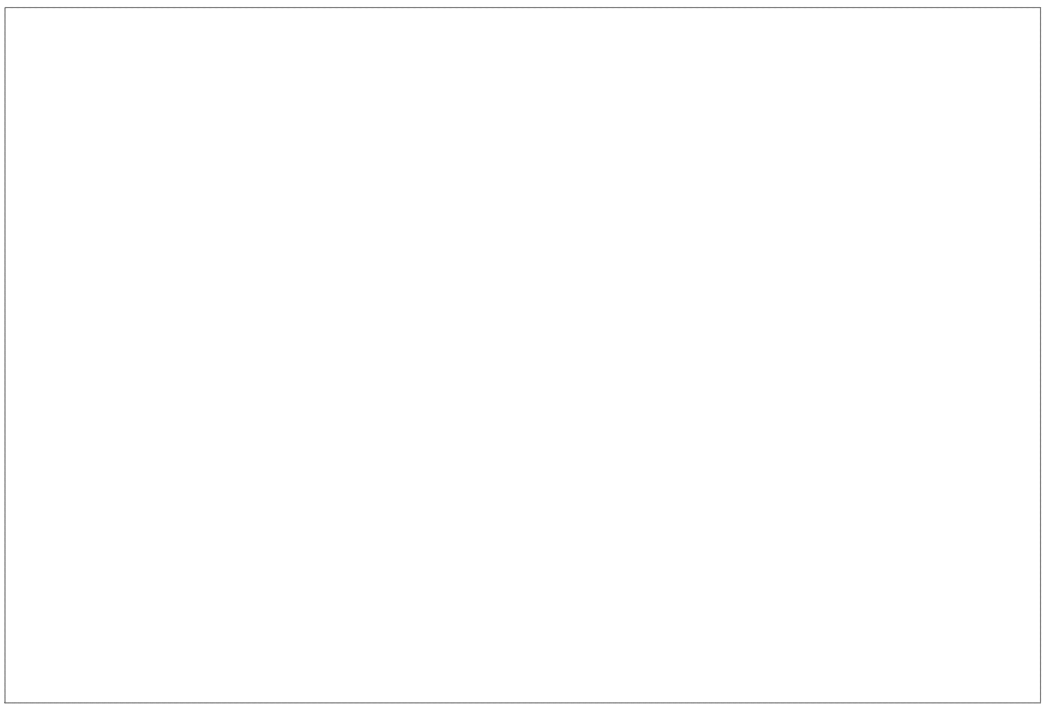


그림 19.5. 수증기의 파장별 광 흡수(a) 및 산란계수(b)
(Pope et al., 1997; Kou et al., 1993; Smith et al., 1981)

(2) 정지궤도 특성에 대한 민감도 분석

정지궤도 관측 특성이 반영된 복사전달모의를 위하여 다음과 같은 조건에서 복사전달모의를 수행하였다. 먼저 정지궤도 위성 관측 시간대 별 변수가 될 수 있는 태양-센서간 광투과 경로, 산란 위상함수, 파장별 흡수계수가 고려되었으며 (그림 19.6 참조), 단파장영역에서의 GOCI 관측 복사량에 대한 모의 복사량을 계산하였다. 그리고 복사전달모델의 입력자료와 지표반사도 산출 알고리즘 결과물과 비교를 통하여 알고리즘의 수행성 평가를 시행하였다.

그림 19.7~14는 SBDART 모델을 이용하여 에어로솔과 지표반사의 영향을 받지 않고 Rayleigh 산란만을 고려했을 때, 태양-위성의 위치에 따른 채널별 반사도 계산결과를 나타낸다. Rayleigh 산란으로 인한 반사도는 파장이 짧아질수록 점점 커지는 경향이 잘 나타나고 있다. 그리고 정지궤도위성의 특성상 태양고도각이 계속 변화하게 되므로 이러한 영향을 확인하기 위하여 다양한 태양 천정각의 경우를 고려하였다.

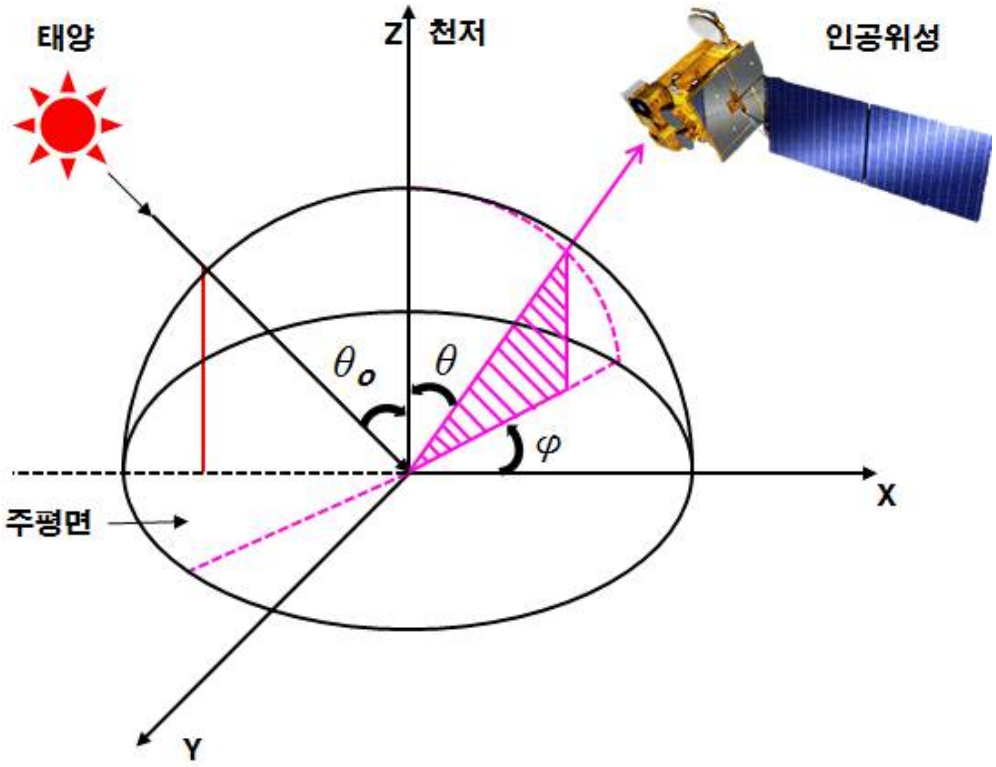


그림 19.6. 태양-위성 관측 기하 정보

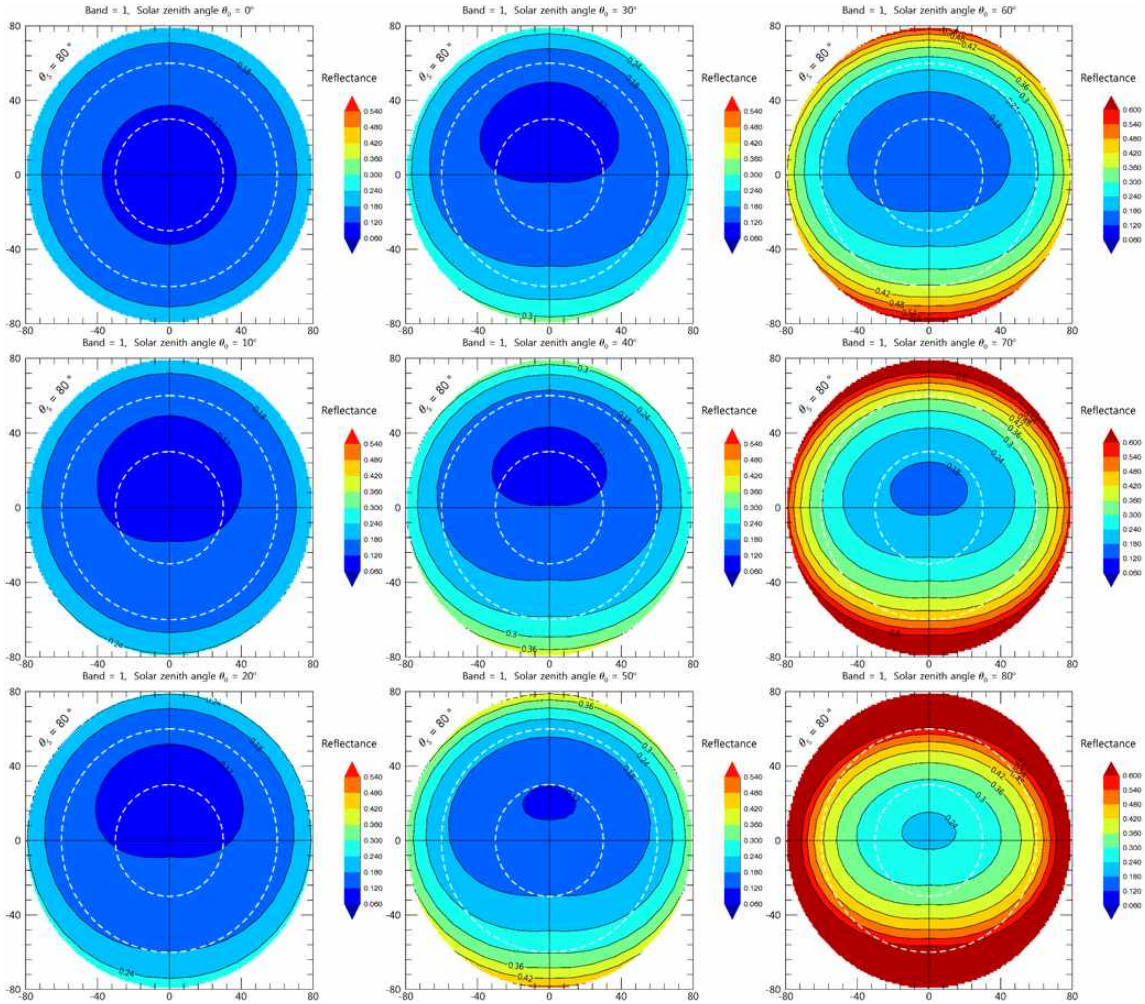


그림 19.7. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=1)(SZA : 0～180)

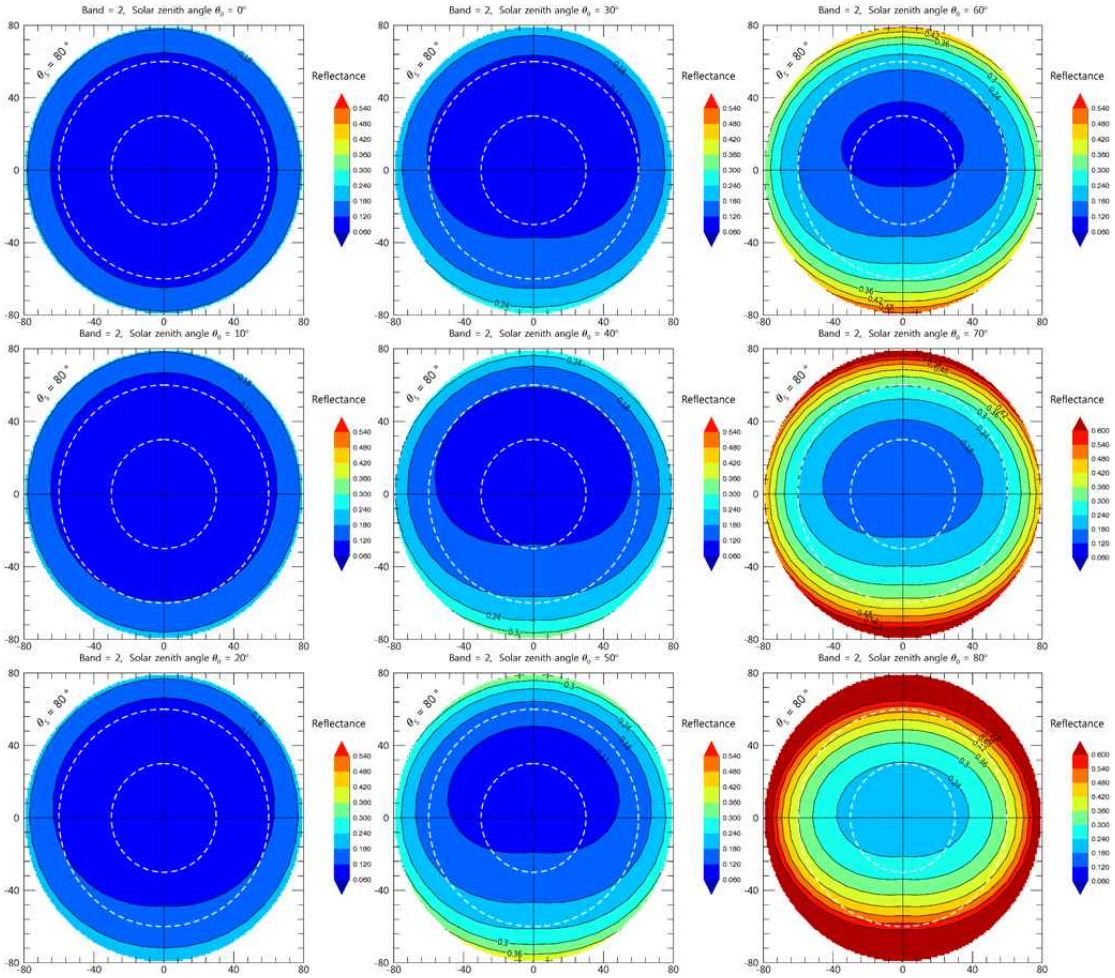


그림 19.8. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=2)(SZA : 0～180)

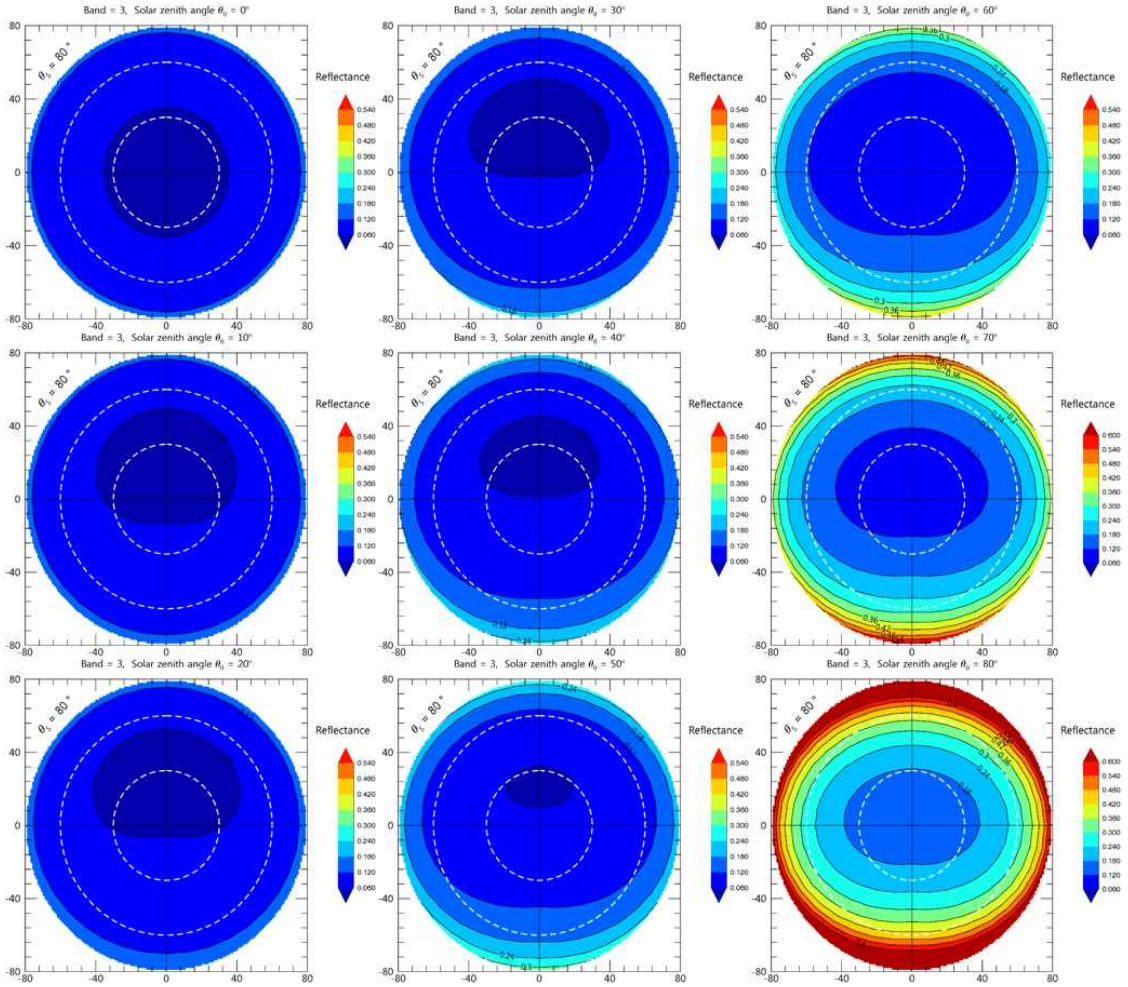


그림 19.9. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=3)(SZA : 0～180)

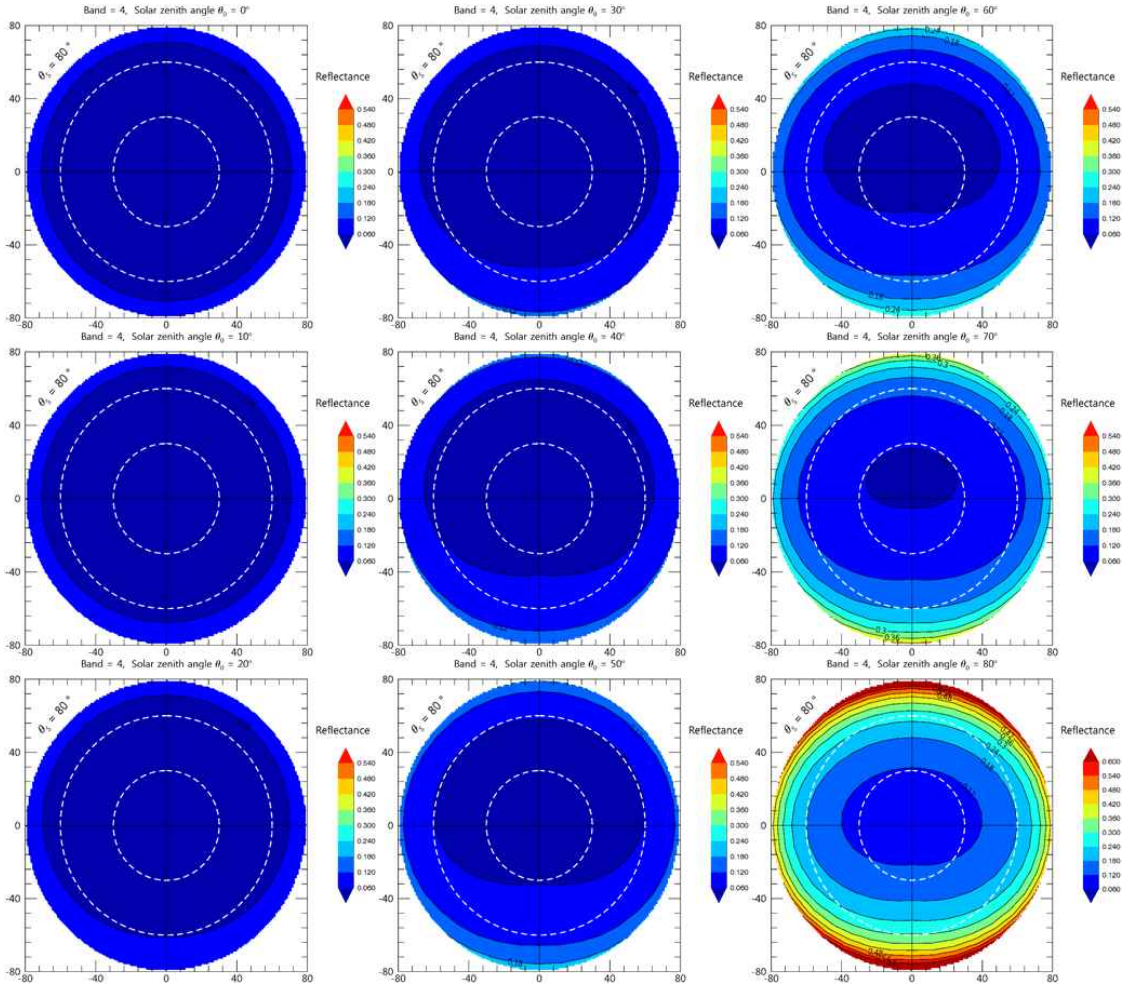


그림 19.10. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=4)(SZA : 0~180)

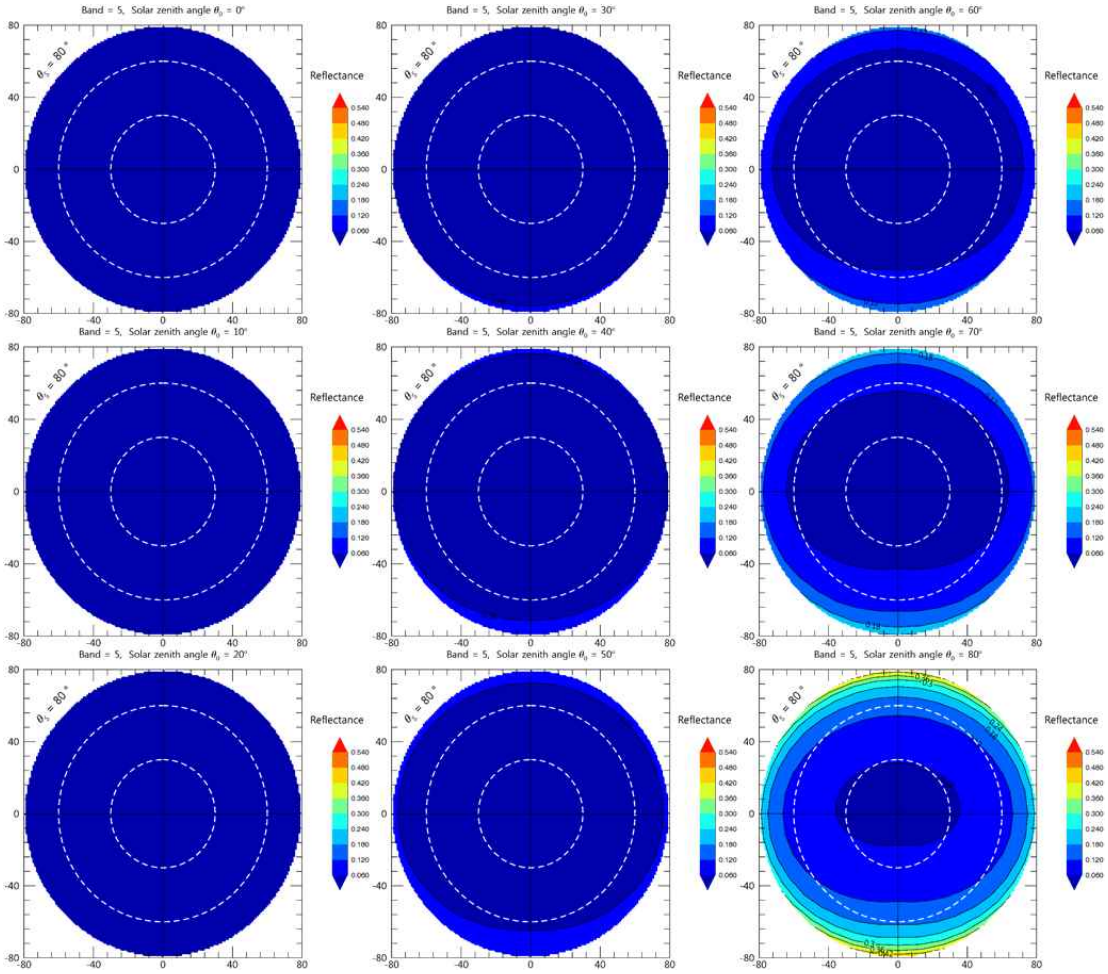


그림 19.11. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=5)(SZA : 0～180)

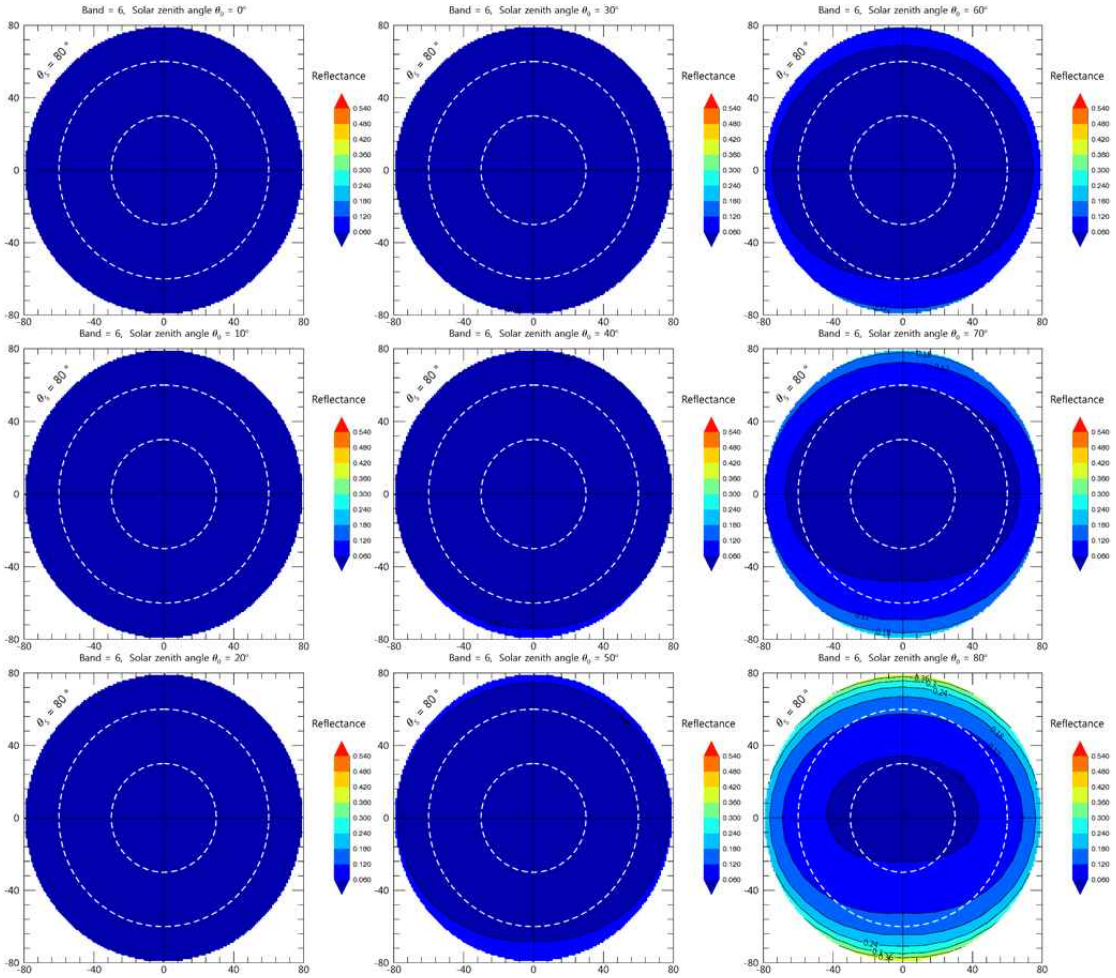


그림 19.12. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=6)(SZA : 0～180)

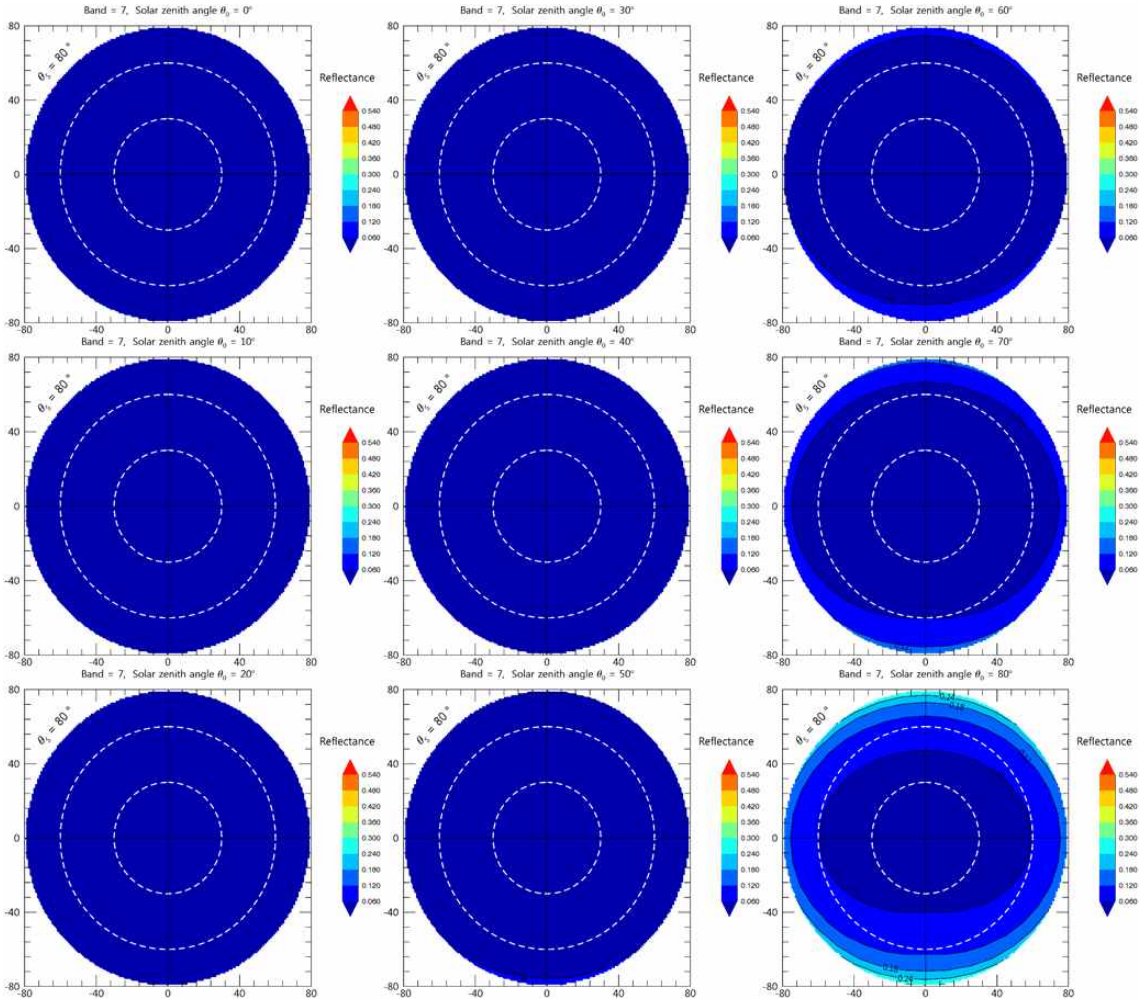


그림 19.13. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=7)(SZA : 0～180)

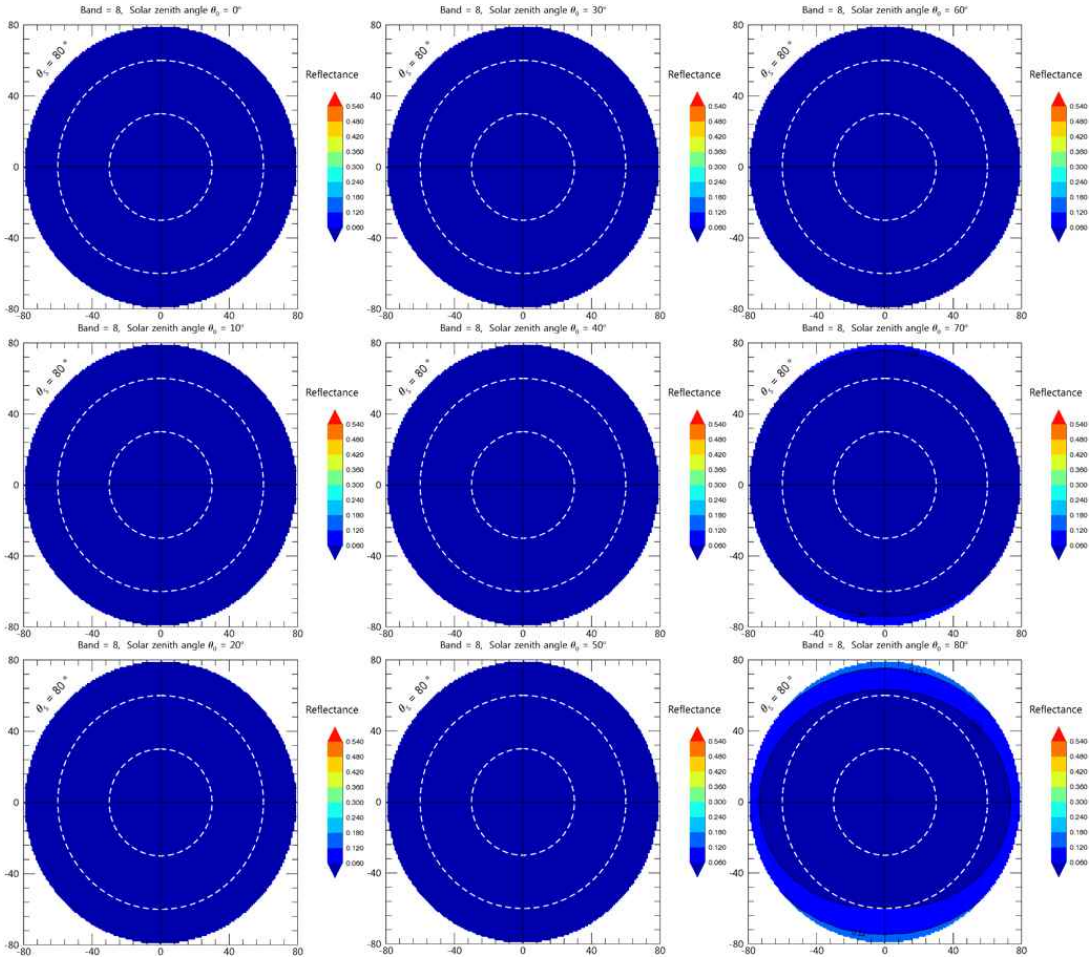


그림 19.14. SBDART 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=8)(SZA : 0～180)

그림 19.15~22는 기존의 스칼라 모델이 아닌 벡터 모델인 6SV를 이용하여 이전과 같이 동일한 조건에서 Rayleigh 산란만을 고려했을 때, 태양-위성의 위치에 따른 채널별 반사도 계산결과를 나타낸다. Rayleigh 산란으로 인한 반사도는 파장이 짧아질수록 점점 커지는 경향이 잘 나타나고 있다. 그리고 정지궤도위성의 특성상 태양고도각이 계속 변화하게 되므로 이러한 영향을 확인하기 위하여 다양한 태양 천정각의 경우를 고려하였다.

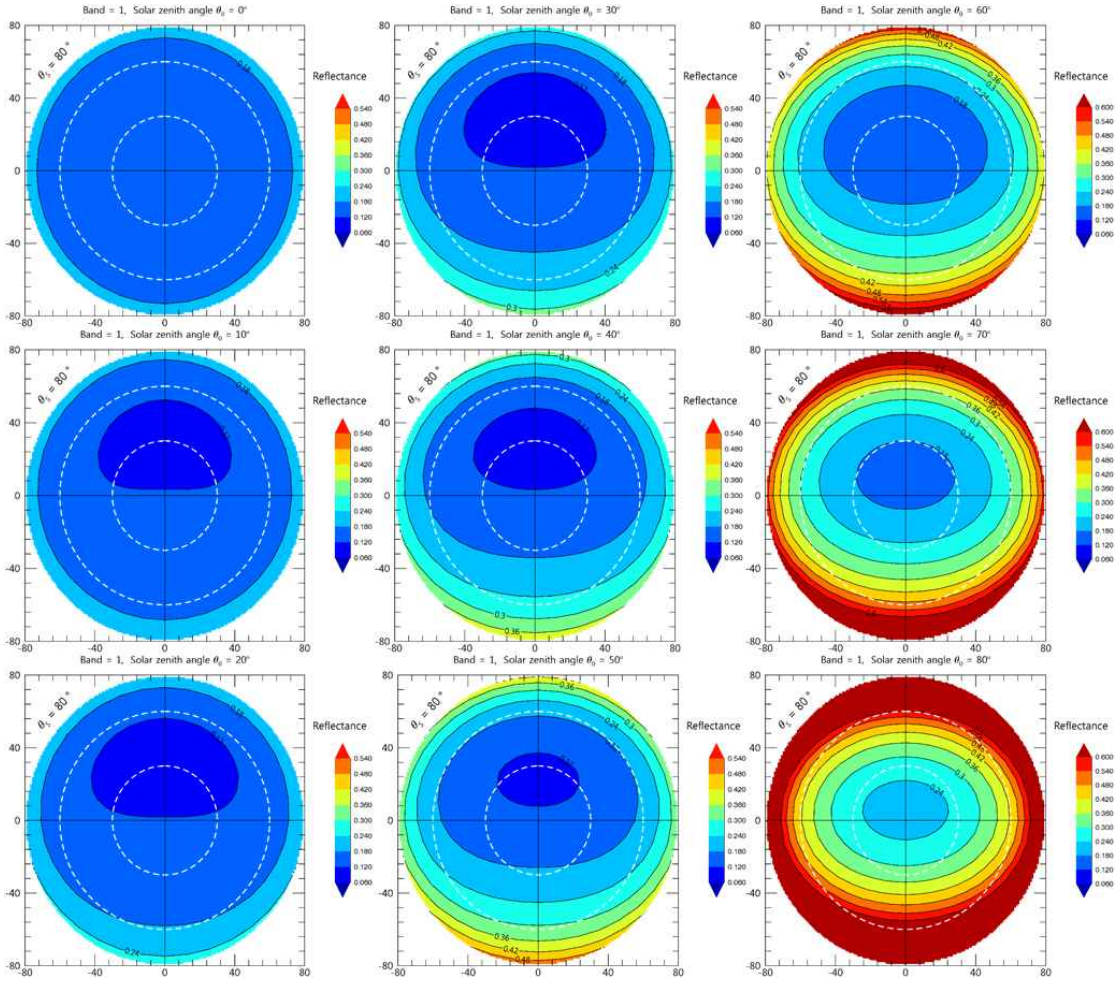


그림 19.15. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=1)(SZA : 0～180)

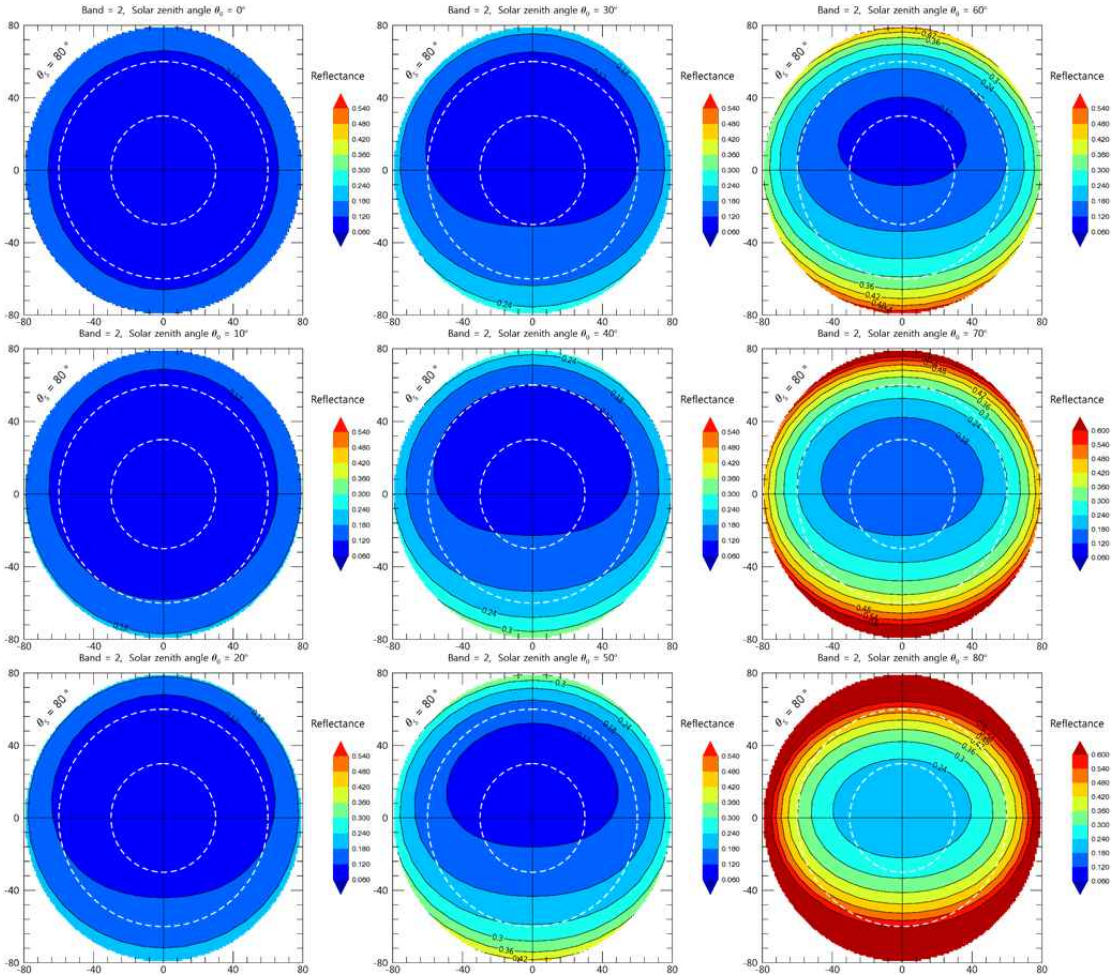


그림 19.16. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=2)(SZA : 0~180)

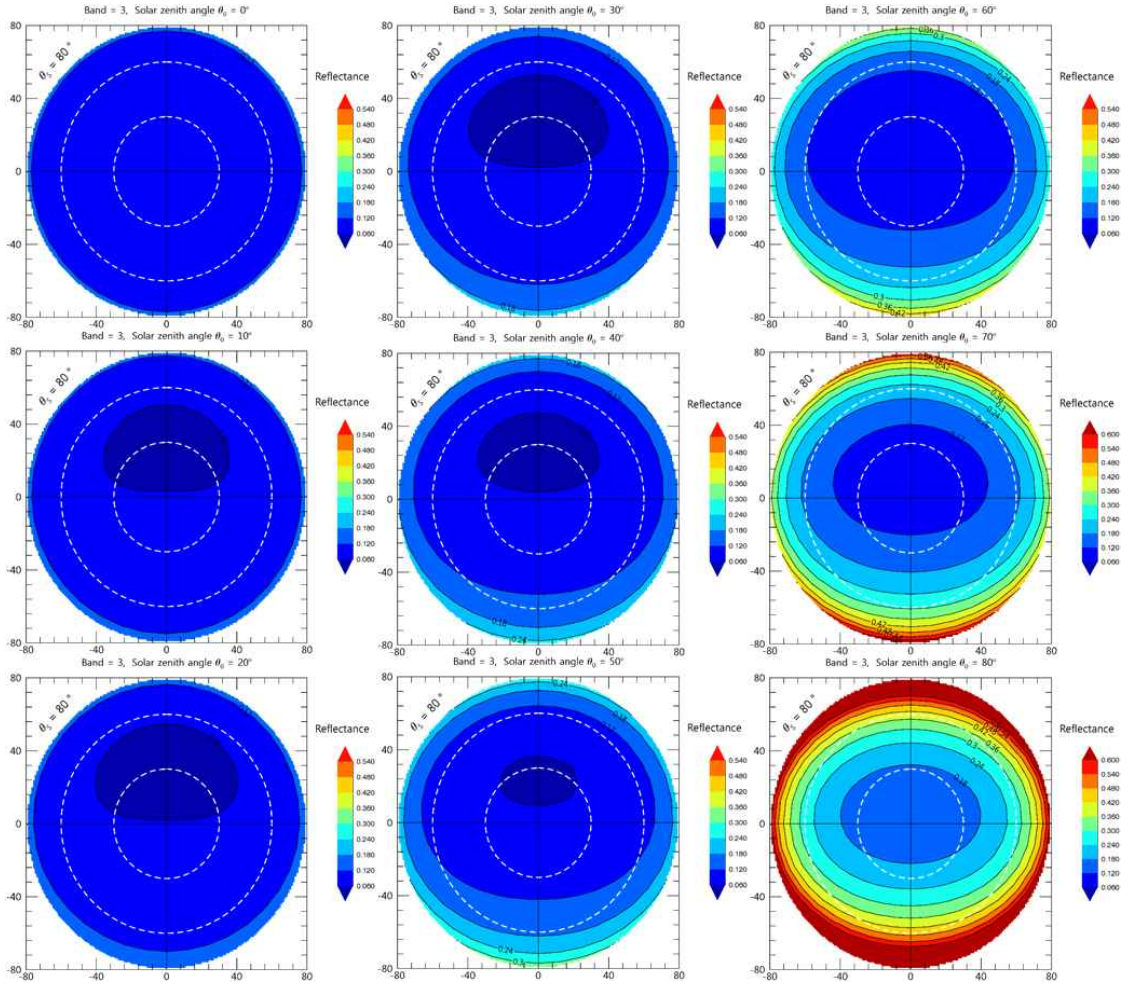


그림 19.17. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=3)(SZA : 0～180)

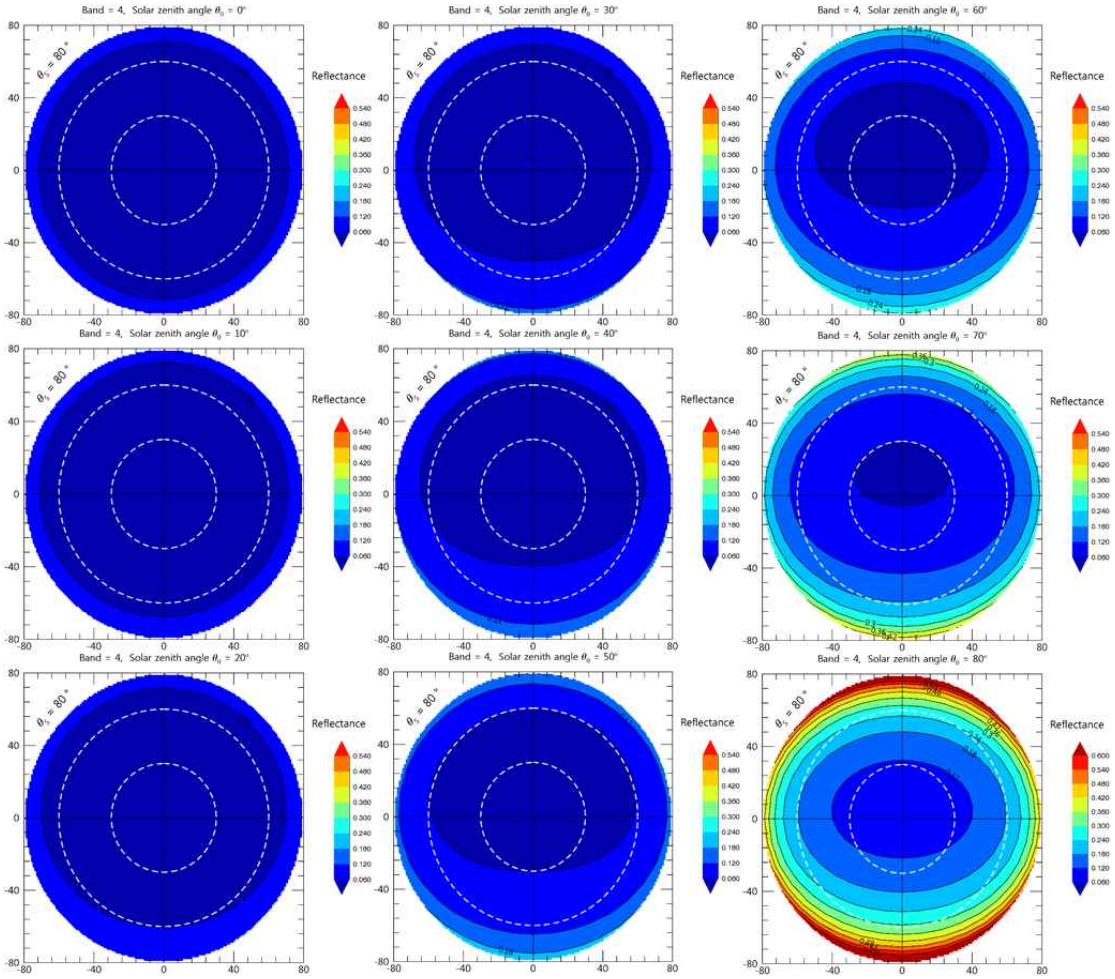


그림 19.18. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=4)(SZA : 0～180)

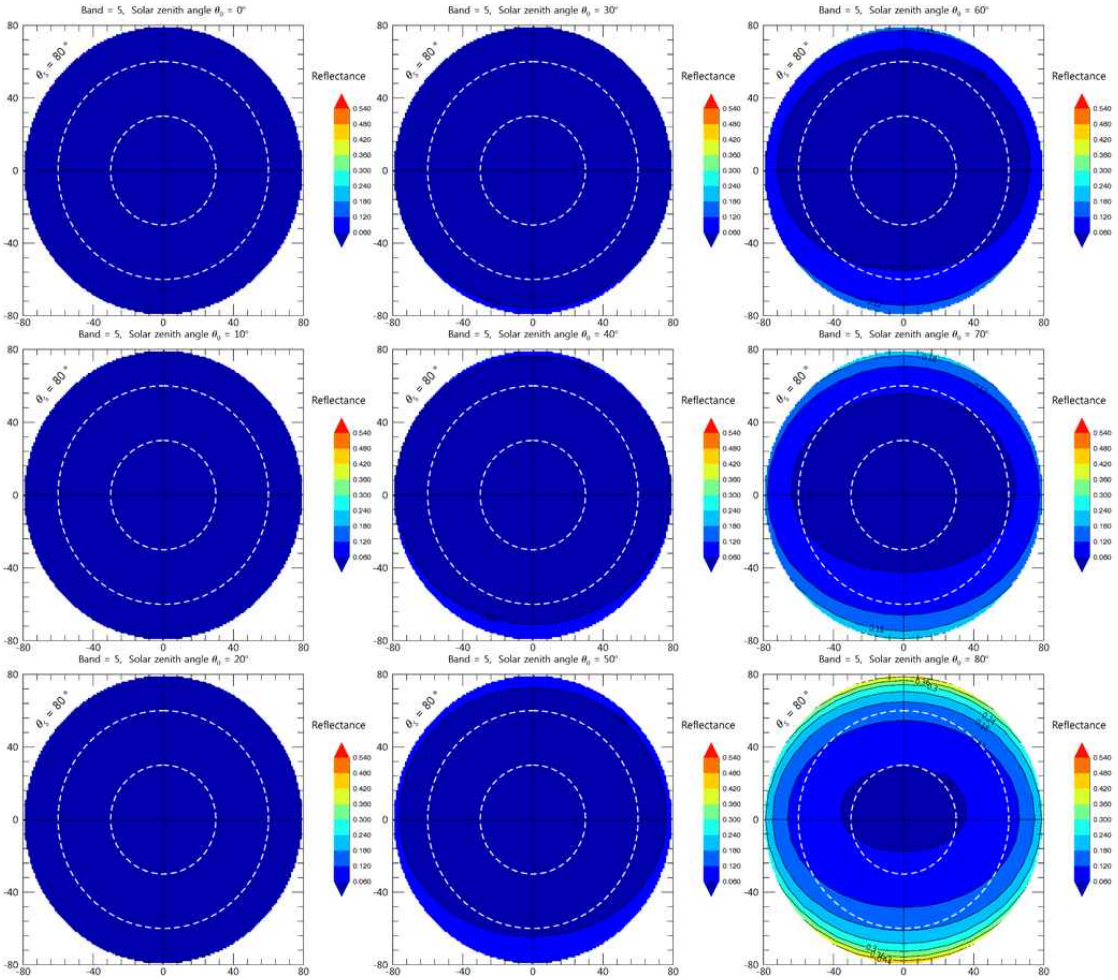


그림 19.19. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=5)(SZA : 0～180)

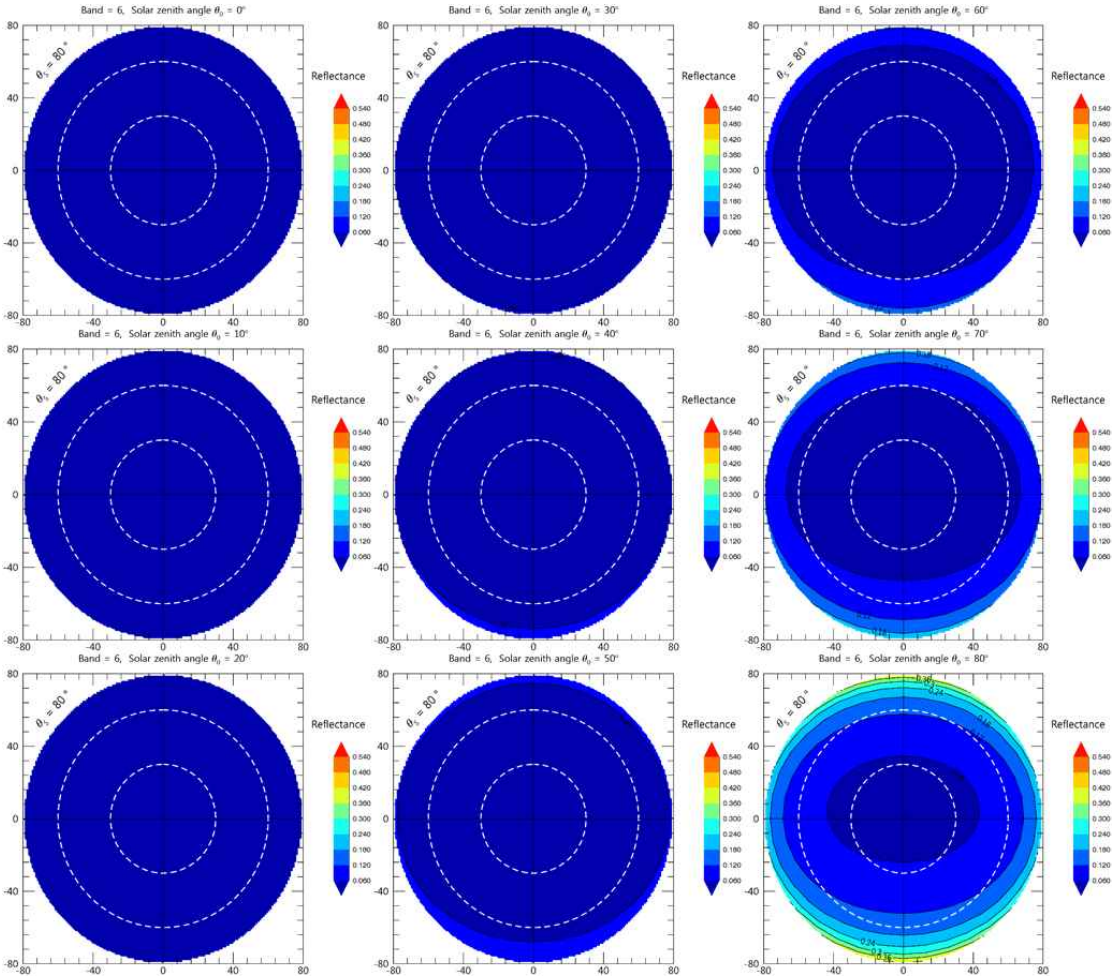


그림 19.20. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=6)(SZA : 0～180)

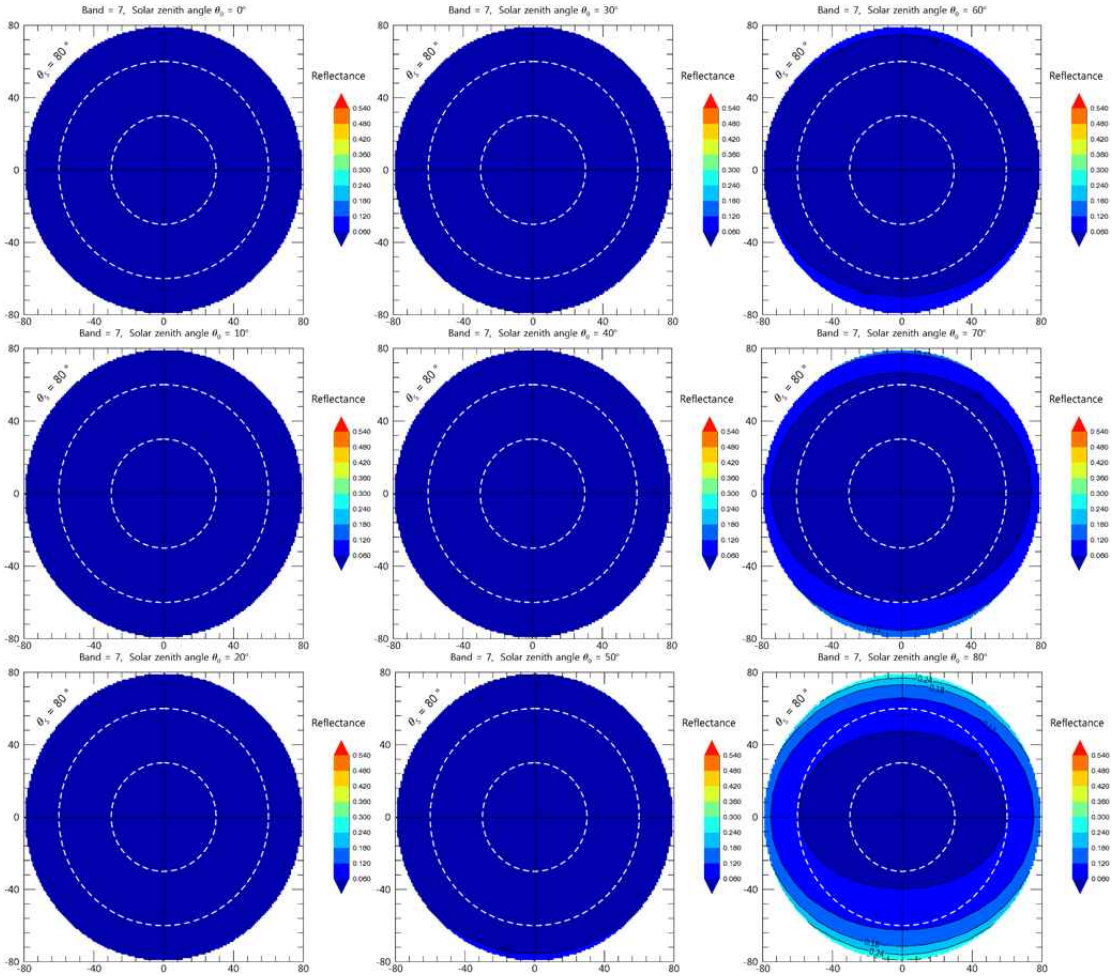


그림 19.21. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=7)(SZA : 0～180)

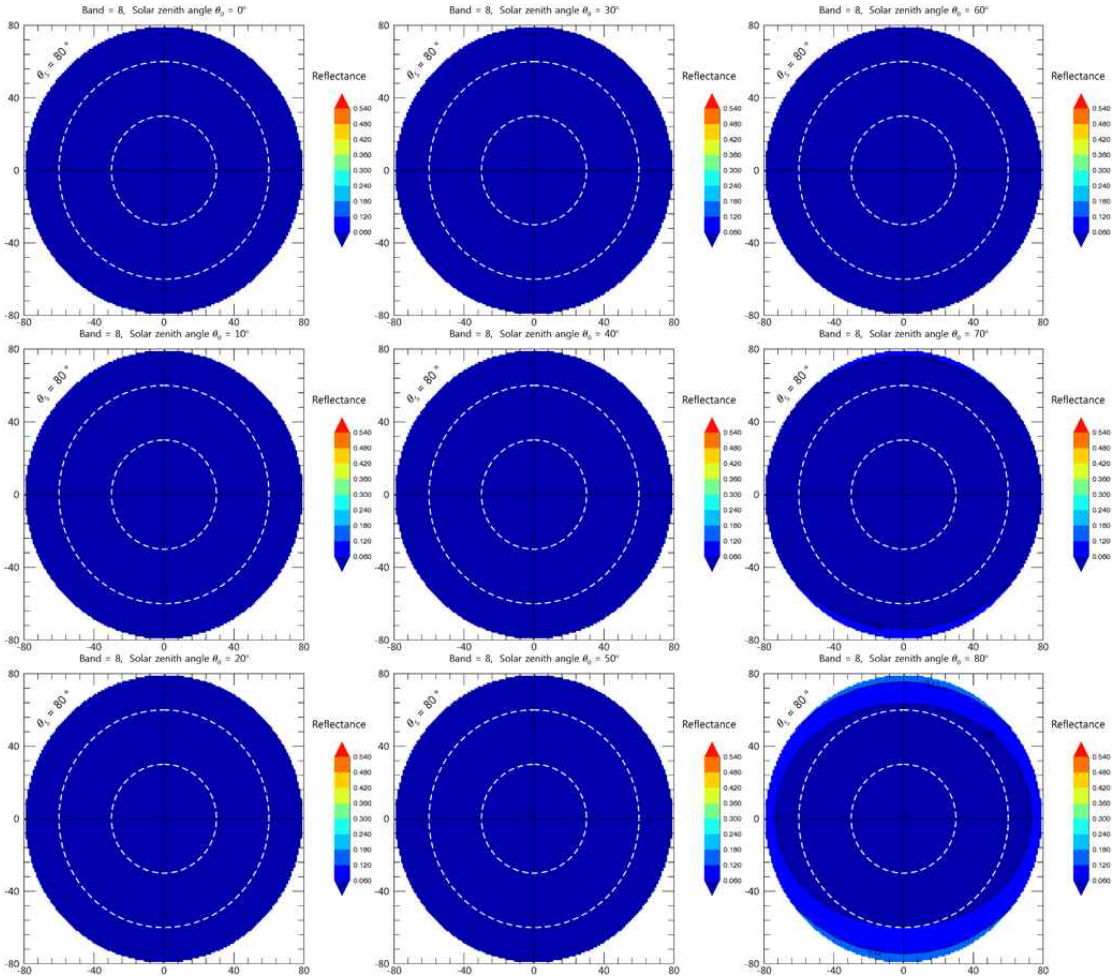


그림 19.22. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=8)(SZA : 0～180)

그림 19.23은 앞에서 기존의 스칼라 모델이 아닌 벡터 모델인 6SV를 이용하여 이전과 같이 동일한 조건에서 Rayleigh 산란만을 고려했을 때, 태양–위성의 위치에 따른 채널별 반사도 계산결과를 나타낸다. SBDART 모델 결과와 마찬가지로 Rayleigh 산란으로 인한 반사도는 파장이 짧아질수록 점점 커지는 경향과 태양 천정각이 커질수록 값이 커짐을 알 수 있다. 그러나 벡터모델의 특성상 두 모델의 결과는 기하조건에 따라 상이한 결과를 나타내었다.

벡터 복사전달모델은 저밀도 매체에서 편광전자기 복사(polarized electromagnetic radiation) 전파를 모델링하는 방법이다. 스토크 벡터(Stokes vector)의 첫 번째 요소만 모델링하는 스칼라 복사 전달모델과는 달리, 벡터 모델은 벡터 방법을 통해 네 가지 구성 요소를 모두 모델링하는 방법을 사용한다. 스토크 벡터의 네 성분은 다음과 같다.

$$I = [I, Q, U, V]^T \quad (1)$$

여기서, I, Q, U 및 V는 각각 스토크 파라미터의 제 1 ~ 4 요소값이고 전자기 복사의 편광 상태를 완전히 설명한다. 우선 첫 번째 구성 요소 I는 총 복사량(편광 및 비 편광)을 의미한다. 만일 편광 효과가 무시된다면 스토크 벡터가 단일 요소로 감소될 수 있다 (즉, 스칼라 근사법). SBDART와 유사한 대부분의 DISORT 모델은 이러한 가정을 사용한다. 그리고 두 번째 구성 요소 Q는 기준 평면에 평행하거나 수직인 방향으로 선형으로 편광된(linearly polarized) 복사이다. 세 번째 요소 U는 기준면에서 45도 방향으로 선형 편광된 복사이다, 마지막 제 4요소 V는 원형 편광된(circularly polarized) 복사광이다.

순수 Rayleigh 대기의 경우 복사전달 계산 과정에서 이러한 편광효과가 무시될 경우 최대 10%이내의 오차가 발생함이 보고되었다 (Kattawar et al., 1976). 따라서, 본 연구에서도 GOCI 관측 채널의 Rayleigh 산란 효과의 복사전달 모의시 벡터 모델의 사용이 필수적임을 알 수 있다.

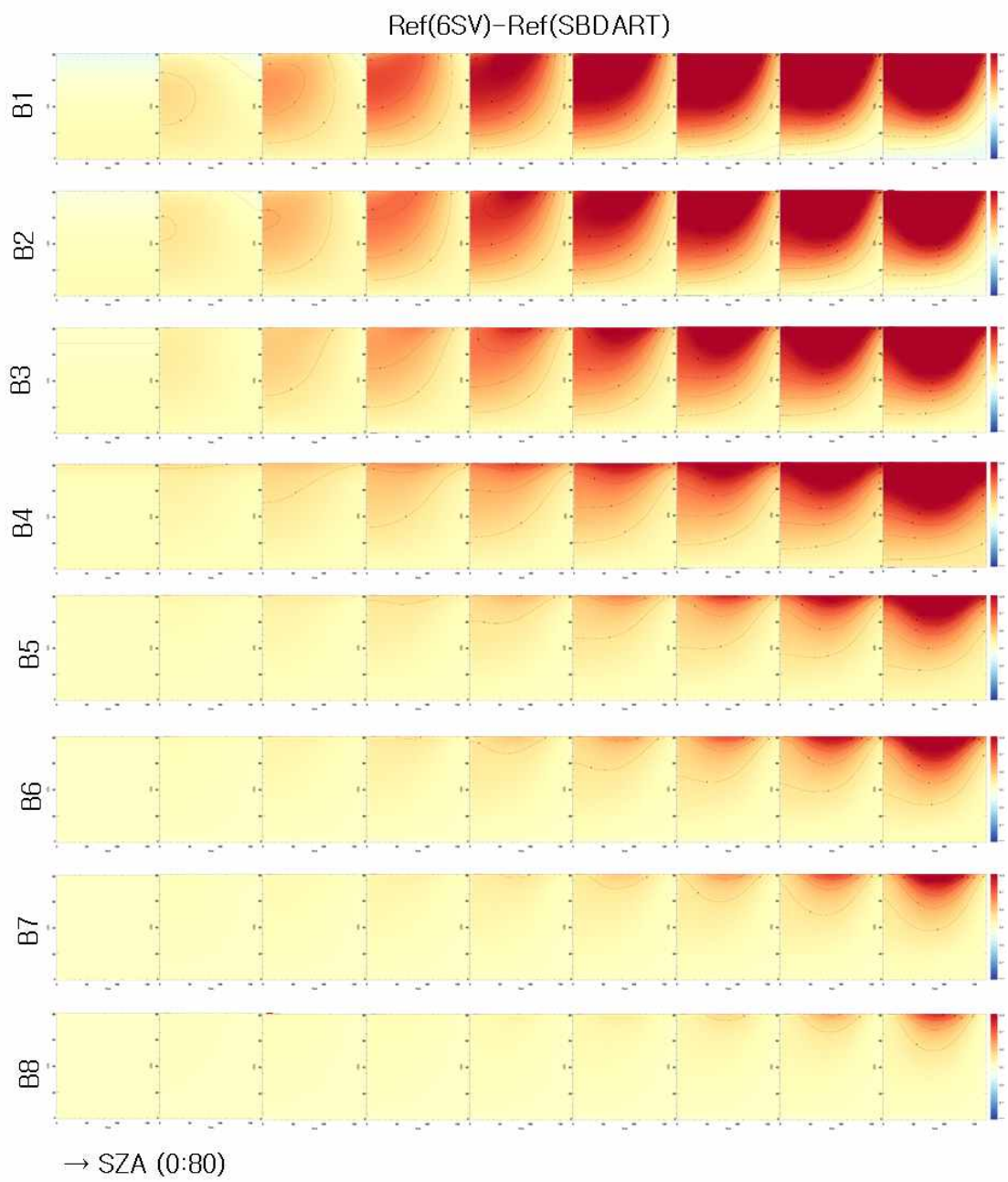


그림 19.23. Rayleigh 산란 LUT 비교사례(SBDART, 6SV)

나. 채널별 대기 투과도, 지표반사도 산출 알고리즘 기초 설계

1) 지표 반사도 산출 알고리즘 설계

동일지점을 연속으로 관측하는 정지궤도 관측 자료의 잇점을 최대한 이용하기 위하여 최소 반사도 기법을 사용하였다. 화소별 최소반사도를 계산하기 위하여 먼저 복사검정(Radiometric calibration)을 마친 L1B 반사도를 입력자료로부터 청천(Clear sky)화소를 결정하였다. 그리고 미리 계산한 조견표와 대기 미량기체 농도 자료를 이용하여 대기 투과도에 관한 보정을 수행하였다. 이러한 과정을 통하여 최종적으로 산출된 최소 반사도값을 지표 반사도로 간주하여 L2 자료 수준의 산출물로 저장하게 된다.

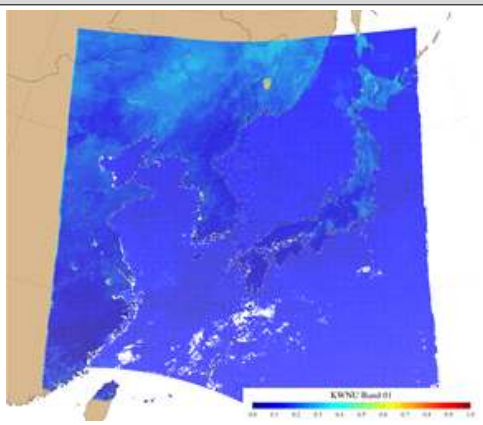
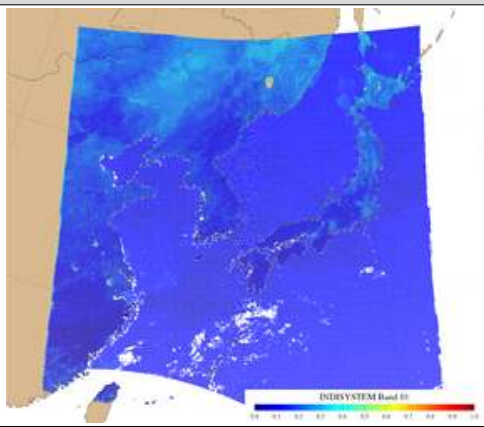
2) 대기투과도가 보정된 지표반사도 프로토타입 알고리즘 작성

가) 최초의 지표반사도 산출 알고리즘은 프로토 버전으로서 IDL 언어(버전 8.*)로 작성 및 시험되었다. 실제 G2GS에서 운영하기 위한 알고리즘은 C언어로 코딩되어야 하므로, IDL 버전의 코드를 C언어 버전으로 포워드 하는 작업을 별도로 수행하였다.

나) 따라서, IDL 버전의 원형 코드와 C언어로 작성한 원시 코드와의 비교를 위하여 시간대별 청천 대기 투과도, 지표반사도 산출을 위한 사례로 분석하였으며, 화소별 비교분석을 통하여 99% 이상의 일치된 결과를 얻었다 (표 19.4 참조).

다) 그리고 해당 알고리즘 산출물은 MODIS L2 지표반사도 산출물과 비교 결과 RMSE 0.023, Bias 0.03 의 결과를 나타내었다 (그림 19.24 참조). 해당 알고리즘은 C 소스코드 및 기술문서(ATBD, 코드 설명서 등)로 위성센터에 제공하였음.

표 19.4 IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=1)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0351839624 • Max Value : 0.6184798479	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0351839624 • Max Value : 0.6184798479

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.1335123479
- Max : 0.0000008941

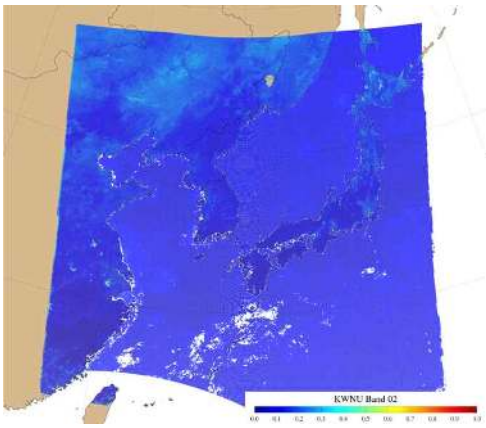
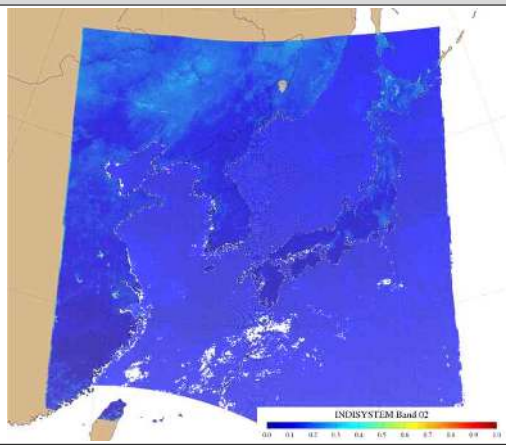
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000149 ~ 0.0000008941
1	0.133512

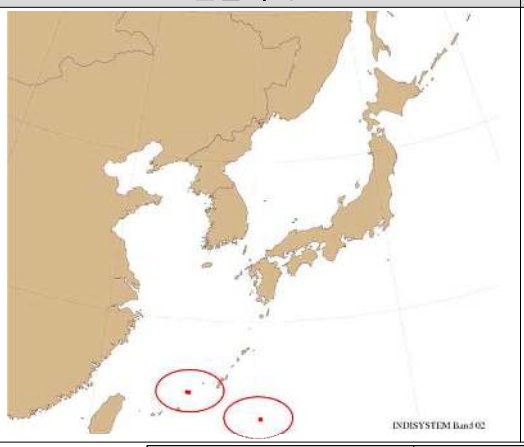
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.108334
[4946][1965]	NaN	0.104264
[5269][2862]	NaN	0.099753
[5272][2868]	NaN	0.096413

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[4940][1939]	0.133512	0.149193	0.282705

표 19.5 IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=2)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.315198489 • Max Value : 0.5718590021	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0315197371 • Max Value : 0.5718585849

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.1106431335
- Max : 0.0000007749

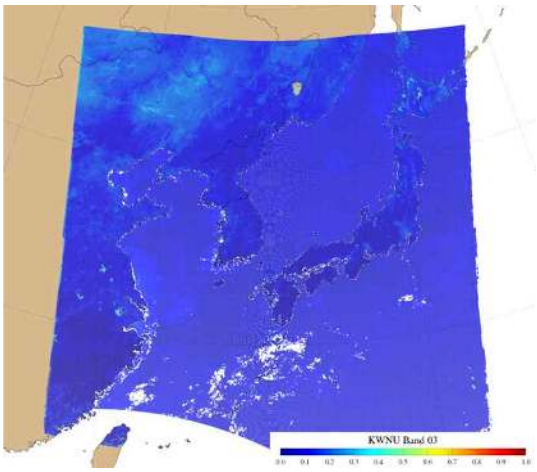
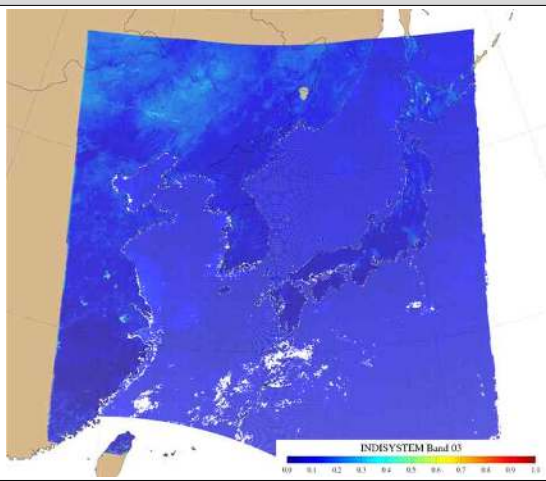
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000224 ~ 0.0000007749
3	0.000584 ~ 0.110643

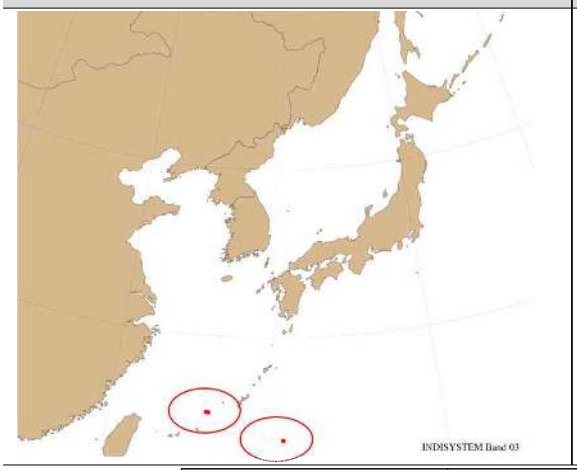
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.084918
[4946][1965]	NaN	0.081820
[5269][2862]	NaN	0.071571
[5272][2868]	NaN	0.069304

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[1769][2002]	0.005570	0.1104253	0.115996
[3082][2949]	0.000584	0.096579	0.097163
[3092][1043]	0.110643	0.155330	0.265973

표 19.6 IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=3)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0249299072 • Max Value : 0.6603531241	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0249298122 • Max Value : 0.660352877

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.0949696749
- Max : 0.0013826638

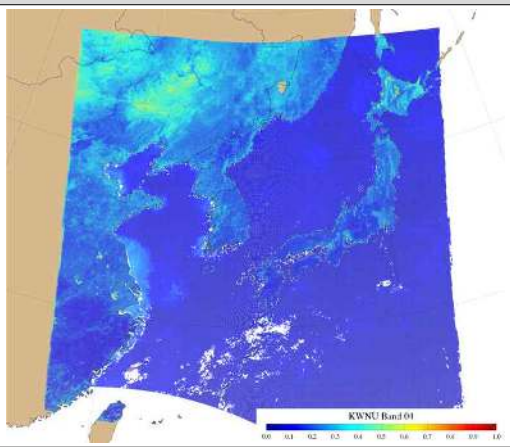
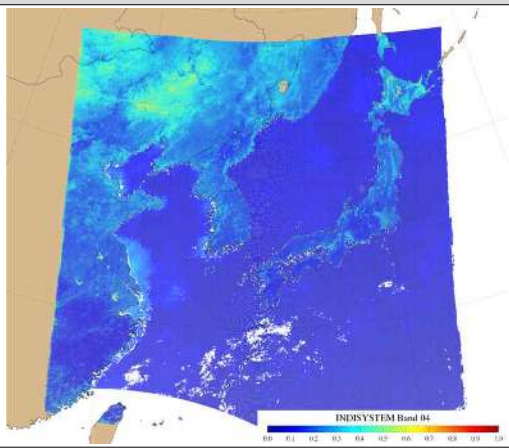
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000298 ~ 0.0000006258
3	0.001383 ~ 0.094970

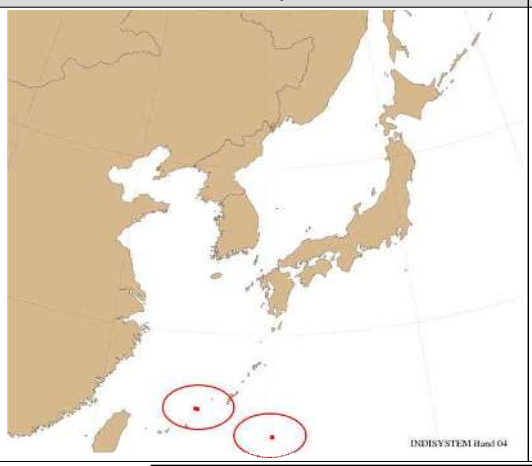
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.068123
[4946][1965]	NaN	0.063095
[5269][2862]	NaN	0.048676
[5272][2868]	NaN	0.047136

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[3082][2949]	0.001383	0.076504	0.075121
[1769][2002]	0.008809	0.087794	0.096603
[3092][1043]	0.094970	0.161765	0.256735

표 19.7. IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=4)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0128819700 • Max Value : 1.1721765995	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0128819086 • Max Value : 1.1721762419

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.116578370
- Max : 0.0000010133

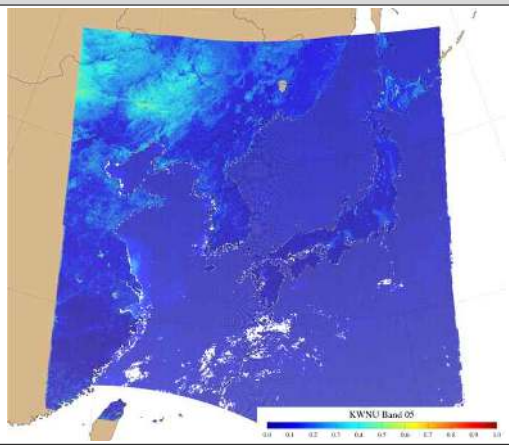
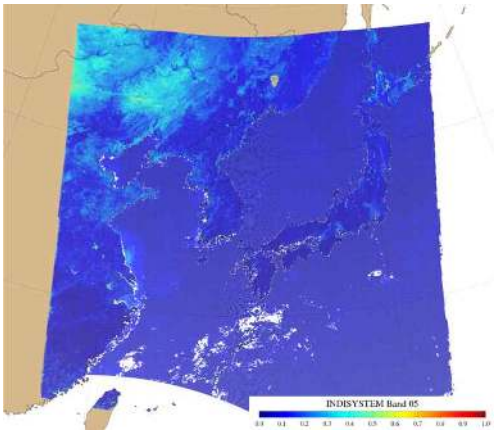
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000002384 ~ 0.0000009537
4	0.000001 ~ 0.116578

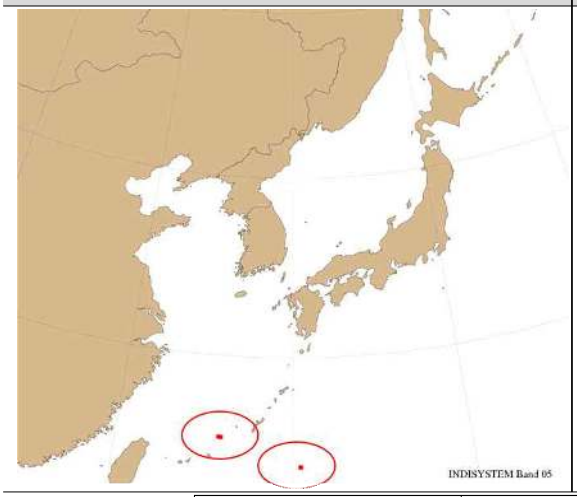
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.060778
[4946][1965]	NaN	0.053958
[5269][2862]	NaN	0.031471
[5272][2868]	NaN	0.029819

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[4881][504]	0.000001	0.705765	0.705764
[1769][2002]	0.012766	0.179755	0.192521
[3082][2949]	0.003627	0.166516	0.170142
[3092][1043]	0.116578	0.294039	0.410617

표 19.8. IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=5)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.00060810647 • Max Value : 0.8418022394	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0060810400 • Max Value : 0.8418018222

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.0607365370
- Max : 0.0000007153

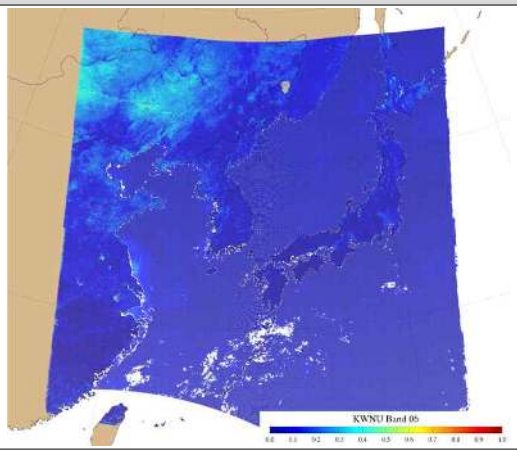
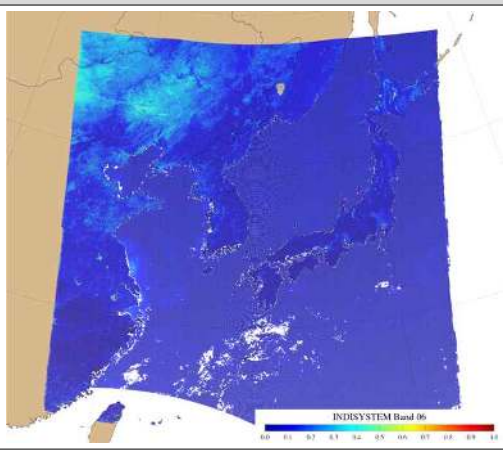
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000298 ~ 0.0000007153
3	0.002969 ~ 0.60737

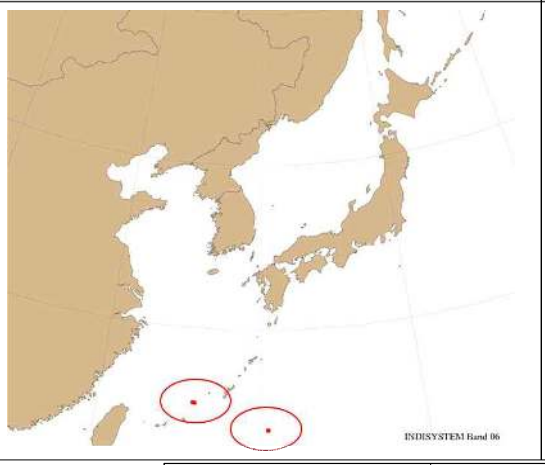
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.034793
[4946][1965]	NaN	0.029014
[5269][2862]	NaN	0.014836
[5272][2868]	NaN	0.013685

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[1769][2002]	0.010381	0.067684	0.07806
[3082][2949]	0.002969	0.061667	0.06435
[3092][1043]	0.060737	0.261254	0.321990

표 19.9. IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=6)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0057640523 • Max Value : 0.9673484564	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0057640336 • Max Value : 0.9673476219

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.0477609336
- Max : 0.0000008345

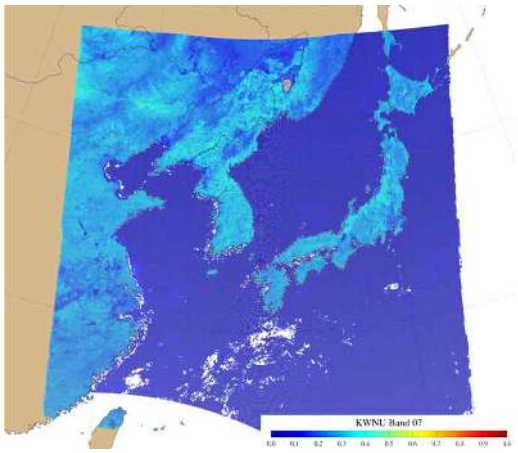
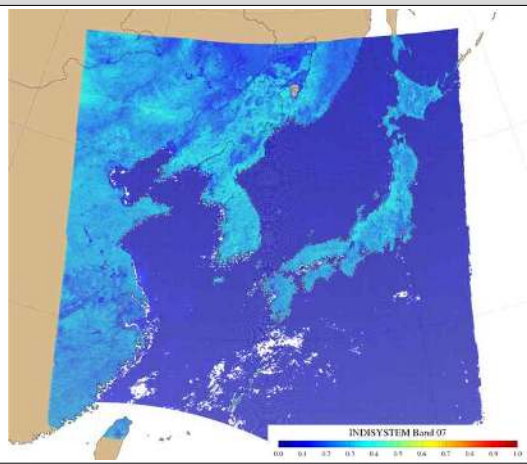
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000037 ~ 0.0000008345
3	0.000049 ~ 0.047761

Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.032069
[4946][1965]	NaN	0.025799
[5269][2862]	NaN	0.019423
[5272][2868]	NaN	0.018345

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[1769][2002]	0.008797	0.054581	0.063378
[3082][2949]	0.000049	0.049133	0.049182
[3092][1043]	0.047761	0.239688	0.287449

표 19.10 IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=7)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0045118714 • Max Value : 1.11610352993	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0045118593 • Max Value : 1.1610343456

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -00475723147
- Max : 0.0011100769

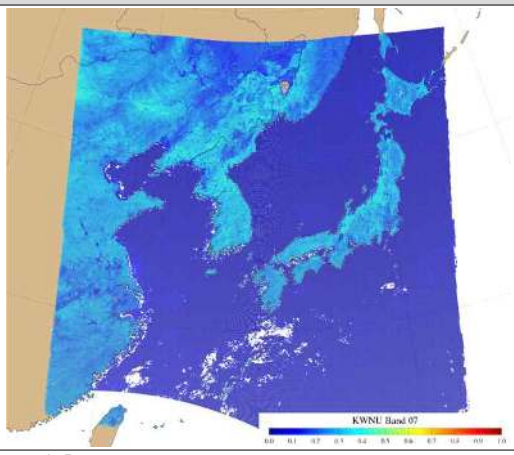
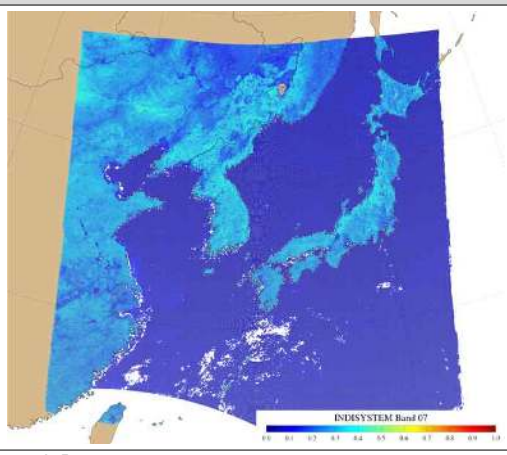
산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000009 ~ 0.0000009537
3	0.001110 ~ 0.047572

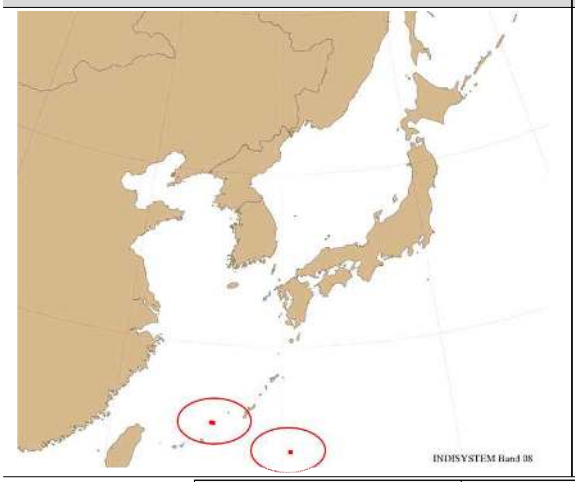
Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.108334
[4946][1965]	NaN	0.104264
[5269][2862]	NaN	0.099753
[5272][2868]	NaN	0.096413

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[1769][2002]	0.015642	0.293968	0.309609
[3082][2949]	0.047572	0.164957	0.212530
[3092][1043]	0.001110	0.324727	0.32361

표 19.11. IDL, C언어 지표반사도 산출 결과(band=8)

IDL산출영상	C언어 산출영상
	
• 산출 Pixel : 26143906 • Min Value : 0.0036850660 • Max Value : 0.4198412597	• 산출 Pixel : 26143910 • Min Value : 0.0036850583 • Max Value : 0.4198409021

- 산출개수4pixel 차이
- Diff (IDL - C)
- Min : -0.0373512954
- Max : 0.0000004768

산출차이	Diff [IDL - C](diff >=0.000001)
	

Count	범위
26143905	0.0000000019 ~ 0.0000004768
3	0.007276 ~ 0.37351

Pixel [row][col]	IDL Value	C Value
[4940][1939]	NaN	0.021255
[4946][1965]	NaN	0.015812
[5269][2862]	NaN	0.010055
[5272][2868]	NaN	0.009359

Pixel [row][col]	Diff	IDL Value	C Value
[1769][2002]	0.027231	0.296913	0.324145
[3082][2949]	0.007276	0.352447	0.359723
[3092][1043]	0.037351	0.128432	0.165784

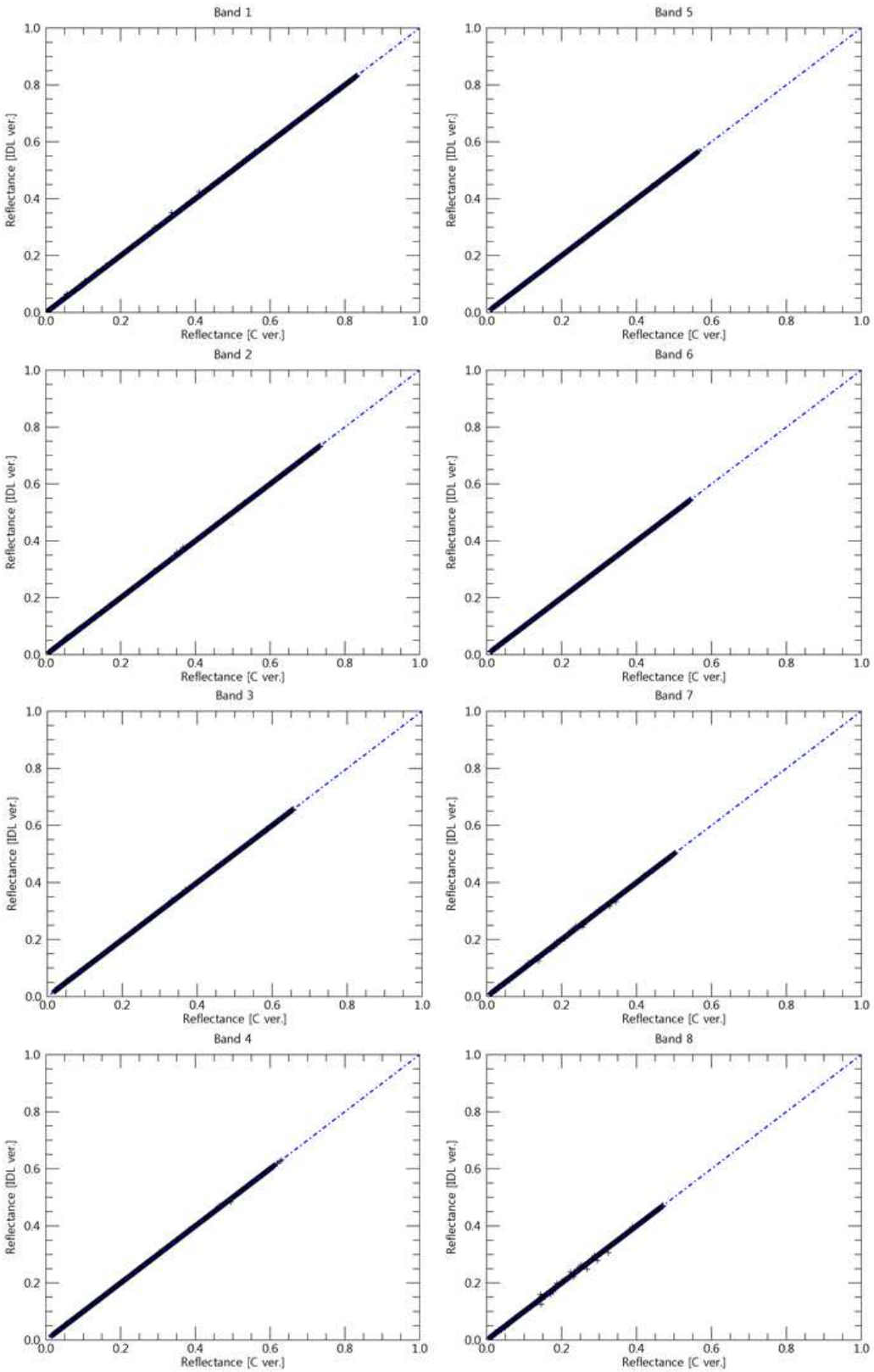


그림 19.24. IDL, C언어 지표반사도 검증 결과

표 19.12는 지표반사도 산출알고리즘의 C언어 개발버전의 성능검증을 위한 비교사례결과로서, 기존의 연구용으로 작성된 IDL 또는 Fortran 2차년도 최종시험버전을 C 언어버전으로 재 작성후 산출된 결과값을 비교하였다(그림 19.25). 1차년도에서 개발된 버전에비하여 두 버전의 차이가 거의 없음을 확인하였다. 표 12에서는 이러한 차이값이 밴드1 = 0.000000, 밴드2 = 2.59734e-015, 밴드3 = 9.74003e-016, 밴드4 = 0.000000, 밴드5 = 4.87001e-016, 밴드6 = 0.000000, 밴드7 = 1.62334e-016, 밴드8 =-8.11669e-017으로 나타났다. 0이 아닌 차이값은 코딩 언어 및 컴파일러에서 사용되는 변수의 자료처리 능력 및 소숫점이하 자료처리 부분에 의하여 이러한 차이로 인한 것으로 판단된다.

표 19.12. IDL, C언어 지표반사도 비교 결과

band	band1	band2	band3	band4	band5	band6	band7	band8
Diff	0	2.59734 e-015	9.74003 e-016	0	4.87001 e-016	0	1.62334 e-016	-8.1166 9e-017

다. 지표반사도 산출 알고리즘

1) 대기보정 알고리즘 개요

인공위성이 관측하는 가시채널 복사량으로부터 산출되는 지표 반사도는 대기투과도가 보정된 복사량으로서, 다양한 위성자료 산출 알고리즘이 보고되었다. 예를 들면, Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Ozone Monitoring Instrument (OMI) 등과 같은 다양한 지구관측위성이 대기효과가 보정된 (또는 최소화 된) 지표반사도 산출을 위하여 사용되고 있다.

이 중 TOMS는 1979년부터 관측을 시작하여 가장 오랜 관측 역사를 가지고 있으며, 구름과 에어로솔이 없는 청천 대기조건에서의 등방향성 지표 반사도(Lambertian Equivalent Reflectance; LER)를 산출하였다 (Herman and Celarier, 1997). TOMS 센서는 자외선 채널(340nm와 380nm)에서 산출된 지표반사도 값의 범위는 상대적으로 매우 낮기 때문에(육지: 2-4%, 해수면: 5-6%) 대기의 영향을 적게 받는 것이 특징이나, 상대적으로 넓은 수평해상도(~50km at nadir; ~250km off nadir)로 인하여 청천화소의 결정이 어려운 것이 단점이다 (Herman and Celarier, 1997).

1995년부터 관측을 시작한 European Remote Sensing-2 (ERS-2)위성의 탑재센서인 GOME은 공간해상도 40 km 320 km를 가지고, 237-772nm 영역의 파장대를 연속 관측할 수 있는 분광센서(spectrometer)이다. GOME의 분광 관측자료 중 선택된 11개의 파장(335nm, 380nm, 416nm, 440nm, 463nm, 494.5nm, 555nm, 610nm, 670nm, 758nm, and 772nm)에서 지표반사도를 산출하기 위하여, 기존의 TOMS에서 사용된 등방향성 반사도 분석 방법을 적용하여 산출물을 생산하였다 (Koelemeijer etal.,2003).

Aura위성의 OMI센서는 공간해상도 13km 24km를 가지며, 270nm - 500nm의 파장영역을 측정할 수 있는 분광센서이다. 2004년 10월부터 2007년 10월까지 3년 동안 관측된 자료를 이용하여 지표반사도 값을 산출하여 이용자들에게 배포하고 있으며(http://mirador.gsfc.nasa.gov/), 앞

에서 언급된 타 위성자료와 OMI의 LER 비교결과는 각각 1.5%(TOMS), 0.5%(GOME) 이내의 오차를 가지는 것으로 보였다(Kleipool et al. 2008).

EOS Terra(2000-current) 와 Aqua(2002-current) 위성의 탑재센서인 MODIS는 복사전달 모델을 이용하여 계산된 대기투과도를 보정하는 방법으로 지표반사도를 산출한다. MODIS Level 2 지표반사도 산출물은 다중분광 채널(0.47μm, 0.55μm, 0.66μm, 0.85μm, 1.2μm, 1.6μm, and 2.1μm)에서 결과 산출물을 생산하고 있으며, 코드명 MOD09/MYD09 자료는 지표반사도 및 관련된 자료를 제공하고 있다 (Vermote et al., 2002). 또란 MODIS 는 지표면의 방향성 반사도 특징을 고려하여 양방향성 반사도 함수(bidirectional reflectance distribution function; BRDF)도 수치적인 계산을 통하여 산출하고 있다(Schaaf et al., 2002).

이상에서 언급된 지표반사도 산출방법은 GOCI-II 지표반사도 알고리즘을 개발하기 위하여 참고적으로 활용될 수 있다.

2) 대기보정 알고리즘의 구성

GOCI-II 지표반사도 알고리즘은 기본적으로 최소반사도 기법을 사용하며 자료처리과정은 그림 19.25와 같다. 최소반사도 기법은 지표변화가 일정한 조건이라는 가정 하에, 동일 지역에서 일정기간 동안 관측된 반사도 값의 최소값을 선택함으로써, 대기의 영향을 최소화하고 지표의 특성을 최대한 반영하는 방법이다. 최소반사도 기법은 지표반사도가 상대적으로 높은 도시나 건조지역에서도 활용이 가능하지만, 자료처리에 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 그리고 GOCI-II의 주요 관측 영역인 동아시아는 대기 오염물질(에어로솔이나 가스 등)의 영향을 크게 받는 지역이므로, 대기 투과도에 대한 영향이 고려되어야 한다. 이를 위하여, GOCI-II 지표반사도 알고리즘은 최소 반사도 산출과정에서 화소별 대기투과도가 보정된 각 시간별 최소값을 지표반사도로 결정한다.

현업용 GOCI-II 지표반사도 산출 알고리즘의 효율적인 자료처리를 위하여, 지표반사도 알고리즘은 대기 보정된 반사도(Atmospherically Corrected Reflectance: ACR)를 생산하는 전처리 과정과 과거의 ACR 자료로부터 최소 반사도를 결정하는 후처리 과정에서 생성되는 지표반사도(Surface Reflectance Product: SRP)의 두 가지 처리과정을 거치도록 설계하였다. 일정 기간 동안의 전 채널 별 자료를 반사도 자료로부터 일괄적으로 지표 반사도를 산출하기에는 자료처리에 필요한 시스템 자원 부하량과 시간이 많이 소요된다. 따라서, 매 시간별 생산된 ACR 자료로부터 단순히 최소 반사도를 결정하면 시스템 자원과 자료처리 시간단축이 가능하다.

그림 19.25에서는 ACR 처리 과정에서는 L1B 자료로부터 Rayleigh 산란과 미량기체 흡수에 의한 반사도 보정이 이루어진다. 에어로솔은 광학특성과 분포영역이 매우 다양하므로 직접적인 반사도 보정이 불가능하다. 따라서, L2 에어로솔 정보를 입력자료로 활용하여 청천대기 조건에서 제거하는 과정을 거치게 된다. 대기보정 과정을 거친 ACR 자료는 각 시간대별로 생산이 되며 일정기간 (예비)산출물로서 저장되는 것이 필요하다. SRP 처리과정에서는 15일 이전까지의 ACR 자료를 입력자료로 하여 화소별 최소반사도 값을 결정하여 지표반사도 산출물로서 저장된다.

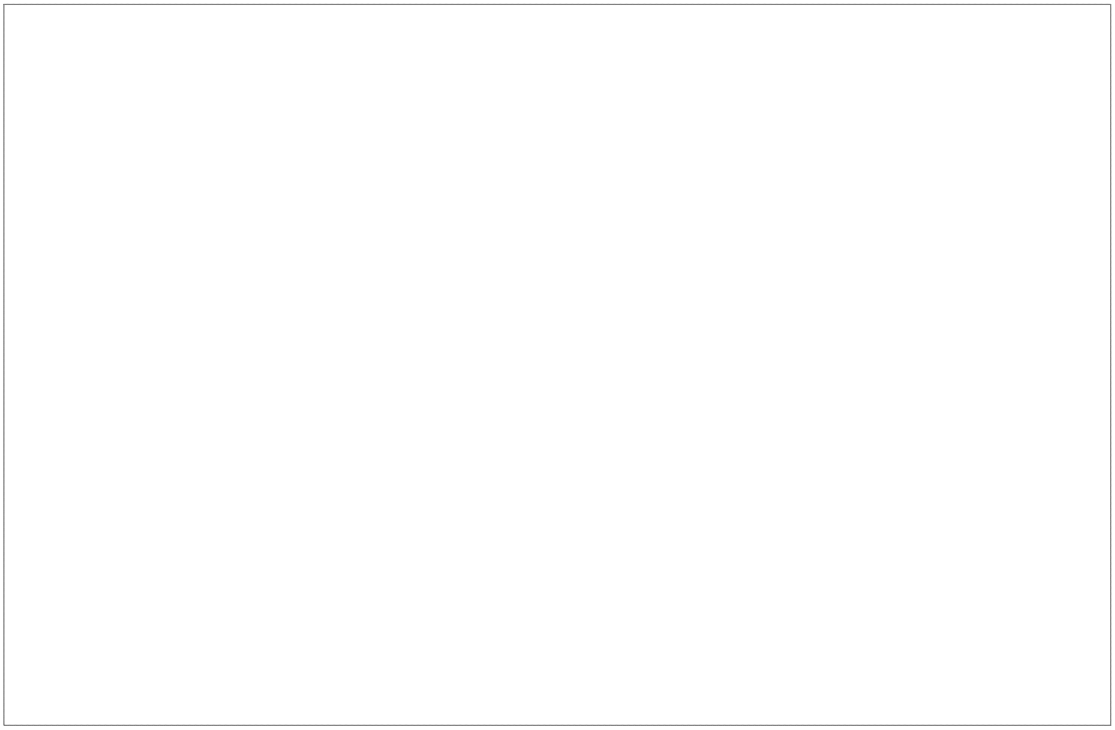


그림 19.25. GOCI-II 지표반사도 알고리즘 자료처리 순서도

3) 입력자료

GOCI-II 지표반사도 알고리즘 입력자료는 주 입력자료인 GOCI-II level-1b/Geometry 자료, 보조 입력자료인 조견표(LUT), 미량기체(O3,NO2,PWV등), 에어로솔 산출물이 필요하다. LUT는 복사전달모의에 의하여 미리 생성된 입력자료이다. 미량기체와 에어로솔은 외부에서 수집한 보조입력 자료로서, 현재 사용 가능한 자료로서 OMI daily NO2자료와 OMI daily O3 자료를 사용하고 있다. 실시간 처리에 필요한 기상자료가 확보되지 않는 경우에는 기후학적 자료(Climatology data)를 이용하여 대체 할 수 있다.

가) 주요 입출력자료

(1) GOCI-II L1b 자료

GOCI-II는 해색을 관측하는 센서이며 GK-2B 위성에 탑재되어 동경 128.2도 적도상공의 정지궤도에서 운영될 계획이다. GOCI-II 관측 자료의 보정은 순차적으로 이루어지며, 각 단계에서 Level-0, Level-1A, Level-1B자료가 생성될 것이다. 본 알고리즘은 복사 보정된 GOCI-II Level-1B를 입력자료로 사용하는 것을 목적으로 하며, 다음과 같은 자료의 특성정보를 사용한다.

- pixel별 위경도 확인 방법 : Level-1B 파일 내부의 위경도 자료(double type) 제공
- 밴드 구성 : 1～12번 밴드
- 파일 포멧 : NetCDF-CF convention
- 자료형 : 32bit float
- dimension : 12개 밴드 28xx * 28xx 크기의 그리드

나) 보조 입력자료

(1) 조견표

조견표는 GOCI-II의 각 밴드별 대기 투과도를 계산한 테이블로서, 태양과 위성센서의 위치별 조건에 따라 계산이 된다. 여기서 사용된 복사전달모델은 SBDART(Ricchiazzi et al., 1998) 또는 6SV(Kotchenova etal.,2006) 와 같은 범용 모델이 사용가능하며, 향후 개발될 GOCI-II 전용 복사전달모델의 사용이 될 것이다. 알고리즘의 입력자료가 위성관측값에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 복사전달모델을 사용한 반사도 모의 결과를 수행하였다.

(2) 미량기체

대기투과도 산정 시 필요한 공간분포자료이며, 실시간 확보가 불가능 한 경우 기후학적 자료를 사용할 수 있다. 현재 알고리즘에서는 동아시아 지역에서 농도가 높은 두 가지 미량 기체 (NO2와 O3)에 대한 투과도 보정을 수행하고 있다. 그리고 GOCI-II 관측 파장대에서 영향을 미칠 수 있는 수증기는 수치모델 중 NCEP Reanalysis 자료를 사용하였다.

(3) 산출 자료

GOCI-II 지표반사도 산출 알고리즘에서는 단파장 영역에서의 광 흡수성 에어로솔에 대한 보정이 필요하며, 실제 L2 산출물을 이용 가능한 경우에 한하여 에어러솔 산출물 정보를 입력자료로 활용 가능하다. 현재 알고리즘에서는 입력자료로 활용 가능한 경우에 대한 유/무를 Flag로 표시 하고 있다.

GOCI-II의 지표반사도 산출물의 품질 분석을 위하여 16bit 자료형의 flag를 제공하며 목록은 표 19.13과 같다.

표 19.13. Quality Flags in DCOMP output

No	Flag 이름	Flag 내용
1	L1B outlier	L1b data 이상치
2	Cloud or Ice	구름 혹은 눈/얼음(Mask 처리)
3	No O3	보조입력자료(O3) 없음
4	No NO2	보조입력자료(NO2) 없음
5	No H2O	보조입력자료(H2O) 없음
6	High SZA	태양고도가 너무 낮아서 대기투과도 오차가클수있음을알림
7	High VZA	위성고도가 너무 낮아서 대기투과도 오차가 클 수 있음을 알림
8	High AOT	에어로졸 농도가 높아 대기보정의 오차가 클 수 있음을 알림
9	Neg. Ref	음의 반사도 산출
10	-reserved-	
11	-reserved-	
12	-reserved-	
13	-reserved-	
14	-reserved-	
15	-reserved-	
16	-reserved-	

(4) 메타 데이터

GOCI-II 지표반사도 산출 알고리즘에서는 최소반사도기법이 적용된 기간 및 유효화 소수에 대한 정보 등과 같은 사용자가 필요로 하는 부가자료에 대하여 메타데이터로서 부가적으로 저장한다.

- 산출물이름
- 자료생성날짜, 시간
- 최소반사도결정에사용된유효화소수
- 영상자료의차원(가로pixel * 세로pixel *밴드수)
- 영상처리관련통계값들
- 지표반사도산출시간
- 기타등등추가
- 구름마스킹threshold
- 기타사항

4) 대기보정 이론

가) 복사전달 이론

GOCI-II 센서의 각 밴드별 중심파장(λ)에서 자외-가시광선 영역의 대기상한 반사도(ρ_{TOA})로서 다음과 같이 정의된다.

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

식 (2)에서, 각 기호의 의미는 다음과 같다.

F0 : 대기 상단에서의 일사량(Extraterrestrial irradiance)

θ0 : 태양천정각(Solar zenith angle)

θS : 위성관측각(Satellite view angle)

φ : 상대방위각(relative azimuth angle)

L : 위성 관측 복사량

식(2)에서 계산된 반사도는 다음과 같이 대기와 지표에 대한 성분으로 구분된 복사전달 방정식으로 표현할 수 있다 (Fraser and Kaufman, 1985).

$$\rho_{TOA}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)=\rho_{ATM}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)+\frac{T_{ATM}(\lambda,\theta_0,\theta_S)\,\rho_{SFC}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)}{1-\rho_{SFC}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)s^*} \quad (3)$$

식 (3)에서, 각 기호의 의미는 다음과 같다.

ρATM : 대기에 의한 반사도(atmospheric reflectance)

ρSFC : 지표에 의한 반사도(surface reflectance)

TATM : 대기에 의한 투과도(atmospheric transmission)

s* : 대기 반구 반사도(hemispheric spherical reflectance)

식(3)는 지표 반사도와 대기 투과도, 그리고 대기 분자 산란(또는 Rayleigh 산란)과미량 기체의 흡수로 설명이 가능하다. 따라서 대기에 의한 기여도를 제거하기 위하여 식(3)를 지표 반사도의 항에 대하여 정리하면 식(4)과 같이 정리된다.

$$\rho_{AC}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)=\frac{\rho_{TOA}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)-\rho_{ATM}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)}{T_{ATM}+\left(\rho_{TOA}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)-\rho_{ATM}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)\right)s^*} \quad (4)$$

식(2), (3)에서 대기반사도와 대기투과도가 완벽히 설정되어 그 영향이 제거된다면, ρSFC는 정량적인 값이 된다. 그러나, 대기투과도와 대기-지표의 상호작용을 완벽히 정량화하는 것은 매우 어려운 일이므로 지표반사도 이외의 조건은 가능한 최소화 시키는 방법이 사용된다. 본 연구에서는 16일 연속 기간의 대기보정된 반사도값 중에서 최소값(즉, 대기 반사도가 최소인 값)을 결정하여 대기반사도로 간주하였다.

$$\rho_{SFC}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)=\min\left|\rho_{AC}(\lambda,\theta_0,\theta_S,\phi)\right|^{16days} \quad (5)$$

그림 19.26은 태양 입사 복사가 지구 대기권과 지표에서의 반사, 흡수 과정을 거치고 인공위성이 관측하게 되는 과정을 표현한 그림이다. 이 과정을 통하여 인공위성이 관측하는 복사량은 식(2)를 이용하여 대기상한 반사도로 전환할 수 있으며, 대기조성물질(에어로솔, 대기분자, 미량기체)에 의한 투과도와 지표반사도의 함수로서 표현될 수 있다.

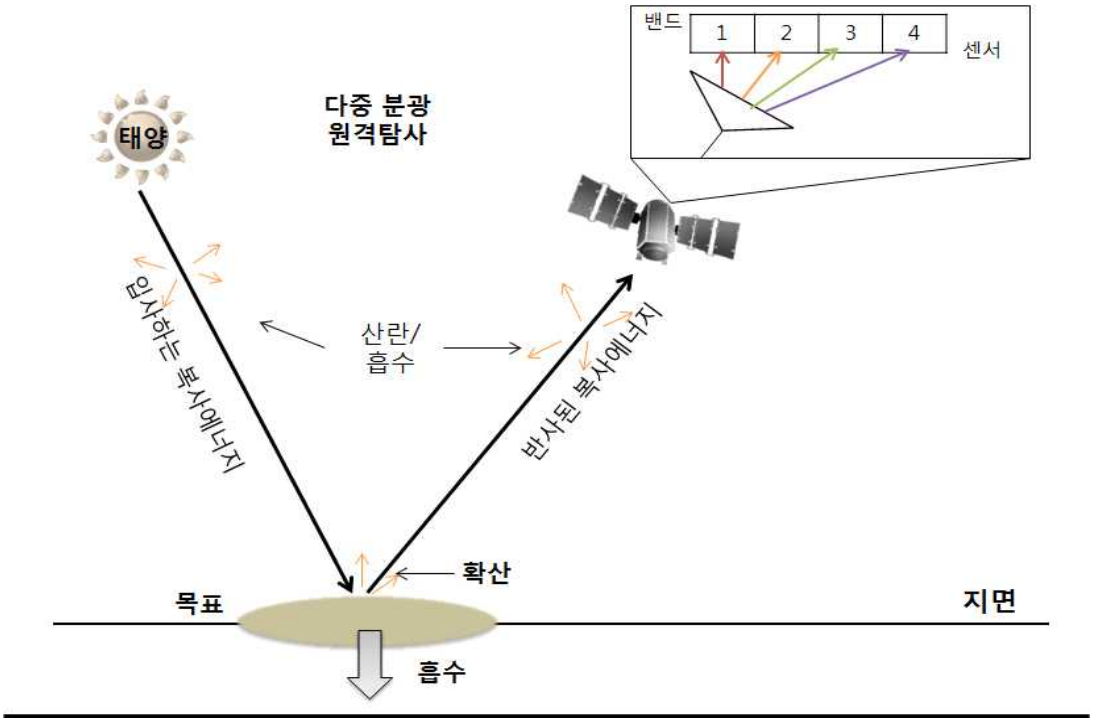


그림 19.26. 위성이 관측하는 복사량에 미치는 대기와 지표의 영향 모식도

나) 자료처리 과정 개선

GOCI-II 요구 자료처리시간은 실시간으로 자료 배포시 10분 이내로 자료처리가 완료되어야 한다. 그러나, 대기보정을 통한 지표반사도 산출에 필요한 자료는 실시간으로 관측된 자료를 바로 처리하는 것이 아니라 이전 15일간의 관측자료를 처리하게 되므로 단일영상을 처리하는 시간보다 최소 15배의 시간이 걸리게 된다. 따라서 최소요구시간 확보를 위한 효율적인 자료처리를 위하여 자료처리 과정을 하드웨어적인 병령화가 아니라 자료처리를 위한 병렬화 방안을 선택하였다. 즉, 16일 기간에 해당하는 16개 영상자료를 자료처리하는 것이 아니라, 이전일부터 15일 이전까지의 자료는 먼저 대기보정 과정만 처리되어 있어야 하고 이 자료와 실시간 자료와의 단순비교를 통하여 자료처리시간을 줄이는 방법이다.

그림 19.27는 지표 반사도 산출을 위한 자료처리 과정에 관한 변화를 설명한 그림이다. 자료처리 시간을 테스트하기 위한 시스템 사양은 CENTOS 7 Linux, Dual CPU (24 core), RAM 128GB 이다. 최초 개발된 초기버전의 알고리즘에서는 현재 관측시간(D0)으로부터 15일이전(D-15)까지의 자료에 대하여 각각 대기보정을 거친 후, 모든 자료에 대하여 최소반사도 처리과정을 거치는 과정에서 약 4시간/영상 정도의 시간이 걸리게 되었다. 이처럼 단일처리과정에 걸리는 시간이 과도하므로 선행 자료처리 과정을 분리하는 방안을 고려하였다. 이 방법에서는 먼저 D0부터 D-15일 까지의 자료를 우선 대기보정 과정에서 처리하고, 이 결

과물을 내일(D+1) 동일시간에 관측된 자료 와 비교하는 방안을 사용하였을 대 약 10분 내외의 자료처리 시간이 걸리게 되었다. 그러나 전처리 과정에서 발생하는 중간단계의 산출 결과로 인하여 저장공간을 소모하게 되므로, 자료처리시간 단축과 동시에 저장공간의 효율적인 사용 방안이 필요하게 되었다. 따라서, 최종적으로 선택된 방법은 D0에서 대기보정을 수행하여 저장공간에 중간 산출물로 저장하고, 동시에 D0부터 D-15 까지의 대기보정된 중간 산출물을 메모리로 읽어서 단순히 최소 반사도 화소만 확보하는 방법을 사용하게 되면 전체 처리시간은 4분 이내로 단축되게 된다. 따라서, 15일 이전 자료룰 동시에 처리하는 데 걸리는 시간은 10분 이상이나, 실시간으로 자료를 처리하는 전처리/후처리 과정을 사용하게 되면 10분 이내로 자료처리 완료됨을 확인하였다.

본 연구에서 개발된 지표반사도 산출 방법에 대한 보다 상세한 설명은 다음과 같다. 지면반사도 산출 알고리즘에서는 화소별 최소반사도를 계산하기 위하여 먼저 복사검정(Radiometric calibration)을 마친 L1B 반사도를 입력자료로부터 청천(Clear sky)화소를 결정한다. 과거 15일 동안의 L1B 자료로부터 청천화소의 결정을 위하여 각 화소별 특이값 검사를 통하여 반사도 값에 대한 이상치(예: RTOA>0.6)가 발생하는 화소는 제외한다. 그리고 이전에서 언급된LUT를 이용하여 대기 투과도에 관한 보정을 수행한다.

바로 16일전부터 관측 전일까지의 15일간의 L1B 자료로부터 위 과정을 반복적으로 수행하여 한 화소에 자료가 축적되면, 최소값을 결정한다. 이후, 해당일에는 15일간의 자료와 비교를 통하여 다시 최소반사도를 구하게 되면 알고리즘 수행시간을 절약할 수 있다. 이 과정이 완료된 후, 최소 반사도 값을 지면반사도로 간주하여 저장한다.

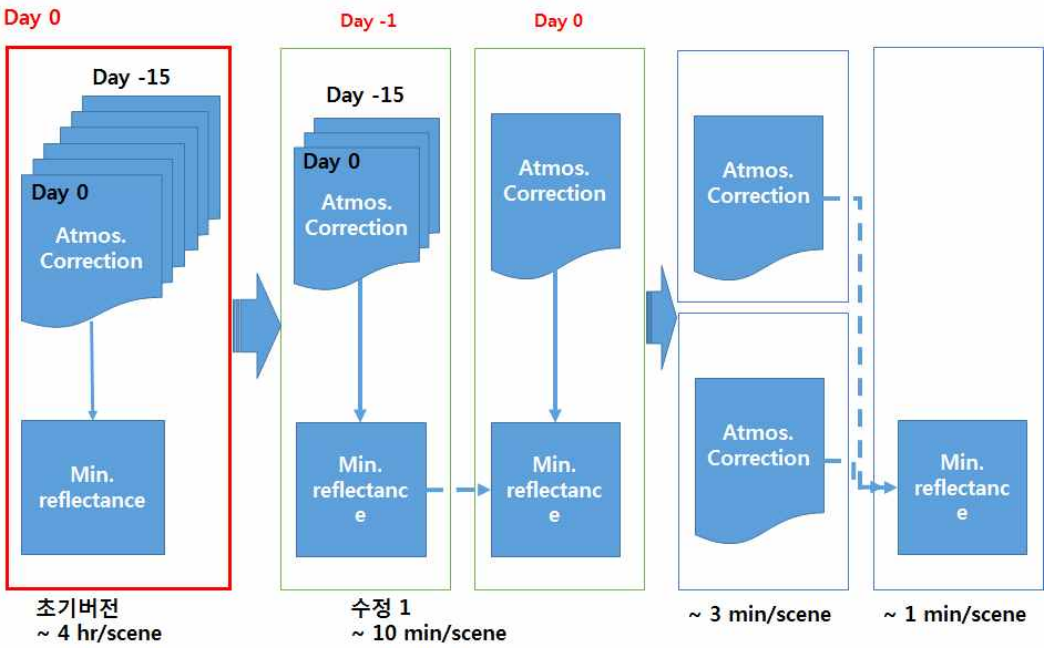


그림 19.27. 자료처리 개선 방안 모식도

다) 조견표 작성

(1) 대기분자 산란

GOCI-II 지표반사도 알고리즘에 사용되는 조견표(LUT) 계산을 위하여 다음과같은 조건에서 복사전달모의를 수행하였다. 우선 대기분자입자에 의한 광산란 계산을 위한 LUT는 아래와 같은 구조를 가진다 (총2,125,440 bytes).

표 19.14. 대기분자 입자 광 산란계산을 위한 LUT 입력 조건

입력변수	입력조건
파장	380, 412, 443, 490, 510, 555, 620, 660, 680, 709, 745, 865 nm(12개)
태양천정각	0°부터80°까지10°간격(9개)
위성천정각	0°부터80°까지5°간격(17개)
상대방위각	0°부터180°까지10°간격(19개)
계절별 표준대기	봄, 가을: standard atmosphere 여름: midlatitude-summer 겨울: midlatitude-winter

(2) 대기 미량기체 흡수

라) GOCI-II Surface Reflectance (G2SR) 산출

대기 미량기체에 대한 투과도는 아래의 식(6), (7)와 같이 주요 가스 성분(오존과 NO2)에 의한 하향 및 상향 흡광도에 의한 투과도를 의미한다.

$$\tau_{gas,0}(\lambda,\theta_0,\theta_0) = \exp\left[-1K_{gas}C_{gas}m_0\right] \quad (6)$$

$$\tau_{gas,S}(\lambda,\theta_0,\theta_S) = \exp\left[-1K_{gas}C_{gas}m_S\right] \quad (7)$$

표 19.15. 대기미량기체의 광흡수계수(GOCI 기준)

Wavelengths [nm]	kO_3 [cm^{-1}]	kNO_2 [cm^2]	kaH_2O [m^{-1}]	kbH_2O [m^{-1}]
412	2.25E-23	5.38E-19	0.0045506	0.00665
443	1.73E-22	4.12E-19	0.0070691	0.0048724
490	7.72E-22	2.84E-19	0.015	0.0031645
555	3.47E-21	7.05E-20	0.0596	0.0018591
660	2.04E-21	1.03E-20	0.41	0.000889
680	1.31E-21	1.12E-20	0.465	0.0007831
745	4.27E-22	0	2.8338	0.0005316
865	6.59E-23	0	4.6052	0.0002825

표 19.16. 대기미량기체의 광흡수계수(GOCI-II 기준)

Wavelengths [nm]	kO_3 [cm^{-1}]	kNO_2 [cm^2]	kaH_2O [m^{-1}]	kbH_2O [m^{-1}]
380	0.00E+00	6.45E-19	0.01137	0.00941
412	2.33E-04	5.63E-19	0.004551	0.00665
443	3.56E-03	4.25E-19	0.007069	0.004872
490	2.06E-02	3.32E-19	0.015	0.003165
510	4.00E-02	2.59E-19	0.0325	0.002667
555	9.45E-02	7.92E-20	0.0596	0.001859
620	1.08E-01	2.76E-20	0.2755	0.00116
660	5.52E-02	6.82E-21	0.41	0.000889
680	3.57E-02	7.43E-21	0.465	0.000783
709	1.87E-02	3.87E-21	0.796289	0.000656
745	1.14E-02	2.83E-21	2.8338	0.000532
865	1.89E-03	2.13E-23	4.6052	0.000283

라. 지표반사도 산출결과

1) 모의자료

지표반사도 산출 알고리즘의 검증은 코드구현수준 검증과 알고리즘 정확도 검증의 두 가지로 나누어 수행된다. 코드구현수준 검증을 위한 입력은 prototype 개발에 활용한 자료를 이용하기 때문에 단순하며, 정확도 검증의 입력자료에 대해서는 다음과 같이 자세히 설명하였다.

GOCI-II 지표반사도 알고리즘을 검증하기 위해서 사용되는 시험자료는 1) 현장자료, 2) 시뮬레이션자료, 3) 타 위성자료 3가지로 구분된다.

가) 현장자료

지표반사도를 측정할 수 있는 현장관측자료는 GOCI-II와 유사하거나 동일한스펙을 가지고 있는 관측장비를 이용하여 특정지점에서의 지표반사도 측정자료를 사용할 수 있다. 그러나, 현재까지 지표반사도를 정량적으로 측정하고있는 기준자료가 존재하지 않으므로, 향후 관측자료가 존재하는 경우에 검증자료로서 활용가능할것이다.

나) 시뮬레이션자료

지표반사도를 측정할 수 있는 현장관측자료는 GOCI-II와 유사하거나 동일한 스펙을 가지고 있는 관측장비를 이용하여 특정지점에서의 지표반사도 측정자료를 사용할 수 있다. 그러나, 현재까지 지표반사도를 정량적으로 측정하고있는 기준자료가 존재하지 않으므로, 향후 관측자료가 존재하는 경우에 검증자료로서 활용 가능할 것이다.

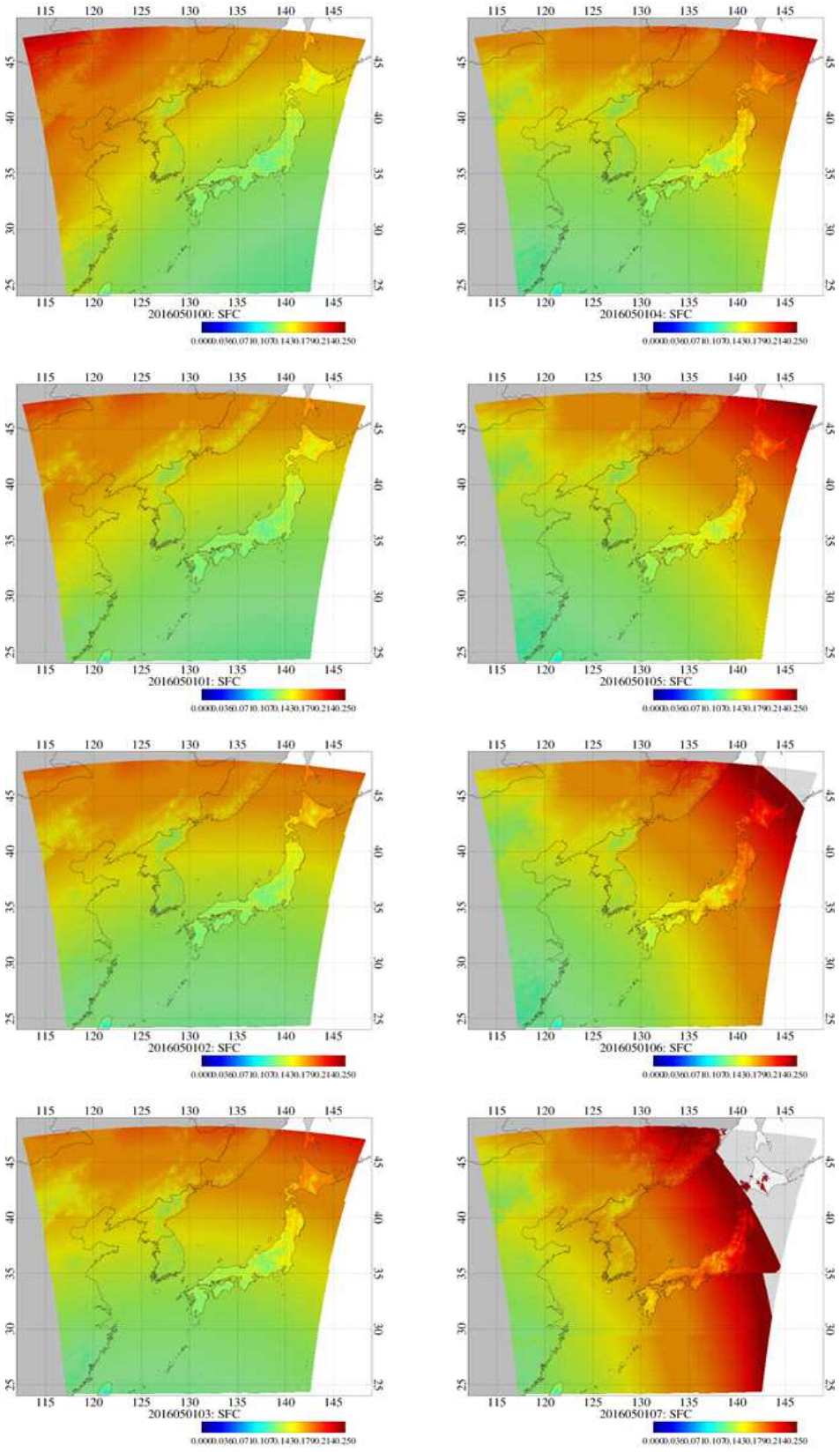


그림 19.28. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도 (Band=1)

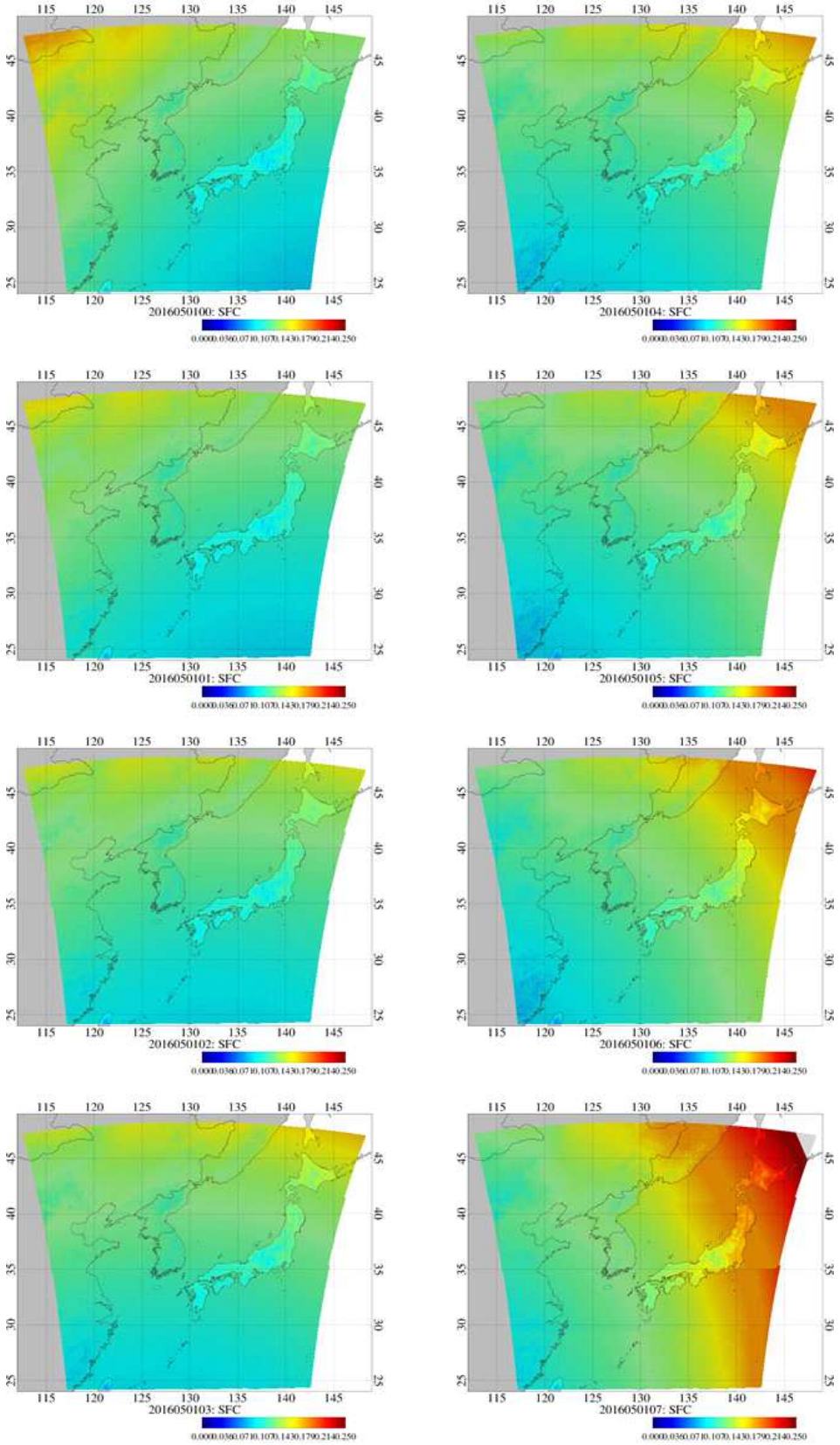


그림 19.29. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=2)

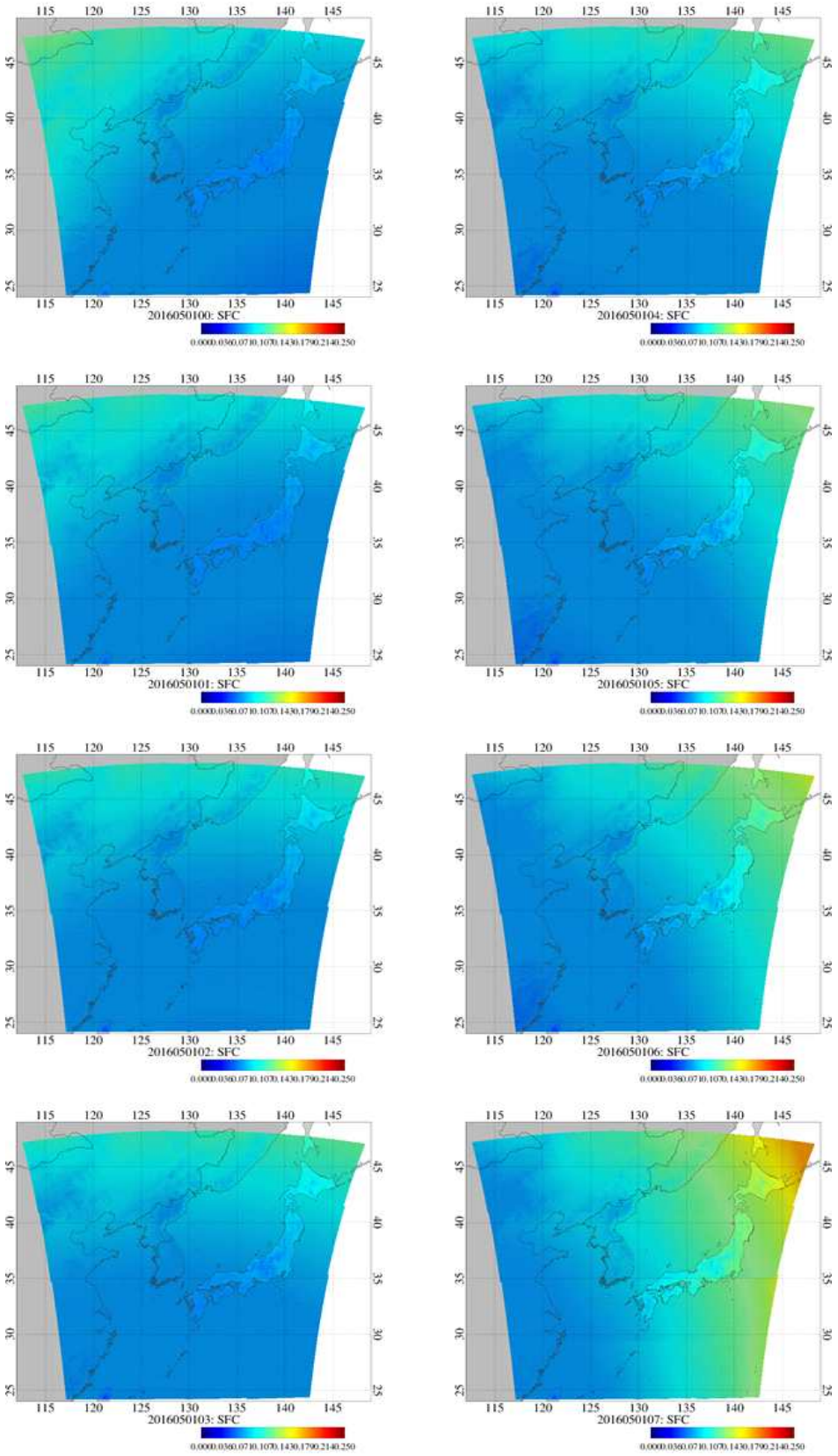


그림 19.30. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=3)

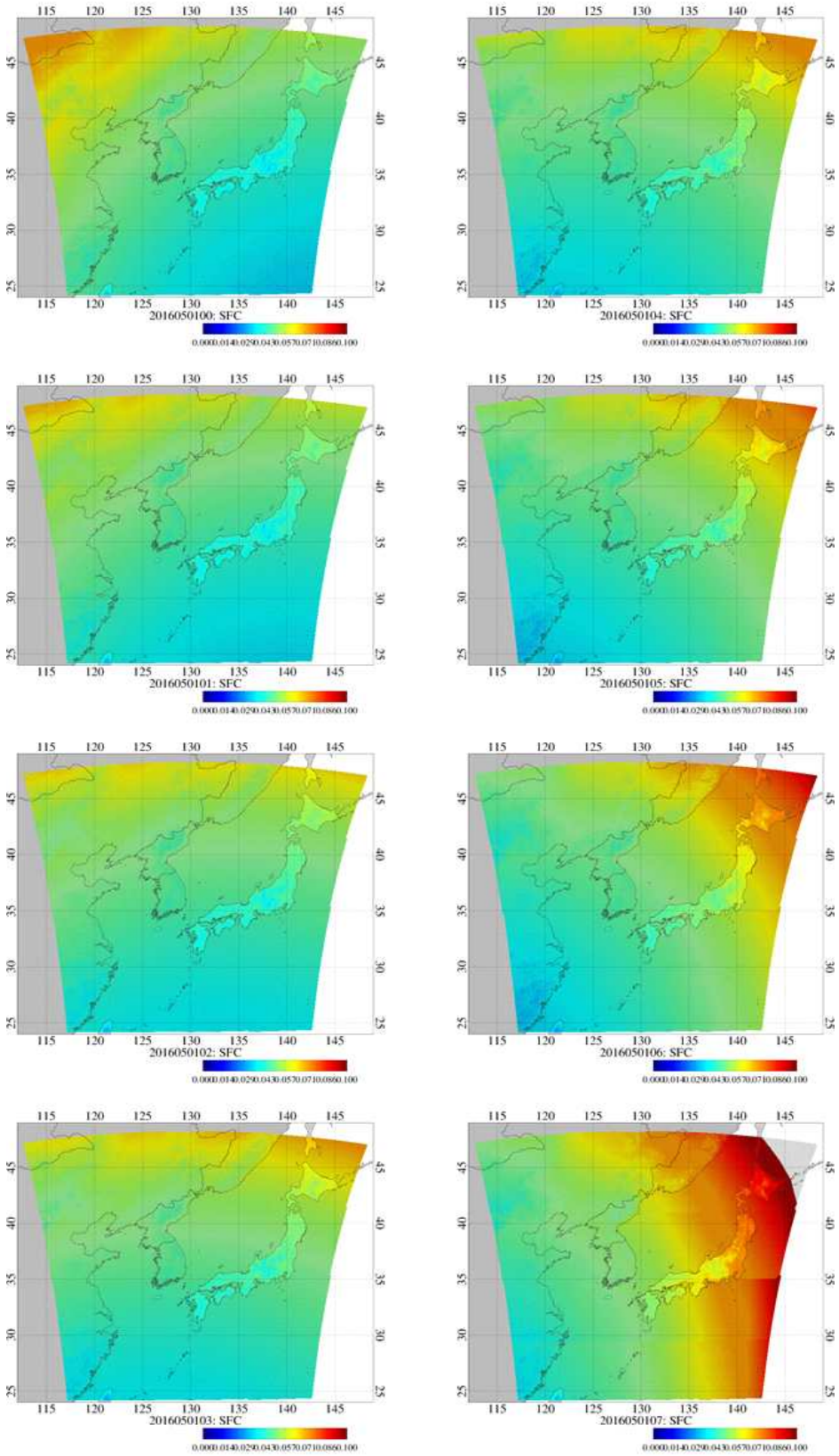


그림 19.31. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=4)

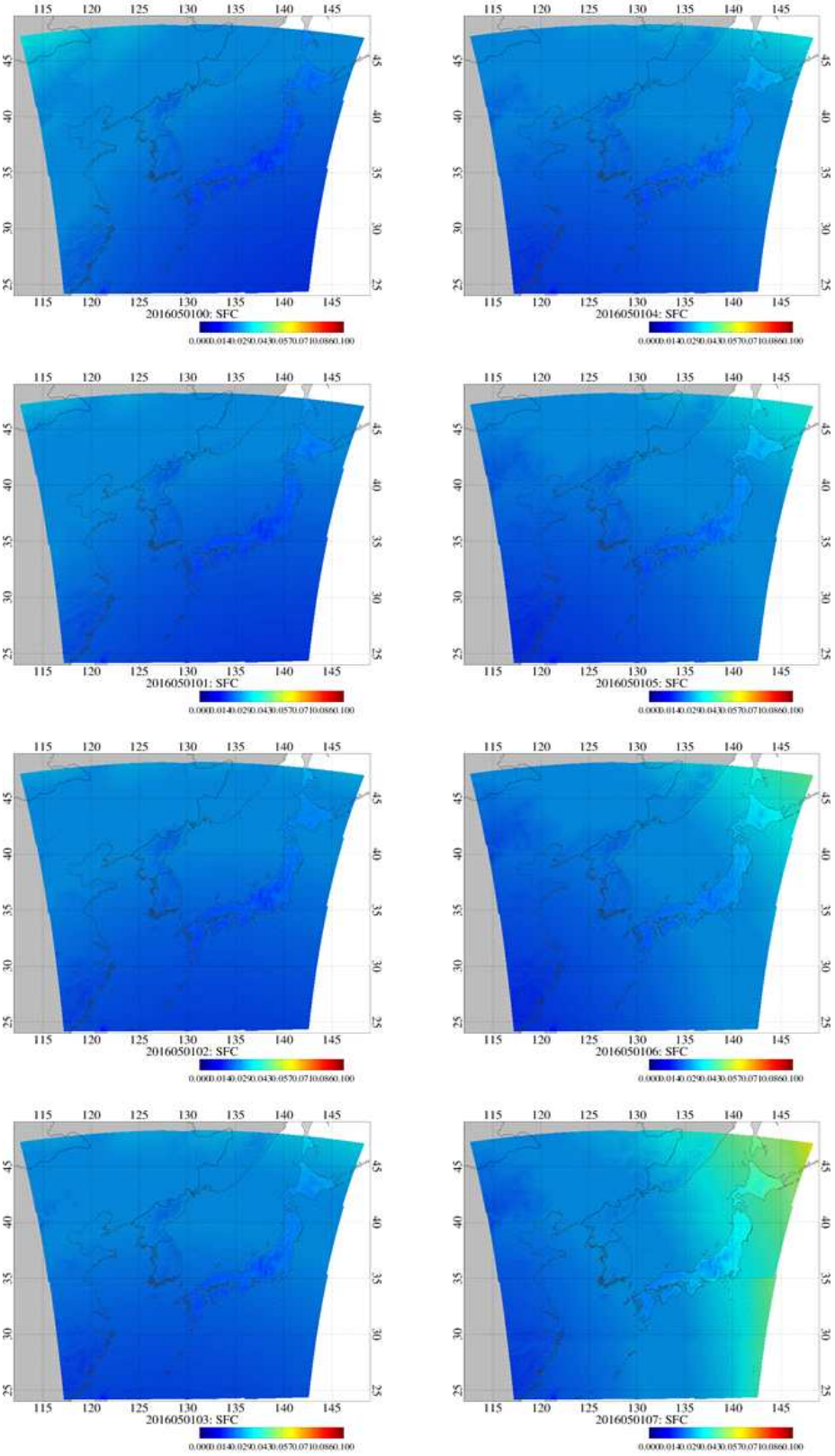


그림 19.32. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=5)

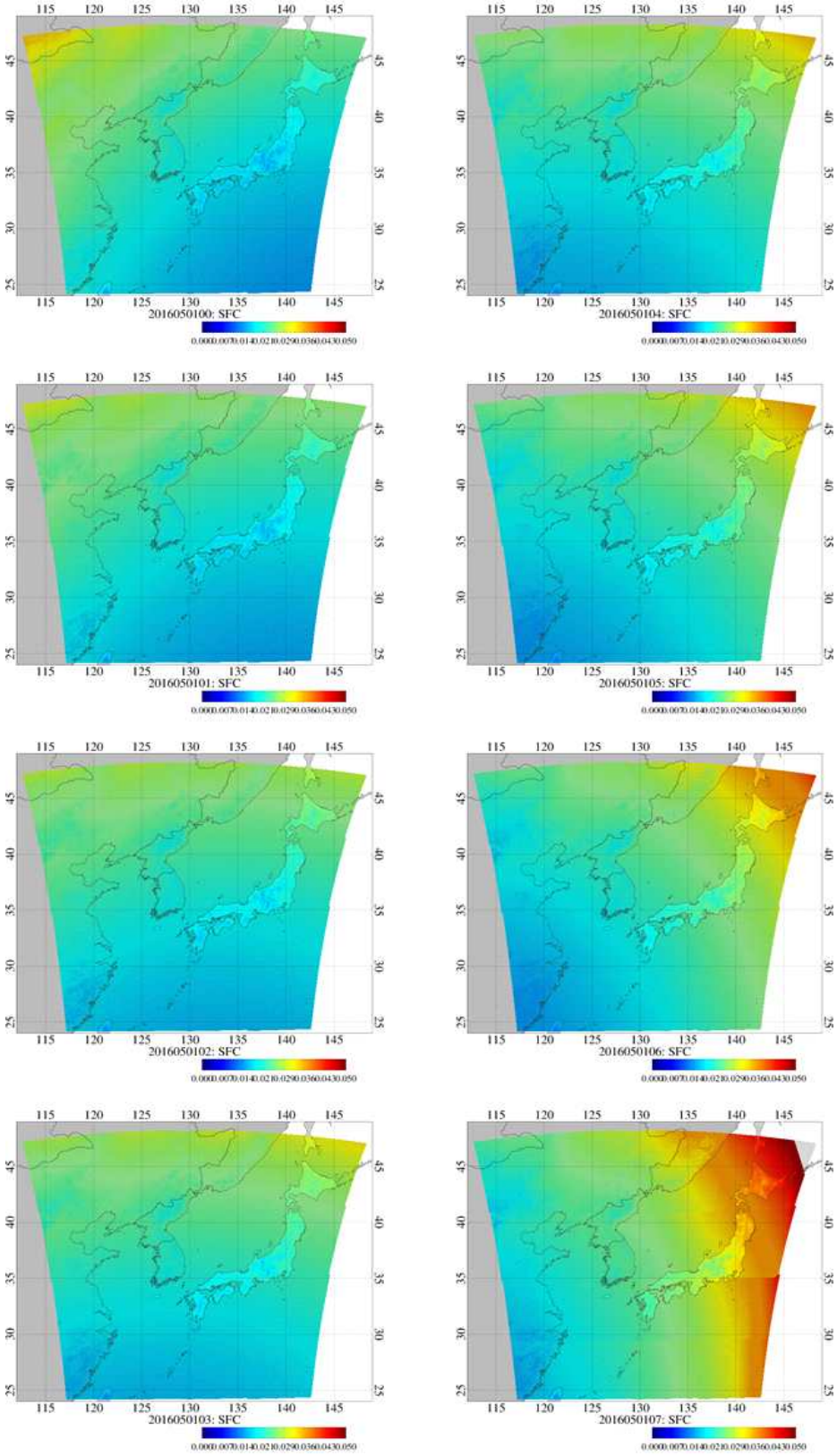


그림 19.33. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=6)

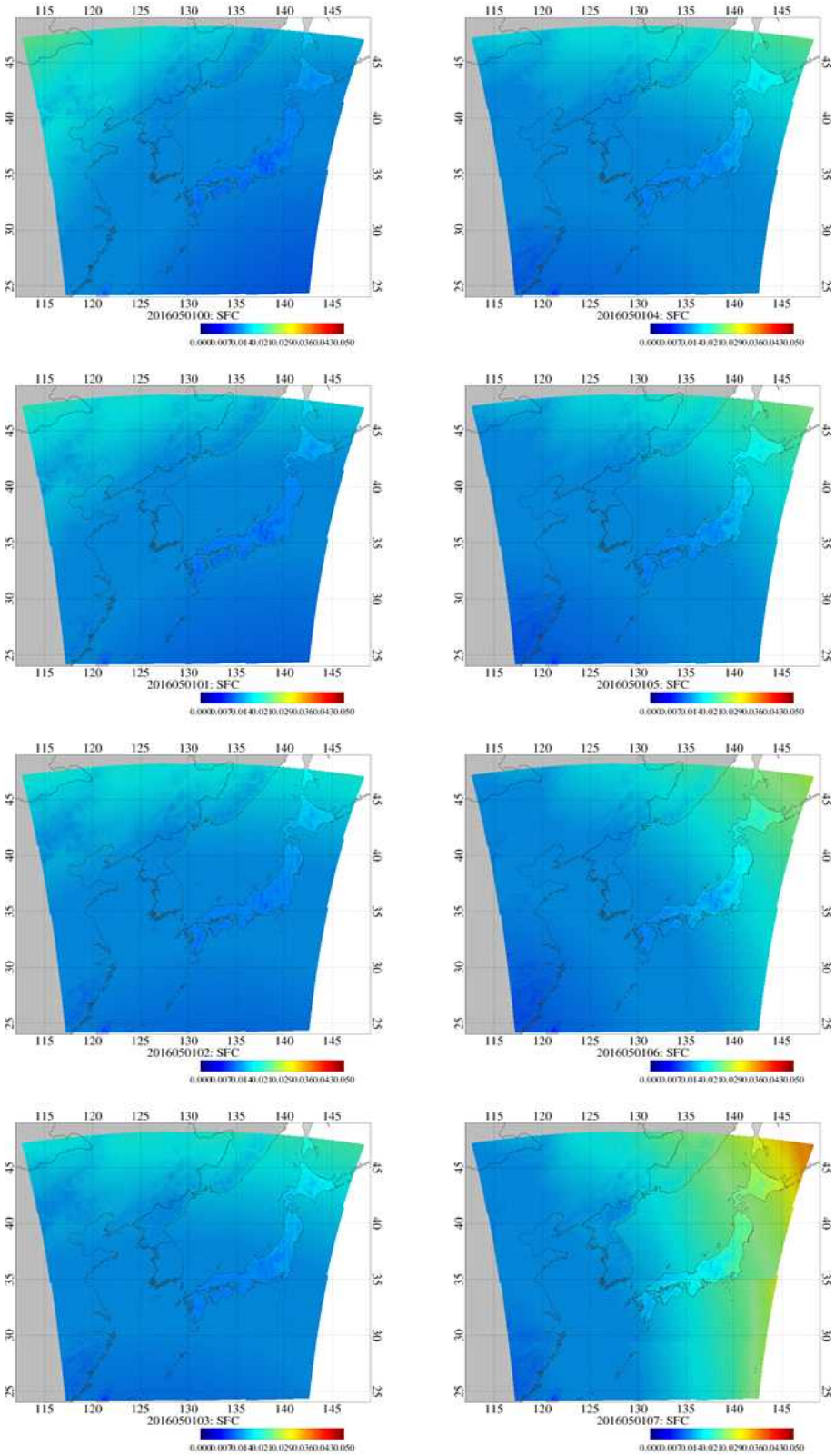


그림 19.34. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=7)

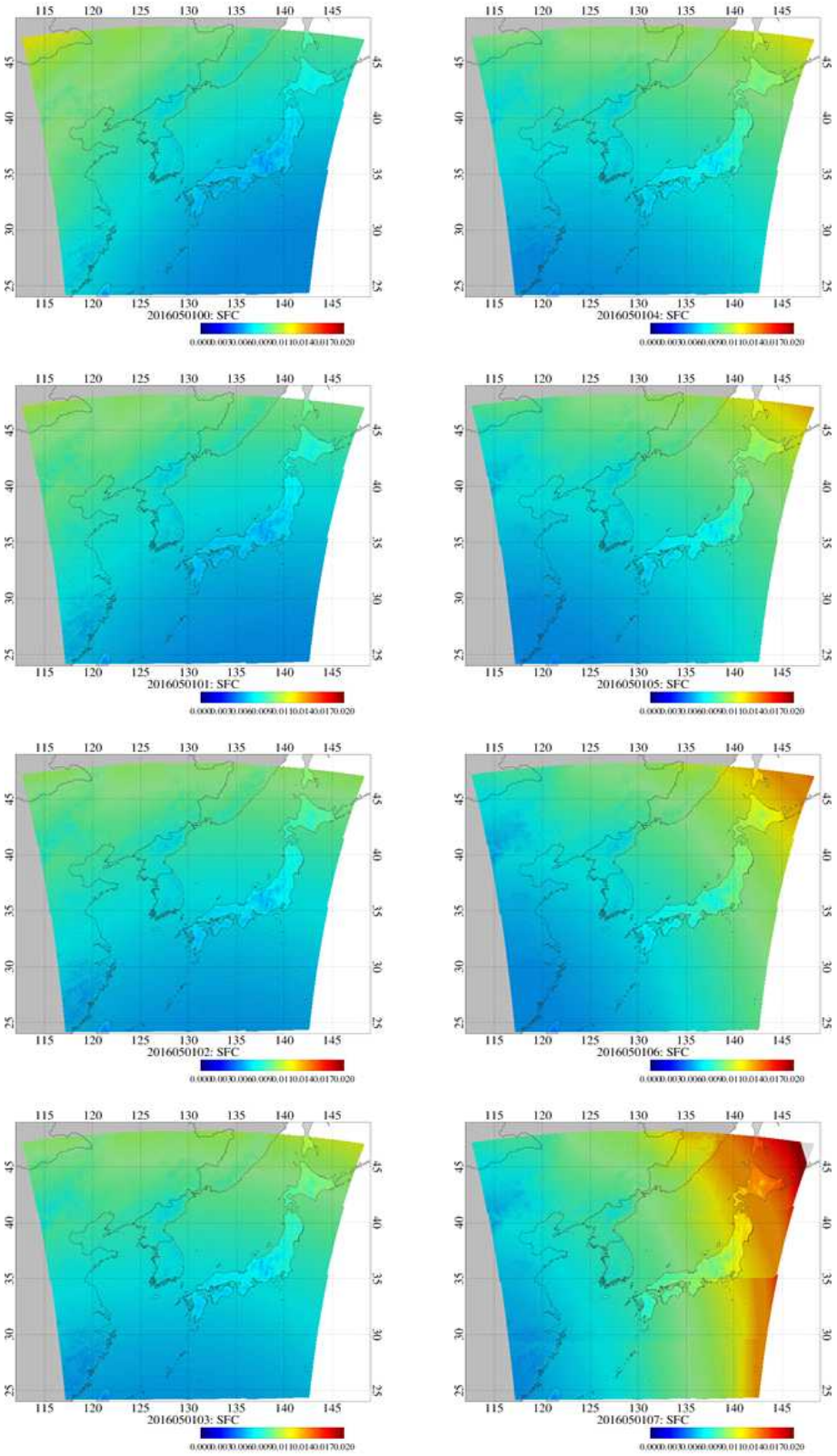


그림 19.35. 6SV 복사전달 모델로 계산된 GOCI 8개 채널별 Rayleigh 산란에 의한 반사도(Band=7)

다) 타 위성자료

현재 이용 가능한 미량기체 자료는 OMI L3 NO2와 O3자료기 대표적이다. GOCI 관측영역에서 이들 미량기체의 농도는 타 지역에 비하여 상대적으로 높게 나타나고 있으므로(그림 19.36, 19.37 참조) 반사도에 미치는 영향을 보정해야한다. 그러나 현재 OMI 와같은 저궤도 위성관측자료는 하루1회 제공되므로 실시간GOCI-II 자료처리에 사용하기엔 제약이 따른다.

따라서, 실시간 자료제공이 가능한 경우에는 OMI와 같은 위성 관측자료를 사용하고, 불가능한 경우에는 기후학적 자료를 사용한다.

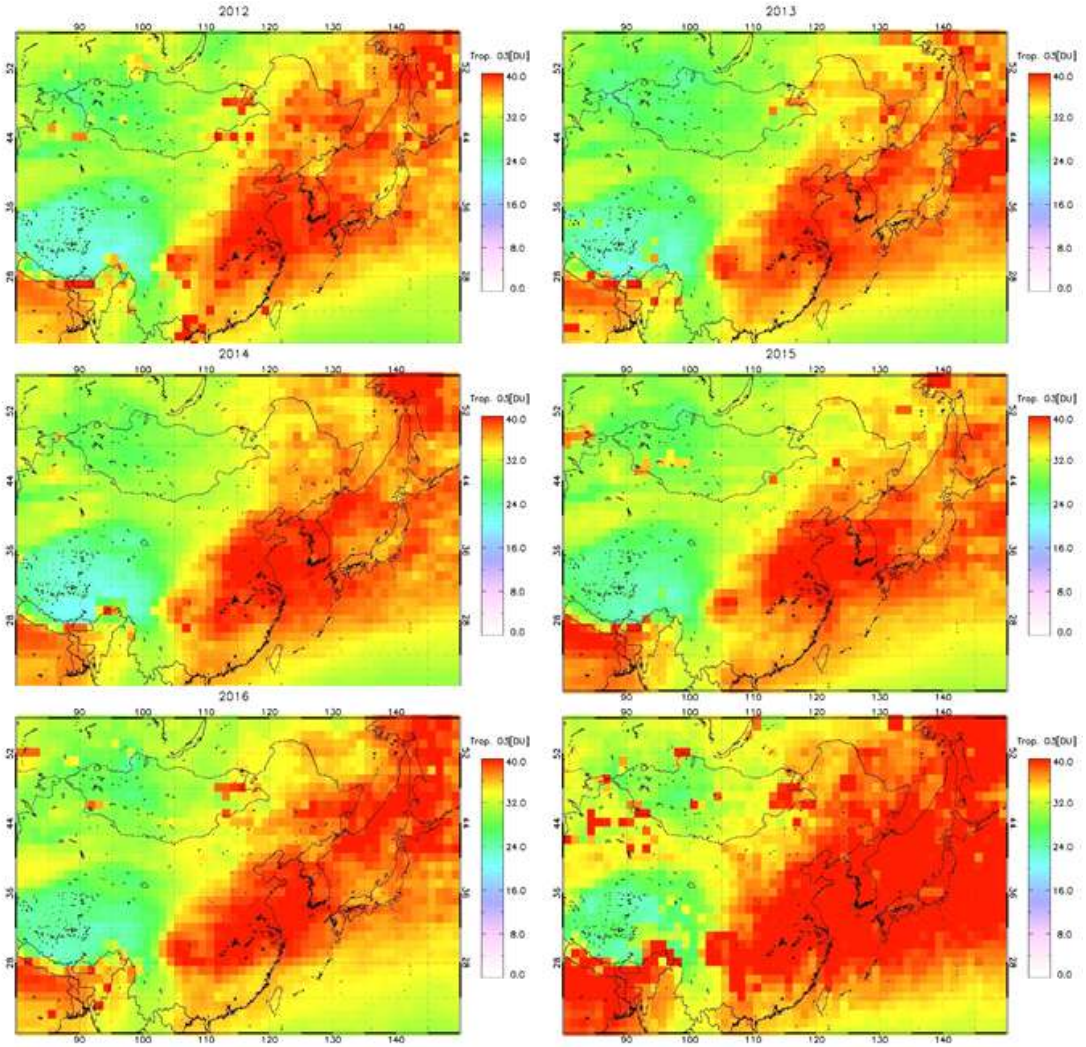


그림 19.36. 최근 6년간 (2012년-2017년) 연평균 OMI 대류권 O3 칼럼농도(DU) 분포도

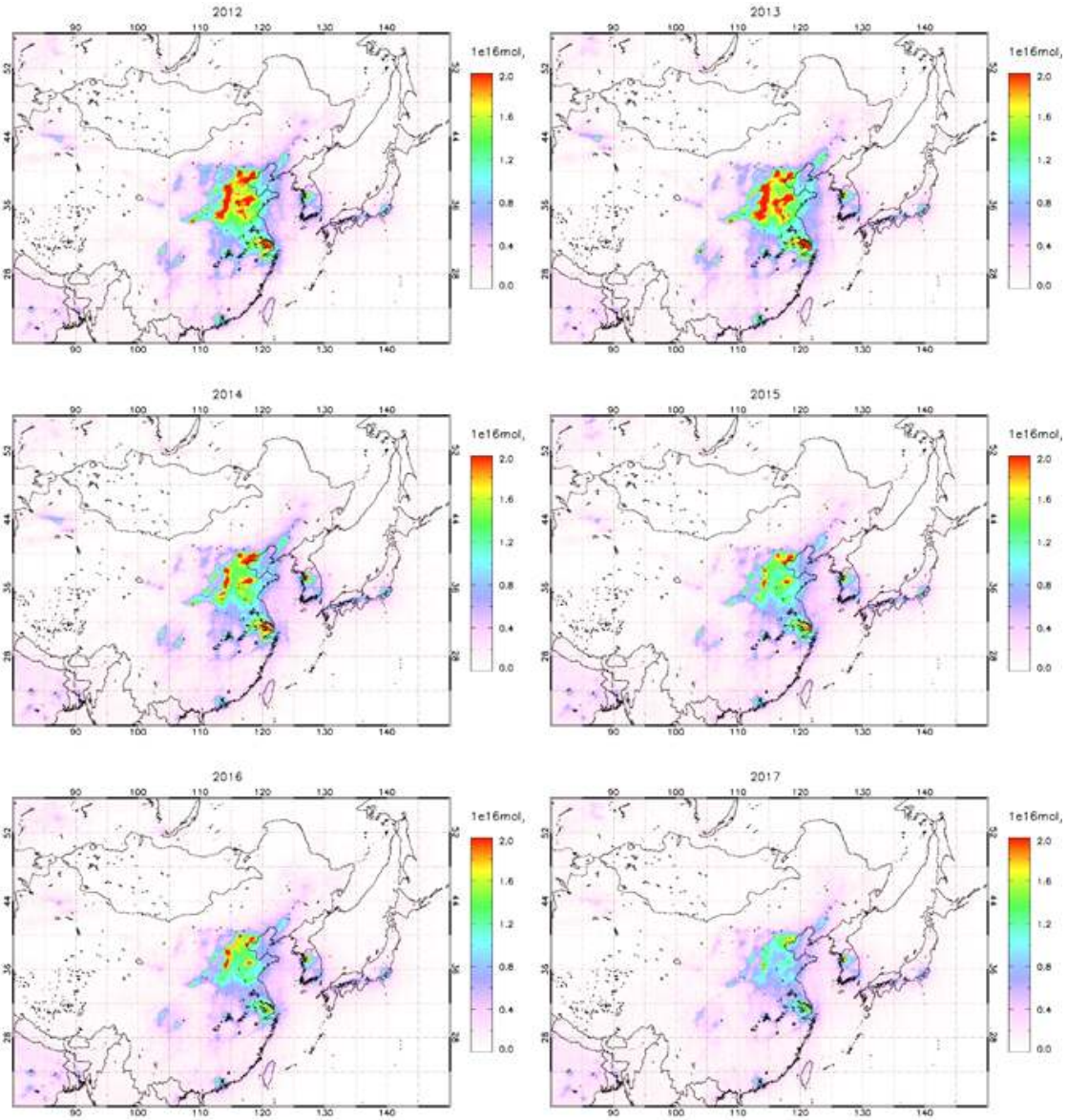


그림 19.37. 최근 6년간 (2012년-2017년) 연평균 OMI 대류권 NO2 칼럼농도(mol/cm2) 분포도

2) 산출 사례

가) 대기보정 반사도(ACR)

지표 반사도 산출 알고리즘에 있어 최초 단계인 대기보정 반사도 산출결과 사례는 그림 19.38~45와 같다. 여기에서는 2016년 5월 20일 사례에 대한 ACR 결과이며, GOCI 관측 시간별 대기투과도 값을 이용한 계산 및 대기투과도 보정이 각 영상 마다 적용된 결과이다. 또한, 구름이나 Sunglint, 총 반사도 값이 이상값(음의 값또는 1보다 큰 경우)을 가지는 경우도 제외되어 저장되므로 산출결과가 없는 화소 영역이 존재한다.

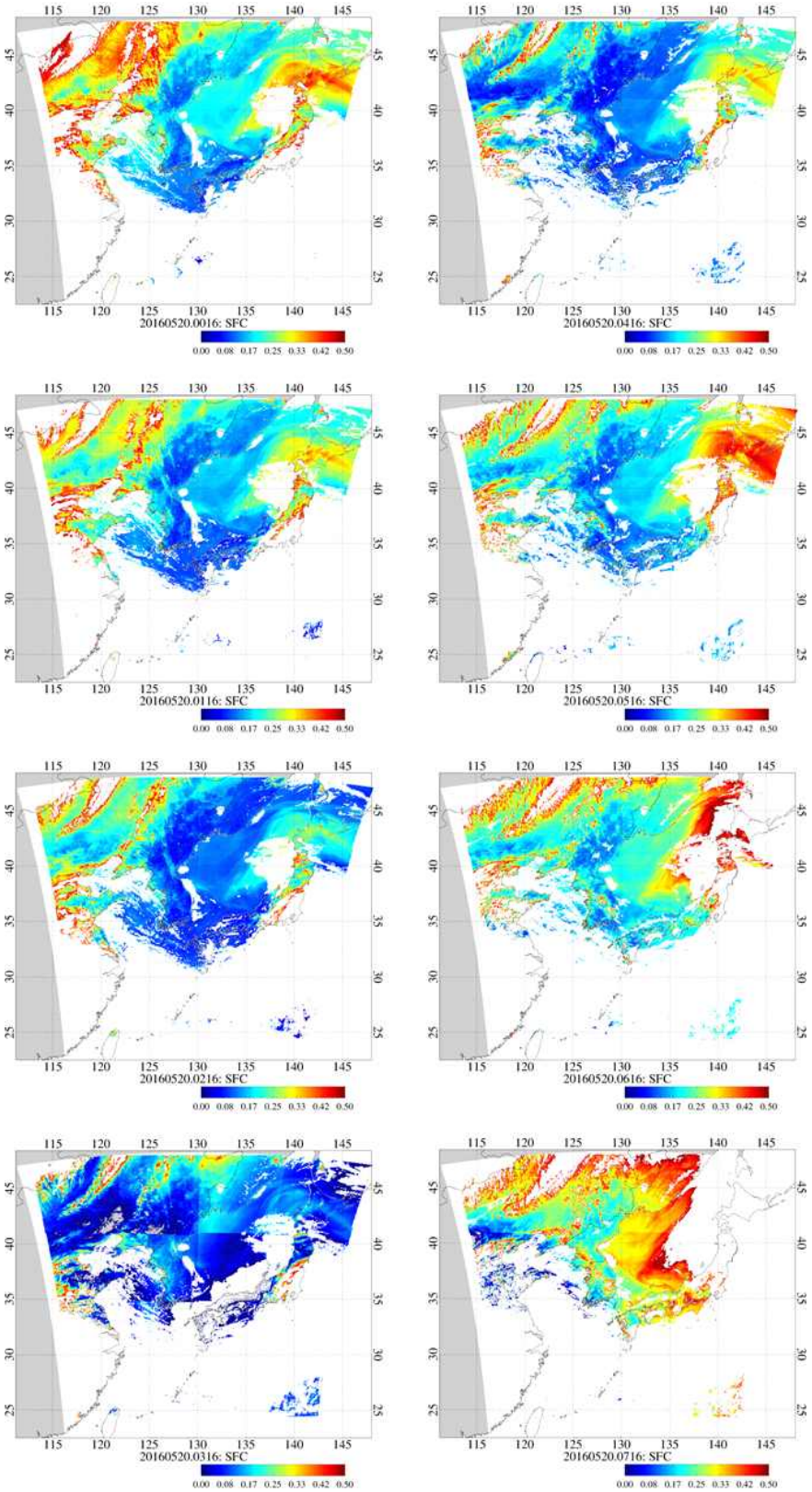


그림 19.38. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 20일) (band=1)

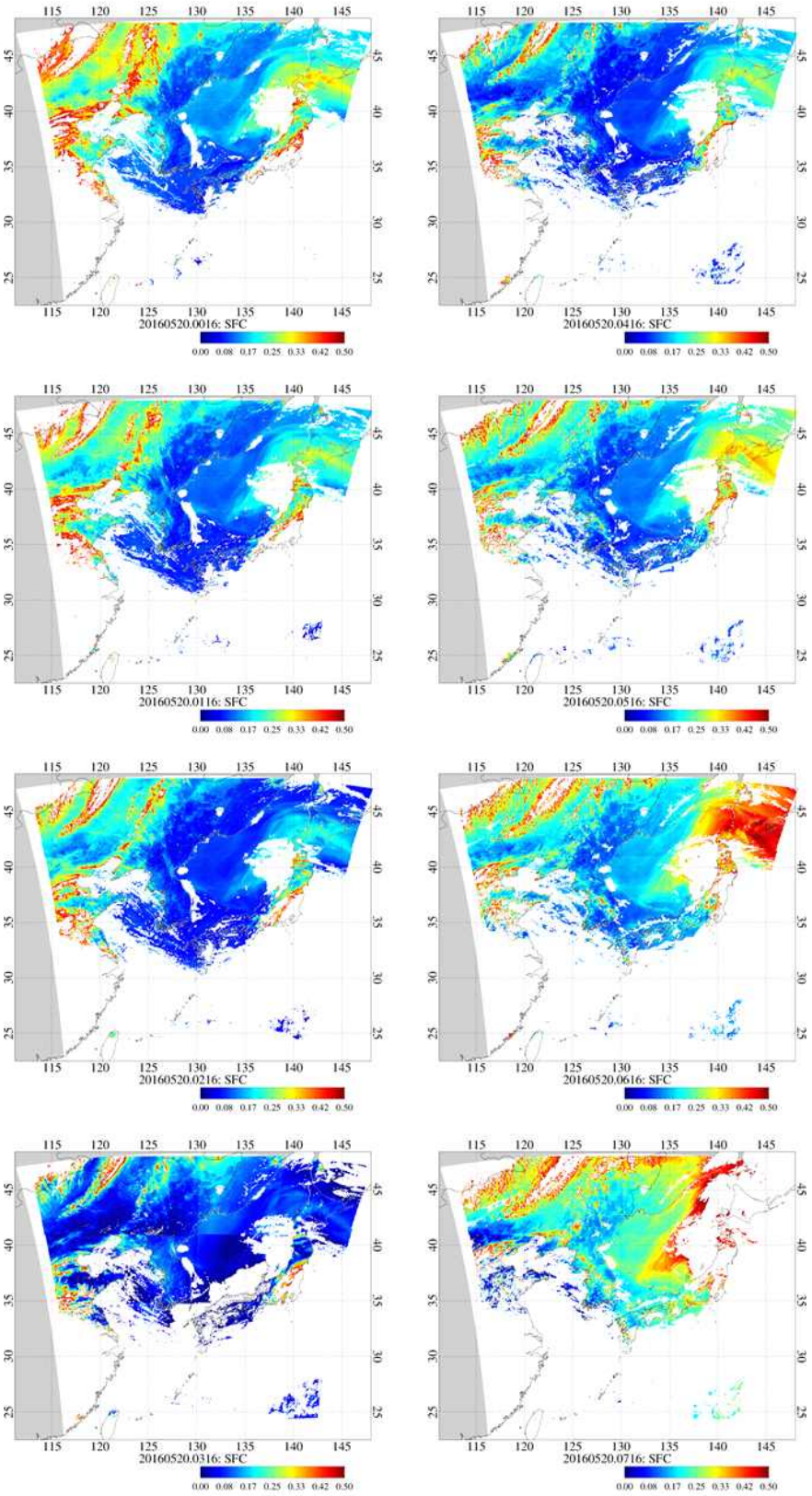


그림 19.39. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=2)

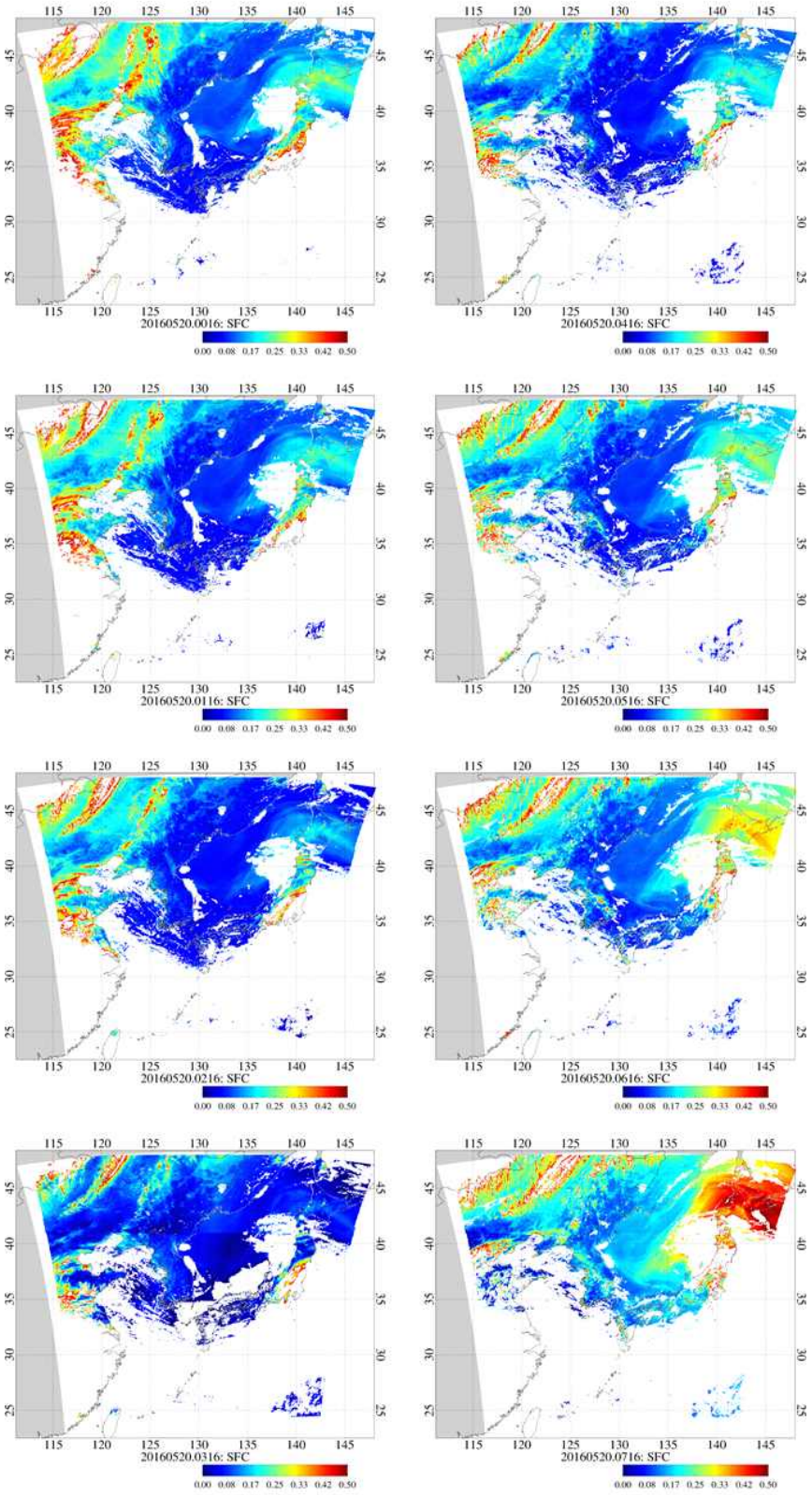


그림 19.40. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=3)

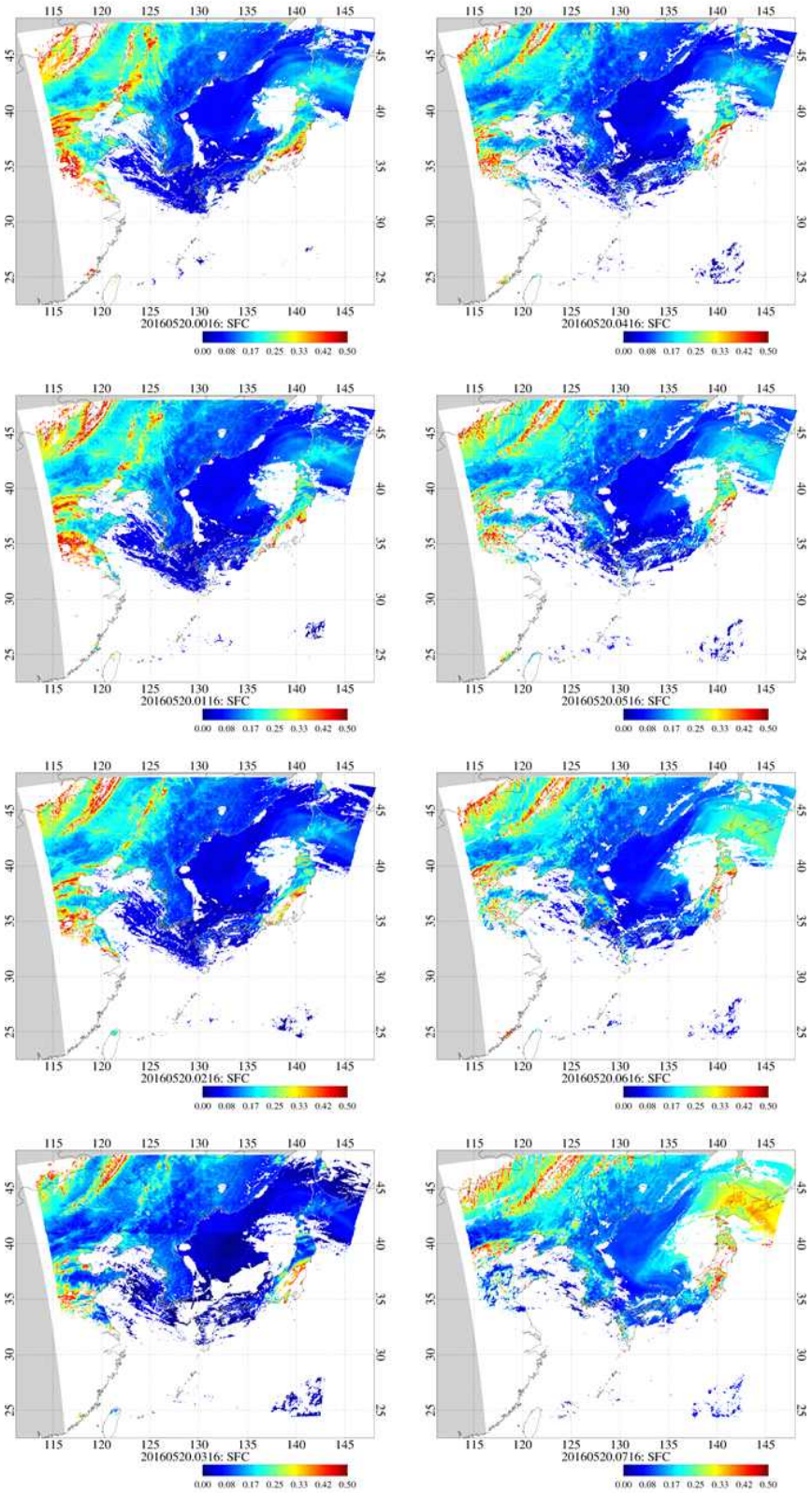


그림 19.41. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=4)

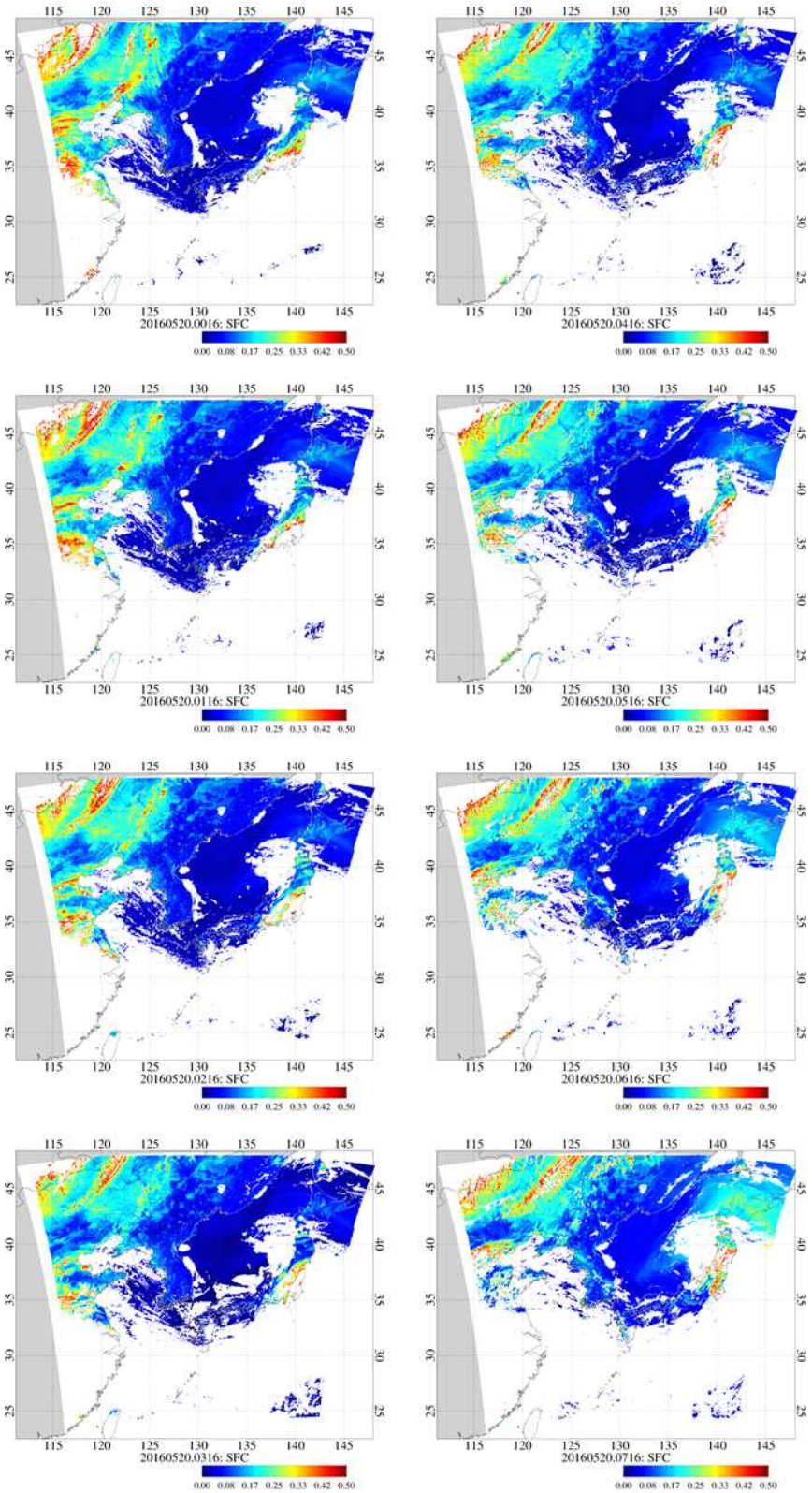


그림 19.42. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=5)

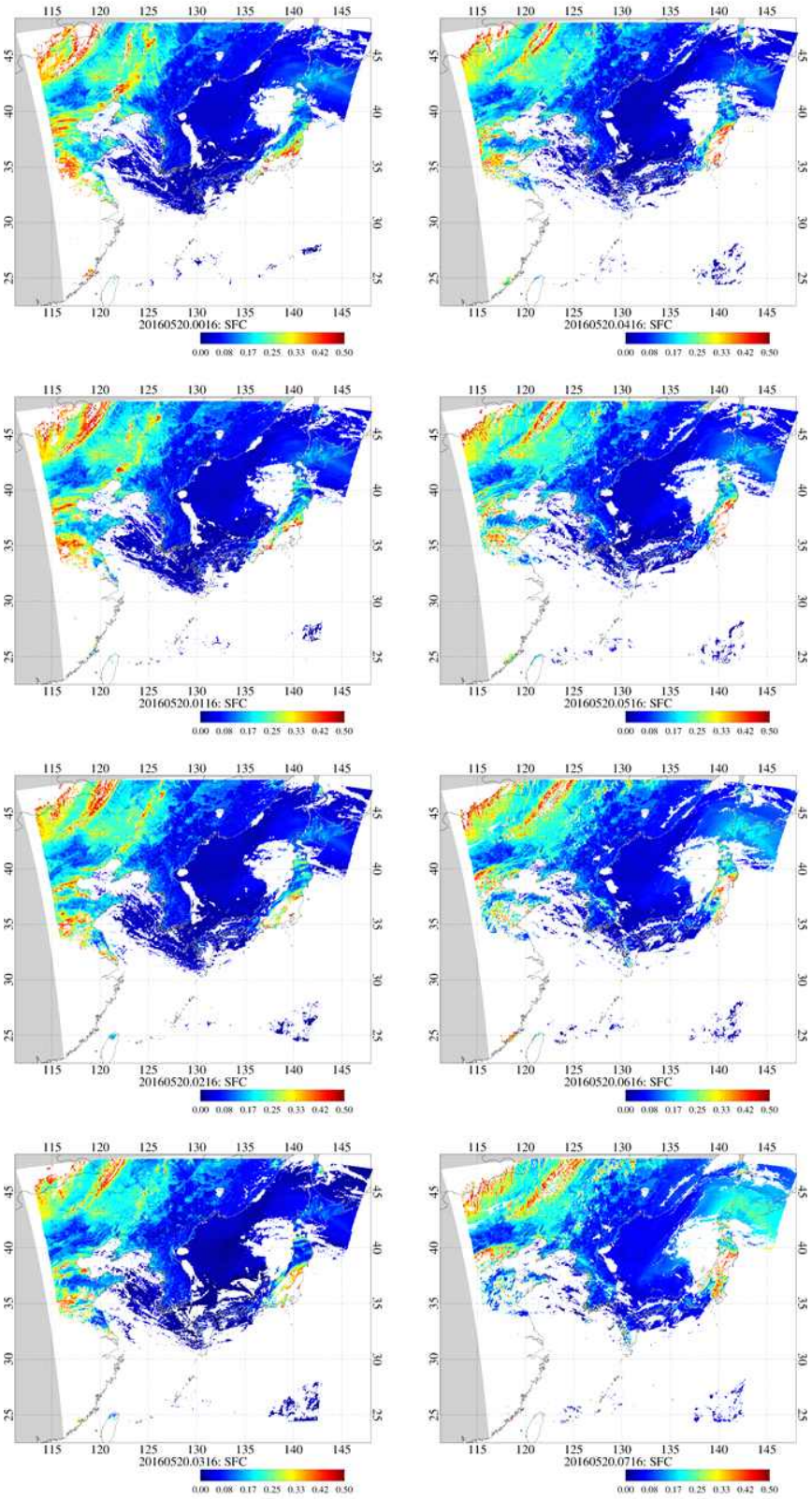


그림 19.43. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=6)

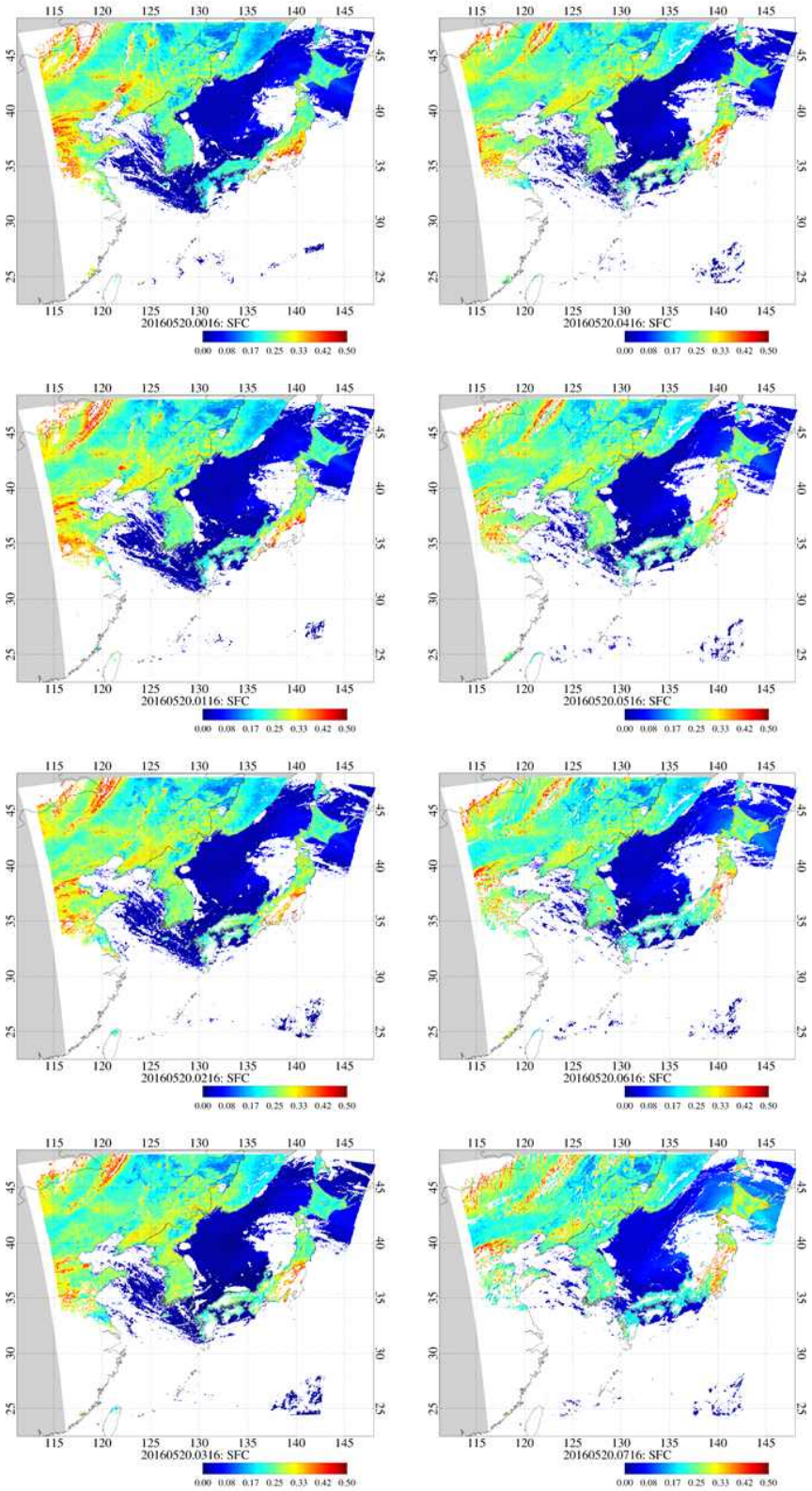


그림 19.44. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=7)

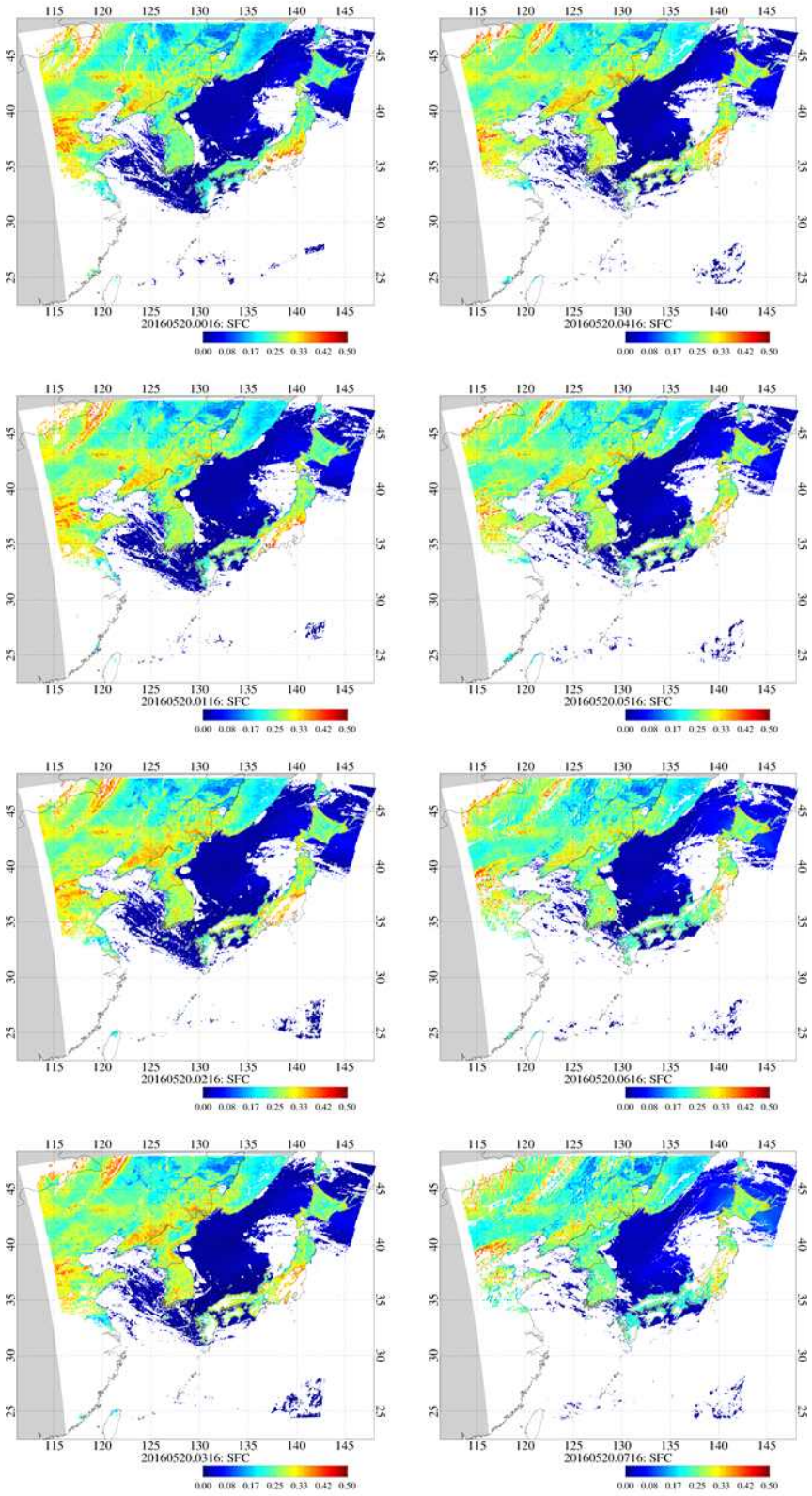


그림 19.45. GOCI 대기보정 반사도(ACR) 사례 (2016년 5월 1일) (band=8)

나) 지표 반사도(SRP)

이전 15일 동안의 대기보정된 반사도(ACR) 결과와 현재 관측결과와의 상호비교를 통하여 최종 산출물인 지표반사도(SRP)를 산출하였으며 산출결과 사례는 그림 19.46~53과 같다. 여기에서는 2016년 5월 20일 사례에 대한 SRP 결과이며, ACR 결과와는 다르게 구름이나 이상 반사도를 나타내는 영역이 존재하더라도 과거의 청천화소가 존재하는 경우 유효 자료로 활용되어 합성된 결과가 저장되므로 SRP 의 결과는 보다 화소값이 많아지게 되는 장점이 있다.

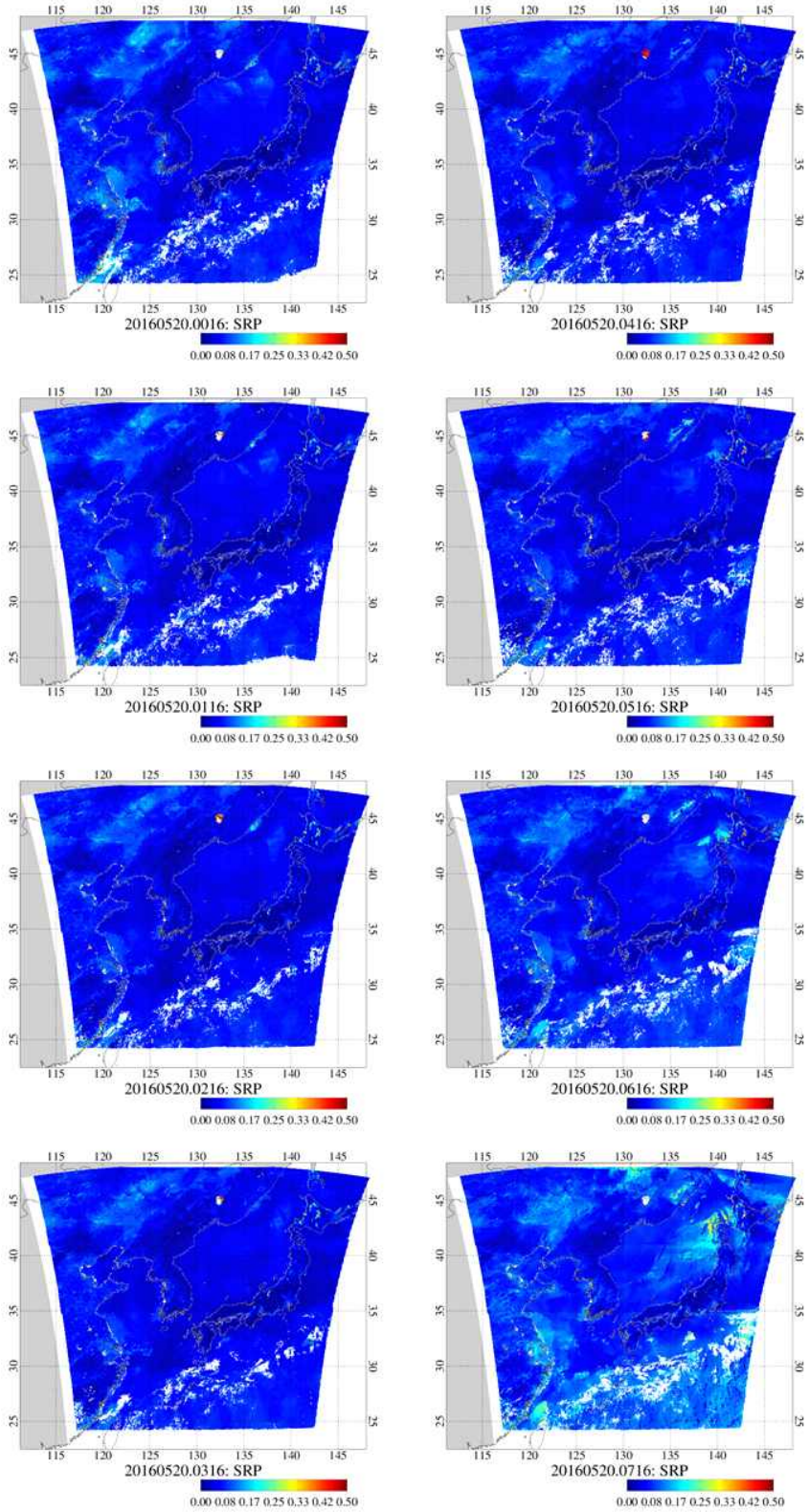


그림 19.46. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=1)

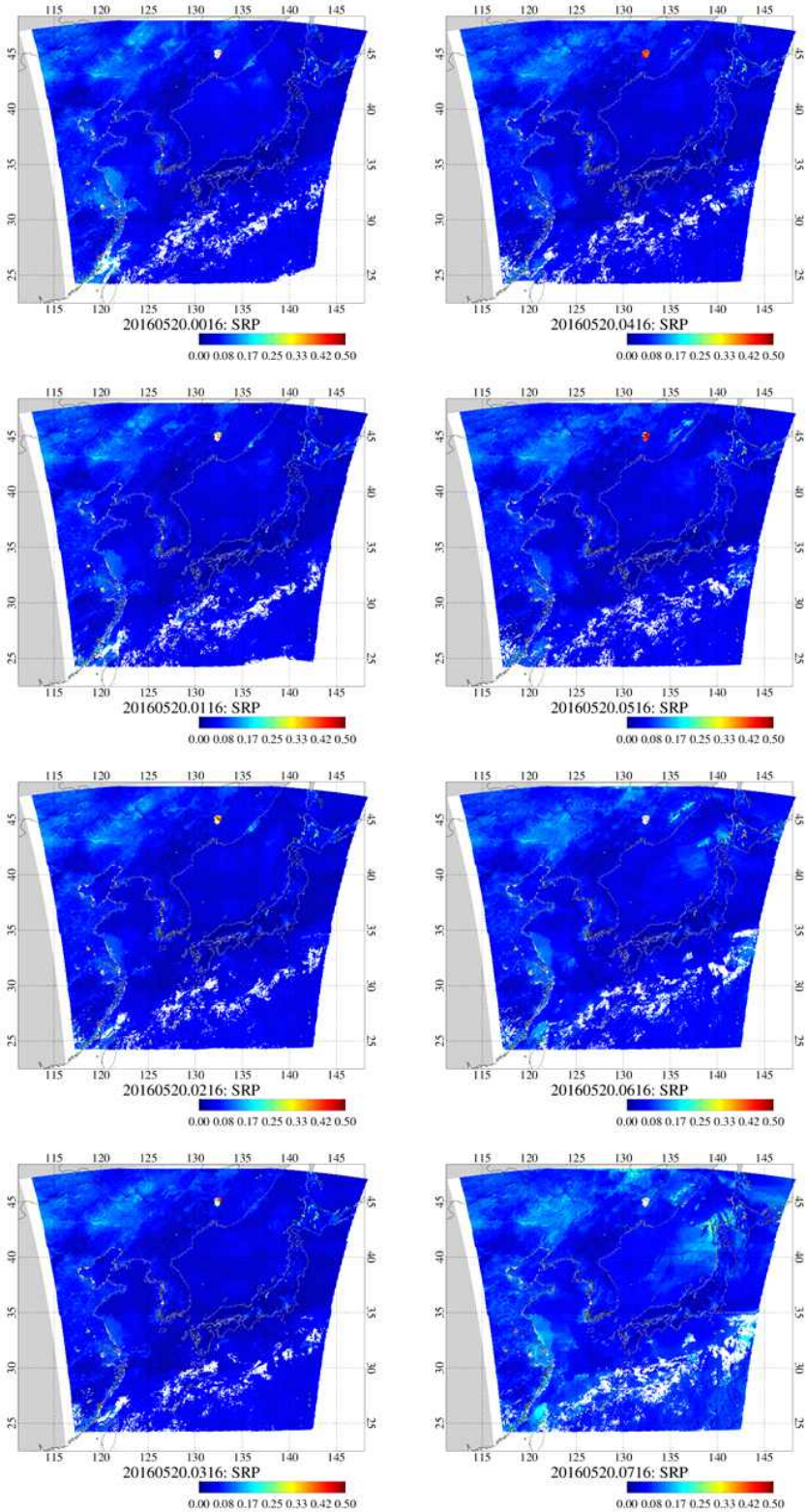


그림 19.47. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=2)

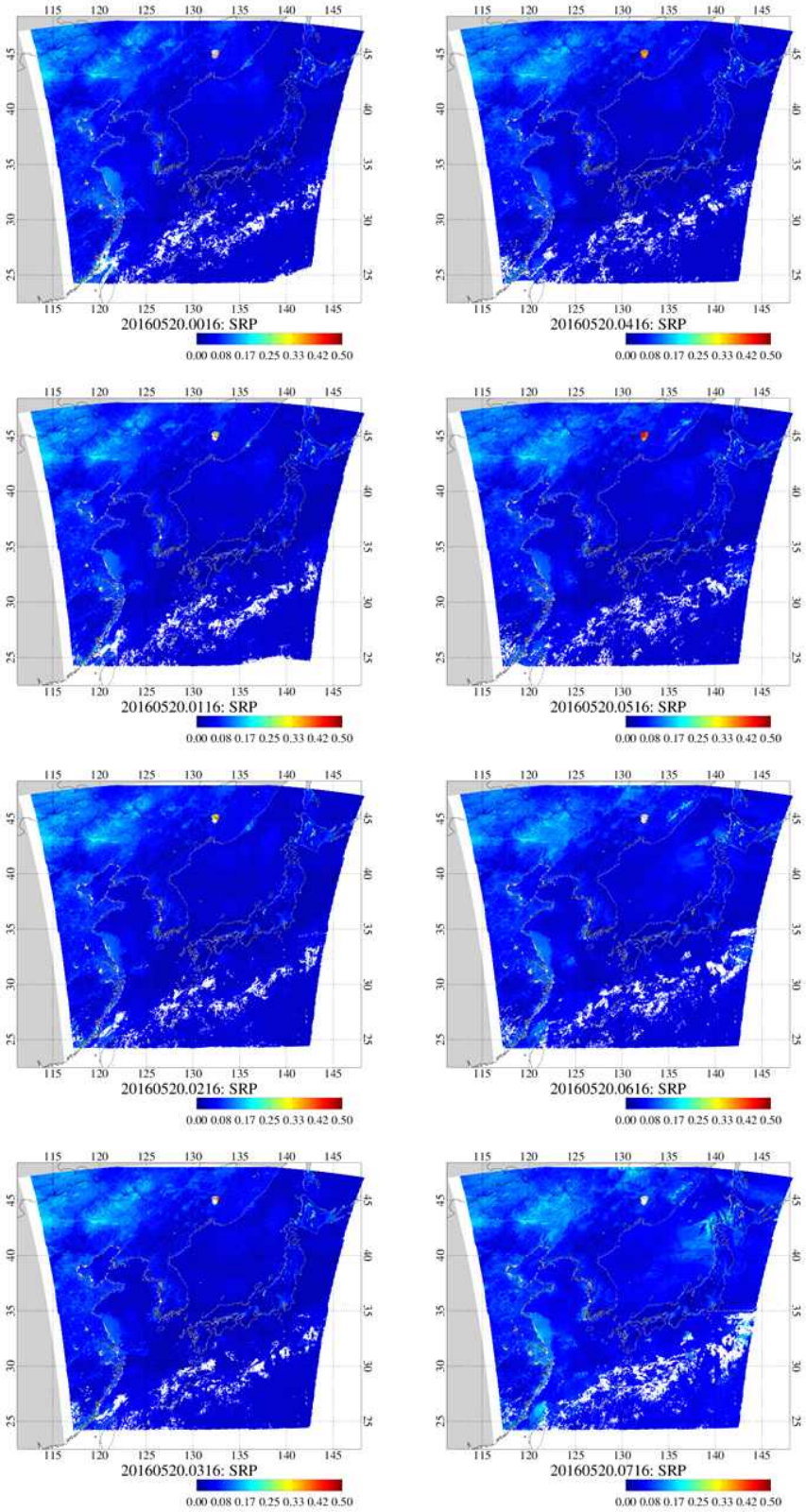


그림 19.48. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=3)

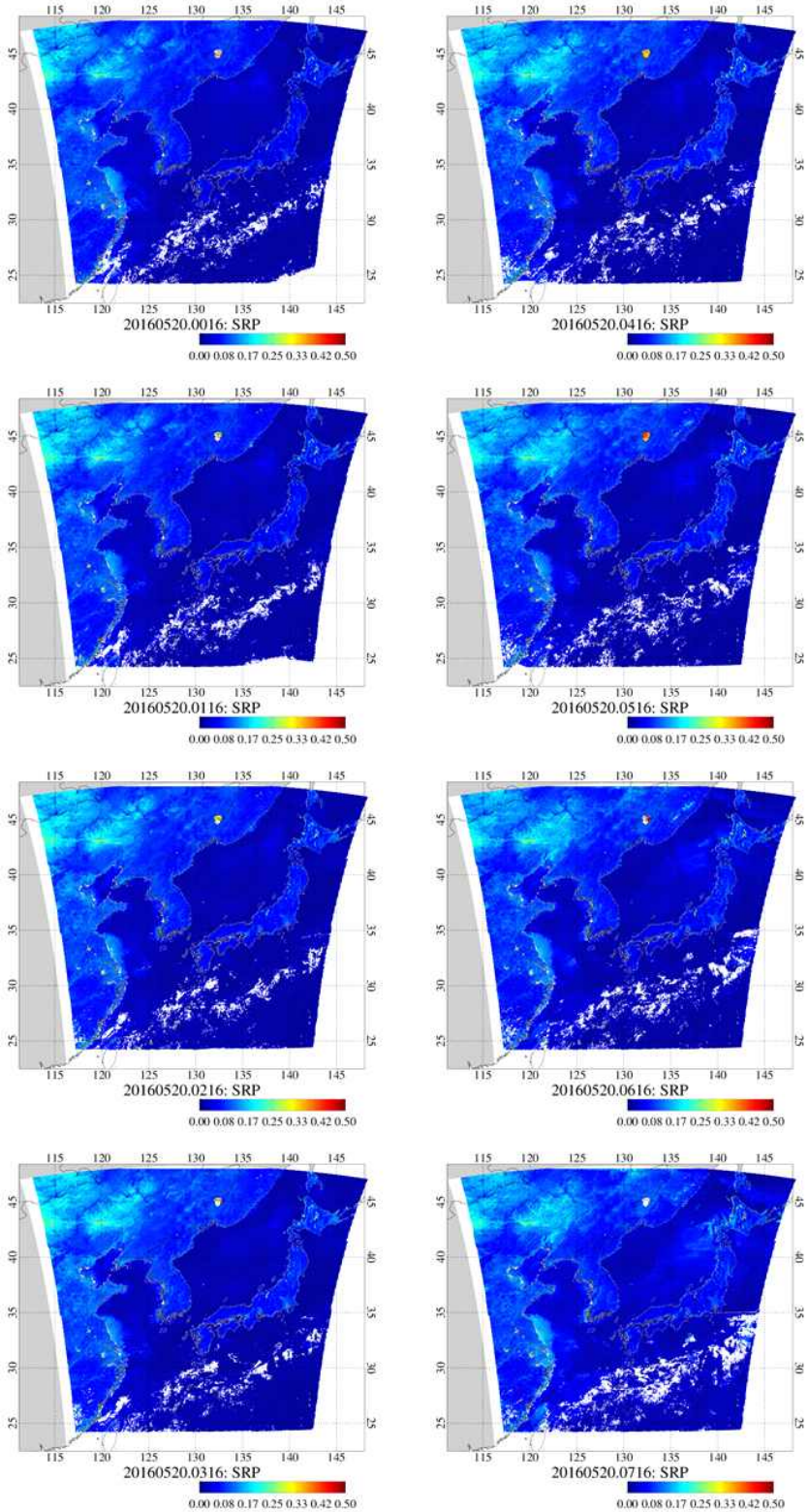


그림 19.49. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일)
(band=4)

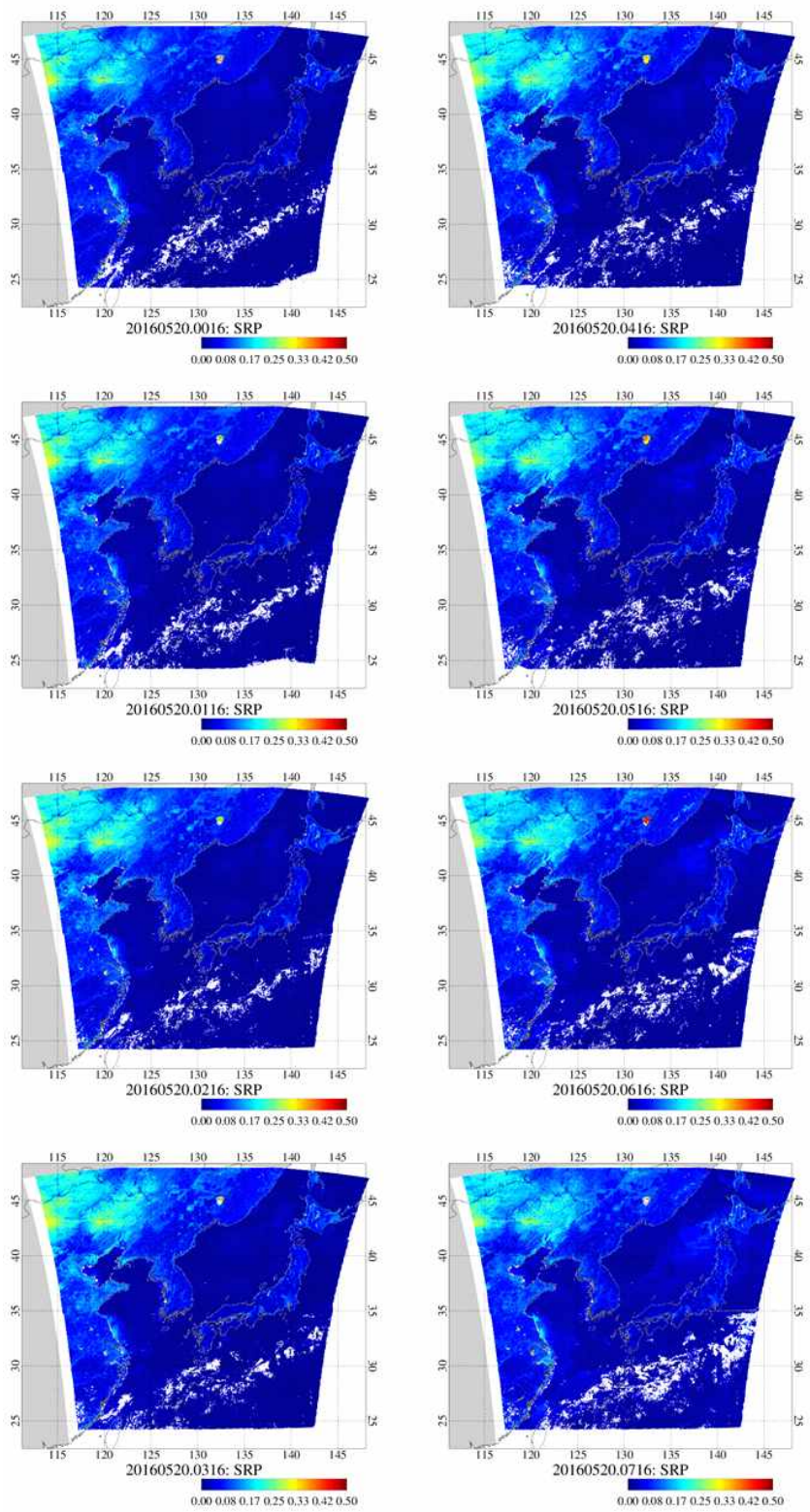


그림 19.50. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=5)

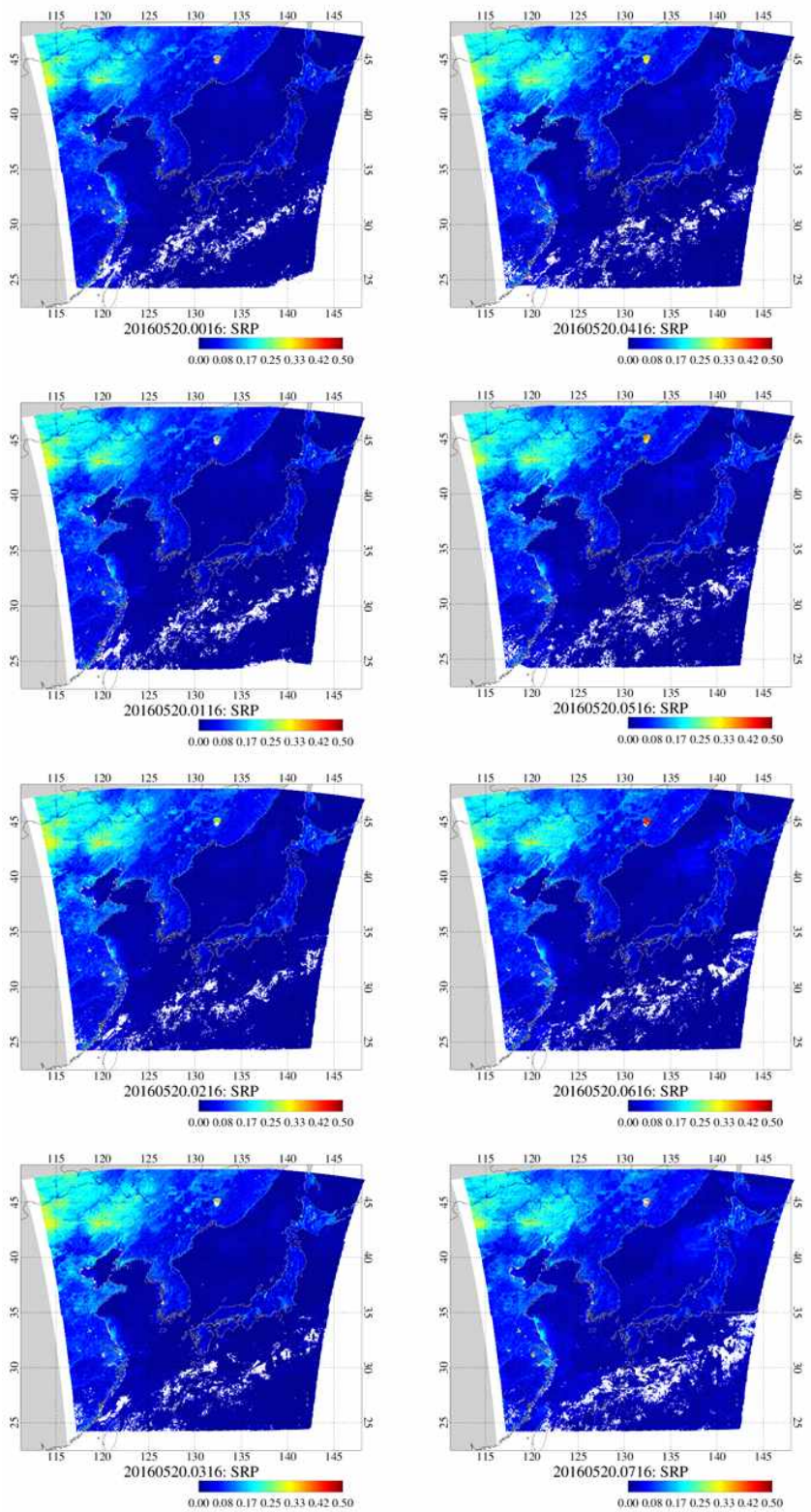


그림 19.51. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=6)

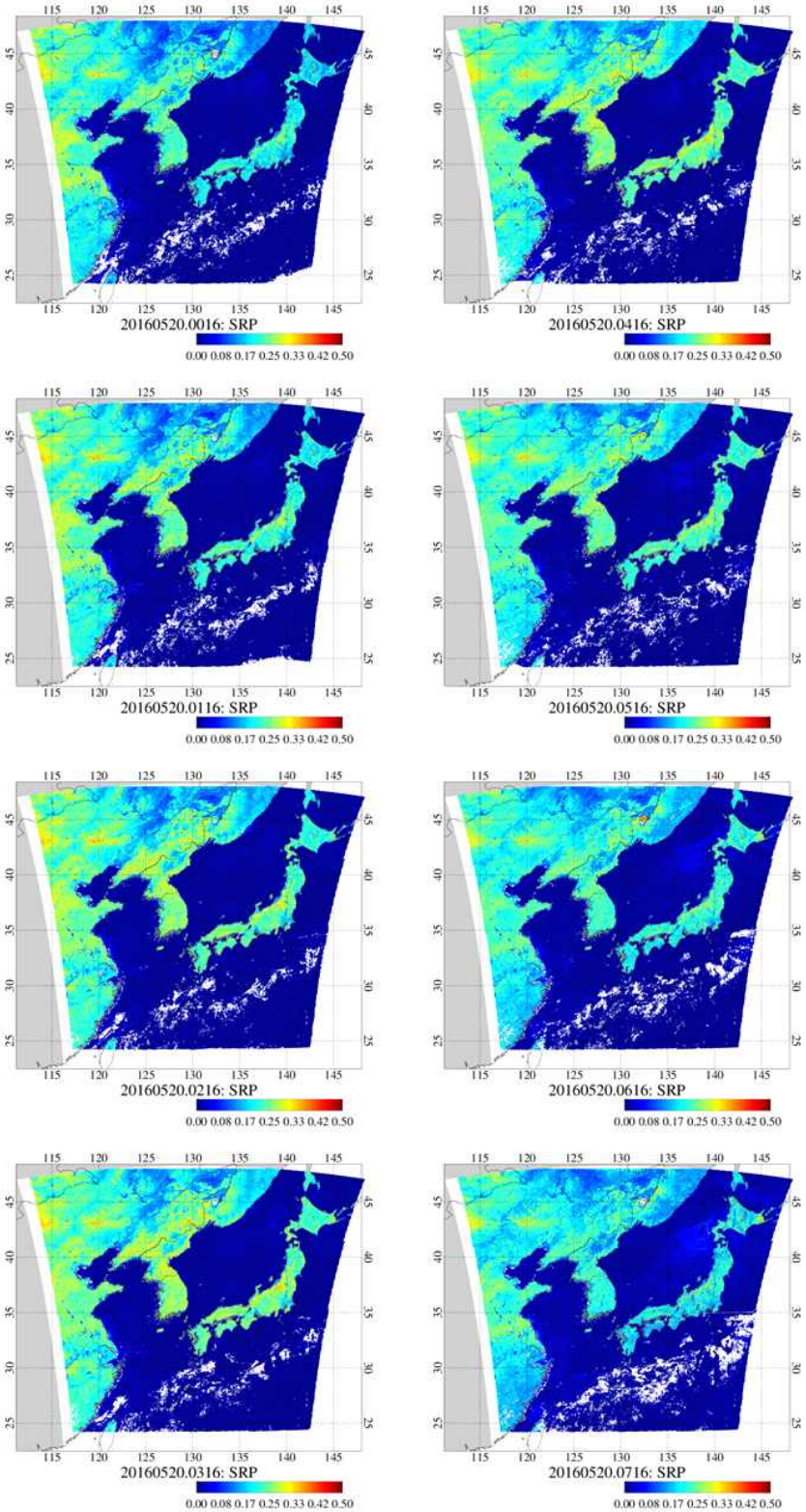


그림 19.52. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=7)

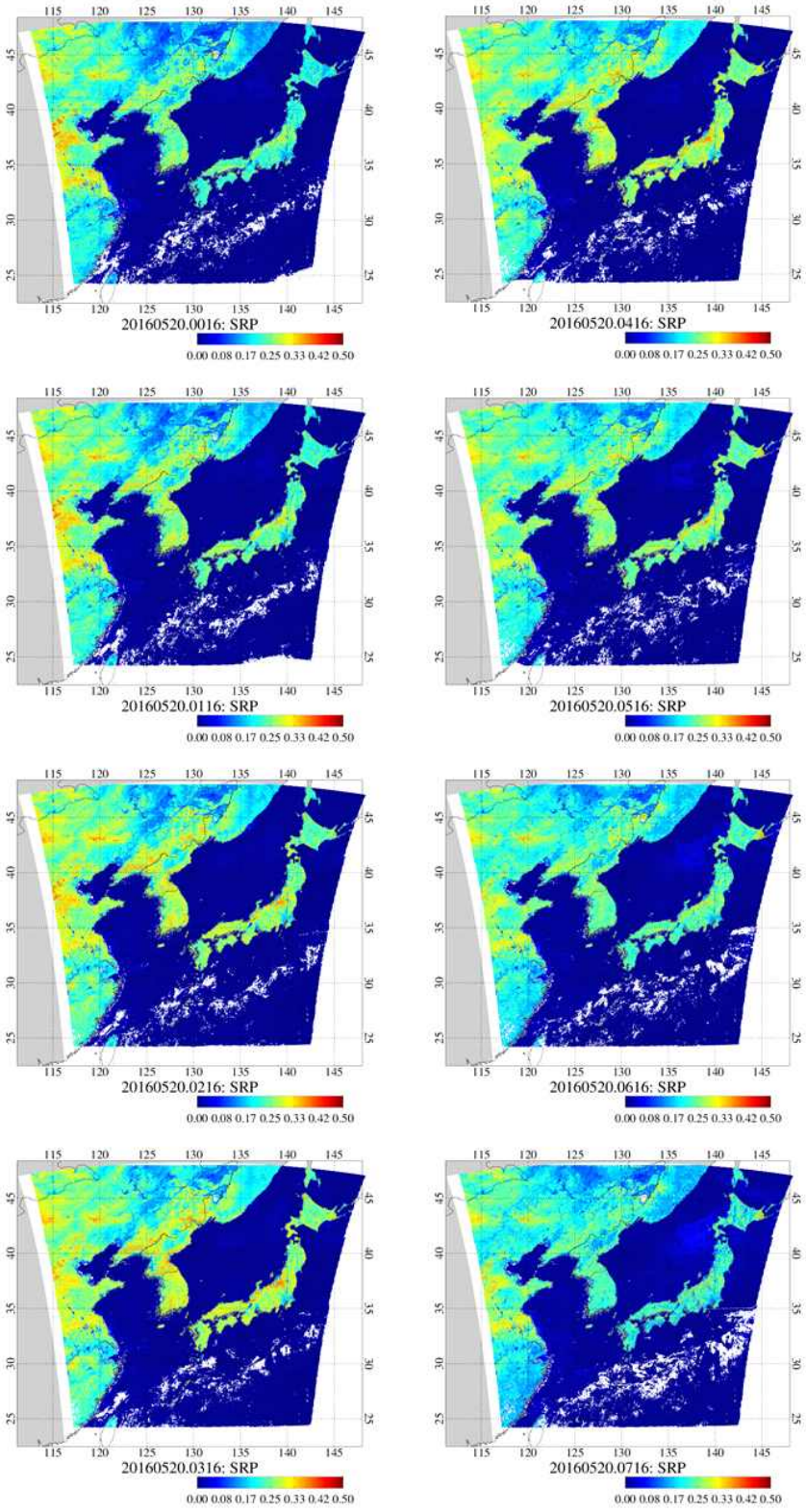


그림 19.53. GOCI 지표 반사도(SRP) 사례 (2016년 5월 20일) (band=8)

다) RGB 칼라합성 영상

ACR과 SRP 자료를 이용하여 컬러 RGB 합성 영상을 작성하여 두 자료의 특성을 비교하였다. RGB 영상 작성을 위하여 부가적으로 필요한 자료는 GOCI 의 기하 정보이며 자료처리과정에서는 GOCI의 관측 시간과 보조 자료인 각 픽셀별 위경도 자료를 이용하여 각 픽셀별 태양 기하정보(태양 천정각, 태양 방위각, 태양-지구의 거리)를 계산하고 각 화소별 반사도와 기하정보를 이용하여 사용자 요구사항에 맞추어 투영된 결과물을 출력하게 된다. 디스플레이 화면에 표시되는 영상정보 표출은 실수형 반사도 값으로부터 RGB 밝기로 전환한 결과이므로, 반사도 값을 24비트 RGB 컬러 합성 영상으로 변환하였다. 그림 19.54-55은 ACR과 SCR의 칼라합성 영상 결과 사례로서, 단순히 대기보정만 한 결과와 이를 합성하여 일별 지표반사도 값을 산출한 결과의 영상 품질 및 활용도에 관한 시각적인 비교가 가능하다.

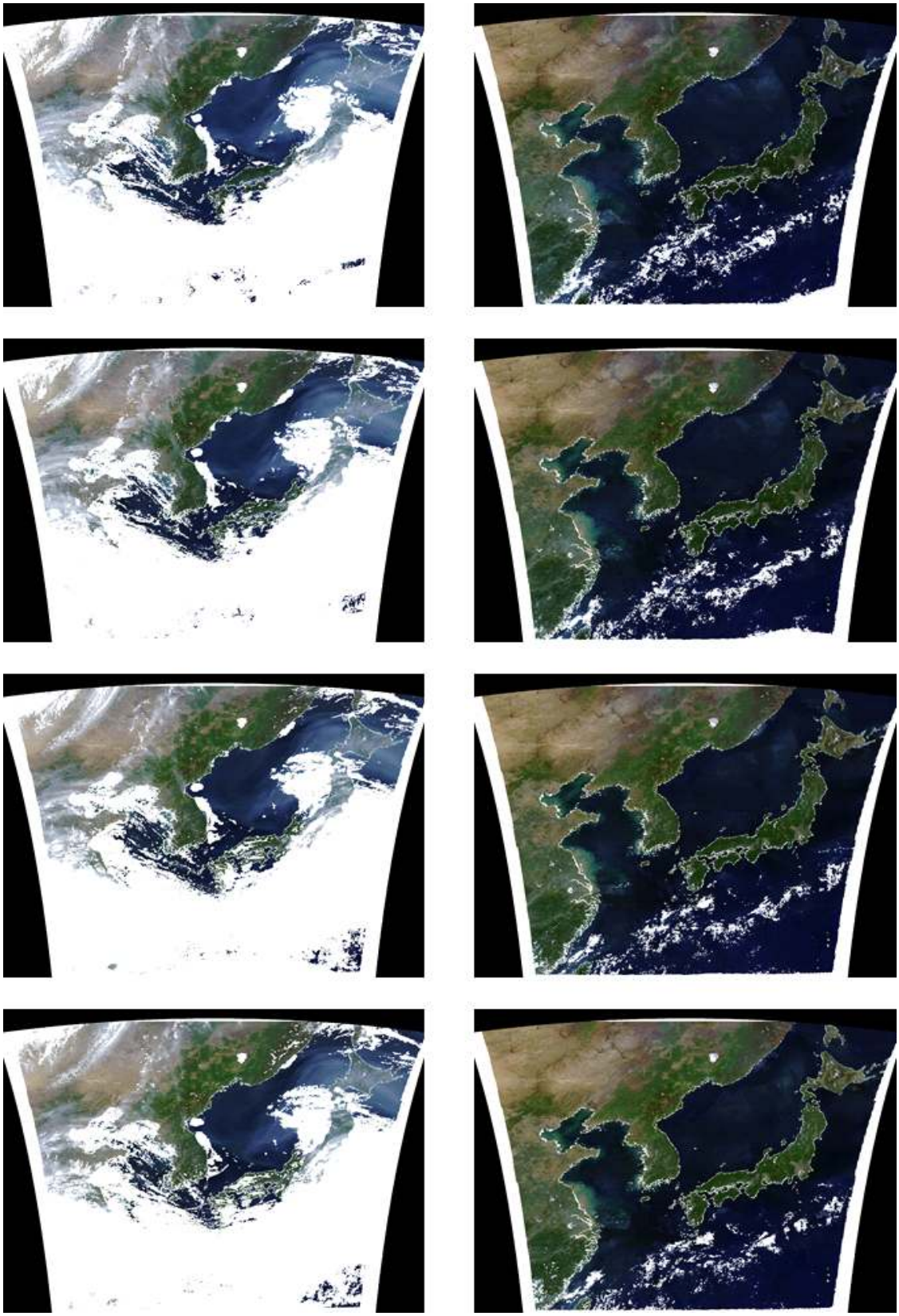


그림 19.54. GOCI ACR(좌)과 SRP(우)를 이용한 칼라합성영상 사례
(2016년 5월 20일)(00～03시)

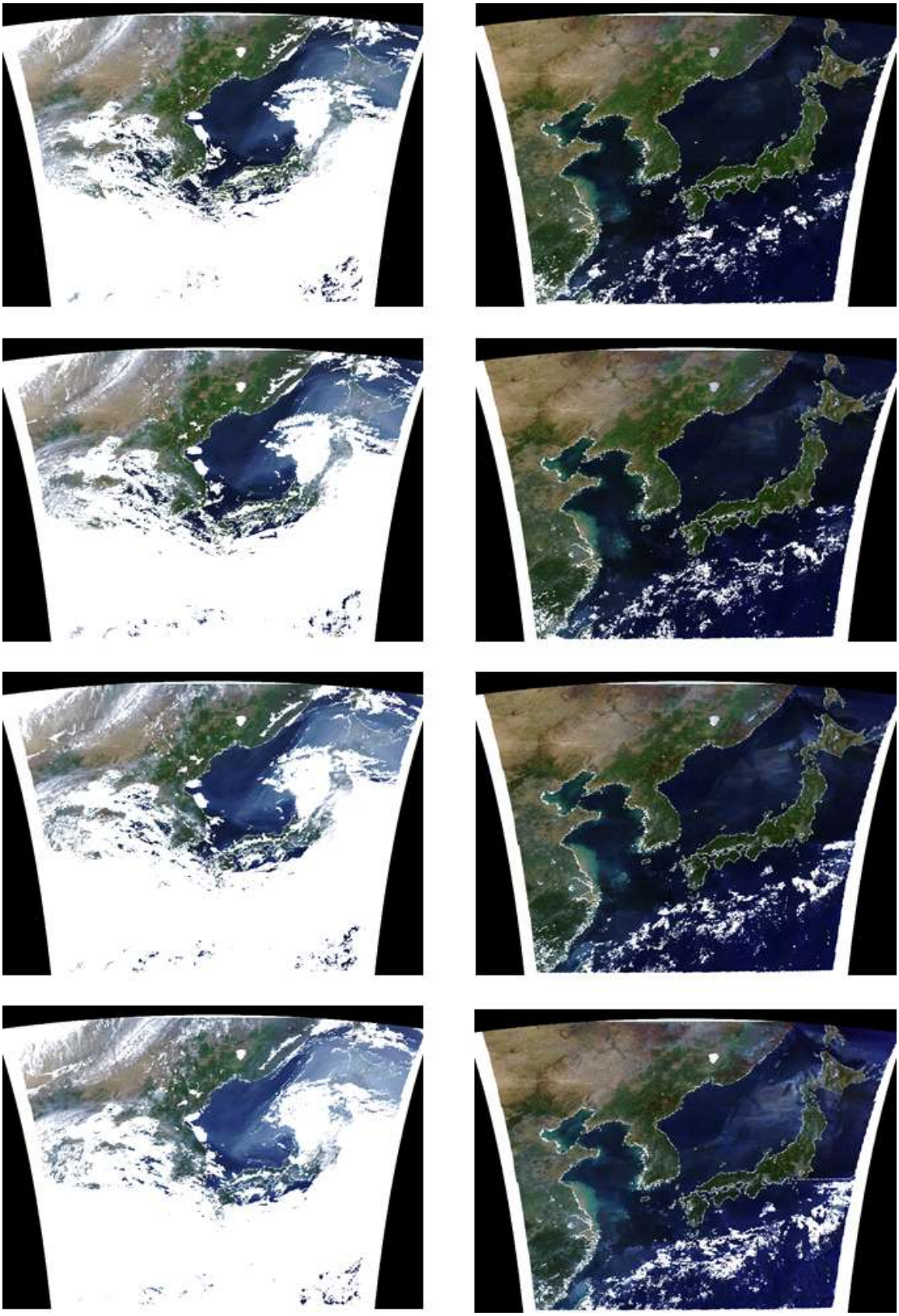


그림 19.55. GOCI ACR(좌)과 SRP(우)를 이용한 칼라합성영상 사례
(2016년 5월 20일)(04～07시)

3) 검증 자료

지표반사도 산출물의 정확도 검증을 위한 정량적인 방법은 검증 지수(validation index)를 설정하여 화소별 검증결과를 수치적으로 요약한 정량적인 지수값을 통계적으로 계산하였다. 검증대상이 되는 변수는 본 연구에서 산출한 GOCI SRP 산출물이며, 검증을 위한 기준 자료는 공개된 표준 산출물로서 NASA에서 현업용으로 제공되는 MODIS 지표반사도 산출물 자료를 사용한다. 정지궤도 위성과 저궤도 위성의 동일 영역에 대한 직접비교는 어렵지만, GOCI 관측 시간의 30분 이내에 MODIS가 통과하는 시간의 관측자료와의 비교를 통하여 통계적인 검증량 RMSE(Root Mean Squareroot Error), MD(Mean Differnce)을 계산하였다.

MODIS 지표반사도 산출물은 구름의 영향이 없는(또는 최소화된) 화소에 대한 지표반사도 산출결과로서, 오랜 시간동안 산출 알고리즘과 분석자료에 대한 QA/QC과정을 통해 지표 반사도 산출 정확도를 높인 대표적인 자료이므로 검증자료로서의 사용 가능한 자료이다. 만일, 특정 지점에서의 정확도 높은 지표반사도 산출 결과가 생산된다면, 위성 영상 자료의 검· 보정을 위한 방법론을 적용시킬 수 있을 것이며, 상기의 검증 및 검증결과에 대한 통계분석 결과를 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

그림 19.56는 GOCI와 MODIS를 이용한 지표반사도 산출 결과에 대한 직접 비교결과로서 RMSE=0.023, MD=0.03 정도의 수치를 나타내었다. 두 산출물의 차이가 발생하는 원인은 알고리즘의 차이가 직접적인 원인이 될 수 있으며, 두 위성이 관측하는 화소에 대한 특성(면적 및 센서의 관측 방향, 광 투과 경로)의 차이를 다룰 수 있다.

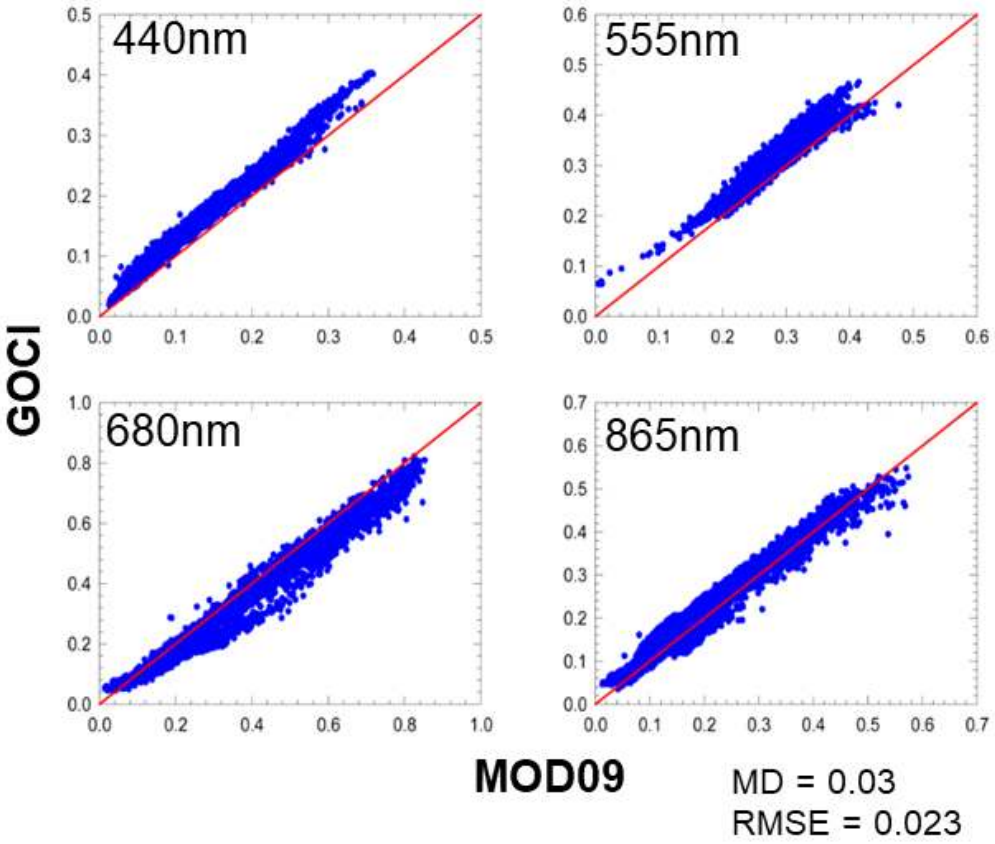


그림 19.56. GOCI와 MODIS 비교 사례

표 19.17. GOCI 지표반사도 산출물과 MODIS 지표반사도 산출물의 비교 검증결과

검증기간	2016.05.01.00:00~2016.05.31.07:00		
구분	RMSE	MD	정확도(목표정확도)
검증지수	0.023	0.03	81% (72%)

4) 오차 요인

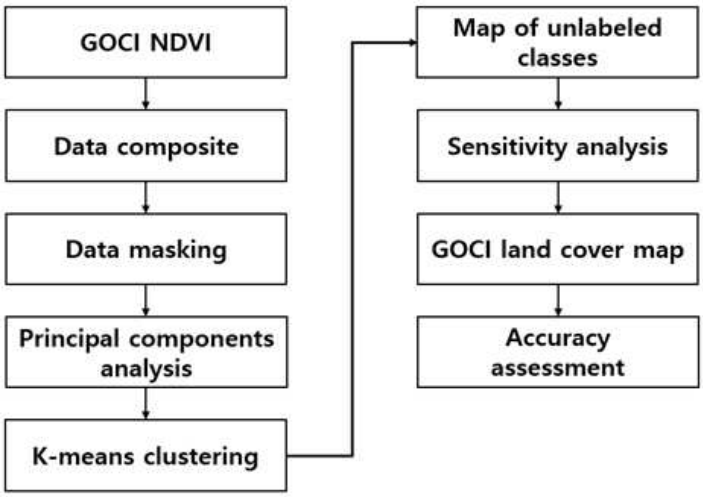
GOCI-II 지표반사도 알고리즘에서 예상되는 오차유발 원인은 다음과 같다.

- 구름의 영향이 없는 청천대기의 자료가 확보되지 않는 경우.
- 최소반사도 산출을 위한 기간 동안 토지피복의 물리/화학적 변화가 발생한 경우
- 대기투과도 보정 시 사용된 에어로솔 또는 가스성분의 정확한 값이 보장되지 않을 경우 최종산출물 오차로 나타날 수 있음.

20. 토지피복도

가. 연구수행 내용

GOCI-Ⅱ를 위한 토지피복 산출물은 GOCI-Ⅱ level-2 atmospheric correction 을 거친 TOC 반사도, GOCI-Ⅱ level-2 BRDF 모델링에 의해 산정된 정규화 반사도와 GOCI-Ⅱ Level-2 NDVI가 입력자료이다. BRDF 모델링을 통해 BRDF parameter를 산출하기 위해서는 구름이 없는 조건에서 최소 3회 이상의 관측이 이루어져야 하며 다양한 각도 조건에서 관측된 자료가 필요하다. 그러나 GOCI-Ⅱ 는 multi-angle 센서가 아니기 때문에 일정 기간의 자료를 합성하여야 한다. 따라서 본 알고리즘에서는 합성 기간을 16일로 선정하였다. 이렇게 합성 기간 16일을 적용한 BRDF 모델링에 의해 산정된 정규화 반사도와 NDVI를 입력값으로 하여 주성분 분석을 수행하였다. 또한 구름 및 눈의 영향을 최소화하기 위해 7일 합성을 추가로 실시하였으며, 토지피복지도 제작을 위해 5월 22일부터 10월 15일까지의 데이터를 입력 자료로 선정했다. 또한, K-means clustering 알고리즘 시간 단축 및 성능 향상을 위해 주성분 분석을 수행하였으며, 주성분 분석 수행 시 accumulate percentages 99% 이하를 주성분으로 정의하였다. 이러한 주성분을 입력값으로 하여 K-means clustering algorithm을 실시한다. K-means clustering algorithm에 의해 결정된 clusters는 민감도 분석과 이질성 검사를 거쳐 GOCI-Ⅱ를 위한 토지피복 명명에 따른 분류항목으로 결정되며, 최종적으로 reference datasets을 이용한 정확도 검증이 수행된다.



나. 연구 수행 성과

1) GOCI-II Land Cover Classes 명명

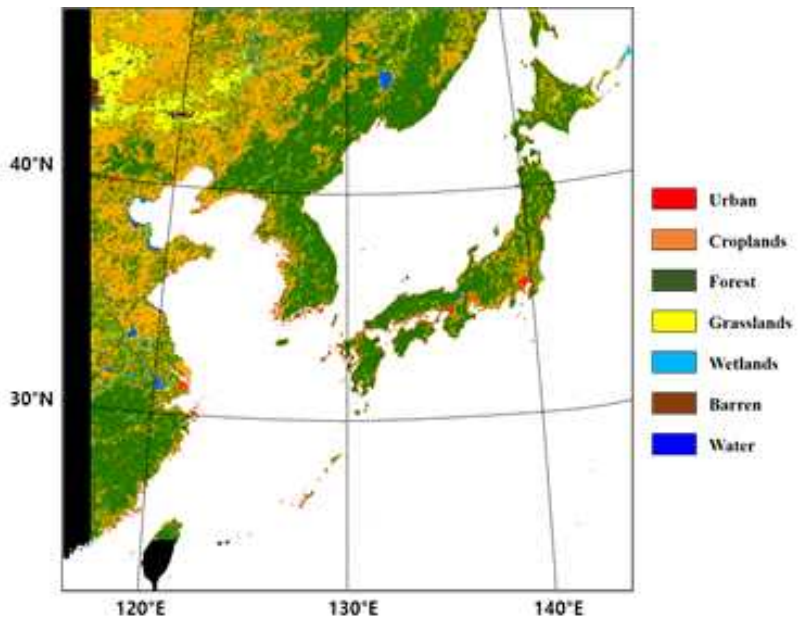
GOCI-II Land Cover product를 제작하기 위해서 동북아시아 토지피복을 잘 반영하는 토지피복 분류체계가 필요하다. GOCI-II Land Cover product 의 토지피복 분류체계 명명을 위해 Global land cover datasets의 토지피복 분류체계를 참고하였으며, 따라서 본 연구에서는 아래 표와 같이 7가지 항목으로 구성된 GOCI-II Land Cover product의 분류체계를 명명하였다.

Class	Label	Description
1	Urban	Land modified by human activities, including all kinds of habitation, industrial and minig area, transportation facilities, etc.
2	Croplands	Land used for agriculture, horticulture and gardens, including paddy fields, irrigated and dry farmland, vegetable and fruit gardens, etc.
3	Forest	Land covered by trees, vegetation covers over 30%, including evergreen or deciduous, needleleaf or broadleaf forests, etc.
4	Grasslands	Land covered by natural grass with cover 10% and shrubs with cover over 50%, including deciduous and evergreen shrubs, and desert steppe with cover over 10%, etc.
5	Wetlands	Land covered by wetland plants and water bodies, including inland marsh, lake marsh, river floodplain wetland, forest/shrub wetland, peat bogs, mangrove and salt marsh, etc.
6	Barren	Land with vegetation cover lower than 10%, including desert, sandy fields, bare rocks, saline and alkaline land, etc.
7	Water	Water bodies in land area, including river, lake, reservoir, fish pond, etc.

2) Reference Dataset 구축 및 정확도 검증

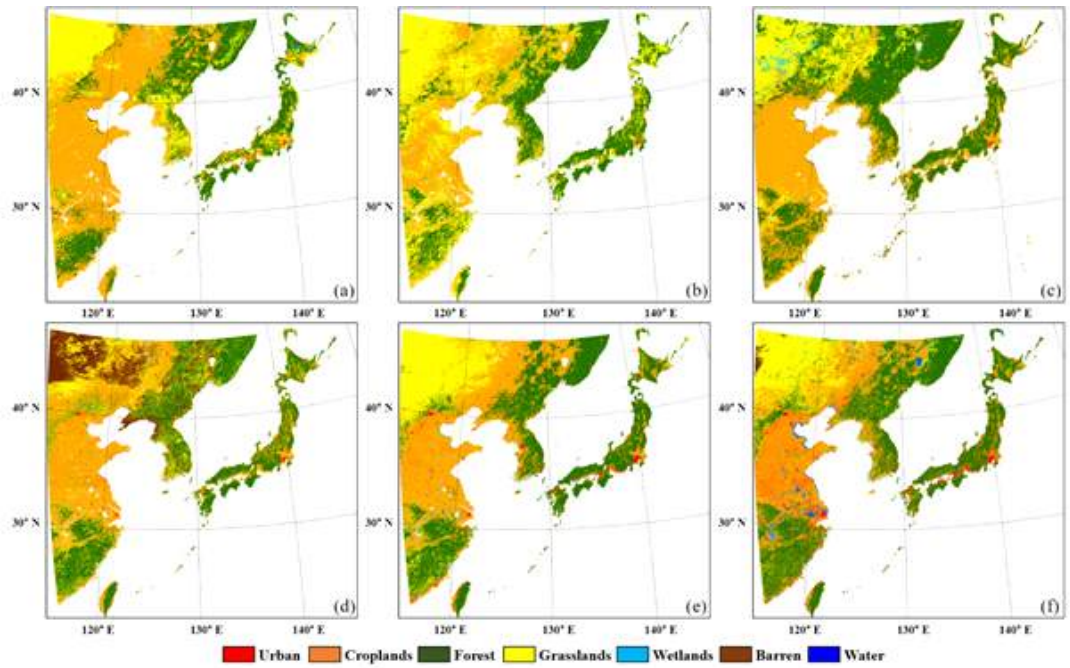
가) First reference dataset

구축된 GOCI-II Land Cover product를 평가하기 위해 2007년 전국 단위로 제작된 중분류 토지피복지도를 아래의 그림과 같이 first reference dataset으로 선정하였다. 정확도 평가를 위해 confusion matrix를 이용하여 전체 정확도를 산정하였으며, first reference dataset과의 전체 정확도는 79.04%로 산출되었다.



나) Second reference dataset

남한 지역 뿐 아니라 GOCI-II Land Cover product 전 영역에서의 정확도 검증을 위해 여러 분야에서 널리 활용되는 6가지 Global land cover datasets(IGBP, UMD, GLC2000, GlobCover2009, MCD12Q1, GlobeLand30)을 선정하였다. 정화도 평가는 first reference dataset과 마찬가지로 confusion matrix를 이용하여 전체 정확도를 산출하였으며, 검증 결과는 아래 표와 같다.



	Reference dataset					
	Croplands	Forest	Grasslands	Wetlands	Barren	Total
Croplands	56,277	23,990	1,470	540	517	82,794
Forest	37,027	225,414	3,488	240	511	266,680
Grasslands	8,174	2,685	295	497	429	12,080
Wetlands	131	49	7	70	6	263
Barren	49	13	0	13	3	78
Total	101,658	252,151	5,260	1,360	1,466	361,895
Overall accuracy (%)						77.94