

Article

북극해 지역의 위성 기반 복사 에너지 산출물의 비교 분석

서민지¹⁾ · 이은경²⁾ · 이경상¹⁾ · 최성원¹⁾ · 진동현³⁾ ·
성노훈³⁾ · 한현경²⁾ · 김현철⁴⁾ · 한경수^{5)†}

Comparative Analysis of Radiative Flux Based on Satellite over Arctic

Minji Seo¹⁾ · Eunkyung Lee²⁾ · Kyeong-sang Lee¹⁾ ·
Sungwon Choi¹⁾ · Donghyun Jin³⁾ · Noh-hun Seong³⁾ ·
Hyeon-gyeong Han²⁾ · Hyun-Cheol Kim⁴⁾ · Kyung-soo Han^{5)†}

Abstract: It is important to quantitatively analyze the energy budget for understanding of long-term climate change in Arctic. High-quality and long-term radiative parameters are needed to understand the energy budget. Since most of radiative flux components based on satellite are provide for a short period, several data must be used together. It is important to acquaint differences between data to link for conjunction with several data. In this study, we investigated the comparative analysis of Arctic radiative flux product such as CERES and GEWEX to provide basic information for data linkage and analysis of changes in Arctic climate. As a result, GEWEX was underestimated the radiative variables, and it difference between the two data was about 3 ~ 25 W/m². In addition, the difference in high-latitude and sea ice regions have increased. In case of comparing with monthly means, the other variables except for longwave downward flux represent high difference of 9.26 ~ 26.71 W/m² in spring-summer season. The results of this study can be used standard data for blending and selecting GEWEX and CERES radiative flux data due to recognition of characteristics according to ice-ocean area, season, and regions.

Key Words: Arctic, radiative flux, comparative analysis, CERES, GEWEX

요약: 북극의 장기간 기후 변화 관측을 위해서는 에너지 수지를 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 에너지 수지를 정량적으로 파악하기 위해서 고품질의 장기간 복사 에너지 변수들이 필요하지만 대부분 위성 기반 복사 에너지 변수 자료들은 제공되는 기간이 짧아 자료들을 연계하여 사용해야한다. 자료를 연계해서 사용하기

Received November 11, 2018; Revised November 22, 2018; Accepted November 26, 2018; Published online December 7, 2018

¹⁾ 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사수료생 (PhD Candidate, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University)

²⁾ 부경대학교 공간정보시스템공학과 석사과정생 (Master Student, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University)

³⁾ 부경대학교 공간정보시스템공학과 박사과정생 (PhD Student, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University)

⁴⁾ 극지연구소 북극해빙예측사업단 책임연구원 (Principal Researcher, Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute)

⁵⁾ 부경대학교 공간정보시스템공학과 정교수 (Professor, Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University)

† Corresponding Author: Kyung-Soo Han (kyung-soo.han@pknu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위해서는 사용되는 자료의 차이를 정확하게 파악하고 일치시키는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 위성 기반 복사 에너지 자료인 Global Energy and Water Exchanges Project(GEWEX)와 Clouds and the Earth's Radiant Energy System(CERES)를 비교 분석하여 자료 연계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 두 자료를 비교 분석한 결과 CERES자료를 기준으로 했을 때, GEWEX 자료가 과소 추정되었다. 또한 두 자료는 약 $3 \sim 25 \text{ W/m}^2$ 의 차이가 발생하였으며, 고위도 지역이거나 해빙지역일수록 두 자료의 차이가 더 증가하였다. 또한 두 자료의 월별 평균을 비교하였을 때는 하향 장파 복사 에너지를 제외한 나머지 변수들은 봄과 여름철에 $9.26 \sim 26.71 \text{ W/m}^2$ 의 높은 차이를 보였다. 본 연구 결과는 북극지역에서 CERES와 GEWEX 자료를 합성하거나 선택할 때 좋은 기준 자료로 사용 가능하다.

1. 서론

북극은 기후변화의 지시자 중 하나이며, 고위도 지역에 한정되지 않고 중위도 지역까지 영향을 미치며, 기후 변화를 관측하는 데 있어 매우 중요한 지역이다(Stuedinger, 2005). 북극의 에너지 균형은 해빙 감소로 인한 알베도 변화와 해양과 대기 사이의 단열층의 감소로 인한 영향을 받게 된다(Stroeve *et al.*, 2012). 또한 북극의 에너지 수지는 복합적인 지표와 대기 사이의 상호 작용, 얼음-알베도 피드백과 같은 다양한 피드백 현상 및 구름 복사 강제력 효과 등에 의해 주도된다(Wetherald and Manabe, 1975; Curry *et al.*, 1996; Chapin *et al.*, 2005; Stephens, 2005; Letterly *et al.*, 2016; Wang and key, 2005; Riihela *et al.*, 2017). 그렇기 때문에 북극의 에너지 수지는 다양한 변화의 최종 지점이자 시작 지점이며, 이를 파악함으로써 북극 기후의 정량적, 정성적 변화를 관측할 수 있게 된다. 일반적으로 에너지 수지 성분은 복사 에너지와 난류 에너지로 구분되며, 복사 에너지는 저장열과 함께 표면(해양/해빙/지표)에서 현·잠열에 에너지를 제공하는 역할을 한다(Alves and Soares, 2016; Wang *et al.*, 2016). 또한 북극의 복사 에너지 변화의 경우 알베도가 감소하고 온도가 상승하는 양의 피드백이 가속화 되고 있으며(Chapin *et al.*, 2005), 북반구의 온난화 현상이 중위도 지역까지 영향을 미치고 있다(Polyakov *et al.*, 2003). 북극 해양으로 입사되는 열 에너지가 증가하고 있으며, 북극 지역의 온난화를 가속화 하고 있다(Perovich *et al.*, 2007). 이와 같이 북극에서는 에너지 수지 및 다양한 원인에 의해 다양한 변화가 진행되고 있다. 앞서 언급했던 것과 같이 북극의 에너지 수지는 북극에서 발생하는 다양한 변화의 선구자이자 최종 지점이기 때문에 북극의 장기간 복사 에너지 수지를 파악하는 것은 중요하게 취급

된다. 그렇기 때문에 에너지 수지를 정확하게 파악하기 위해서는 북극 지역의 기초 에너지 변수인 복사 에너지의 장기간 변화 관측 및 분석이 중요하다. 현재 위성 기반 복사 에너지 자료는 EUMEST Satellite Application Facility on Climate Monitoring(CMSAF)의 CMSAF cCloud, Albedo and surface Radiation dataset from AVHRR data - Edition 2(CLARA A2), NASA의 Global Energy and Water Exchanges Project(GEWEX) 자료와 Clouds and the Earth's Radiant Energy System(CERES)자료가 제공되고 있다. 일반적으로 기후를 분석하기 위해서는 30년 이상의 자료가 필요하고 이를 만족하는 것은 CMSAF에서 제공하는 CLRAR-A2 자료이다. 하지만 해당 자료는 단파 에너지 자료가 극지방에서 정확도가 떨어지는 단점이 있기 때문에 북극 지역을 관측하기에는 부족하다(CMSAF 2016). 또한 Riihela *et al.*(2017)은 북극 지역에서 GEWEX, CERES 및 CMSAF 기반 합성 자료인 FluxNet-CLARA의 복사 에너지 변수를 상호 비교 및 검증하였고, 그 결과 FluxNet-CLARA의 경우 $30.95 \sim 102.86 \text{ W/m}^2$ 의 높은 오차가 관측되었으며, CERES와 GEWEX의 경우 $12.44 \sim 58.42 \text{ W/m}^2$ 의 오차가 관측되었다. 그렇기 때문에 북극 지역에서는 GEWEX와 CERES 자료를 활용할 수밖에 없지만 GEWEX자료의 경우 1983년부터 2007년, CERES자료의 경우 2000년부터 현재까지 자료를 제공하기 때문에 단일 자료로는 장기 기후 변화 관측이 불가능하다. 그렇기 때문에 장기간 복사 에너지 변화를 관측하기 위해서는 GEWEX와 CERES 자료를 연계하여 사용할 필요가 있다. 자료를 연계하여 사용하기 위해서는 자료 사이의 일관성을 유지시켜주는 것이 필요하며, 이를 위해서 두 자료의 차이가 정량적으로 얼마나 발생하는지, 지역에 따라 혹은 계절 등의 다양한 조건에 따라 차이의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본

연구에서는 북극 지역에서 CERES와 GEWEX의 복사 에너지 변수들의 정량적 차이와, 다양한 조건에서 어떻게 차이가 나는지 비교 분석하고자 한다. 두 자료의 비교 분석은 공간적 차이, 위도 별 차이, 해빙 농도 별 차이에 따라 수행하였다. 또한 계절적 특성을 파악하기 위하여 전체 연구기간 동안의 월별 평균 차이를 바탕으로 두 자료를 상호 비교하였다.

2. 연구 자료

현재 복사 에너지 자료를 제공하는 곳은 CERES, GEWEX, CM SAF에서 제공하고 있지만 앞서 언급 했듯이 CM SAF의 Surface Incoming shortwave 자료의 경우 극지방 실측 자료와 비교 시, 적설 혹은 얼음으로 덮여 있는 표면의 태양 복사열을 정확하게 유도하고 식별하는데 어려움이 있다(CMSAF, 2016). 따라서 본 연구에서는 CERES와 GEWEX의 태양 복사에너지인 하향 단파 복사(SWD), 상향 단파 복사(SWU)와 지구 복사 에너지인 하향 장파 복사(LWD), 상향 장파 복사(LWU)의 사용하였다.

1) CERES

본 연구에서는 Synoptic 1-degree monthly fluxes(SYN1deg, ed 4A) 자료를 사용 하였다. CERES 자료는 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 MODIS 센서와 CERES센서의 자료를 이용하여 산출된다. 단파와 장파 영역 모두 Langley Fu-Liou radiative transfer model이 사용되었으며, 구름 정보의 경우 MODIS와 정지궤도 위성에서 제공하는 정보를 이용하였다(NASA, 2017a). CERES SYN1deg 자료는 일별, 월별 평균 자료를 제공하며, 공간 해상도는 1°의 균일한 격자 자료로 제공된다. 자료 제공 기간은 2000년 3월부터 2018년 3월까지 제공 중이다. 자료의 정확도는 북극 실측 지점인 Summit 지점 자료와 비교 시, SWD의 경우 -4 W/m^2 , LWD의 경우 11 W/m^2 의 bias를 가지고 있다(NASA, 2017b).

2) GEWEX

GEWEX Surface Radiation Budget(SRB) 월 평균 자료를 사용하였으며, 공간해상도는 1°의 균일한 격자 자료

로 제공되며, 1983년 7월부터 2007년 12월까지 자료를 제공한다. NOAA위성에 탑재된 AVHRR 센서 기반으로 산출된다. Radiative transfer scheme은 단파 영역에서는 Pinker and Laszlo(1992) 방식을 장파 영역에서는 Fu *et al.*(1997) 방식을 사용하였으며, 구름 정보는 International Satellite Cloud Climatology Project(ISCCP)에서 제공하는 자료를 사용하였다(Riihela *et al.*, 2017). GEWEX 월 평균 자료는 1998년~ 2007년 동안 단파 영역에서 RMS 23.34 W/m^2 , Bias -5.22 W/m^2 , 장파 영역에서는 RMS 11.1 W/m^2 , bias는 0.9 W/m^2 의 정확도를 보인다(Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015).

3. 연구 방법 및 결과

본 연구는 두 자료가 중첩되는 기간인 2000년 3월부터 2007년 12월 동안 비교 분석을 수행하였다. 이 때 월 평균 자료를 활용하였으며, 연구 영역은 북극권부터 캄카 반도까지 포함된 북위 50° 지역이다. 두 자료의 비교 분석은 전체 기간 동안의 공간적 분포, 조건 별 두 자료의 비교 분석 및 연구 기간 동안 월별 차이를 바탕으로 수행하였다. 두 자료를 비교 할 때, 기본적으로 CERES 자료를 기준으로 수행되었으며, 이는 2007년 4월부터 2007년 9월까지 일별 검증한 선행 연구 결과와 각 자료의 validation reports를 참고하여 CERES 자료를 기준 자료를 선정하였다(Riihela *et al.*, 2017; NASA, 2017b; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015).

1) 공간 분포에 따른 비교 분석

두 자료가 공간적으로 어떠한 차이가 존재하는 지를 분석하였다. Fig. 1은 전체 연구기간동안 각 복사 에너지 변수 별 차이의 평균을 보여주며 전체 연구 영역의 정량적인 차이는 Table 1과 같다. CERES 자료를 기준으로 GEWEX 자료와의 비교 분석하였으며, 붉게 보이는 부분은 GEWEX가 CERES에 비해 과소 추정된 영역이며, 파랗게 보이는 부분은 반대로 과대 추정된 지역이다. 4가지 변수 모두 북극권 해역(북위 60°N 이상)에서 GEWEX가 CERES에 비해서 과소 추정되는 특징이 관측되었으며, 연구 지역 전역에서 단파 복사 변수가 장파 복사 변수에 비해서 두 자료의 차이가 크게 관측되

Table 1. Root mean square differences and bias in study area of radiative flux components between CERES and GEWEX during 2000 to 2007

RMSD (Bias) of area [W/m ²]	LWD	LWU	SWD	SWU
Ocean	6.45 (-5.36)	4.26 (-3.12)	7.59 (-0.58)	6.57 (-3.44)
Land	3.94 (-1.95)	4.88 (0.68)	7.01 (-4.06)	6.71 (-4.12)

었다. 각 변수 별로 LWD는 5.20 W/m², LWU는 4.58 W/m², SWD는 7.30 W/m², SWU는 6.64 W/m²의 Root Mean Square Difference(RMS-Diff)를 보였다. 또한 모든 변수에서 음의 bias(-3.78 ~ -1.22 W/m²)가 관측되었으며 LWU, SWD, LWD SWU 순으로 bias가 작게 관측되었다. SWD

에서 각 지역별로는 두 자료의 차이가 높게 관측되지만, 전체 지역으로 확장할 경우, 지역별로 양극화된 편차가 발생하기 때문에 bias의 강도가 희석되어 전체 연구 지역에서는 낮게 관측된다. 장파 복사 에너지는 대부분 해양에서는 GEWEX가 과소 추정을 하며, 대륙 지역에서는 다소 과대 추정하였다(Fig. 1(a)-(b)). LWD의 경우 해양에서는 6.45 W/m², 내륙에서 3.94 W/m²의 RMS-Diff로 해양에서 더 차이가 두드러지는 경향을 보였으며 LWU는 해양과 내륙에서 각각 4.26 W/m², 4.88 W/m²의 유사한 차이를 보였다. 단파 복사 에너지는 북극권 해역에서는 GEWEX가 CERES에 비해서 과소 추정하며, 중위도 인접 해역에서는 과대 추정하는 경향을 보여준다(Fig. 1(c)-(d)). 하지만 북극점 인접 지역에서는 GEWEX

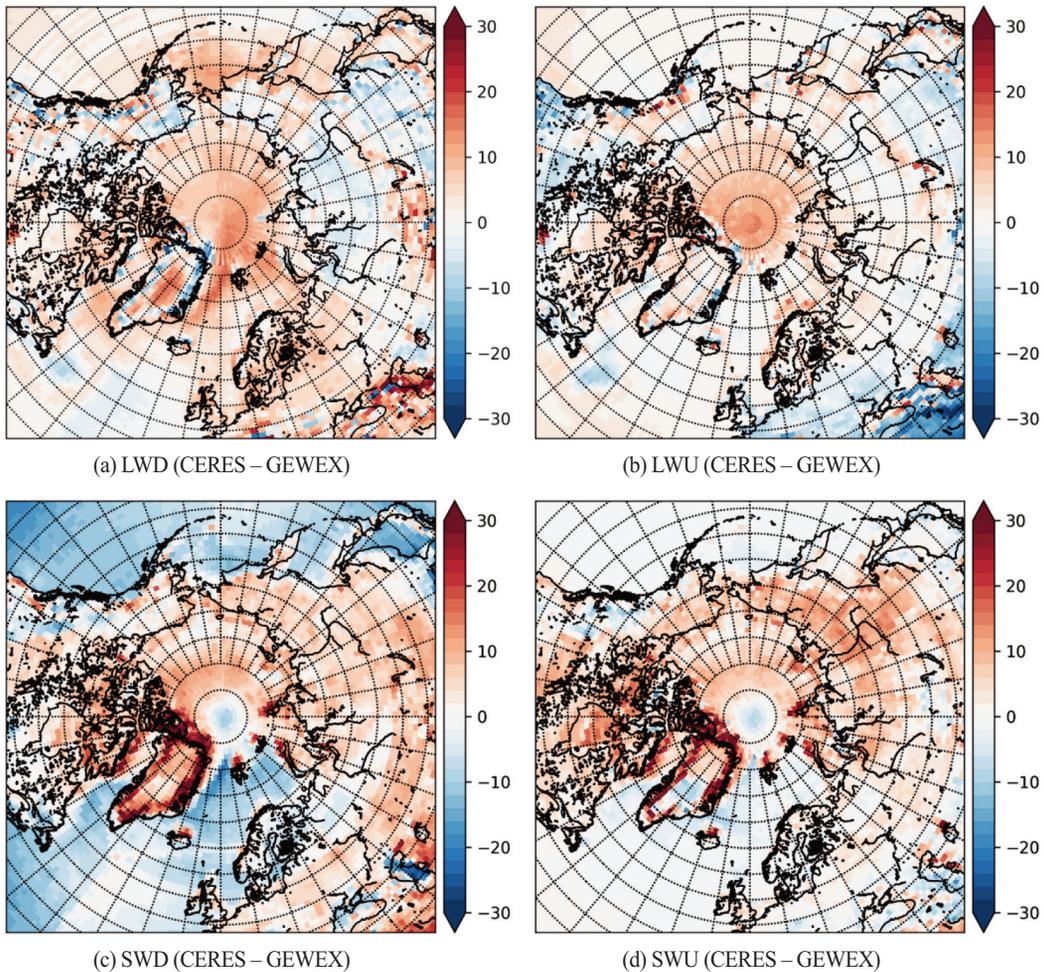


Fig. 1. Distribution of difference mean between CERES and GEWEX radiative flux during study period; (a) LWD, (b) LWU, (c) SWD and (d) SWU.

가 과대추정하는 경향을 보인다. 또한 장파 에너지와 상이하게 대륙 지역에서 GEWEX 자료가 과소 추정하는 경향이 관측되며, 그린란드 해안선 지역에서 높은 차이가 발생한다.

2) 조건에 따른 비교 분석

본 연구는 위도와 해빙 농도에 따라 두 자료의 비교 분석을 수행하였다. 태양에너지는 위도에 따라 에너지의 양의 차이가 크게 발생하며, 기온도 위도에 따라 차이가 뚜렷하게 관측되기 때문에 위도에 따라서 두 자료를 비교 분석하였다. 또한 북극은 해빙 손실과 대기 순환 사이의 민감도가 높게 관측되며(Pedersen *et al.*, 2016), 해빙 농도가 높은 지역일수록 뚜렷한 계절 대기 및 표면 주기를 가지기 때문에 해빙 농도 별 비교 분석을 수행하였다(Perovich and Polashenski, 2012; Riihela *et al.*, 2017).

(1) 위도별 비교 분석

연구 지역을 위도 10° 간격으로 평균하여 위도별 해양과 대륙을 모두 포함한 지역, 해양, 대륙으로 총 3가지 지역으로 구분하여 비교하였다(Table 2-3). 각 표의 행은 위도 10° 간격으로 구분되어 있으며 열은 해양과 대륙

이 모두 포함된 All area, 해양 영역만 포함된 Ocean, 대륙만 포함된 Land로 구분되어 있다. CERES를 기준으로 두 자료의 RMS-Diff와 Bias로 계산하였으며, 괄호 안의 값은 Bias를 의미한다. 장파와 단파 모두 고위도 지역일수록 차이가 증가하였으며, 대부분 GEWEX가 과소 추정하였다. 장파 변수의 경우 대륙에 비해 해양에서 큰 차이가 관측 되었지만, 단파 영역에서는 해양 보다 대륙에서 더 큰 차이가 발생하였다. 이는 SWU의 경우 표면 특성에 따라 값의 차이가 크게 존재하게 되는데, 해양 영역의 경우 해양-해빙의 비교적 균질한 표면 특성을 가지고 있다. 하지만 대륙의 경우 눈, 얼음, 툰드라 지역의 경우 식생까지 관측 되기 때문에 다양한 표면적 특성을 가지고 있고 이로 인해서 두 자료 사이의 오차가 증가하는 것으로 판단된다.

(2) 해빙 농도별 분석 비교 분석

해빙 농도는 총 3가지의 조건으로 각각 해양 지역 (0~15%), 해빙 후보 지역(15~30%), 해빙 지역(30~100%)으로 분류하여 분석하였다. 일반적으로는 해빙 농도가 15% 이상인 지역을 해빙 지역이라고 분류하지만, 해빙 지역을 구분하는 임계치는 최대 30%까지 지정할 수 있다(NSIDC). 또한 해빙 농도 자체에 존재하는 오차 및

Table 2. Root mean square differences and bias in zonal mean of longwave radiative flux components between CERES and GEWEX during 2000 to 2007

RMSD (Bias) of area [W/m ²]	50 ~ 60°N		60 ~ 70°N		70 ~ 80°N		80 ~ 90°N	
	LWD	LWU	LWD	LWU	LWD	LWU	LWD	LWU
All area	3.19 (-2.54)	5.06 (0.28)	6.32 (-2.26)	4.43 (-1.79)	8.59 (-4.48)	5.61 (-3.56)	10.70 (-7.11)	9.50 (-7.21)
Ocean	3.98 (-2.95)	1.51 (-0.18)	5.89 (-4.62)	2.92 (-1.60)	9.25 (-5.41)	5.71 (-3.88)	11.71 (-7.99)	10.11 (-7.70)
Land	3.65 (-2.22)	7.84 (0.64)	7.37 (-1.27)	5.21 (-1.87)	7.64 (-2.22)	5.69 (-2.80)	6.95 (-2.09)	4.59 (-2.16)

Table 3. Root mean square differences and bias in zonal mean of shortwave radiative flux components between CERES and GEWEX by area conditions during 2000 to 2007

RMSD (Bias) of area [W/m ²]	50 ~ 60°N		60 ~ 70°N		70 ~ 80°N		80 ~ 90°N	
	SWD	SWU	SWD	SWU	SWD	SWU	SWD	SWU
All area	3.74 (0.45)	3.32 (-1.71)	9.07 (-2.41)	10.73 (-4.80)	13.40 (-4.74)	10.14 (-5.23)	18.50 (-8.03)	13.59 (-7.95)
Ocean	6.00 (5.28)	0.90 (0.06)	6.47 (1.31)	6.32 (-2.07)	12.95 (-2.61)	9.50 (-4.43)	18.04 (-6.58)	12.94 (-6.75)
Land	6.18 (-3.24)	5.42 (-3.07)	10.77 (-3.97)	12.67 (-5.94)	17.00 (-9.88)	12.26 (-7.17)	35.26 (-23.09)	30.15 (-20.34)

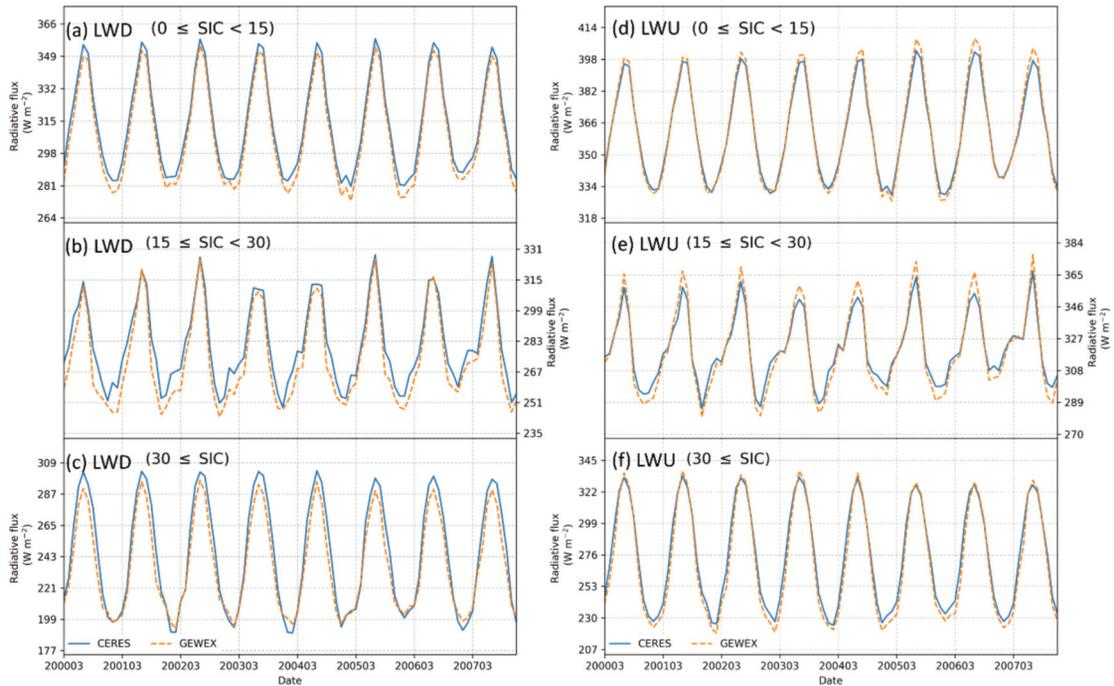


Fig. 2. Radiative flux averaged for condition of sea ice concentration by (top) 0 to 15 (middle) 15 to 30 (bottom) over the 30 during Mar. 2000 to Dec. 2007; orange line is CERES radiative flux and blue dash line is GEWEX radiative flux; (a) ~ (c) LWD and (d) ~ (f) LWU.

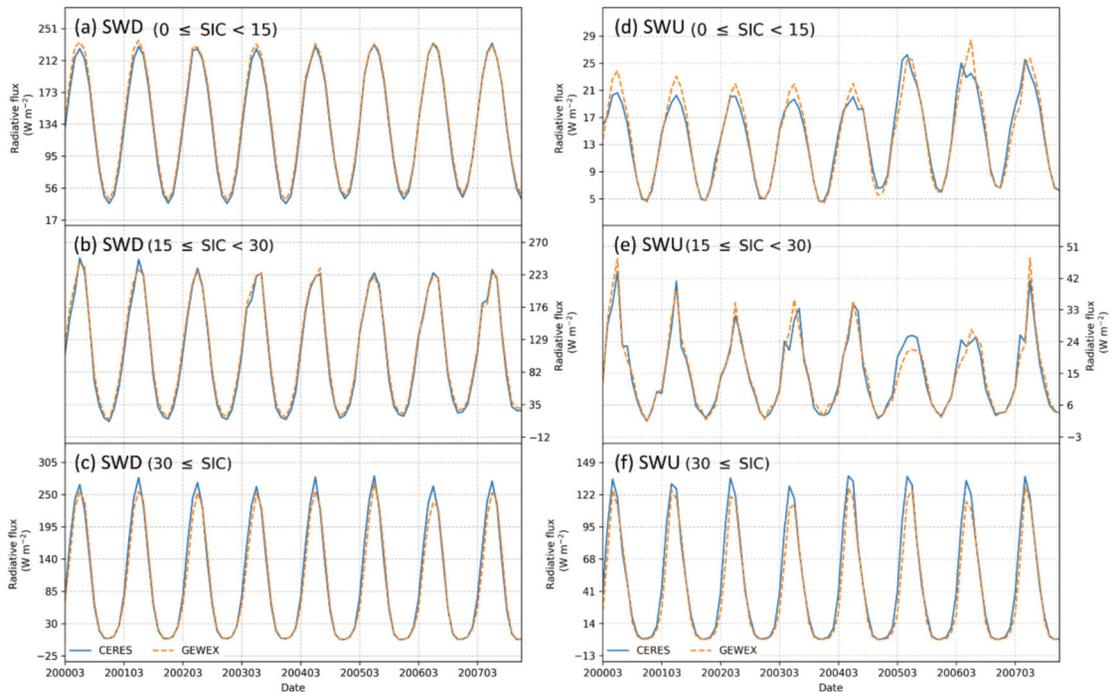


Fig. 3. Radiative flux averaged for condition of sea ice concentration by (top) 0 to 15 (middle) 15 to 30 (bottom) over the 30 during Mar. 2000 to Dec. 2007; orange line is CERES radiative flux and blue dash line is GEWEX radiative flux; (a) ~ (c) SWD and (d) ~ (f) SWU.

차이로 인하여 불확실한 화소가 해빙으로 분류될 수 있기 때문에 해빙 농도가 15% 이상이라도 해양과 해빙이 섞일 수 있다고 판단하여 해빙 농도 15~30% 지역을 해빙 후보 지역으로, 30% 이상의 지역은 확실한 해빙 지역으로 구분하였다. Fig. 2-3은 해빙 농도의 조건별 시계

열 그래프이며, 모든 복사 에너지 변수가 high peak와 low peak의 패턴이 일치 하고 계절적 변동성이 동일하게 관측되었다. LWD(Fig. 2(a)-(c))에서는 3가지 조건 모두 GEWEX가 CERES에 비해 과소 추정하는 하고 있으며, 해양 지역에서는 5.12 W/m^2 , 해빙 후보 지역에서

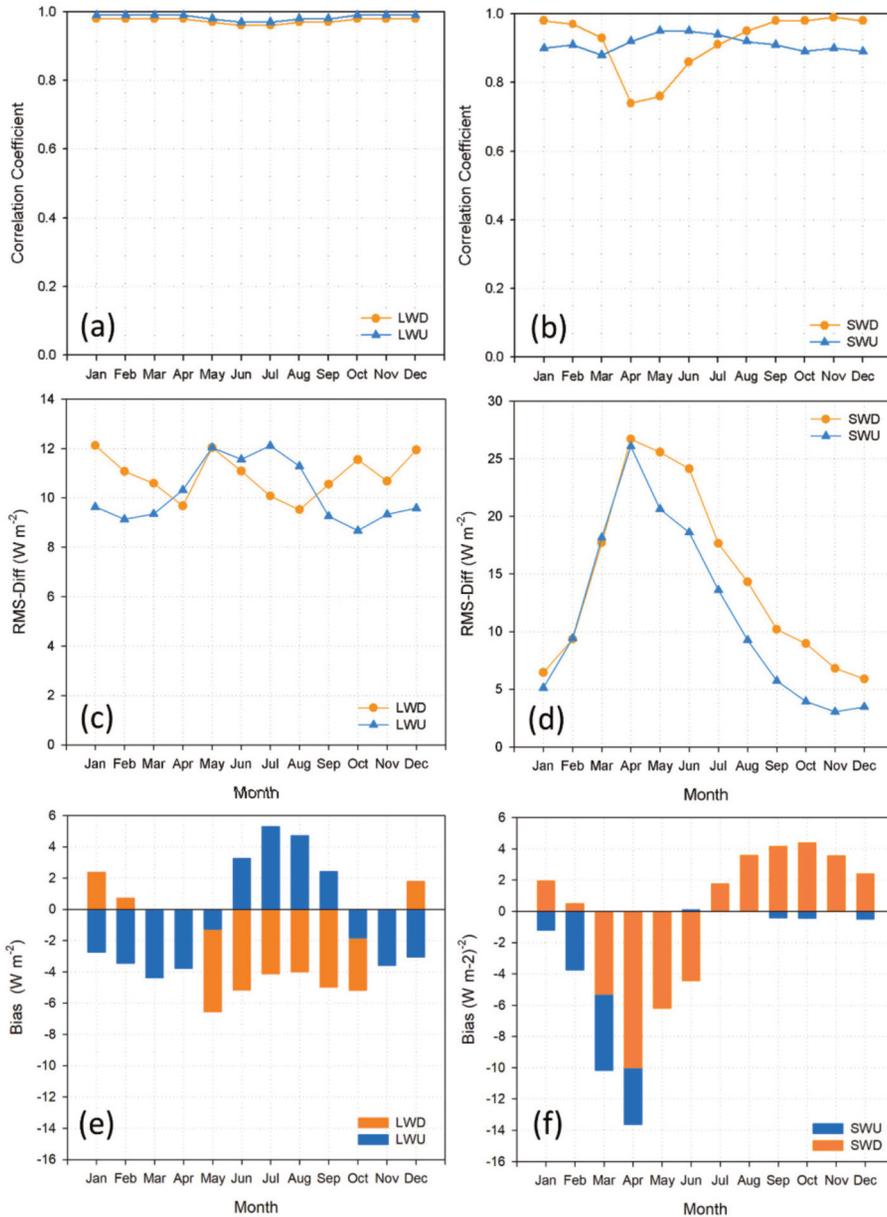


Fig. 4. Statistical results of comparison between monthly mean radiative flux of CERES and GEWEX for study period; Orange circle-line or bar indicate downward components and blue triangle-line or bar indicate upward components; (top) Correlation coefficients (medium) RMS-Diff, and (bottom) Bias; (a),(c),(e) Longwave radiative components and (b),(d),(f) Shortwave radiative components.

는 8.21 W/m^2 , 해빙 지역에서는 10.18 W/m^2 로 해빙 지역에서 오차가 증가하였다. LWU(Fig. 2(d)-(f))의 경우 3가지 조건에서 모두 high peak에서는 GEWEX가 과대 추정을 하였으며 low peak에서는 과소 추정한다. 이는 GEWEX LWU의 변동이 CERES보다 크다는 것을 의미하며 이러한 특성은 두 자료 사이의 차이를 증가시키는 주요 요인이 될 수 있다. SWD(Fig. 3(a)-(c))의 경우 해빙 지역을 제외하고 GEWEX가 과대 추정하지만, 두 자료 모두 유사한 peak의 분포를 보여준다. 하지만 해빙 지역의 경우, low peak는 일치하지만 high peak 지점에서 GEWEX가 과소 추정한다. 이런 차이는 해빙 지역에서 일사되는 에너지의 양이 차이가 나게 되며, 에너지 수치를 정량적으로 파악할 때 오차를 야기 시키는 주요 원인이 될 수 있다. SWU(Fig. 3(d)-(f))는 해양 지역에서 1.44 W/m^2 으로 매우 적은 차이를 보이는데, 해양의 경우 눈과 얼음에 비해서 반사되는 에너지 자체가 적기 때문이다. 해빙 후보 지역의 경우 대부분 high peak에서 GEWEX가 과대 추정하였지만 2005년도에는 과소 추정하였다. 해빙 지역의 경우 low peak는 일치하지만 high peak 지점에서 GEWEX가 과소 추정하였으며, SWD와 동일한 특성을 보여준다. 단파 영역에서 해빙 지역의 차이가 동일하게 관측되는데, 이는 GEWEX 자료가 2001년 10월부터 NOAA-14에서 NOAA-16으로 넘어가면서 얼음 표면 위에서 관측되는 복사 휘도가 증가하였고, 이로 인해 북극지역에서 비정상적으로 높은 알베도 값의 관측으로 인하여 차이가 발생한 것으로 파악된다(NASA GEWEX).

3) 월별 비교 분석

북극은 고위도 지역이기 때문에 계절에 따라 극야와 백야 발생하고 이로 인해 태양 일사량의 극단적 차이가 발생한다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 각 자료 별 계절별 차이를 분석하기 위하여 월별 평균을 비교하였다. Fig. 4는 자료 별 차이의 월별 특성을 분석한 것으로 상관계수, RMS-Diff, Bias를 정량적으로 나타내었다. 자료 별 상관계수를 보면 장파 변수들은 계절에 상관없이 항상 높은 상관관계를 보여준다. 하지만 단파 영역의 경우 SWU의 경우 일사가 존재하는 4월에서 9월까지 상관관계가 증가하였으며, SWD의 경우 상관관계가 감소한다. RMS-Diff의 경우 LWU의 경우 봄-여름 철에 오차

가 증가하였으며 LWD의 경우 계절과 무관한 특징을 보였다. 단파 변수의 경우 SWD와 SWU 모두 4월에 가장 큰 차이를 보였으며, 겨울로 갈수록 차이가 감소하였다(Fig. 4(d)). 겨울철에 차이가 감소하는 것은 두 자료 사이 자체의 차이가 감소하는 것과 겨울철에 에너지 일사되는 에너지와 반사되는 에너지의 양 자체가 감소함으로써 발생할 수 있다. SWD의 경우 겨울철에서 두 자료의 상관관계가 증가하였기 때문에 전자의 가능성이 높을 거라 판단된다. SWU의 경우 겨울철에 RMS-Diff와 bias 모두 감소하지만 상관관계도 감소하기 때문에 자료의 값의 범위가 줄어들어 따른 영향력도 존재한다고 판단된다. Bias의 경우 LWD는 겨울철을 제외한 기간에서 음의 bias가 관찰되었으며 이는 GEWEX가 겨울철에는 과대 추정 한다는 것을 의미하며, 반대로 LWU의 경우 여름에서 초가을(Jun. ~ Sep.)기간에는 양의 bias가 관찰되었다. 이러한 상반되는 계절 bias는 순 단파 복사를 계산할 때, 실제보다 과소 추정되는 문제를 야기할 수 있다. SWU와 SWD의 경우 봄철(Mar. ~ May)에서 동일하게 음의 bias가 관측되었으며, SWU의 경우 2월에서 5월을 제외한 나머지 기간에서 상당히 낮은 bias가 관측되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 북극에서 CERES와 GEWEX의 복사 에너지 변수들을 비교 분석하였다. 두 자료는 북극권과 중위도 인접 지역에서 상이한 차이 경향이 발생하였으며, 내륙과 해양에서도 차이 경향이 다르게 관측되었다. 각각의 변수 모두 고위도 지역과 해빙 지역에서 자료의 차이가 증가하였다. 월별 평균을 비교하였을 때, LWD를 제외한 나머지 에너지 변수들은 봄-여름철에 $9.26 \sim 26.71 \text{ W/m}^2$ 으로 차이가 증가하였다. 또한 SWD의 경우 봄~초여름 기간에 급격하게 상관관계가 감소하며, SWU는 이와 반대로 동일 기간에서 상관관계가 증가하였다. 두 자료는 해양과 대륙을 모두 포함한 영역에서 약 $3 \sim 25 \text{ W/m}^2$ 까지 차이가 존재하며, 이러한 차이는 두 자료의 기초가 되는 센서, 관측하는 파장, 교환 모델의 차이점으로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 두 자료의 차이는 각 자료를 단일로 사용할 때는 문제가 되

지 않지만, 장기간 기후 관측을 위해 함께 사용할 경우 유의 해야한다. 선행 연구에 따르면 10년동안 3.3 W/m^2 가 지표에 흡수 될 경우 이산화탄소로 인하여 지구가 온난화되는 비율의 약 2배 정도의 효과를 야기할 수 있다고 언급하였다(Chapin *et al.*, 2005). 그렇기 때문에 두 자료에서 발생하는 차이는 극지방의 에너지 수지를 산정할 때 오차를 증폭시키는 요인이 될 수 있다. 또한 자료의 차이를 고려하지 않고 기후 모델에 활용 할 경우 모델의 불확실성 및 오차의 증폭을 야기시키는 요인이 될 수 있다. 특히 북극의 기후변화는 해빙의 생성 및 소멸과 밀접한 연관이 있지만 두 자료의 차이는 고위도 지역과 해빙영역에서 증가한다. 그렇기 때문에 장기간 기후 분석을 위하여 두 자료를 중첩하여 사용할 경우 기후 변화에 분석에 있어서는 각 자료별 오차를 정확하게 파악하고 자료의 일관성을 유지 시켜서 사용할 필요가 있다. 본 연구에서 제공되는 CERES와 GEWEX 복사 에너지의 비교 결과는 장기간 북극 기후 변화 분석을 위한 장기 복사 에너지 자료 생성 시, 기초자료로 활용 할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

본 연구는 극지연구소의 북극 해빙 위성 관측을 위한 분석 기술 개발(PE18120) 연구과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Alves, M. and J. Soares, 2016. Diurnal Variation of Soil Heat Flux at an Antarctic Local Area during Warmer Months, *Applied and Environmental Soil Science*, 2016: 1769203
- Chapin, F.S., M. Sturm, M.C. Serreze, J.P. McFadden, J.R. Key, A.H. Lloyd, A.D. McGuire, T.S. Rupp, A.H. Lynch, J.P. Schimel, J. Beringer, W.L. Chapman, H.E. Epstein, E.S. Euskirchen, L.D. Hinzman, G. Jia, C.-L. Ping, K.D. Tape, C.D.C. Thompson, D.A. Walker, and J.M. Welker, 2005. Role of land-surface changes in Arctic summer warming, *Science*, 310(5748): 657-660.
- CM SAF, 2016. CM SAF Cloud, Albedo, Radiation dataset, AVHRR-based, Edition 2 (CLARA-A2), *Surface Radiation Products Validation Report*, 2(1): SAF/CM/DWD/VAL/GAC/RAD.
- Curry, J. A., J.L. Schramm, W.B. Rossow, and D. Randall, 1996. Overview of Arctic cloud and radiation characteristics, *Journal of Climate*, 9(8): 1731-1764.
- Fu, Q. and K.N. Liou, 1992. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49(22): 2139-2156.
- Fu, Q., K.N. Liou, M.C. Cribb, T.P. Charlock, and A. Grossman, 1997. Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54: 2799-2812.
- Letterly, A., J. Key, and Y. Liu, 2016. The influence of winter cloud on summer sea ice in the Arctic, 1983-2013, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5): 2178-2187.
- NASA, 2017a. *Data Quality Summary (10/3/2017)*, CERES SYN1deg Ed4A, Atmospheric Science Data Center, USA.
- NASA, 2017b. *Surface Flux Accuracy and Validation (9/15/2017)*, CERES SYN1deg Ed4A, Atmospheric Science Data Center, USA.
- NASA GEWEX Surface Radiation Budget Known Data Irregularities, https://gewex-srb.larc.nasa.gov/common/php/SRB_known_issues.php, Accessed on Nov. 26, 2018.
- Pedersen, R.A., I. Cvijanovic, P.L. Langen, and B.M. Vinther, 2016. The impact of regional Arctic sea ice loss on atmospheric circulation and the NAO, *Journal of Climate*, 29(2): 889-902.
- Perovich, D.K. and C. Polashenski, 2012. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice, *Geophysical*

- Research Letters*, 39(8): L08501.
- Perovich, D.K., B. Light, H. Eicken, K.F. Jones, K. Runciman, and S.V. Nghiem, 2007. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback, *Geophysical Research Letters*, 34(19): L19505.
- Pinker, R. T. and I. Laszlo, 1992. Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 31: 194-211.
- Polyakov, I.V., R.V. Bekryaev, G.V. Alekseev, U.S. Bhatt, R.L. Colony, M.A. Johnson, P.M. Alexander, and D. Walsh, 2003. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875-2000, *Journal of Climate*, 16(12): 2067-2077.
- Riihelä, A., J.R. Key, J.F. Meirink, P. Kuipers Munneke, T. Palo, and K.G. Karlsson, 2017. An intercomparison and validation of satellite-based surface radiative energy flux estimates over the Arctic, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(9): 4829-4848.
- Seo, M., C.S. Lee, H. Kim, M. Huh, and K.S. Han, 2015. Relationship between sea ice concentration and sea ice albedo over Antarctica, *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(4): 347-351.
- Stroeve, J. C., V.M. Kattsov, A.P. Barrett, M.C. Serreze, T. Pavlova, M.M. Holland, and W. N. Meier, 2012. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations, *Geophysical Research Letters*, 39(16): L16502.
- Stephens, G.L., 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review, *Journal of Climate*, 18(2): 237-273.
- Wetherald, R.T. and S. Manabe, 1975. The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(11): 2044-2059.
- Wang, X. and J.R. Key, 2005. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part I: Spatial and temporal characteristics, *Journal of Climate*, 18(14): 2558-2574.
- Wang, D., S. Liang, T. He, and Q. Shi, 2015. Estimating clear-sky all-wave net radiation from combined visible and shortwave infrared (VSWIR) and thermal infrared (TIR) remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 167: 31-39.
- Zhang, T., P.W. Stackhouse Jr, S.K. Gupta, S.J. Cox, J.C. Mikovitz, and L.M. Hinkelman, 2013. The validation of the GEWEX SRB surface shortwave flux data products using BSRN measurements: A systematic quality control, production and application approach, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 122: 127-140.
- Zhang, T., P.W. Stackhouse Jr, S.K. Gupta, S.J. Cox, and J.C. Mikovitz, 2015. The validation of the GEWEX SRB surface longwave flux data products using BSRN measurements, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 150: 134-147.