

GK-2A AMI

Algorithm Theoretical Basis

Document

지표면 하향장파복사 (DLR)

장정필, 이규태
강릉원주대학교

Version 1.1

2019. 10. 02.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서	수정내용	과학코드	수정일	작성자
----	------	------	-----	-----

버전		버전		
0.1	ECMWF 및 CERES 자료를 이용한 DLR 산출 초기 알고리즘	0.1.0.1	2016.01.01.	안서희, 이규태
0.2	ECMWF 및 CERES 자료를 이용한 DLR 산출 알고리즘	0.2.0.1	2017.01.01.	임세훈, 이규태
0.3	UM 자료 및 GK-2A 산출물을 이용한 DLR 산출 알고리즘	0.3.0.1 0.4.0.1	2018.01.01.	임세훈, 이규태
0.4	ATBD 수정 및 보완	0.5.5.1	2018.11.01.	김부요, 임세훈, 이규태
0.5	ATBD 수정	0.5.5.1	2019.03.01.	김부요, 이규태
1.0	ATBD 수정	0.5.5.1	2019.04.24.	김부요, 이규태
1.1	ATBD 수정	0.6.1.1	2019.10.02	장정필, 이규태

<목차>

1. 개요.....	1
1.1 목적	1
1.2 사용자	1
1.3 내용	1
1.4 관련 문서	1
2. 알고리즘 소개.....	2
2.1 개요	2
2.2 알고리즘 흐름도	2
2.3 입력자료	3
2.3.1 L1B	3
2.3.2 L2.....	3
2.3.3 보조 자료	3
2.4 이론적 배경	3
2.5 수학적 설명	4
2.6 산출물	6
3. 모의자료 및 검증	7
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	7
3.2 검증 방법	7
3.3 검증 결과	7
4. 현업운영 시 고려사항	10
4.1 수치계산 고려사항	10
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	10
4.3 품질 평가 및 진단	10
4.4 예외사항 처리	10
4.5 검증 알고리즘	10
5. 가정 및 제한	11
5.1 성능	11
5.2 예상 센서 성능	11
5.3 개선을 위한 사전 계획	11

6. 참고문헌.....	12
--------------	----

<표 목차>

표 2.6.1. 지표면 하향 장파복사 알고리즘 산출 자료	6
표 3.1.1. 모의 입력자료 정보	7

<그림 목차>

그림 2.2.1. 지표면 하향 장파복사 (DLR) 산출 알고리즘 흐름도.....	2
그림 3.3.1. 지표면 하향장파복사 산출 결과 (a) 0400 UTC, (b) 1700 UTC.....	8
그림 3.3.2. 2017년 7월 24일 0100-0800 UTC 사례의 GK-2A DLR (a)과 CERES DLR과의 차이 (b)	9

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
DLR	Downward Longwave Radiation at surface
GEO-KOMPSAT-2A (GK-2A)	Geostationary Earth Orbit KOrrea Multi-Purpose SATellite-2A
GOES-R	Geostationary Operational Environmental Satellite-R series
ISIS	Integrated Surface Irradiance Study
KMA	Korea Meteorological Agency
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
RTTOV	Radiative Transfer for TOVs
SURFRAD	Surface Radiation Budget Network
UKCA	United Kingdom Chemistry and Aerosols
UM	Unified Model
VZA	Viewing Zenith Angle
$\epsilon_{Clear\ sky}$	clear sky emissivity
$\epsilon_{All\ sky}$	all sky emissivity

1. 개요

지표면에서의 하향 장파복사 (DLR)는 구름과 대기 중의 기체에 의해 방출되어 지표면에 도달하는 장파복사의 총량을 의미하고 대기 중의 기체 농도와 운량 그리고 기온과 비습 등에 의존한다 (Sohn, 1996). 지표면 하향 장파복사는 기후와 온실효과 그리고 지표면 복사 수지 등의 분석에 중요하게 사용되기 때문에 BSRN과 SURFRAD 그리고 ISIS 등과 같은 지상 복사 관측 네트워크가 운영되고 있으나 관측 자료의 시공간 분해능 문제에 따른 자료 활용 한계성 때문에 GK-2A와 같은 인공위성 관측 및 산출 알고리즘이 중요하게 활용될 수 있다.

1.1 목적

이 분석서는 관측시스템 및 알고리즘 개요와 시험 자료 및 출력물 그리고 현업 운영 시 고려 사항에 대한 정보를 제공하며 여기에 기술되는 상세 알고리즘 개발 과정은 사용자들의 이해와 분석을 도울 수 있다. 또한 산출되는 DLR은 사용자들에게 지표면 에너지 수지 및 기후 분석을 위한 중요 자료로 활용될 수 있다.

1.2 사용자

기후 관련 현업 및 연구자와 복사 수지 및 모델 개발 관련 연구자들에게 제공된다.

1.3 내용

이 알고리즘 분석서는 GK-2A 산출물과 UM 수치모델 자료를 이용하여 DLR을 추정하는 방법을 서술하였다.

1.4 관련 문서

이 알고리즘은 GOES-R ABI ATBD DLR v2.0에 근거한다.

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

DLR 산출을 위하여 GK-2A 산출물 및 UM 자료가 사용된다. 즉 GK-2A L2 CLD와 UM 모델의 2m 기온과 비습 그리고 지표면 기압 정보가 입력자료로 사용된다. UM GDAPS (전구 규모) 자료의 공간 해상도는 약 $17\text{ km} \times 17\text{ km}$ 로 해당 입력자료는 GK-2A 공간해상도인 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 로 내삽 되며 DLR 산출 과정은 2.2-2.6장에 서술된다.

2.2 알고리즘 흐름도

지표면 하향 장파복사 (DLR) 산출 알고리즘 흐름도는 그림 2.2.1과 같다.

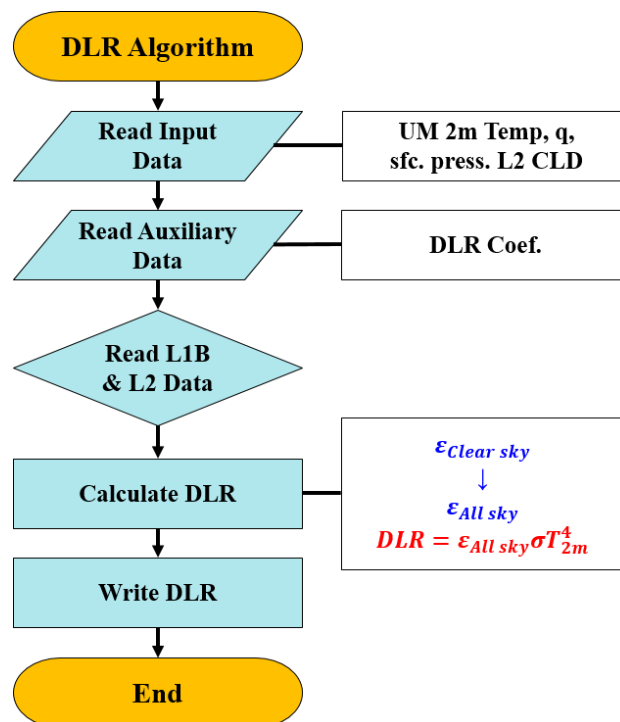


그림 2.2.1. 지표면 하향 장파복사 (DLR) 산출 알고리즘 흐름도.

1) 기본 데이터

GK-2A 위성운량 산출물과 UM 모델의 2m 기온과 비습, 화소 정보 (위도, 경도, 육해상 구분) 그리고 DLR 산출을 위한 회귀계수가 사용된다.

2) 데이터 전처리

UM 2m 비습을 수증기압으로 변환하고 변환된 수증기압과 2m 기온 자료를 이용하여 청천 대기 방출률을 계산한다. 산출된 청천 대기 방출률과 GK-2A 위성 운량 산출물은 전천 대기 방출률을 계산할 때 입력 자료로 사용된다.

3) DLR 산출

DLR은 계산된 전천 대기 방출률과 스테판-볼츠만 함수에 따라 각 화소별로 계산된다.

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

DLR 산출에 L1B 자료를 입력자료로 사용하지 않는다.

2.3.2 L2

GK-2A L2 산출물인 위성 운량 자료가 입력된다.

2.3.3 보조 자료

위·경도 및 지표면 타입 자료가 사용된다.

2.4 이론적 배경

대기에 의한 적외 복사 산란을 무시할 경우 청천 대기에 대한 각 파수별 지표면 하향 장파복사는 식 (2.4.1)과 같이 표시될 수 있다 (Lee et al., 2010).

$$F_{\nu}^{\downarrow} = \pi B_{\nu}(1 - T(0, z_t)_{\nu}) \quad (2.4.1)$$

여기서 πB_{ν} 는 평균 기온에 따른 흑체 복사조도 (Wm^{-2})이고 B_{ν} 는 플랑크 (Planck) 함수이며 $T(0, z_t)$ 는 대기 최상단 (z_t)에서 지표면 ($z = 0$)까지의 투과율을 의미한다. 식 (2.4.1)을 장파복사 영역에서 전체 파수에 대해 적분한 값은 다음의 식 (2.4.2)와 같다.

$$DLR = \int F_v^\downarrow dv = \int \pi B(1 - T(0, z_t)_v) dv \quad (2.4.2)$$

식 (2.4.2)에서 $1 - T(0, z_t)_v$ 는 방출률로 표시될 수 있고 πB 는 기온에 의한 플랑크 함수 (σT^4)로 정의될 수 있기 때문에 식 (2.4.3)–(2.4.5)가 성립된다.

$$\sigma T^4 = \int \pi B_v(T) dv \equiv \pi B \quad (2.4.3)$$

$$\epsilon \equiv \frac{\int \pi B_v(1 - T(0, z_t)_v) dv}{\int \pi B_v dv} \quad (2.4.4)$$

$$DLR = \epsilon \times \sigma T^4 \quad (2.4.5)$$

이 알고리즘에서는 위와 같은 내용을 바탕으로 경험식 식 (2.4.2) 및 식 (2.4.3)을 이용하여 청천과 전천 방출률 계산한 후 2m 기온 자료와 스테판-볼츠만 방정식으로 DLR을 산출한다.

2.5 수학적 설명

이 연구에 의한 DLR 산출은 경험적인 방법에 근거한다. 즉, 식 (2.5.1)과 같이 UM 2m 비습 자료를 수증기압으로 변환하고 2m 기온 자료와 함께 식 (2.5.2) (Iziomon et al., 2003)를 이용하여 청천 대기 방출률을 계산한다.

$$e_v = (q_{2m} \times \text{surface pressure})/0.622 \quad (2.5.1)$$

$$\epsilon_{\text{Clear sky}} = 1 - a_1 e^{-a_2 \frac{e_v}{T_{2m}}} \quad (2.5.2)$$

$\epsilon_{\text{Clear sky}}$: 청천 대기 방출률

T_{2m} : 2m 기온 (K)

q_{2m} : 2m 비습 (kg/kg)

e_v : 수증기압 (hPa)

a_1, a_2 : 회귀 계수

산출된 청천 방출률과 GK-2A AMI L2 위성 운량 자료를 식 (2.5.3)에 입력하여 전천 대기 방출률을 계산하고 식 (2.5.4)에 따라 DLR을 산출한다.

$$\varepsilon_{All\ sky} = (1 - a_3 CF)\varepsilon_{Clear\ sky} + a_3 CF + a_4(1 - \varepsilon_{Clear\ sky}) \quad (2.5.3)$$

$$DLR = \varepsilon_{All\ sky}\sigma T_{2m}^4 \quad (2.5.4)$$

$\varepsilon_{All\ sky}$: 전천 대기 방출률

CF: 위성 운량

σ : 스테판 볼츠만 상수 ($5.670367 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

a_3, a_4 : 회귀 계수

DLR: 지표면에 도달하는 하향장파복사조도 (Wm^{-2})

방출률 계산에 필요한 회귀계수는 청천 대기 방출률 계산을 위한 회귀계수 a_1 과 a_2 는 MODTRAN 5.3.3 (Berk et al., 1987)에 각 화소별 연직 자료를 입력하여 DLR을 계산한 후 이 값과 UM 2m 기온 및 수증기압 자료를 식 (2.5.2)에 입력하여 선형회귀 모형으로 계산하였다. 전천 대기 방출률 계산을 위한 회귀계수 a_3 와 a_4 는 BSRN (Ohmura et al., 1998) 지상 관측 자료 및 GK-2A 위성 운량 산출물과 계산된 청천 대기 방출률을 식 (2.5.3)에 입력하여 선형회귀 식으로 산출하였다. 이때 GK-2A 산출물 중 구름 하층에 대한 기상 정보는 제공되지 않기 때문에 지표면 부근의 기상 정보를 이용하여 DLR을 산출하게 된다.

2.6 산출물

이 연구에 의한 DLR의 최종 산출물 정보는 표 2.6.1과 같다.

표 2.6.1. 지표면 하향 장파복사 알고리즘 산출 자료.

변수	설명
DLR	공간 해상도 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 의 반구 영역, 시간 해상도 약 10분
Quality_flag1	0: Bad ($\text{value} < 0\text{ Wm}^{-2}$ or $\text{value} > 750\text{ Wm}^{-2}$) 1: Good ($0\text{ Wm}^{-2} \leq \text{value} \leq 750\text{ Wm}^{-2}$)
Quality_flag2	0: Bad ($\text{VZA} > 70^\circ$) 1: Good ($\text{VZA} \leq 70^\circ$)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

모의실험을 위한 입력 자료와 이들의 공간해상도 및 배열 정보는 표 3.1.1에 나타내었다.

검증을 위해 사용된 자료는 극 궤도 위성인 Terra에 탑재된 CERES의 SSF XTRK Edition4A DLR 자료를 사용하였다. 이 자료는 CERES의 관측시각 내에서 $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ 의 공간해상도로 관측을 수행한다. CERES 복사량 자료는 구름 탐지 정확도가 매우 우수하여 다른 복사량 자료보다 정확도가 높아 많은 연구에 활용된다.

표 3.1.1. 모의 입력자료 정보.

자료	해상도	설명	배열
Cloud Fraction (Satellite)	$2\text{km} \times 2\text{km}$	GK-2A 산출물	5500×5500
2m specific humidity	$2\text{km} \times 2\text{km}$	UM 2m specific humidity (Bilinear interpolation)	5500×5500
2m temperature	$2\text{km} \times 2\text{km}$	UM 2m temperature (Bilinear interpolation)	5500×5500
Surface pressure	$2\text{km} \times 2\text{km}$	UM surface pressure (Bilinear interpolation)	5500×5500

3.2 검증 방법

검증은 Kim et al. (2018)과 Kim and Lee (2019) 방법에 따라 Terra CERES의 위·경도와 공간해상도 ($20\text{ km} \times 20\text{ km}$)를 기준으로 GK-2A DLR 자료를 평균하였고 GK-2A 관측 시각을 기준으로 ± 5 분 이내의 CERES DLR 자료와 비교 분석하였다.

3.3 검증 결과

모의자료를 이용하여 산출한 DLR은 그림 3.3.1과 같다. 즉 이 그림은 2016년 8월 5일 주간 (0400 UTC)과 야간 (1700 UTC)의 사례로서 청천 영역 보다 구름 영역

의 DLR이 그리고 고위도 보다는 저위도 지역의 DLR이 더 크게 나타난다.

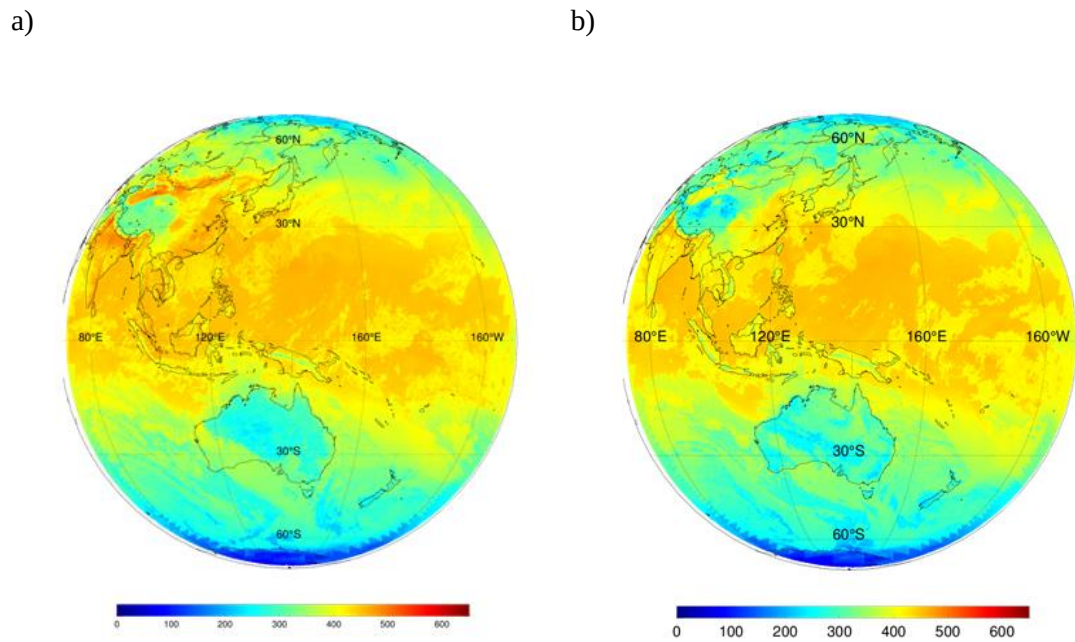
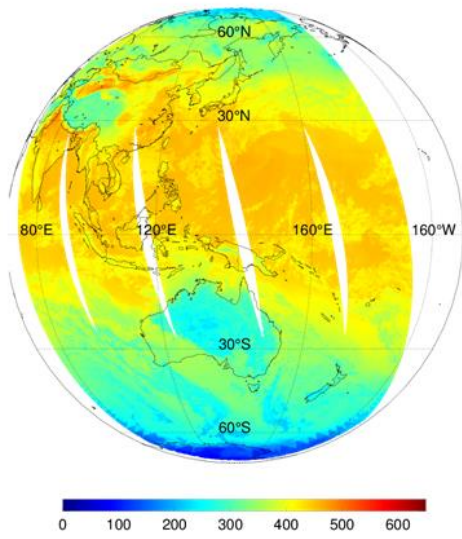


그림 3.3.1. 지표면 하향장파복사 산출 결과 (a) 0400 UTC, b) 1700 UTC).

DLR 산출 알고리즘은 극 궤도 위성인 Terra의 CERES (Barkstrom et al., 1989; Wielicki et al., 1996) DLR 자료와 직접 비교하여 검증할 수 있고 그에 따른 이 연구 결과와 CERES 자료의 차는 그림 3.3.2에 나타내었다. 이 그림은 2017년 7월 24일 0100–0800 UTC의 사례로 평균제곱근오차 (RMSE)는 24.56 Wm^{-2} (최종 목표정확도 25 Wm^{-2} 미만 만족) 그리고 상관계수는 0.95로 나타났다.

a)



b)

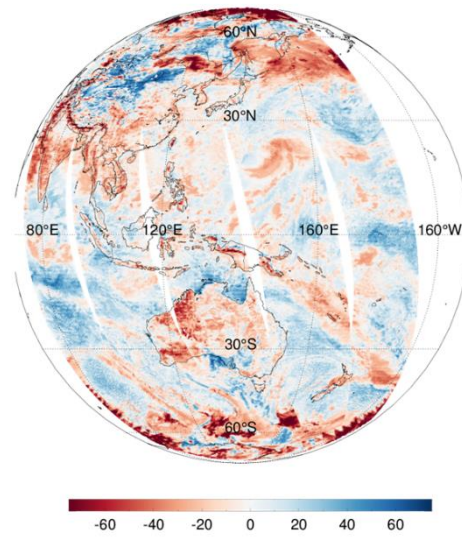


그림 3.3.2. 2017년 7월 24일 0100-0800 UTC 사례의 GK-2A DLR (a)과 CERES DLR과의 차이 (b).

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

DLR 산출을 위하여 GK-2A 산출물 및 UM 자료가 사용되기 때문에 이들 자료의 정확성이 DLR 산출에 영향을 미칠 수 있다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

DLR 산출의 입력 자료인 GK-2A 산출물 및 UM 자료가 없을 경우 산출 불가 상황이 발생되며 자료에 대한 정보는 Q.C flag에 작성된다.

4.3 품질 평가 및 진단

DLR 산출물은 Terra 또는 Aqua에 탑재된 CERES의 DLR과 비교 분석될 수 있다.

4.4 예외사항 처리

DLR 산출을 위해 입력되는 정보가 제공되지 않을 경우 DLR 산출이 불가하다.

4.5 검증 알고리즘

검증은 극 궤도 위성인 Terra 또는 Aqua의 CERES DLR과 함께 GK-2A DLR 자료를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 영역으로 평균하고 GK-2A 관측 시각을 기준으로 ± 5 분 이내의 CERES DLR 자료와 비교 분석되어야 한다. 또한 이 자료는 VZA이 70° 이내에서 분석되어야 한다. 예를들어 0100 UTC에 산출된 GK-2A DLR는 0055-0105 UTC에 관측된 CERES DLR과 비교분석 될 수 있다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

이 알고리즘에 의한 DLR 산출 정확성은 GK-2A 위성 운량과 UM 모델의 산출물 정확도에 따라 결정된다.

5.2 예상 센서 성능

DLR 산출 알고리즘은 GK-2A AMI 센서 자료가 직접적으로 사용되지 않기 때문에 센서 성능 보다 기상요소 자료와 구름 정보 성능 평가가 우선되어야 한다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

DLR의 경우 GK-2A 산출물과 UM 모델의 기상자료가 필수 입력자료이기 때문에 이들의 산출 정확도에 따라 DLR 산출 정확성이 결정된다. 따라서 산출물 개선 이전에 수집된 입력자료에 대한 평가와 보정 작업 등이 필요할 수 있다.

6. 참고문헌

- Barkstrom, B., Harrison, E., Smith, G., Green, R., Kibler, J., and Cess, R., 1989. Earth radiation budget experiment (ERBE) archival and April 1985 results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70(10), 1254-1262.
- Berk, A., Bernstein, L. S., and Robertson, D. C., 1989. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Final report, GL-TR-0122, AFGL, Hanscomb AFB, MA, 42 pp.
- Cho, H. K., Kim, J., Jung, Y., Lee, Y. G., and Lee, B. Y., 2008. Recent changes in downward longwave radiation at King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Climate*, 21(22), 5764-5776.
- Lee, H. T., Laszlo, I., and Gruber, A., 2010. ABI Earth Radiation Budget-Downward Longwave Radiation: Surface (DLR). NOAA nesdis center for satellite applications and Research. Algorithm theoretical basis document, Version 2.
- Iziomon, M. G. H., Mayer J., and Matzarakis, A., 2003. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(10), 1107-1116.
- Kim, B. Y., Lee, K. T., Jee, J. B., and Zo, I. S., 2018. Retrieval of outgoing longwave radiation at top-of-atmosphere using Himawari-8 AHI data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 498-508.
- Kim, B. Y. and Lee, K. T., 2019. Using the Himawari-8 AHI Multi-Channel to Improve the Calculation Accuracy of Outgoing Longwave Radiation at the Top of the Atmosphere. *Remote Sensing*, 11(5), 589.
- Ohmura, A. and Coauthors, 1998. Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WRMC), a new precision radiometry for climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2115-2136.
- Sohn, B. J., 1996. The Impact of Clouds on the Surface Longwave Radiation Budget. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 143-143.
- Unsworth, M. H. and Monteith, J., 1975. Long-wave radiation at the ground I. Angular distribution of incoming radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(427), 13-24.
- Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee III, R. B., Smith, G. L., and Cooper, J. E., 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(5), 853-868.