

맞춤형 기후정보 상세화 기술 개발 및 강화

**Development and Consolidation of Downscaling
Methods for User-friendly Climate Information**

김무섭, 박지훈, 박경원

기후사업본부 예측기술과

2019.12.

APEC기후센터

평문 초록

우리나라와 동아시아 지역은 기후변화에 따른 집중호우, 폭염과 가뭄 등의 영향으로 심각한 자연재해가 발생합니다. 따라서 자연재해 저감을 위하여 시군 단위에서 사용할 수 있는 계절예측정보와 관측이 거의 없는 지역에서도 이용할 수 있는 자료의 수요가 갈수록 증대되고 있습니다. 현재는 계절전망의 자료가 지역적으로 정보를 제공하기 어렵거나 동아시아처럼 관측 자료가 적어서 기후정보를 얻기 어려운 실정입니다.

이 연구는 시군 단위에서도 사용가능한 계절전망 자료를 생산하는 기술을 개발하였습니다. 또한 지상관측자료를 이용하여 위성정보의 정확도를 제고한 30년간의 고해상도 강수기후정보를 생산하는 기술을 개발하였습니다.

이 연구는 다량의 시나리오 자료들을 기후지수로 변환하여 농업분야 봄철 서리일수, 겨울철의 건물난방지수 등에 활용 가능한 정보를 산출하였습니다. 더불어 지상관측자료를 이용하여 정확도를 제고한 고해상도 강수자료를 이용하여 한반도 차바 태풍홍수사상과 2011년 태국에서 발생한 대홍수 사례를 대상으로 극한강수정보의 적용성 연구를 수행하였습니다. 맞춤형 고해상도 기후격자 정보자료는 APCC의 기후정보제공시스템에 의해 제공할 예정입니다.

Executive Summary

The development and consolidation of downscaling methods for user-friendly climate information provide daily weather scenario grid data and high-resolution grid data based on APCC seasonal probabilistic forecast on a watershed scale.

A grid Weather Generator(WG) model was constructed to produce high-resolution grid data that is highly useful for seasonal forecast based climate impact assessment. The grid WG model was developed by extending the sub-model of the multi-site WG model to the grid model, and the reproducibility of the climate characteristics was evaluated. In particular, it was confirmed that it has an advantage in reproducibility when compared with the method of obtaining grid data through interpolation of multi-site data. This means that the grid data produced by the grid WG model provides more reliable weather variable values for ungauged sites. Also, spatial patterns of precipitation and temperature are more apparent than multi-site data, which is useful for sectors requiring watershed-based weather variables such as water resource management.

By applying the multi-site downscaling method to APCC seasonal forecast, the process of producing downscaled climate forecast information was presented, and the usefulness of the produced information was evaluated. Climate indices were defined as seasonal scale indices. The probability distribution of the index was obtained by calculating the climate index value of a large amount of scenario data produced by the seasonal forecast downscaling method, and interpreted as the forecast of the climate index in the coming season. We evaluated the accuracy of the prediction and the adequacy of the forecast uncertainty expressed in the probability distribution. Seasonal frost days, Seasonal growing season length, and seasonal heating degree day showed high accuracy.

The database of high-resolution rainfall grid data was constructed for high-quality climate information services in East Asia. Long-term (30 years) data were constructed using infrared sensor of geostationary satellite (GridSat B1), TRMM satellite Level 3 TMPA, and GPM IMERG equipped with dual radar. Using the ground observation data, the error-correction of satellite precipitation data was performed by the cross-validation method. All evaluation measures except detection probability are significantly improved than before error correction.

The downscaling of observed data provided more accurate extreme climate information at the ungauged point. The accuracy of the extreme climate index was evaluated based on the error-corrected satellite precipitation data (daily/ 0.1°). The downscaled satellite rainfall grid data in East Asia, which lacks observation points, is highly applicable to long-term climate research, hydrology, and agriculture. Besides, as a result of calculating the 10-, 50-, 100-, and 200-year probable rainfall, it is considered that there is the resilience of extreme climate information of high-resolution grid data (error corrected precipitation grid data).

Seasonal forecast is a major basis for climate services, but is spatially low resolution and has low availability and limited use due to monthly average climate-based information. In reality, the demand for downscaled climate information related to extreme climate is increasing in the public sector, and downscaled seasonal forecast data are needed for proper climate impact prediction in specialized sectors. To meet these demands, the development of seasonal forecast downscaling method overcomes the limitations of current seasonal forecast services and serves as the basis for more advanced forms of services.

Satellite imagery-based high-resolution rainfall grid data has the most considerable significance in that it can provide reliable climate data for regions without long-term climate data in the Asia-Pacific region. Long-term climate data is essential for most climate application fields, and research and projects are difficult to perform unless high-quality climate data are available. Because of this, providing 30 years of precipitation data not only plays an essential role in promoting research and projects based on climate data but also could conduct a variety of application studies considering the spatial advantages of grid data.

국문 요약

계절예측 상세화 기술 개발 연구는 유역규모에서 APCC 계절확률예측 기반 고해상도 격자 일별 날씨시나리오자료와 고해상도 격자자료를 제공한다.

계절예측 기반 기후영향평가에 활용도 높은 고해상도 격자자료를 생산하기 위해서 격자 WG모형을 구축하였다. 기존 다지점 WG모형의 세부모형을 격자모형으로 확장하는 방식으로 격자 WG모형을 개발하였고, 주요 기후특성의 재현성을 평가하였다. 특히, 다지점 자료의 보간을 통해 격자자료를 얻는 방식과 비교했을 때 재현성능 우위에 있음을 확인하였다. 이는 격자 WG모형이 생산하는 격자자료가 미관측지점에 대해 보다 신뢰도 높은 기상변수의 값을 제공함을 의미한다. 또한, 기존 다지점 자료보다 명확한 강수와 기온의 공간적인 패턴을 제시하여 수자원 관리와 같은 유역 전반의 기상변수 값을 필요로 하는 분야에 유용하다.

APCC 계절예측에 다지점 상세화 기술을 적용해 상세기후예측정보를 생산하는 과정을 제시하고 생산된 정보의 유용성을 평가하였다. 연단위로 정의된 기후지수들을 계절규모의 지수로 정의하여 사용하였다. 계절예측 상세화 기술로 생산된 다량의 시나리오자료의 기후지수 값을 계산해 지수의 확률분포를 얻고, 이를 다가올 계절에서 기후지수의 예측으로 해석하였다. 예측의 정확도와 확률분포로 표현된 예측 불확실성의 적절성을 평가하였다. 봄철 서리일수(SFD), 생장일수(SGSL), 겨울철의 건물난방지수(SHDD) 등이 높은 정확도를 보였다.

동아시아 지역의 고품질 기후정보 서비스를 위하여 고해상도 강수격자자료 데이터베이스를 구축하였다. WMO 기후분석표준에 맞추기 위해서 정지궤도 적외선센서 자료(GridSat B1), TRMM 위성의 Level 3 TMPA, 듀얼레이더를 탑재한 GPM IMERG를 이용하여 장기간(30년)자료를 구축하였다. 지상관측자료를 이용해, 오차보정된 위성강수자료를 교차검증방식으로 평가하였다. 탐지확률을 제외한 모든 평가측도에서 오차보정 전보다 상당히 개선되었다.

관측자료 상세화를 통해 미관측지점에 보다 정확한 극한기후정보를 제공하였다. 오차보정된 위성강수자료(daily, 0.1°)에 기반한 극한기후지수의 정확도를 평가하였다. 관측지점이 부족한 동아시아지역에서 상세화된 위성강수 격자자료는 장기간의 기후연구와 수문, 농업 등의 활용분야에서도 적용성이 높다고 판단된다. 또한 10년, 50년, 100년, 200년 빈도 확률강수량을 산정하여 비교한 결과 고해상도 격자자료(오차보정된 강수격자자료)의 극단기후정보 복원성이 있다고 사료된다.

계절예측은 기후서비스의 주요한 근간이 되지만 공간적으로 저해상도이고 월평균 기후중심의 정보제공으로 유용성이 낮으며 사용이 제한적이다. 실제 공공영역에서도 극한기후와 관련된 상세기후정보에 대한 요구가 높아지고, 기후인접분야와 같은 전문영역에서는 적절한 기후영향예측을 위해서 상세화된 계절예측자료가 필요한 실정이다. 계절예측 상세화 기술 개발은 이러한 요구에 부합하기 위해 현행 계절예측 서비스의 한계를 극복하고 보다 발전적인 형태의 서비스의 기초자료로 제공된다.

위성영상 기반 고해상도 강수격자자료는 아태 지역의 장기간의 기후자료가 없는 지역을 대상으로 신뢰성 있는 기후자료를 제공할 수 있다는 점에 가장 큰 의미를 가진다. 대부분의 기

후응용분야가 장기간의 기후자료 구축이 필수적이며, 양질의 기후자료가 구축되지 않는다면 연구와 사업이 수행되기 어려운 실정이다. 이러한 점을 고려하였을 때 30년 동안의 강수격자자료를 제공하는 것은 기후자료를 기반으로 하는 연구 및 사업을 추진하는데 필수적인 역할을 할 뿐만 아니라 격자자료가 가지는 공간적인 장점을 고려한 다양한 응용분야 연구를 수행할 수 있다.

목 차

평문 초록	i
Executive Summary	ii
국문 요약	iv
목차	vi
표 차례	vii
그림 차례	ix
1. 서론	1
2. 방법 및 자료	3
가. 계절예측 격자형 상세화 기술 개발	3
(1) 자료	3
(2) 개발방법	3
나. 계절예측 상세화 적용성 평가 방법	13
(1) 자료	13
(2) 개발방법	13
다. 고해상도 격자자료 생산 및 검증	21
(1) 고해상도 강수격자자료 생산	21
(2) 고해상도 강수격자자료 오차보정 기법 개발	28
라. 고해상도 관측자료 적용성 평가	31
(1) 고해상도 관측자료 기반 강수격자자료	31
(2) 고해상도 관측자료 적용성 평가 방법	37
3. 결과	39
가. 계절예측 격자형 상세화 기술 개발의 결과	39
(1) 일강수량 재현성 평가결과	39
(2) 일강수량 공간상관 재현성 평가결과	40
(3) 일기온 재현성 평가결과	43
(4) 일기온의 공간상관 재현성 평가결과	44
(5) 월누적 강수량과 월평균기온 재현성 평가결과	47
나. 계절예측 상세화 적용성 평가의 결과	49
(1) 예측 정확도 평가 결과	49

(2) 불확실성 표현 적절성 평가 결과	52
(3) 평가 요약	52
다. 고해상도 격자자료 생산 및 검증의 결과	54
(1) 원시위성 강수격자자료 생산 및 검증 결과	54
(2) 고해상도 강수격자자료 오차보정 기법 개발	55
라. 고해상도 관측자료 적용성 평가의 결과	61
(1) 고해상도 관측자료 기반 강수격자자료 생산 결과	61
(2) 고해상도 관측자료 적용성 평가 결과	62
4. 요약 및 결론	65
가. 상세화 기술 총론	65
나. 상세화 기술 각론	65
(1) 계절예측 격자형 상세화 기술 개발	65
(2) 계절예측 상세화 기술 적용성 평가	65
(3) 고해상도 격자자료 생산 및 검증	66
(4) 고해상도 관측자료 적용성 평가	67
다. 상세화 기술 활용 방안	67
(1) 계절예측 격자형 상세화 기술 활용 방안	67
(2) 계절예측 상세화 적용성 평가 기술 활용 방안	67
(3) 고해상도 격자자료 활용 방안	68
사사	69
References	70

표 차례

Table	page
1 Seasonal climate index for temperature	15
2 Seasonal climate index for precipitation	16
3 Variable of Gridsat data	22
4 Comparison with Gridsat and CPC gridded data	23
5 Definition of POD, FAR, and CSI	28
6 Statistical performance evaluation criteria for high-resolution gridded precipitation.	30
7 APHRODITE current version precipitation data	33
8 Reanalysis, gauge, satellite data for climate research	34
9 Gridded data used for resilience evaluation of extreme climate information	37
10 Average mean ratios on the AWS stations for each case of month and monthly wetness (BN: drier than normal, NN: Near normal, AN: wetter than normal)	40
11 Comparison with the IDW interpolation of multi-site downscaling data in terms of daily precipitation amount reproducibility	40
12 Average MAE of correlation coefficient differences between observation and simulation of daily precipitation on monthly wetness	41
13 Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of daily precipitation spatial correlation reproducibility	41
14 Average mean differences of observed and simulated TMAX on the ASOS stations and monthly warmness	43
15 Average mean differences of observed and simulated TMIN on the ASOS stations and monthly warmness	44
16 Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMAX distribution reproducibility	44
17 Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMIN distribution reproducibility	44
18 Average MAE of correlation coefficient differences of between observation and simulation of TMAX on monthly warmness	45
19 Average MAE of correlation coefficient differences between observation and simulation of TMIN on monthly warmness	45

20 Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMAX spatial correlation reproducibility	45
21 Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMIN spatial correlation reproducibility	46
22 Averages mean ratios of monthly total precipitation on the AWS stations for each case of month and monthly wetness	48
23 Average mean difference of monthly average temperature on ASOS stations and monthly warmness	48
24 Comparison with IDW interpolation of multi-site data in terms of monthly average temperature reproducibility	49
25 Average CVM on the ASOS stations and average pass number (Avg Pass) of the seasonal climate indices	53
26 Statistics evaluation result for Gridsat-CDR, TRMM TMPA and GPM IMERG rainfall estimation	54
27 Statistics evaluation result raw satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)	54
28 Product of raw satellite rainfall estimate	55
29 Statistics evaluation result error-corrected satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)	57
30 Product of error-corrected satellite rainfall estimate	60
31 Comparison result of probable rainfall by return period (comparison with 12 ASOS data)	64

그림 차례

Figure	page
1 Annual cyclic oscillation (upper panel) and deviation (lower panel) of TMAX(°C) at a site for 1988-1990	6
2 Annual cyclic mean temperatures at all sites under consideration	7
3 The unit mode obtained from the principal component analysis of the residuals. The mode represents the unimodality well.	8
4 Spatial coherency of temperature deviations	9
5 Comparison of simulated (black line) and observed (blue line) daily precipitation amount distribution	11
6 The plot of absolute value of logarithm of the ratios (log ratio) against KS test statistic ..	11
7 The plots of absolute difference of daily temperature mean against KS test statistic	12
8 Comparison between simulation and observation values of correlation coefficients for all pairs of sites	13
9 The process of producing seasonal climate index prediction from global seasonal prediction ..	14
10 Two Predictions for MAM frost days	17
11 MAM frost days prediction (boxplot) and actual values (red points) for 1983-1989	19
12 The qqplot for u-values of MAM frost days against uniform distribution	20
13 Flowchart of high-resolution gridded data production and evaluation	21
14 Geostationary satellite coverage of Grisat 1b data by time series	24
15 Brightness temperature of Gridsat image at January 1, 1985	26
16 Adjustment functions in the Auto-Estimator using function of precipitable water, brightness temperature-rainfall relationship	27
17 Flowchart of error-correction method	29
18 CPC precipitation gridded coverage at August 11, 2018	31
19 APHRODITE daily rainfall data at August 20, 2018	32
20 APHRODITE domain of current products	33
21 Flowchart of CHIRPS retrieval rainfall algorithm	35
22 Function of regression for CCD and TRMMv7 rainfall data	35
23 Flowchart of PERSIANN-CDR rainfall algorithm	37
24 ASOS station location (left) and the grid system (right, resolution: $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$) used for	

this study.	39
25 Consistency of the first 3 EOF modes for July with monthly wetness NN	42
26 Consistency and variation portion of the first 2 modes for month and monthly wetness ..	42
27 Average mean differences of observed and simulated temperatures of ASOS stations on monthly warmness	43
28 Consistency of the first 3 EOF modes of TMIN for June with monthly warmness BN	46
29 Consistency and variation portion of the first 2 modes of TMAX	47
30 Consistency and variation portion of the first 2 modes of TMIN	47
31 AMSE ratios and ROC scores (AUC) of seasonal climate indices for 4 seasons	50
32 AMSE ratios and ROC scores (AUC) of seasonal climate indices for JJA	51
33 The prediction accuracy change of the seasonal climate indices according to lead time ..	52
34 Cross-validation result for estimating parameters of error-correction(GridSat)	55
35 Cross-validation result for estimating parameters of error-correction(TRMM+GPM)	56
36 Box-plot of evaluation result of error-corrected satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)	57
37 False Alarm Ratio by stations	58
38 spatial correlation analysis result of precipitation gridded data	59
39 Spatial distribution of error-corrected precipitation gridded data (2016.10.05. / 0.1°)	59
40 precipitation distribution at typhoon Chaba landing (October 05, 2016) (Resolution: 0.1°)	61
41 Comparison with CPC and Satellite daily rainfall for Thailand flood case (September 12, 2011)	62
42 Comparison with CPC and Satellite Monthly rainfall for Bangkok area (September 12, 2011)	62
43 Comparison result of 10- and 50-year probable rainfall	63
44 Comparison result of 100- and 200-year probable rainfall	63

1. 서론

APEC기후센터(이하 ‘APCC’)는 우리나라를 포함한 아시아-태평양(이하 ‘아태’)지역을 대상으로 기후정보를 생산하는 중심지이다. 또한, 기후정보의 사회경제적 가치를 인지하여, 생산에 그치지 않고 인접분야에 파급시켜 사회 각 분야에서 진정한 정보로서 가치를 창출시키는데 노력해 왔다. 이 연구는 이러한 APCC 연구기조의 연장선에서 기획되었다. 특히, 기후정보 가치창출의 핵심과정인 기후영향평가(climate impact evaluation)를 위한 기반자료를 만드는 데 집중하였다. APCC의 대표적인 기후정보인 계절예측은 다양한 모델예측자료에 기반한 앙상블기법으로 생산되어 비교적 정확도 높은 기후전망을 내놓고 있으며(Min et al., 2017) 지난 10년간 축적된 경험으로 운영의 안정성을 자랑한다. 하지만, 월단위로 평균적인 기후중심의 정보가 생산되고 있고 공간격자간격도 기후인접분야에 바로 적용되기에는 많이 성기다. 한편, APCC는 기후정보서비스개발을 위해 지상관측자료, 재분석자료와 같은 다양한 형태의 관측자료를 수집해 보유하고 있다. 그러나, 자료기간의 길이나 관측지점의 조밀함이 인접분야에 적용되기에는 부족함이 있다. 그래서, 이 연구에서 이러한 APCC 자료의 한계점을 극복하고 개선시키기 위한 노력을 해왔다.

기후영향평가에서 요구되는 자료조건으로 여러 가지가 있다. 그 중 대표적으로 시공간적 고해상도를 들 수 있다. 농업이나 수문분야에서는 가능한 대상지점에 가깝거나 대상지역에서 조밀한 격자밀도에서 일별 강수량 기온값 등이 필요하다. 또한, 낮은 시공간 해상도에서는 폭우, 폭염, 한파와 같은 극단사상에 관한 정보가 소실되는데 반해, 기후영향평가에서는 중요하게 고려되는 요소이다. 그래서, 금년 연구에서는 자료의 고해상화 요구에 대응하고자 APCC에서 가용한 자료를 기반으로 고해상도 기후자료를 생산하는 데 역점을 둔다.

고해상도 자료 생산에 대한 연구는 크게 두 가지 방향으로 수행된다. 첫 번째 방향은 계절예측 격자형 상세화이다. 김무섭(2018)과 김무섭 등(2019)에서 다년간 APCC 계절예측의 기후인접분야에서 활용도를 높이기 위해 계절예측 상세화 방법을 개발해 왔다. 기개발된 방법은 다지점(multi-site) Weather Generator (WG)를 기반해서 관측지점에서만 강수와 기온값을 제공한다. 그래서, 실제 사용에서는 추가적인 공간보간법을 적용해야 하는 번거로움이 있고, 대상유역 상에서 연속적인 기상특성을 설명하는 데 부족함이 있다. 이를 보완하고자, 이 연구를 통해 유역상에서 고해상도로 상세화 자료를 생산할 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 격자 WG모형을 개발해 이 모형을 기반으로 선행연구에서 개발된 계절예측 상세화 알고리즘을 수행하는 것이다. 격자 WG모형은 미리 정해진 고해상도 격자지점에서 강수와 기온값을 생성하는 통계모형으로 기존의 다지점 WG모형을 확장하는 식으로 개발한다. 본문에서 모형의 개발내용을 자세히 설명한다.

고해상도 격자자료 생산은 위성관측기반으로 30년 이상의 장기간에 고해상도($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ / daily) 강수격자자료를 생산하고, 지상관측자료 기반으로 원시위성 강수격자자료의 오차보정을 수행하여 신뢰성이 향상된 강수격자자료를 제공한다. 장기간의 기후자료 구축은 기후자료를 기반으로 하는 여러 분야에서 필수적으로 필요하나 이를 구축하기는 상당히 어려운 실정이다. 이를 근본적으로 해결하기 위해 전구 규모로 모니터링을 수행하는 위성영상을 기반으로 고해상도 강수격자자료를 생산하여 양질의 기후자료를 제공하고자 한다. 이를 위해서 3종류의

(GridSat B1, TRMM TMPA, GPM IMERG) 위성관측자료를 구축하여 사용하였다. 특히 GridSat B1 자료는 직접적인 강수량 자료를 제공하지 않아 휘도온도를 강수량으로 변환하는 알고리즘을 개발하여 원시위성 강수격자자료를 생산하였다. 다음으로 지역단위로 보다 신뢰성 높은 자료를 생산하기 위해 지상관측자료를 기반으로 원시위성 강수격자자료의 오차를 보정하여 오차보정된 강수격자자료를 생산하였다. 오차보정은 지상관측강수량과 원시위성자료 간의 비율을 공간보간하여 수행하였고, 교차검증을 수행하여 매개변수를 추정하였다. 마지막으로 원시위성 및 오차보정된 강수격자자료의 우수성을 평가하기 위해 통계적 성능 평가 기준을 정립하여 최종적인 효용성을 검증하였다.

계절예측 상세화 적용성 평가는 기개발된 APCC 계절예측의 기후인접분야에서 활용도를 높이기 위해 개발해온 계절예측 상세화 자료의 유용성을 평가한다. 기개발된 계절예측 상세화 방법은 다지점 WG를 기반으로 관측지점에서 일단위의 강수와 기온값을 생산한다. 고해상도 계절예측 상세화 자료를 어떻게 기후민감분야에 적용하는지, 기후민감분야에 적용하여 창출한 2차정보가 얼마나 유용한지에 대한 평가 방법을 제공한다. 계절예측 상세화 자료를 적용하여 기후영향평가를 수행할 수 있는 분야는 농업, 수자원, 보건 등으로 상당히 다양하나 해당 분야에 기후영향의 정량화 및 이를 기반한 예측을 수행하기 위해서는 평가모델(작물모형, 수문모형 등)을 이용하여 영향 평가를 수행해야 한다. 이러한 과정에서 추가적으로 평가모델의 종류, 평가모델을 구축하는 과정에서 발생하는 불확실성이 누적되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 기후자료만으로 간편하게 생산할 수 있는 계절기후지수를 정의하여 적용성 평가를 수행하였다. 연단위 기후지수를 계절단위 기후지수로 정의하여 총 35개의 계절기후지수를 사용하였다. 또한 상세기후정보의 정확도, 정보 불확실성 표현의 적절성을 평가하는 체계를 개발하여 계절예측 상세화 자료를 적용하여 창출한 기후정보가 얼마나 유용한지 평가하였다.

고해상도 관측자료 적용성 평가는 관측자료를 기반으로 생산한 고해상도 격자자료가 기존의 저해상도 격자자료에 비해 추가적으로 제공해 줄 수 있는 정보가 무엇인지를 파악하여 분석한다. 먼저 장기간(30년) 고해상도 관측자료가 동아시아 지역에서 보여줄 수 있는 기후학적 특징을 분석하고, 다음으로 저해상도 소실된 극단기후정보를 복원하여 제공할 수 있는지에 대해 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 따라서 고해상도 관측자료로 각 지점에서 극단기후와 관련된 기후지수를 산정하고 기존의 격자자료의 값과 비교하여 정확도를 평가하였다.

이 연구는 총 4개의 내용 - 계절예측 격자형 상세화 기술 개발, 계절예측 상세화 기술 적용성 평가, 고해상도 격자자료 생산 및 검증, 고해상도 관측자료 적용성 평가로 구성되어 있다. 2절에서 각 연구 내용별 자료 및 방법을 기술하고, 3절은 각 연구 내용별 결과를 제시하겠다. 4절은 전체 연구의 요약 및 결론 그리고 활용 방안을 기술한다.

2. 방법 및 자료

가. 계절예측 격자형 상세화 기술 개발

(1) 자료

계절예측 격자형 상세화 기술 개발에는 기상관측자료와 지형자료가 필요하다. 기상관측자료로 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)자료를 사용하였으며, 지형자료로는 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)자료를 0.05° 로 평활하여 썼다. 한편, 개발된 모형의 평가를 위해서는 ASOS자료와 더불어 자동기상관측계(Automatic Weather System, AWS)자료를 활용하였다.

(2) 개발방법

계절예측 격자형 상세화 기술 개발은 상세화의 기반인 WG모형의 격자화로 수행된다. 개발된 격자 WG모형을 이용한 계절예측 상세화 방식은 다지점 WG모형을 격자모형으로 대체하는 점을 제외하면 기존과 실질적으로 동일하다. 상세화 방식의 자세한 내용은 김무섭 등(2019)의 16쪽에 제시된 Main Algorithm과 관련된 알고리즘을 참고하기를 바란다. 여기서는 격자 WG모형의 개발방법을 설명하는 것에만 집중한다. WG모형은 강수모형과 기온모형으로 구성된다. 아래에서 각 모형의 격자화 방법을 설명한다.

(가) 강수격자모형 개발 방법

강수모형은 대상구역의 강수현상을 모의하는 모형이다. 강수현상이 건조기(dry-spell)과 습윤기(wet-spell)가 번갈아 나타나며 진행되는 점에 착안하여, 김무섭 등(2019)의 11쪽에 제시된 Algorithm 3과 같이 모형은 습윤기-건조기 교대방식으로 현상을 설명한다. 건조기는 이 연구에서는 구역의 모든 관측지점에서 강수량이 0mm인 날의 연속으로 정의되며, 지속일수의 확률분포로 모의할 수 있다. 지속일수에 대한 확률분포로 음이항분포(negative binomial distribution)을 사용하였으며, 특히, 계절예측 상세화를 위해 분포의 평균을 월습윤상태 Below Normal (BN), Near Normal (NN), Above Normal (AN)에 따라 구분하여 추정한다.

습윤기는 어느 한 관측지점에서라도 강수량이 0.1mm 이상인 날의 연속으로 정의된다. 지속일수의 확률분포로 건조기와 같이 음이항분포를 쓴다. 습윤기 모의에서는 지속일수와 함께 기간동안 각 날의 강수량을 나타내야 한다. 강수량 모의모형으로 아래에 주어진 식을 고려한다: $R(s)$ 는 지점 s 에서 강수량을 나타내고 F_s 가 지점 s 에서 비가 올 경우의 강수량분포라면,

$$R(s) = F_s^* \left(\frac{U(s) \vee q_s - q_s}{1 - q_s} \right) \quad [1]$$

이다. 여기서, F_s^- 는 F_s 의 분위수함수(quantile function)로서 $F_s^-(u)$ 는 u 의 연속함수이고, 특히, $F_s^-(0)=0$ 이고 $u > 0$ 일 때 $F_s^-(u) > 0$ 이다. $U(s)$ 는 각 지점 s 에서 구간 $[0,1]$ 상의 균일분포(uniform distribution)를 따르는 공간확률과정(spatial stochastic process)으로 강수량의 공간상관성을 표현한다. q_s 는 비가 오지 않는 지점을 표현하기 위해 도입된 0과 1사이의 수이다. 예를 들어, Eq. [1]에서 $U(s) > q_s$ 일 때 비로소 지점 s 에서 0mm보다 큰 강수량이 기록된다.

강수격자모형 개발의 핵심과정은 Eq. [1]에서 나타나는 s 의 영역을 관측지점 영역에서 격자지점 영역으로 확장하는 것이다. 이를 위해, 각 격자지점 s 에서 F_s 와 q_s 를 정해야 하고 공간확률과정 $U(s)$ 을 격자지점 영역 상에서 정의해야 한다. 아래 소절에서 보다 자세히 그 방식을 설명한다.

① F_s 와 q_s 의 확장

이 연구에서는 F_s 에 대해 평균 μ_s 와 형태모수 α_s 를 지니는 감마분포를 가정한다. 관측지점자료를 사용해 각 관측지점 s 의 F_s 와 q_s 를 추정한다. 관측지점의 추정값 $\hat{\mu}_{s_1}, \dots, \hat{\mu}_{s_d}$ 와 $\hat{\alpha}_{s_1}, \dots, \hat{\alpha}_{s_d}$, 그리고 $\hat{q}_{s_1}, \dots, \hat{q}_{s_d}$ 를 사용해, 격자지점 s 에 대해

$$\begin{aligned} \log \hat{\mu}_s &= \beta_0 + \sum_{j=1}^d \beta_j \log \hat{\mu}_{s_j}, & \log \hat{\alpha}_s &= \beta_0 + \sum_{j=1}^d \beta_j \log \hat{\alpha}_{s_j}, \\ \log \frac{\hat{q}_s}{1 - \hat{q}_s} &= \beta_0 + \sum_{j=1}^d \beta_j \log \frac{\hat{q}_{s_j}}{1 - \hat{q}_{s_j}}, \end{aligned}$$

을 통해 해당하는 F_s 와 q_s 를 추정한다. 단, β -계수는 ordinary kriging 방법으로 정한다.

② 공간확률과정 $U(s)$ 의 확장

$U(s)$ 에 대해 Gaussian copula를 가정한다. 즉, 정규확률과정(Gaussian stochastic process) $Z(s)$ 가 있어, 각 s 에 대해 $Z(s)$ 는 표준정규분포를 따르고

$$U(s) = \Phi(Z(s)) \quad [2]$$

가 성립한다. 단, Φ 는 표준정규분포의 CDF를 나타낸다. 그러면, Eq. [1]과 [2]를 통해 강수량의

공간상관은 $Z(s)$ 의 상관구조로 결정된다. 관측자료를 이용해 모든 관측지점 쌍 (s_1, s_2) 의 상관 계수 $\text{Cor}(Z(s_1), Z(s_2))$ 를 추정한다. $U(s)$ 의 확장은 이 상관계수 추정값들을 사용해 모든 격자지점 쌍의 상관계수를 정하는 것으로 수행될 수 있다. 최종적으로 얻어질 $Z(s)$ 의 상관구조의 수리적 합리성을 보장받기 위해서, 모수 θ 를 지니는 비등방성 정상공분산함수(anisotropic stationary covariance function) $\rho(s_1 - s_2; \theta)$ 가 있어, 모든 격자지점 쌍 (s_1, s_2) 에 대해

$$\rho(s_1 - s_2; \theta_0) = \text{Cor}(Z(s_1), Z(s_2)) \quad [3]$$

를 만족하는 모수값 θ_0 가 존재한다고 전제한다. 관측지점 쌍 (s_1, s_2) 의 상관계수 추정값을 $\hat{\rho}(s_1, s_2)$ 로 나타내면, $\sum_{(s_1, s_2)} \{\hat{\rho}(s_1, s_2) - \rho(s_1, s_2; \theta)\}^2$ 를 최소로 하는 $\hat{\theta}$ 을 구한다. ($\hat{\theta}$ 이 Eq. [3]의 θ_0 의 추정값이다.) 구해진 $\hat{\theta}$ 을 이용해 모든 격자지점 쌍 (s_1, s_2) 간 상관계수를

$$\text{Cor}(Z(s_1), Z(s_2)) = \rho(s_1 - s_2; \hat{\theta}) \quad [4]$$

을 통해 얻을 수 있다. 그러면, Eq. [4], [2], [1]를 통해 격자지점 영역 상에서 강수량의 공간상관이 정해진다. 이 연구에서는 지수공분산함수(exponential covariance function)를 기반으로 하여 $U(s)$ 를 확장하였다.

계절예측 상세화를 위해 습윤기의 특성을 결정짓는 지속일수의 평균, F_s , q_s , θ 을 건조기 경우에서처럼 월습윤상태에 따라 구분하여 추정한다.

(나) 기온격자모형 개발 방법

기온모형은 기온의 시간변동을 여러 주기의 진동으로 분해한다. 분해를 통해 얻어진 진동 성분은 연주기의 평화된 진동, 계절시간규모에서 느린 진동, 강수효과, 수일 주기의 짧은 진동이다. 김무섭(2018)의 2.2.2.2절과 부록 A.2에서 분해방법 및 해석에 대한 자세한 내용을 소개하였다. 연주기 진동은 각 날의 관측기간 동안 기온평균으로 해석되고, 이러한 관점에서 나머지 진동성분의 합을 기온편차라고 일컫는다. 또한, Figure 1에서처럼, 연주기 기온평균은 정적(static)인 반면에 기온편차는 매우 동적(dynamic)이고 확률적(stochastic)으로 모의된다. 기온모형의 격자화는 연주기 기온평균의 공간보간과 격자지점 영역 상에서 기온편차의 모의로 구분되어 수행된다.

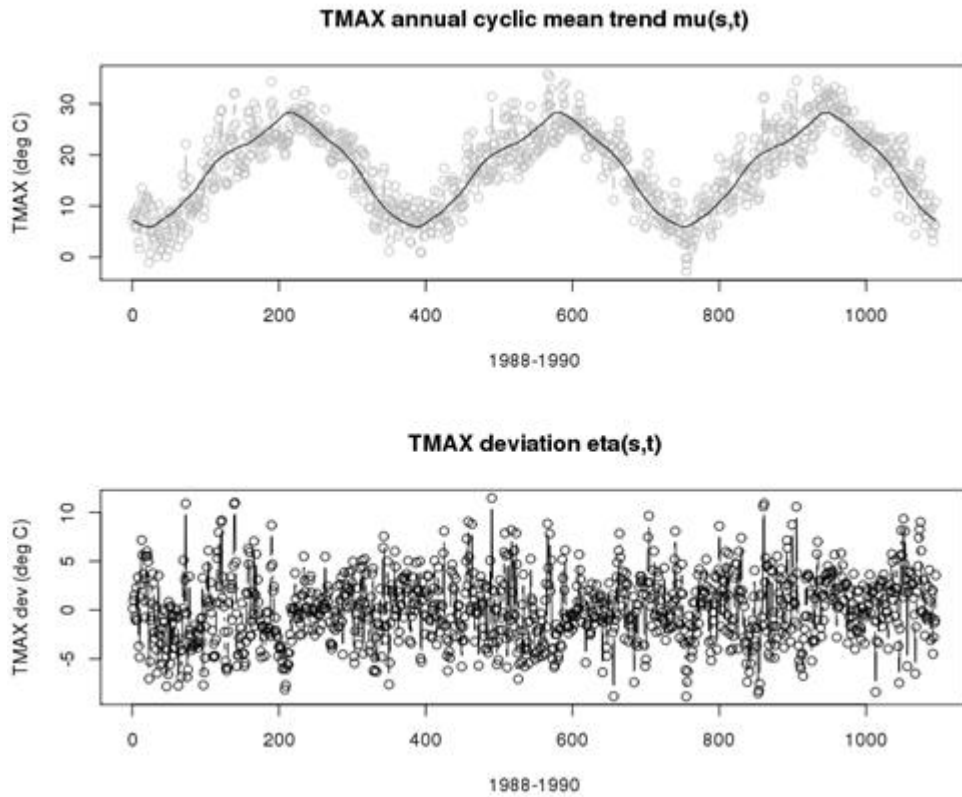


Figure 1. Annual cyclic oscillation (upper panel) and deviation (lower panel) of TMAX(°C) at a site for 1988-1990. The annual cyclic oscillation is static, whereas the deviation is dynamic and stochastic. Note that the deviation oscillates around 0. It supports that the annual cyclic oscillation is interpreted as the annual cyclic mean temperature.

① 연주기 기온평균의 공간보간

연주기 기온평균의 공간보간은 함수의 직교분해(orthogonal decomposition)를 기반한다. Figure 2은 영남지역 19개 지점의 연주기 기온평균을 나타내고 있는데, 이들을 Julian day의 매끄러운 함수로 볼 수 있다. 또한, 변동을 unimodality와 지점마다 차이는 수준으로 특징을 지을 수 있는데, 이 특징을 직교분해로 표현하고자 한다. $\mu_s(t)$ 를 지점 s 의 시점 t 의 연주기 기온평균의 값을 나타낸다고 하자. $\mu_0(t)$ 을 $\mu_s(t)$ 들의 관측지점 평균으로 정의하면서, $\mu_s(t) - \mu_0(t)$ 를 직교하는 두 단위모드 Ψ_1 와 Ψ_2 로 분해한다:

$$\mu_s(t) - \mu_0(t) = \langle \mu_s - \mu_0, \Psi_1 \rangle \Psi_1(t) + \langle \mu_s - \mu_0, \Psi_2 \rangle \Psi_2(t) + e_s(t). \quad [5]$$

Figure 2에서 드러나는 지점 간 수준차를 잘 설명하기 위해서 $\Psi_2(t) = 1/\sqrt{365}$ 로 둔다. 한편,

unimodality를 설명하는 ψ_1 는 잔차 $r_s(t) = \mu_s(t) - \mu_0(t) - \langle \mu_s - \mu_0, \psi_2 \rangle \psi_2(t)$ 의 첫 번째 적재벡터 (loading vector)로 정한다. Figure 3는 이처럼 잔차의 주성분분석으로 구해진 ψ_1 를 보여주는데, unimodality를 잘 설명한다.

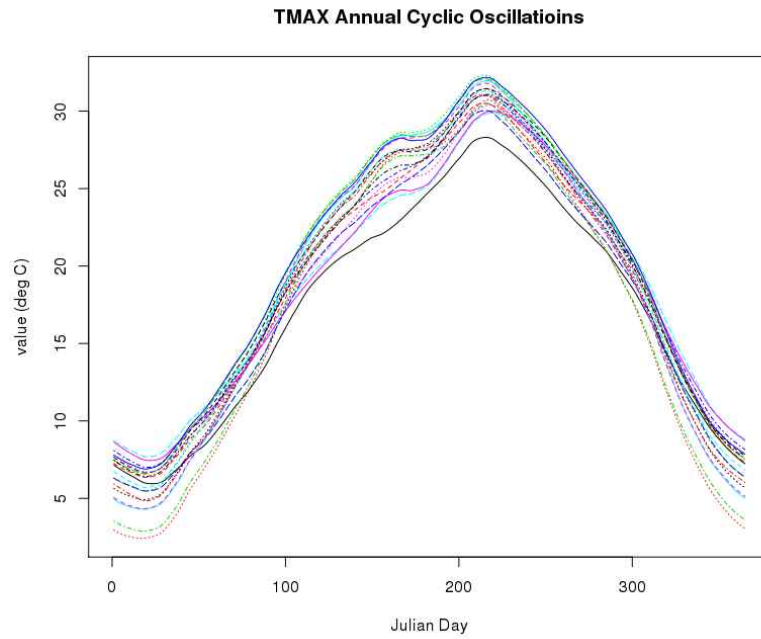


Figure 2. Annual cyclic mean temperatures at all sites under consideration. They are viewed as functions of Julian day. Their variation is characterized by the unimodality and level.

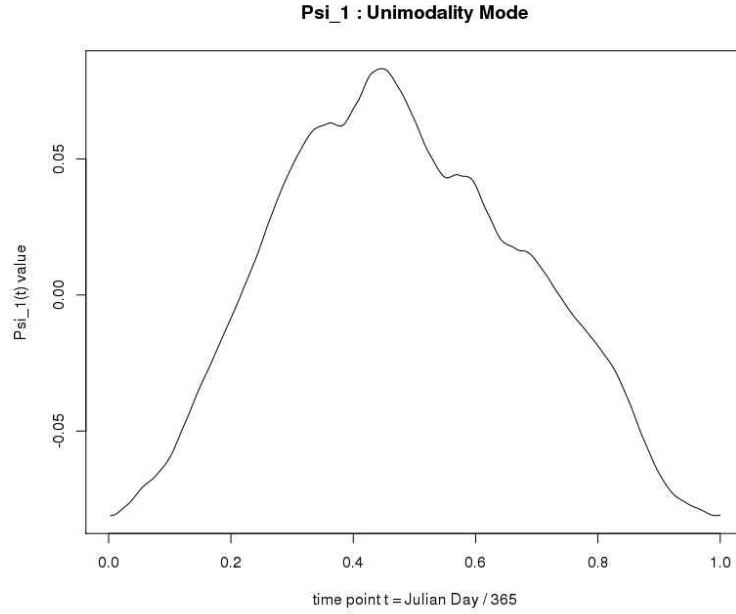


Figure 3. The unit mode obtained from the principal component analysis of the residuals. The mode represents the unimodality well.

직교분해를 기반한 공간보간의 핵심은 Eq. [5]의 주성분 $P_{s,1} = \langle \mu_s - \mu_0, \Psi_1 \rangle$ 과 $P_{s,2} = \langle \mu_s - \mu_0, \Psi_2 \rangle$ 이 지형정보로 잘 설명된다는 점이다. $P_{s,1}$ 과 $P_{s,2}$ 은 각각 unimodality의 강도와 수준의 높낮이에 관련이 있어 지점의 고도, 위도, 해양인접성으로 설명될 수 있을 것이라 예상된다. 설명관계를 식으로 표현하기 위해서 지형정보를 설명변수, 주성분을 반응변수로 하는 회귀분석을 실시하였고 주성분 예측식을 도출하였다. 실제, 일최고기온에 대한 회귀분석 결과로, $P_{s,1}$ 는 위도와 해양인접도, $P_{s,2}$ 는 모든 지형변수가 유의한 설명력이 있고 결정계수는 각각 78%와 86%로 매우 높게 나왔다. 최종적으로 격자지점 s 에서 연주기 기온평균은 $\hat{P}_{s,1}$ 과 $\hat{P}_{s,2}$ 를 주성분 예측식으로 구해진 예측값이라 했을 때,

$$\hat{\mu}_s(t) = \mu_0(t) + \hat{P}_{s,1}\Psi_1(t) + \hat{P}_{s,2}\Psi_2(t) \quad [6]$$

로 예측된다.

② 격자지점 영역 상에서 기온편차 모의

강수와 다르게 유역 내에서 기온의 공간변동은 크지 않다. Figure 4은 영남지역 19개 관측 지점의 기온편차 시계열을 나타내는데, 매우 강한 공간적 일관성이 드러난다. 이러한 일관성은 격자지점 영역 상에서도 여전히 유지될 것이라 예상되기 때문에, 관측지점 영역 상에서 모의된

기온편차에 간단한 공간보간법을 적용해서 격자지점 영역 상에서 것을 얻을 수 있다. 즉, 김무섭 등(2019)의 15쪽에 제시된 Algorithm 5을 이용해 모의된 관측지점 $s_1, \dots, s_d$ 에서 시점 t 의 기온편차를 $\eta^*(s_1, t), \dots, \eta^*(s_d, t)$ 라고 할 때, 동일시점에서 격자지점 s 의 기온편차 $\eta^*(s, t)$ 는

$$\eta^*(s, t) = \alpha_{s,0} + \sum_{j=1}^d \alpha_{s,j} \eta^*(s_j, t) \quad [7]$$

으로 정해진다. 단, 계수 $\alpha_{s,0}, \dots, \alpha_{s,d}$ 는 관측의 기온편차자료를 이용해 ordinary kriging 방법으로 정한다. 최종적으로 기온격자모형은 격자지점 s 에서 시점 t 의 기온을 Eq. [6]을 통해 얻는 연주기 기온평균 $\hat{\mu}_s(t)$ 과 Eq. [7]을 통해 얻은 기온편차 $\eta^*(s, t)$ 의 합으로 모의한다.

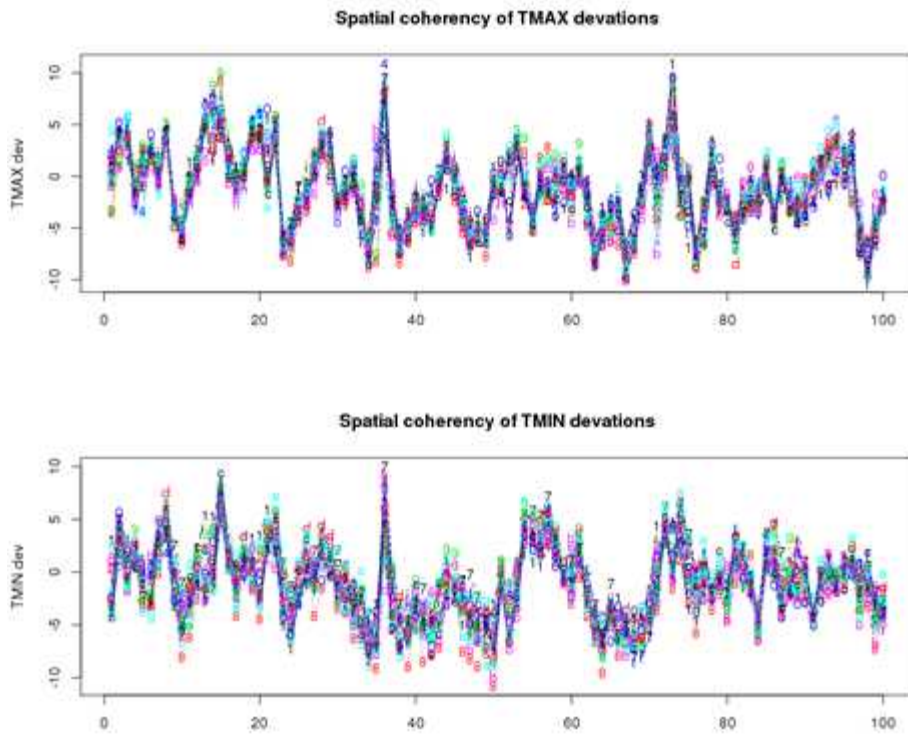


Figure 4. Spatial coherency of temperature deviations. Strong coherencies appear in both plots. It means that simple interpolation is successfully applied to the gridization of multi-site deviation.

(3) 평가방법

격자 WG모형이 계절예측 상세화에 적용된다는 점에서 개발된 모형이 주어진 월기후상태에 맞는 날씨를 얼마나 정확하게 모의하는가를 평가한다. 평가방식은 격자 WG모형으로 모의된 날씨에서 나타나는 기후특성을 관측자료의 것과 비교해 재현성(reproducibility)을 재는 것이다. 특히, 개발취지를 염두할 때, 격자 WG모형의 평가는 미관측지점의 기후특성을 얼마나 정확성이 있게 재현하는가에 초점을 둘 필요가 있다. 그래서, 강수와 관련된 기후특성 재현성 평가에서는 모형구축에 사용되지 않았던 AWS자료를 사용하였다. 한편, AWS기온자료는 정확도가 의심되는 관계로 쓰지 않았다. 대신에, 모형구축에 leave-one-site-out 방식을 적용하였고, 구축에 빠진 지점에 대해 평가를 실시하였다. 기후특성으로 일강수량, 일최고/최저기온의 분포, 공간상관, 월누적강수량과 월평균기온을 고려한다. 아래에서 각 특성별로 평가방식을 자세히 설명한다.

(가) 일강수량, 일최고/최저기온, 월누적강수량, 월평균기온의 재현성 측도

Figure 5에서처럼 관측 일강수량 분포에 감마분포로 잘 설명되기 때문에, 격자 WG모형에서도 감마분포를 일강수량 모의에 쓴다. 더 나아가, 모의와 관측 일강수량 분포 차이는 같은 Figure의 분위수그림(우측하단)에서처럼 분위수의 비로 잘 설명이 된다. 그런데, 확률변수 X 에 대해서 그것의 분위수함수 $q(u)$, $0 < u \leq 1$, 라고 할 때 $E(X) = \int_0^1 q(u)du$ 이기 때문에, 결과적으로 일강수량 분포의 차이는 일강수량 평균의 비(比)로 잘 설명될 수 있음을 시사한다. Figure 6은 평균비와 Kolmogorov-Smirnov(KS) 검정통계량을 비교하였는데, 실질적으로도 평균비가 분포차이를 잘 설명한다고 볼 수 있다. 또한, 평균비가 직관적으로 해석이 간편하기 때문에, 이를 일강수량 분포 재현성의 측도로 쓴다. 한편, 같은 이유에서 일최고/최저기온은 평균차를 재현성 측도로 쓴다. 실제로 Figure 7을 통해 평균차가 분포차를 잘 대변함을 알 수 있다. 월기후 특성인 월누적강수량은 일강수량의 경우처럼 평균비, 월평균기온은 일기온에서처럼 평균차를 재현성 측도로 쓴다.

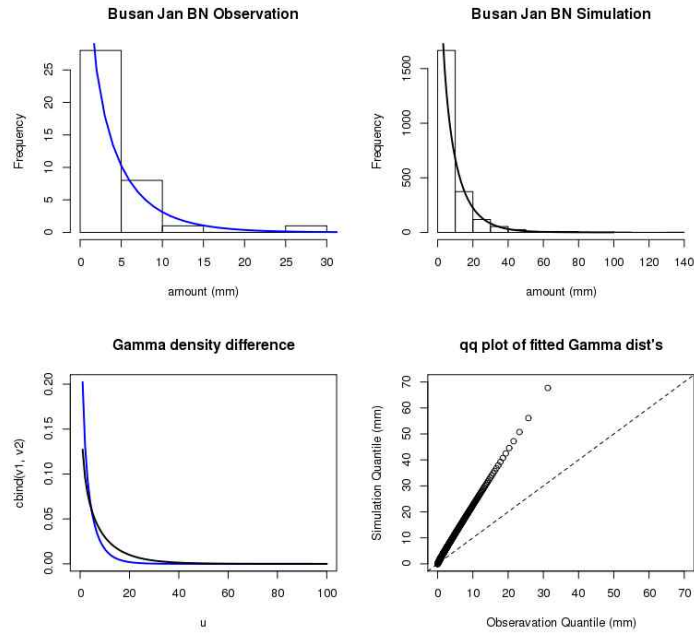


Figure 5. Comparison of simulated (black line) and observed (blue line) daily precipitation amount distribution. Gamma distribution is well fitted to the observation. The difference is effectively represented by the ratio of quantiles as seen in the bottom-right panel.

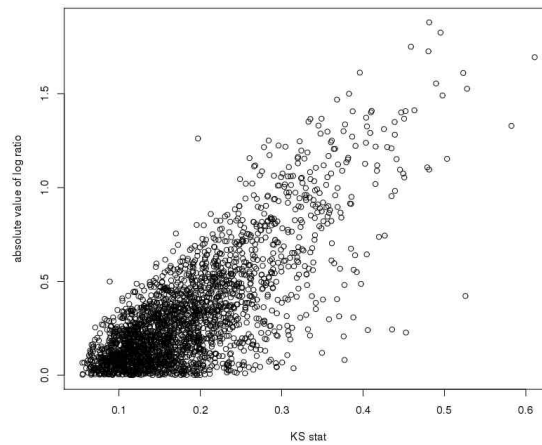


Figure 6. The plot of absolute value of logarithm of the ratios (log ratio) against KS test statistic. The log ratio is approximately proportional to KS statistic. It means that the ratio represents the distributional difference well.

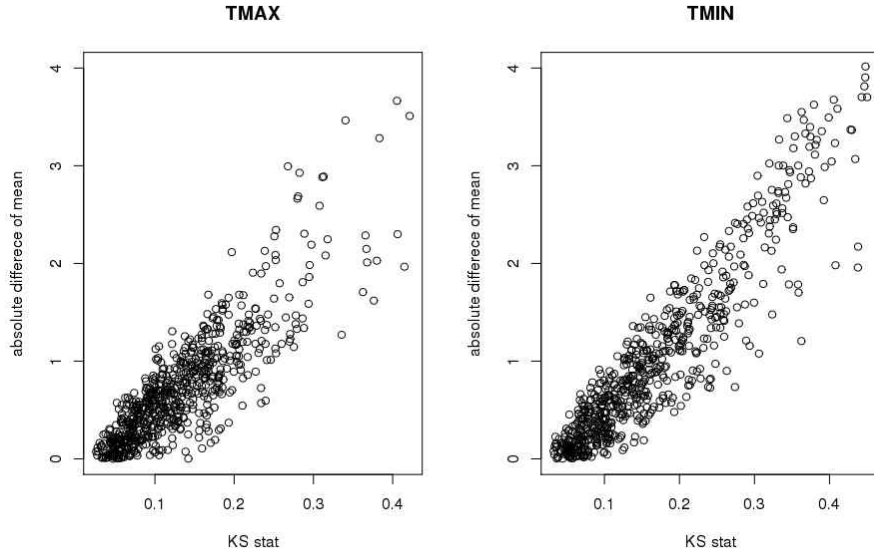


Figure 7. The plots of absolute difference of daily temperature mean against KS test statistic. The mean difference represents distributional discrepancy well.

(나) 공간상관의 재현성 측도

일강수량과 일최고/최저기온의 공간상관 재현성은 지점 간의 상관계수의 재현성과 EOF 모드의 재현성으로 평가한다. 지점 간 상관계수의 재현성 평가는 모의값과 관측값 간 차를 기반으로 한다. Figure 8은 8월의 월습윤상태가 NN일 경우에 관측지점 간 상관계수의 관측값과 모의값을 비교하는 그림으로 점들이 기울기 1인 직선(그림에서 파선으로 표시)에 가까이 모여 있을수록 공간상관 재현성이 높음을 의미한다. 직선 주위로 모여 있음의 정도를 다음과 같이 평균절대오차(mean absolute error, MAE)으로 정량화한다: 관측지점 $s_1, \dots, s_d$ 에 대해 $\sigma(s_i, s_j)$ 가 지점 s_i 와 s_j 간 상관계수의 관측값이고, $\hat{\sigma}(s_i, s_j)$ 이 모의값이라면,

$$\text{MAE} = \frac{2}{d(d-1)} \sum_{i=1}^{d-1} \sum_{j=i+1}^d |\sigma(s_i, s_j) - \hat{\sigma}(s_i, s_j)| \quad [8]$$

으로 정의한다. 한편, EOF 모드의 재현성은 EOF분석을 통해 얻어진 모드형태의 일치성으로 평가한다. 일치성은 모드 간 내적(inner product)의 절대값으로 정량화하는데, 그 값이 1에 가까울수록 일치도가 높음을 의미한다.

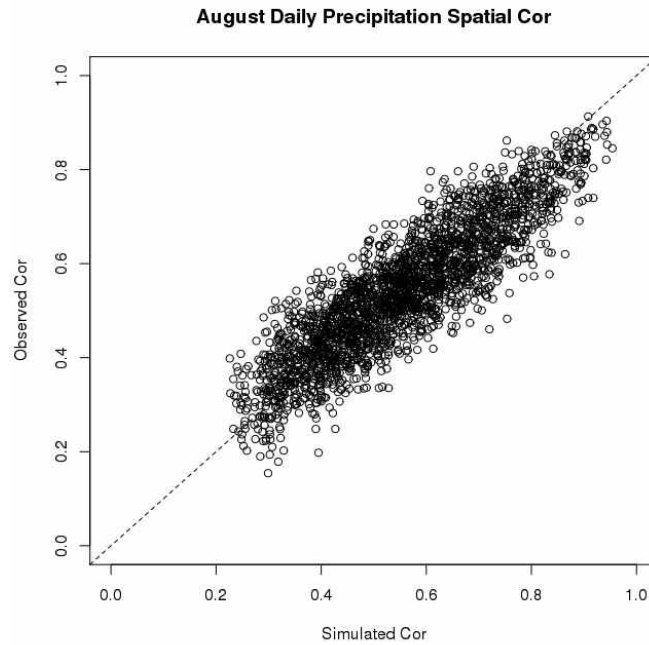


Figure 8. Comparison between simulation and observation values of correlation coefficients for all pairs of sites. For each point, x-coordinate and y-coordinate values indicate simulated and observed correlation coefficients, respectively. As the points get closer to the dashed line, the spatial correlation is better simulated.

나. 계절예측 상세화 적용성 평가 방법

(1) 자료

아래에서 정의될 계절기후지수의 실제값 계산과 다지점 WG모형 구축에 ASOS자료를 사용하였다. 한편, 상세화를 적용할 계절예측자료로 APCC 계절예측 hindcast 자료를 썼는데, 기간은 1983-2010년까지이다.

(2) 평가방법

계절예측 상세화의 목적은 인접분야에서 목적변수의 계절예측정보를 얻는 데 필요한 기반 자료를 만드는 것이다. 예를 들어, 농업 분야에서는 작물수확량, 수자원 분야에서는 유역유출량이 목적변수이고 운영 및 대응전략을 수립을 위해서는 목적변수의 예측정보가 필요하다. 예측 정보는 얻는 방식은 여러 가지가 있는데, 대표적인 방식이 과정기반모형(process-based model)

을 쓰는 것이다. 과정기반모형의 구동에는 일별기상자료가 입력으로 필요한데, 현행의 계절예측 서비스는 그러한 자료를 제공하지 않는다. 그래서, 계절예측 상세화가 필요하며 이 연구에서 실제 분야적용에 관해 고찰한다.

과정기반모형은 보정(calibration)에 관한 전문가적 경험이 필요하고 모형구동에 많은 시간이 소요된다. 그래서, 이 연구에서는 간략성을 위해 계산이 간편한 계절기후지수(seasonal climate index)로 표현되는 상세기후정보의 생산에 계절예측 상세화를 적용하고자 한다. 계절기후지수의 예측정보는 Figure 9의 과정을 따라 생산된다. 즉, 전구계절예측으로부터 대상구역의 계절예측을 얻고, 이를 입력으로 다지점 WG모형을 구동해 날씨시나리오를 다량으로 생성한다. 최종적으로, 각 시나리오의 계절기후지수 값을 계산해 확률분포의 형태로 예측정보를 얻는다. 실제 적용에서는 계절기후지수를 계산하는 대신에 시나리오를 입력으로 한 과정기반모형의 구동으로 목적변수의 예측정보를 생산할 수 있다.

계절예측 상세화의 적용성을 판단하기 위해서는 Figure 9의 과정을 통해 생산된 예측정보의 유용성을 평가할 필요가 있다. 아래에서, 예측대상인 계절기후지수를 소개하고 이어서 예측정보의 유용성 평가방식을 설명한다.

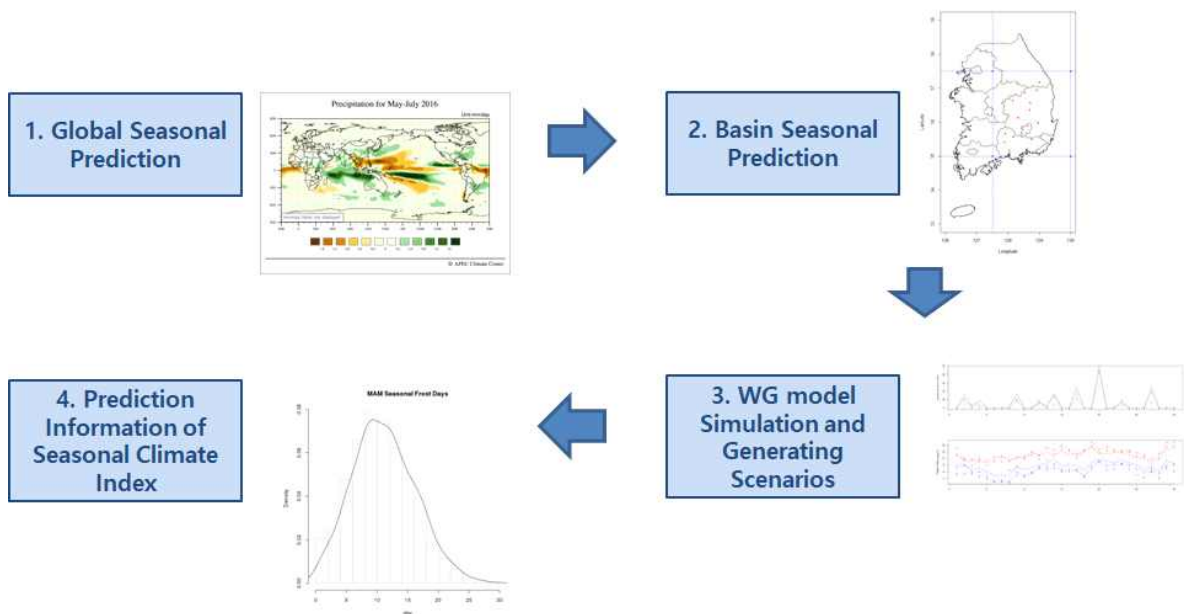


Figure 9. The process of producing seasonal climate index prediction from global seasonal prediction. The final prediction information is a probability distribution.

(가) 계절기후지수

계절기후지수는 계절예측 상세화의 적용성을 평가하기 위해 기존에 연단위로 제공하는 기후지수를 산정하는 식을 계절규모의 기후지수로 재정의하여 계절의 기후 특성을 대표할 수 있는 수치를 의미한다.기온과 강수량을 대상으로 계절기후지수를 정의하였으며, 극한기후지수를 포함한 총 35개의 계절기후지수를 최종적으로 선정하여 적용하였다. Tables 1-2는 계절예측 상

세화의 적용성 평가에 사용한 계절기후지수를 설명하고 있다.

Table 1. Seasonal climate index for temperature

Seasonal climate index	Definition	Unit
SFD	Number of seasonal frost days: Seasonal count of days when Tmin (daily minimum temperature) < 0 degC.	day
SSD	Number of seasonal summer days: Seasonal count of days when Tmax (daily maximum temperature) > 25 degC.	day
SID	Number of seasonal icing days: Seasonal count of days when Tmax (daily maximum temperature) < 0 degC.	day
STN	Number of seasonal tropical nights: Seasonal count of days when Tmin (daily minimum temperature) > 20 degC.	day
SGSL	Seasonal growing season length: Seasonal count between first span of at least 6 days with daily mean temperature Tavg > 5 degC and first span of at least 6 days with TG < 5 degC.	day
SXTX	Seasonal maximum value of daily maximum temperature:	degC
SXTN	Seasonal maximum value of daily minimum temperature:	degC
SNTX	Seasonal minimum value of daily maximum temperature:	degC
SNTN	Seasonal minimum value of daily minimum temperature:	degC
STN10p	Seasonal Percentage of days when Tmin < 10th percentile	%
STX10p	Seasonal Percentage of days when Tmax < 10th percentile	%
STN90p	Seasonal Percentage of days when Tmin > 90th percentile	%
STX90p	Seasonal Percentage of days when Tmax > 90th percentile	%
SWSDI	Seasonal Warm spell duration index: Seasonal count of days with at least 6 consecutive days when Tmax > 90th percentile	day
SCSDI	Seasonal cold spell duration index: Seasonal count of days with at least 6 consecutive days when Tmin < 10th percentile	day
SDTR	Seasonal daily temperature range: Seasonal mean difference between daily Tmax and Tmin	degC
STN25	Number of seasonal tropical nights: Seasonal count of days when Tmin (daily minimum temperature) >= 25 degC.	day
SHD	Number of seasonal heat wave days: Seasonal count of days when Tmax (daily maximum temperature) >= 33 degC.	day
SCDD	Seasonal cooling degree day: A measurement designed to quantify the demand for energy needed to cool buildings. Threshold = 24	day

	degC	
SHDD	Seasonal heating degree day: A measurement designed to quantify the demand for energy needed to heat buildings. Threshold = 18 degC	day
SMHD	Seasonal maximum length of heat wave days: maximum number of consecutive days with TX (daily maximum temperature) ≥ 33 degC.	day
SSHII	Seasonal simple heat wave intensity index	degC/day
SCD	Seasonal cold surge days: 1) When the minimum temperature is lower than 10 degC from the previous day and is below 3 degC and is lower than seasonal normals. 2) When the minimum temperature is expected to last more than 2 days below -12 degC.	day

Table 2. Seasonal climate index for precipitation

Seasonal climate index	Definition	Unit
SRx1day	Seasonal maximum 1-day precipitation	mm
SRx5day	Seasonal maximum 5-day precipitation	mm
SSDII	Seasonal simple precipitation intensity index	mm/day
SR10mm	Seasonal count of days when PRCP ≥ 10 mm	day
SR20mm	Seasonal count of days when PRCP ≥ 20 mm	day
SR80mm	Seasonal count of days when PRCP ≥ 80 mm	day
SMCDD	Seasonal maximum length of dry spell: maximum number of consecutive days with PRCP < 1 mm	day
SMCWD	Seasonal maximum length of wet spell: maximum number of consecutive days with PRCP ≥ 1 mm	day
SR95pTOT	Seasonal total PRCP when RR > 95 p	mm
SR99pTOT	Seasonal total PRCP when RR > 99 p	mm
SPRCPTOT	Seasonal total precipitation in wet days	mm
SRD	Seasonal count of rainy days when PRCP ≥ 0.1 mm	day

(나) 적용성 평가 방법론

계절기후지수 예측정보의 유용성을 예측정확도와 불확실성 표현 적절성 관점에서 고려한다. 특히, 예측정확도는 다시 점예측(point prediction) 정확도와 위험경고 정확도로 구분하여 평

가한다. 아래에서 각 관점에서 평가방식을 설명한다.

① 점예측 정확도 평가

점예측 정확도란 계절기후지수의 실제값을 예측하는 정확도로 정의한다. 계절예측 상세화를 통해 생산된 예측정보는 확률분포로 표현된다. 그래서, X 가 그 확률분포를 따르는 확률변수이고 x 가 계절기후지수의 실제값이라고 할 때, 점예측 정확도의 측도로 평균제곱오차(mean squared error, MSE), $E\{(X-x)^2\}$ 를 쓴다. 일반적으로 MSE에 대해서

$$E\{(X-x)^2\} = \{E(X) - x\}^2 + \text{Var}(X) \quad [9]$$

가 성립하는데, 우변의 첫 번째 제곱항은 예측정보의 편의(bias), 분산항은 예측정보의 불확실성을 표현한다. 특히, 분산항은 예측정보가 확률적이기 때문에 정확도 측정에 있어 필히 고려되어야 한다. 예를 들어, Figure 10은 봄철서리일수에 대한 두 가지 예측정보를 제시하는데, 양자 모두 편의가 0이다. 하지만, 파란색의 예측정보가 실제값에 확률이 더 모여 있기 때문에 더 정확한 정보를 주고 있는데, 이는 Eq. [9]의 분산항으로 잘 설명된다.

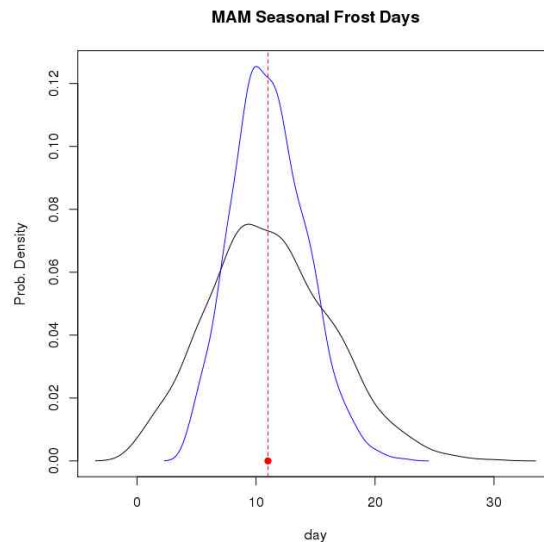


Figure 10. Two Predictions for MAM frost days. The red point is the actual value. Both have zero bias, but different variances. Since the blue prediction has less uncertainty, it is more informative than the other.

예측정보와 실제값은 매년 변하기 때문에 hindcast 기간의 각 해마다 구해지는 MSE값의 평균(average of MSE, AMSE)을 측도로 고려한다. 하지만, AMSE는 단위에 의존하는 성질이 있어, 이 측도의 규격화(normalizing)를 시도한다. 계절기후지수 예측에서 계절예측의 실효성을 파악하기 위해서 Weigel et al. (2007)와 같이 climatology를 기반한 예측의 성능을 기준성능(baseline)으로 잡는다. Climatology 기반 계절기후지수 예측의 AMSE를 $AMSE_b$ 라고 하면, 최종적으로

$$AMSE \text{ ratio} = \frac{AMSE}{AMSE_b} \quad [10]$$

를 점예측정확도 측도로 쓴다. AMSE ratio의 값이 1보다 작으면 계절예측 기반 계절기후지수 예측정보가 실효성이 있고, 0에 가까울수록 정확도가 높다.

② 위험경고 정확도 평가

실무적으로 기후로 인한 위험을 정확하게 경고할 수 있는 예측정보가 종종 요구된다. 예를 들어, 농업분야의 경우, 봄철 서리일수가 길수록 농작물 생장에 치명적이어서 서리일수가 평년에 비해 길어질 가능성에 관심이 크다. 이러한 관점에서 계절예측 기반의 계절기후지수 예측정보가 위험경고에 얼마나 정확한가를 평가한다. 만약 계절기후지수의 실제값 x 가 클수록 위험하다고 하면 상위 임계값(high threshold) a 를 정해, $x > a$ 을 잘 경고하는지를 판단한다. 이 경우에, 예측대상은 이진(binary)형태로, TRUE: $x > a$; FALSE: $x \leq a$ 이고 예측을 위해 상세화를 통해 얻은 확률분포를 따르는 X 에 대해 확률 $\Pr(X > a)$ 를 계산한다. $x > a$ 일 때 $\Pr(X > a)$ 이 높고 반대로 $x \leq a$ 일 때는 그 확률이 낮을수록 위험을 잘 경고하는 것이다. 위험경고 정확도의 측도로 ROC 곡선의 AUC(area under curve)를 쓴다. 그런데, AUC값은 임계값 a 에 의존하기 때문에, 계절기후지수가 클수록 위험한 경우에는, 상위 25,20,15,10%의 분위수를 임계값으로 두어 계산한 AUC의 중간값(median)을 최종적인 측도로 쓰고, 반대로 작을수록 위험한 경우에는 하위 확률에 분위수를 임계값으로 두어 같은 방식으로 측도를 계산한다. 측도값이 0.5보다 크면 계절예측기반의 위험경고가 실효성이 있고, 1에 가까울수록 정확도가 높다.

③ 불확실성 표현 적절성 평가

앞서 거듭 언급하였듯이, 계절기후지수 예측정보는 확률분포로 주어지고 이는 정보의 불확실성을 표현한 결과이다. 앞서 위험경고 정확도 평가에서 $p = \Pr(X > a)$ 을 계산하는데, 값의 의미는 계절기후지수 값이 a 를 넘을 확률이다. 불확실성 표현이 적절하다면, 확률 p 의 상대빈도로 넘을 경우가 발생할 것이다. 더 일반적으로, 불확실성 표현 적절성 평가는 Figure 11에서처럼 각 해의 계절기후지수의 실제값이 예측된 확률분포로부터 뽑힌 표본점으로 볼 수 있는가를 판단하는 것이다.

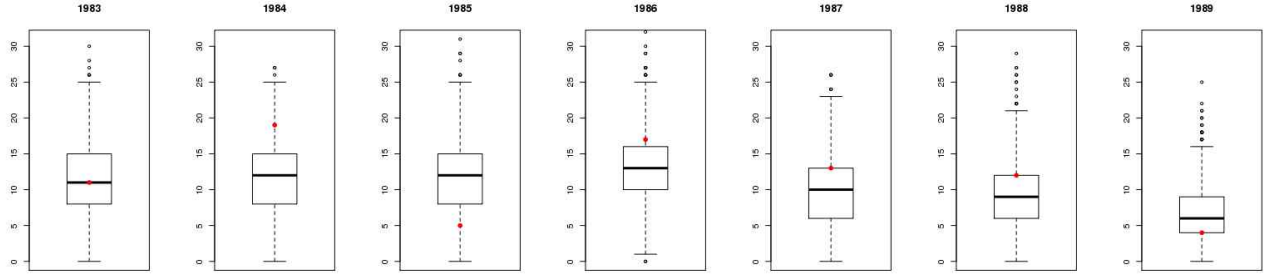


Figure 11. MAM frost days prediction (boxplot) and actual values (red points) for 1983–1989. Is each red point sampled from the corresponding distribution?

불확실성 표현 적절성 평가가 평이하지 않은 것은 관측의 일회성에 있다. 즉, 각 해마다 얻어진 확률분포에 대응하는 실제값은 하나뿐이다. 하지만, 이 점은 어렵게 않게 다음과 같은 수리적 사실로 극복가능하다: $i = 1, \dots, n$ 에 대해 x_i 가 i 번째 해의 실제값이고 F_i 가 동일 해의 상세화로 얻어진 확률분포의 누적확률분포(cumulative distribution function, CDF)이라고 하자. x_i 가 F_i 부터 나온 표본점이라면, $u_i = F_i(x_i)$, $i = 1, \dots, n$ 들이 구간 $[0,1]$ 에서 균일하게 분포한다. $u_1, \dots, u_n$ 이 균일분포(uniform distribution)를 따르는지를 확인하는 것으로 표준적인 분포검정법을 적용할 수 있다. 균일성을 정량화하기 위해서, 규격화(normalization)되지 않은 Cramer von Mises 통계량의 제공근

$$\text{CVM} = \sqrt{\int_0^1 \{u_{([nz])} - z\}^2 dz} \quad [11]$$

을 고려한다. 여기서, $u_{(0)} = 0$ 이고 $u_{(i)}$ 는 $u_1, \dots, u_n$ 중 i 번째로 작은 값을 뜻한다. Figure 12은 봄철 서리일수에 대해서 $u_1, \dots, u_n$ 의 균일분포에 대한 분위수그림으로 청색면적이 커질수록 불확실성 표현이 적절하지 않음을 의미한다. Eq. [11]은 청색면적 크기에 대응하는 통계량이다.

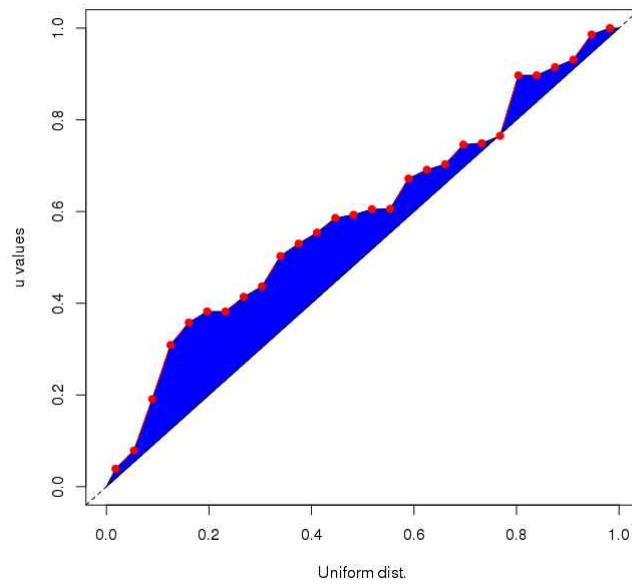


Figure 12. The qqplot for u-values of MAM frost days against uniform distribution. As the blue area gets larger, the uniformity is weaker.

다. 고해상도 격자자료 생산 및 검증

고해상도 격자자료 생산 및 검증은 위성관측기반으로 장기간의 고해상도 원시위성 강수격자자료를 생산하여 여러지역을 대상으로 원시위성의 검증결과를 제시하고, 지상관측자료를 이용하여 오차보정된 강수격자자료를 생산한 다음 검증결과를 제시하여 고해상도 격자자료의 우수성을 입증하였다. Figure 13은 고해상도 격자자료 생산 및 검증의 순서도를 보여주고 있다.

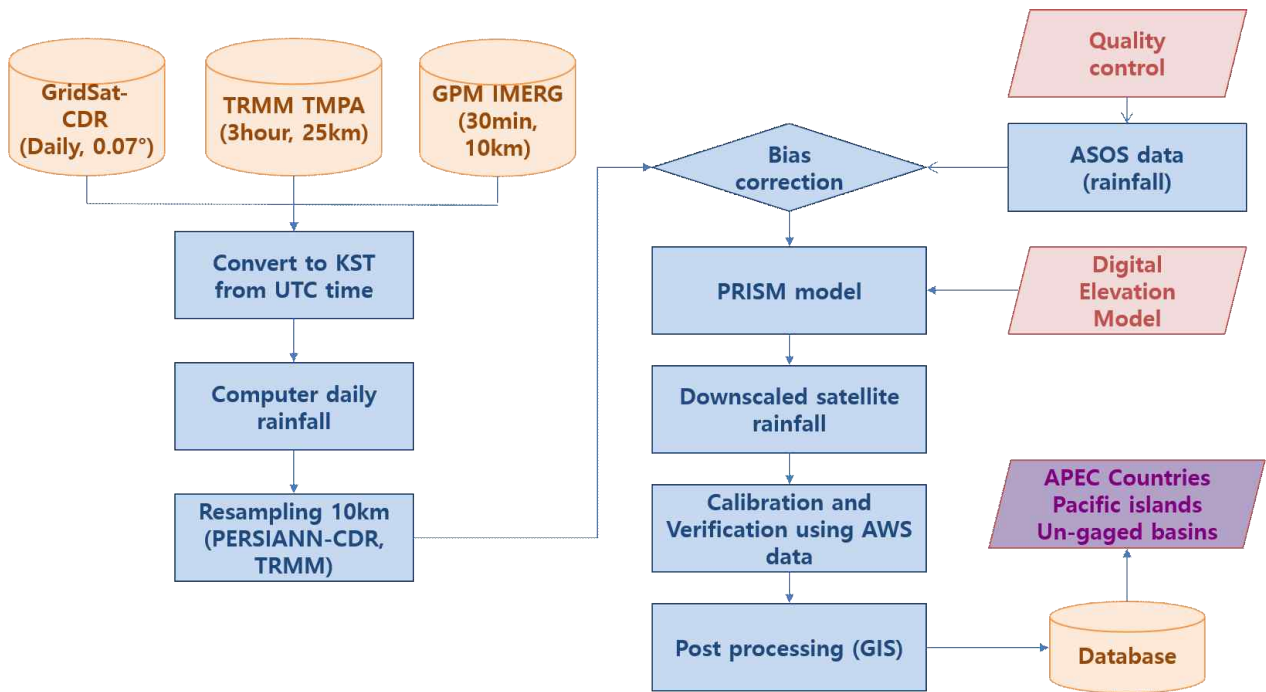


Figure 13. Flowchart of high-resolution gridded data production and evaluation

(1) 고해상도 강수격자자료 생산

(가) GRIDSAT 1B

Gridsat-B1자료는 장기간의 정지궤도 적외채널(Infrared) 휘도온도(Brightness Temperature)를 제공하고 있으며, CDR-quality infrared window(IRWIN) channel(near 11 μ m), Visible channel(near 0.6 μ m), Infrared water vapor(IRWVP) channel(near 6.7 μ m) 3개의 채널을 제공하고 있다. 자료는 현재 버전은 v02r01이고 자료기간은 1980년 1월부터 2014년 3월까지의 자료를 구축하고 있으며, 현재 버전은 입사각에 따른 휘도온도 보정한 값을 추가하였고 netCDF 4 파일포맷으로 저장되어 배포된다. 유럽기상정지궤도위성 Meteosat 위성의 위경도 정보(satlat, satlon)은 다시 재배열이 되어 제공되고 있다.

정지궤도 위성은 각각의 나라별로 발사되어 운영중이다. 미국은 GOES시리즈, 일본은 GMS, MTSAT 최근 Himawari 위성이 발사되어 운영중이고 유럽은 Meteosat시리즈가 발사되어 현업

운영중에 있다. 각각의 자료는 자료포맷, 자료보정 방법, map projection을 달리하여 운영중에 있기 때문에 보정된 자료를 이용하기 어려운 점이 있다. Gridsat자료는 NOAA에서 이러한 파편되어 있는 정보를 보정하여 제공한다는 장점이 있다.

i Nadir correction : 버전변경에 따라 적외채널(irwin_cdr)값은 태양입사각에따라 보정이 되어 제공되고 있으며, irwin_vza_adj 입사각 정보를 같이 제공하고 있다.

ii 영상중복 : 전지구를 관측하기 위해 각국에서 발사된 정지궤도 위성자료는 위치에 따라 영상이 중복이 되어 있으며, 각각의 중복된 정보는 같이 제공이 되고 있다.

iii 부가적인 정보중에서 위, 경도값과 입사각, 방위각에 대한 각각의 픽셀에 대해서 정보를 제공하고 있다.

자료는 여러 가지 변수와 속성값을 가지고 있으며, 여러 가지 tools에 의해 자료를 읽고 활용할 수 있으며, 리눅스에서는 ncdump 명령어로 자료처리가 가능하다. 처리할 수 있는 자료변수는 다음과 같다(Table 3).

Table 3. Variable of Gridsat data

Name	Dimensions	Purpose
irwin_cdr	lat-on	Primary CDR Variable The nadir-most infrared window observation
irwin_2	lat-lon or sparse	When two satellites overlap, this layer provides the second-best observation(based on view zenith angle)
irwin_3	lat-lon or sparse	When three satellites overlap, this layer provides the third-best observation(based on view zenith angle). This is useful for reconstructing the entire view for a particular satellite
irwin_vza_adj	lat-lon	Provided to allow users to reverse the view zenith correction for the irwin_cdr variable.
irwvp	lat-lon	The nadir-most infrared water vapor observation.
irwvp_2	lat-lon or sparse	When two satellites overlap, this layer provides the second-best observation(based on view zenith angle)
vschn	lat-lon	The nadir-most visible channel observation.
vcshn_2	lat-lon or sparse	When two satellites overlap, this layer provides the second-best observation(based on view zenith angle)
satid_ir	lat-lon	The packed satellite index value(provides information for both the irwin_cdr and irwin_2 variables).
satid_ir3	lat-lon or sparse	The satellite index for the irwin_3 variable.
satid_wv	lat-lon	The packed satellite index value(provides information for both the irwvp and irwvp_2 variables).
satid_vs	lat-lon	The packed satellite index value(provides information for both the vschn and vschn_2 variables).

Gridsat자료는 NOAA CPC(Climate Prediction Center)의 4km 고해상도 전지구 적외채널 자료와 비슷하지만 CPC 자료가 2000년부터 시작하여 현재까지 제공되고 있기 때문에 이기간의 자료는 TRMM자료를 활용가능하기 때문에 기간이 겹치지 않는 1988년대부터 TRMM 자료 이전인 1997년까지 Gridsat 자료를 이용하였다. CPC자료와 Gridsat 자료와의 차이점은 아래 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Comparison with Gridsat and CPC gridded data

	Gridsat	CPC-4km
공간해상도	8km	4km
시간해상도	3시간	30분
센서	가시, 수증기, 적외	적외
월평균 파일용량	40GB	45GB
자료 기간	1980-현재	2000-현재
이미지 합성	전처리	전처리
시간 결합(UTC)	전처리	전처리 되어 있지 않음
자료포맷	netCDF	바이너리

한반도 지역은 1980년대초에 발사된 일본 GMS 시리즈의 정지궤도의 연속적인 성공적인 발사에 힘입어 GMS자료는 2000년대 자료까지 이용가능하며, 2000년대 중반에는 일본 정지궤도 위성의 발사실패로 미국 GOES위성의 위성을 동아시아로 이동해서 자료를 연속적으로 이용이 가능하였다. 이후 MTSAT위성과 현재 2세대 정지궤도 Himawari 위성이 동아시아 관측을 계속하고 있으며, 한국에서는 2010년대 천리안 정지궤도 위성이 처음으로 발사되어 운영중에 있다. 차세대 정지궤도 위성인 GEO-Kompsat-2A호의 성공적인 발사와 2019년 7월 현업운영을 중이며 자료를 제공하고 있다 (Figure 14).

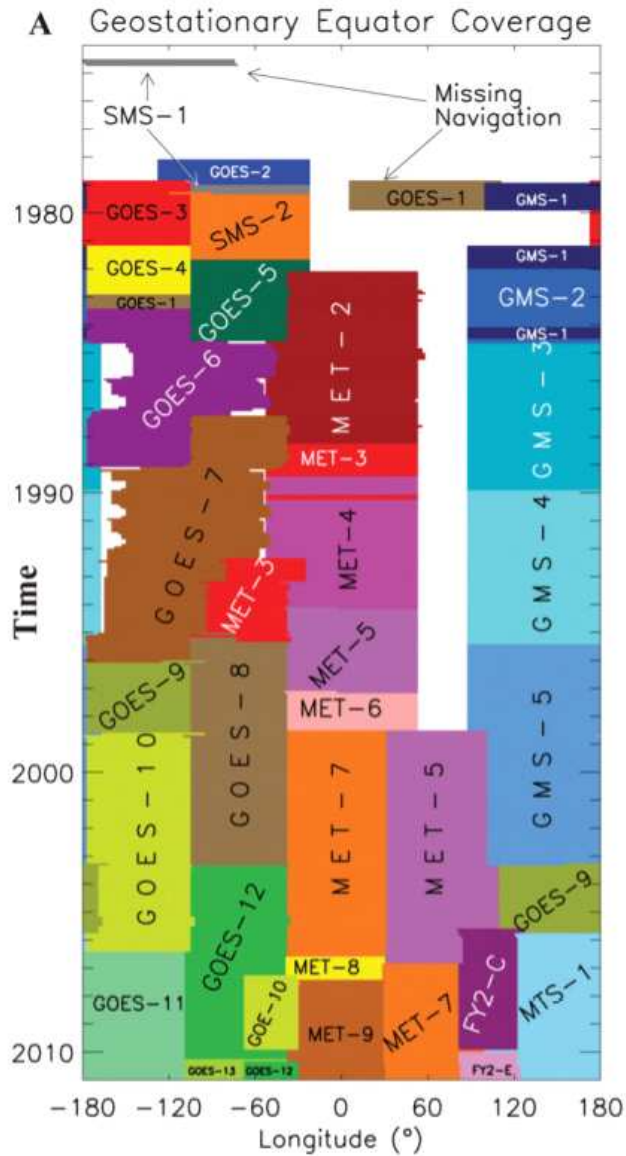


Figure 14 Geostationary satellite coverage of
Grisat 1b data by time series

Gridsat 자료는 netCDF의 포맷으로 메타자료는 좌표계, 변수 등 다양한 정보를 제공있다. 아래와 같이 각 변수의 단위, 좌표계, missing 값의 정보를 알 수 있으며, 이 값을 이용하여 강수량 추정 알고리즘에 의해 강수량으로 변환되어 저장되었다.

dimensions:

```
time = 1
lat = 2000
lon = 5143
sparse3ir = 1
sparse2vs = 1
sparse2wv = 1
sparse2ir = 97885
Ngeo = 2
StrLen = 50
```

variables:

```
sbyte irwin_vza_adj(time = 1, lat = 2000, lon = 5143)
:coordinates = "lon lat"
:long_name = "Adjustment made to all IRWIN channels for view zenith angle effects"
:units = "Kelvin"
:comment = "Original_temperature_observed = variable(IRWIN) - variable(IRWIN_vza_adj)"
:scale_factor = 0.25
:add_offset = -10
:valid_range = System.Int16[]
:missing_value = -1
:_FillValue = -1

sbyte satid_ir3(sparse3ir = 1)
:long_name = "IRWIN_3 Satellite Index (packed)"
:valid_range = System.SByte[]
:variable = "irwin_3"
:comment = "The SATID_IR3 value corresponds to the index for the satellite variables (SATLAT, SATLON, SATRAD, SATNAME). It derives from the sate"
:Usage = "The SATID can be used in conjunction with the sub-satellite latitude and longitude to determine satellite view and azimuth angles."
:Unpacked = "14 is missing"

int sparse3ir(sparse3ir = 1)
:long_name = "Coordinate for compression by gathering (if used)"
:channel = "irwin_3"
```

Gridsat의 적외채널 자료는 irwin_cdr 변수로 표현되며, 휘도온도로 표시함. VZA(view zenith angle) 보정이 된 자료로 배열은 (5143×2000)자료이다.

```
short irwin_cdr(time = 1, lat = 2000, lon = 5143)
:long_name = "NOAA FCDR of Brightness Temperature near 11 microns (Nadir-most observations)"
:standard_name = "toa_brightness_temperature"
:coordinates = "lon lat"
:units = "Kelvin"
:comment = "Nadir-most observations"
:scale_factor = 0.01
:add_offset = 200
:valid_range = System.Single[]
:missing_value = -31999
:_FillValue = -31999
:Note_A = "Calibration correction of Knapp (2007) applied before VZA correction."
:Note_B = "The IRWIN_CDR data have been View Zenith corrected using the Joyce (NCEP) algorithm"
:intergeo_cal_flag = 0
```

Figure 15은 1985년 1월 1일 00(UTC) 11 μ m 휘도온도 영상으로 VZA보정된 영상자료이다. 적외채널 휘도온도 기반 강수량 추정 알고리즘을 개발 한반도 지역에 적용하였다. 한반도에 적합한 알고리즘을 개발하여 보다 정확한 지역 강수량을 산출하고 DB를 구축하였다.

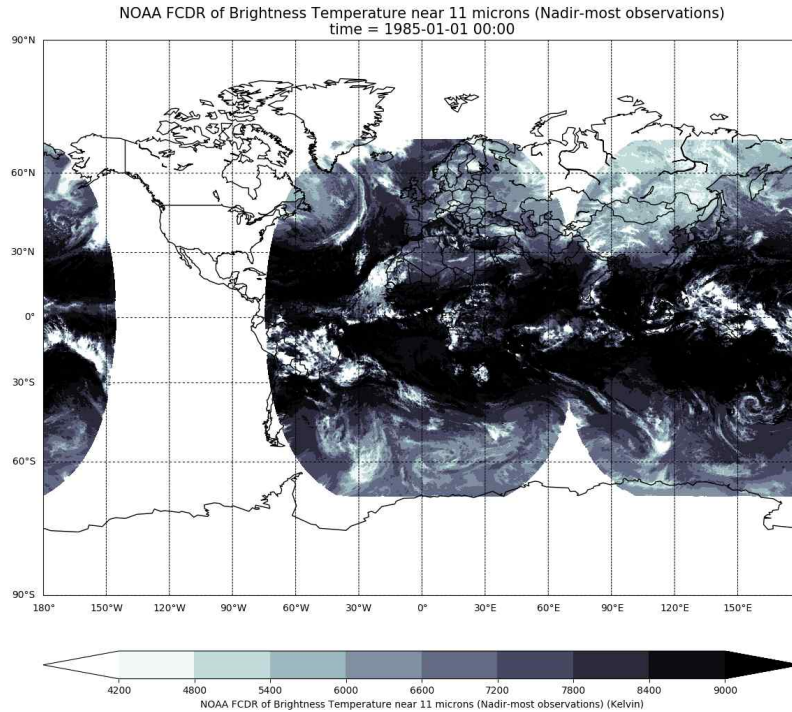


Figure 15 Brightness temperature of Gridsat image at January 1, 1985

(나) 원시위성 강수격자자료 생산방법

아시아태평양 지역 고해상도 위성강우 격자자료를 구축하기 위하여 세계최초로 강수레이더를 탑재한 TRMM 위성의 Level 3 TMPA 격자자료를 1998년부터 2014년 7월까지 자료를 수집하였고 듀얼레이더를 탑재한 GPM IMERG 격자자료를 2014년 8월 2018년까지 자료를 수집하여 10km로 자료상세화 구축하였다. 장기간(30년)자료를 구축하기 위하여 1998년 이전 자료는 정지궤도 적외선 센서 자료를 이용하여 강우자료를 산출함. 전지구 정지궤도 위성자료인 Gridsat자료를 NOAA Hydro-estimator, GMSAR(GOES Multispectral Rainfall Algorithm)의 개선 강수추정 알고리즘을 블렌딩하여 한반도시간(KST) 일강수자료를 생산하였다. Hydro-Estimator(H-E) 알고리즘은 NOAA GOES 위성의 IR데이터를 이용하여 강수량을 추정하는 방법이다. NOAA/NESDIS에서는 IFFA(Interactive Flash Flood Analyser)기법을 1970년부터 현업운영하면서 2002년부터 본격적으로 운영되고 있기 때문에 되고 있기 때문에 H-E 알고리즘은 정지궤도 자료를 강수자료로 변환하는데 유용하다. H-E는 현재 레이더 기반 적외선 윈도우 휘도온도를 이용하고 있고 대기습도(PW)와 상대습도와 지형 등의 보조자료를 이용하여 보정한다. 기본식은 휘도온도와 레이더 강수량의 6800픽셀을 조합으로 아래의 회귀식으로 산출하여 기본 강수량을 산출한다:

$$RR = 1.1183 \times 10^{11} \exp(-0.036382 T_{10.7}^{1.2})$$

RR은 강수량이며 단위는 mm/h이다. NCEP(National Centers for Environmental Prediction(NCEP)의 NAM(North American Mesoscale) 모델의 가강수량에 의한 휘도온도값 변화와 상대습도에 따른 휘도온도와 강수량의 차이가 있기 때문에 가강수량과 상대습도를 이용하여 기본식을 보정하게 된다 (Figure 16).

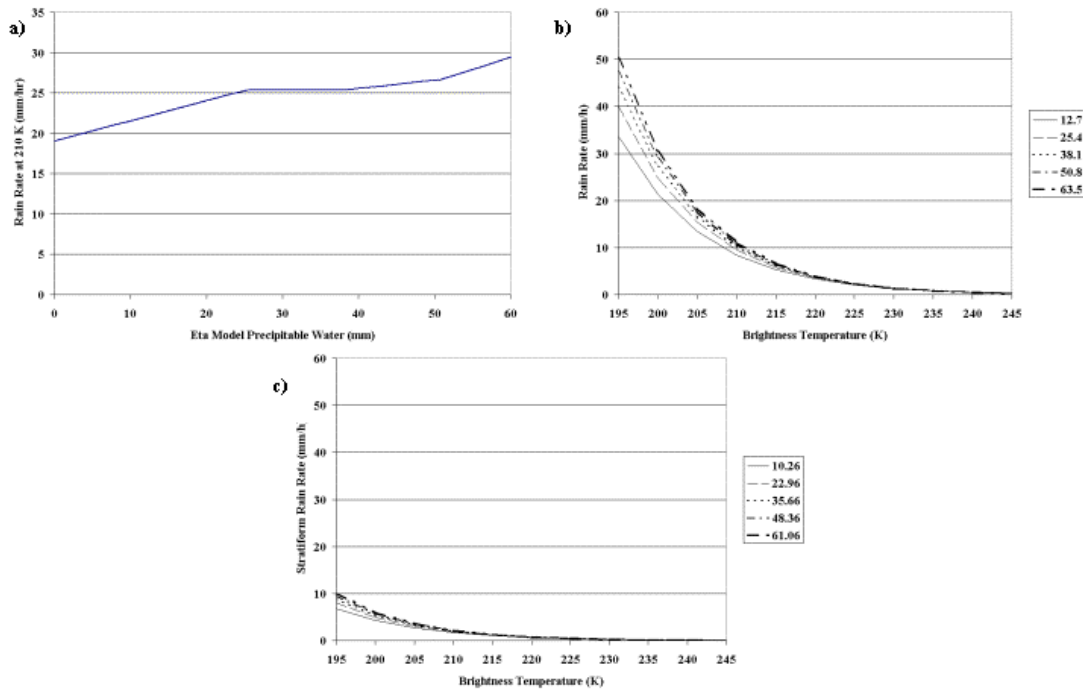


Figure 16 Adjustment functions in the Auto-Estimator using function of precipitable water, brightness temperature-rainfall relationship

GMSAR 강우추정 알고리즘은 Ba and Gruber 2001의해 제안된 강우추정 알고리즘으로 5개의 GOES 채널을 이용하여 강수량을 산출한다. ch10.7과 ch6.9의 차이를 이용하여 강수구름대에서 비가 오지않는 cirrus구름을 제거하고, ch3.9 ch10.7과 ch12를 조합하여 낮시간대에 구름 particle size을 추정하여 강수산출에 적용한다. 레이더자료와 휘도온도의 관계를 통하여 기본 강수자료를 산출하고 기상모델에서 제공하는 PW*RH 구름발달계수와 습도보정장을 조정변수로 이용하여 최종 강수량을 산정한다. 밤시간대에는 ch 3.9자료로 강수량을 보정하여 적용한다 (그림 4). 비구름에서 비가 오지않는 Cirrus 구름을 제거하는 방법은 통상 Alder and Negri(1988)의 방법을 많이 이용하는데 Sope(S)와 온도 gradient(Gt)를 25개의 GOES 픽셀에서 계산하여 산출한다. 산출식은 다음과 같다:

$$G_t = T_{avg} - T_{min}, \quad s = 0.568(T_{min} - 217).$$

T_{min} 은 25×25 픽셀에서 가장 낮은 값이고 T_{avg} 는 타겟 픽셀의 주변 6개의 픽셀 평균값이다. 계산된 G_t 는 클수록 적운형 구름에 가깝고 값이 작을수록 Cirrus 구름에 해당된다. 낮시간대는

visible 채널의 반사도값이 $VIS > 0.4$ 보다 크고 구름 particle size가 $15\mu m$ 보다 크고 ch11-ch6.7의 값이 마이너스 값이고 ch11의 휘도온도가 230k보다 작은 기준을 만족할 때 다음식에 의해서 강수량을 최종산출한다.

(다) 원시위성 강수격자자료 검증방법

원시위성 강수격자자료의 정확성은 지상관측자료(1988-2018년 동안 12개 ASOS 일강수량 자료)와 비교하여 평가하였다. 사용한 평가측도는 COR, RMSE, PBIAS, 탐지확률(Probability of Detection, POD), 오보율(False Alarm Ratio, FAR), 임계성공지수(Critical Success Index, CSI)이다. COR, RMSE, PBIAS은 정량적 통계량을, 탐지확률, 오보율, 임계성공지수는 범주형 통계량을 의미한다. 탐지확률, 오보율, 임계성공지수의 정의는 아래 Table 5과 같다.

Table 5. Definition of POD, FAR, and CSI

Index	Equation	Best value	Range
Probability of Detection (POD)	$HIT/(HIT+MISS)$	1	0~1
False Alarm Ratio (FAR)	$FALSE/(HIT+FALSE)$	0	0~1
Critical Success Index (CSI)	$HIT/(HIT+MISS+FALSE)$	1	0~1

(2) 고해상도 강수격자자료 오차보정 기법 개발

(가) 오차보정 기법에 사용한 자료

고해상도 강수격자자료 오차보정은 대한민국을 대상지역으로 선정하여 수행하였다. 기상청에서 제공하는 지상관측자료와 위성관측기반으로 장기간(1988-2018년) 동안 생산한 고해상도 ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$) 일강수량 자료를 사용하였다.

(나) 오차보정 기법

오차보정 기법은 Geographical Ratio Analysis (GRA)를 기반으로 개발하였다. GRA는 지상관측강수량과 원시위성자료 간의 비율(比)을 공간보간해서 각 격자점의 강수량을 원시위성자료의 값과 비의 곱으로 얻는 방법이다 (Duan and Bastiaanssen, 2013; Laurent et al., 2013). Figure 17은 오차보정 기법의 전체적인 순서도를 보여주고 있다. 오차보정의 매개변수 추정에는 지상관측자료(1988-2018년 동안 55개 ASOS 일강수량 자료)를 사용하여 수행하였다. 교차검증(5-fold cross-validation)을 사용하여 매개변수를 추정하였다.

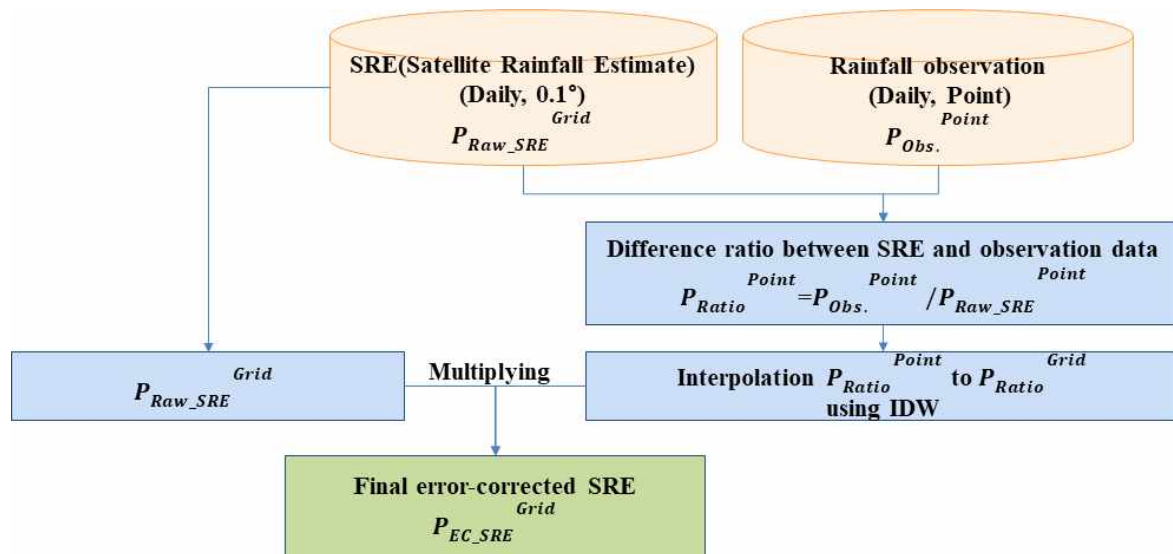


Figure 17. Flowchart of error-correction method

(다) 오차보정된 강수격자자료 검증방법

오차보정된 강수격자자료의 정확성은 지상관측자료(1988-2018년 동안 12개 ASOS 일강수량 자료)와 비교하여 검증하였다. 총 6개의 평가측도를 선정하여 검증을 수행하였다. 오차보정된 강수격자자료의 검증은 다음의 과정으로 수행하였다.

- i 고해상도 강수격자자료 오차보정의 정확도를 나타낼 수 있는 평가측도(COR, RMSE, PBIAS, 탐지확률(POD), 오보율(FAR), 임계성공지수(CSI))를 선정하여 ASOS 55지점에 대해 교차검증을 수행하여 평가측도를 산정함
- ii 교차검증을 통해 산정한 평가측도를 4개의 등급(Very Good, Good, Satisfactory, Unsatisfactory)으로 나누어 통계적 성능 평가를 수행함
- iii 강수격자자료의 지점 간 상관계수를 도식화하고, 지점 간 상관계수의 평균절대오차(MAE)로 제시하여 공간상관성을 분석함

오차보정된 강수격자자료의 우수성을 보다 객관적으로 입증하기 위해 국내외에서 생산한 위성영상 기반 격자자료를 분석하였다. 국내에서는 대표적으로 국가기상위성센터에서 천리안위성을 이용하여 시간단위의 강우강도를 산출하는 알고리즘 개발 및 검증을 수행하고 있다. 현재 기상자료를 구축하는데 연구의 초점이 맞추어져 있어 국가기상위성센터에서 생산하는 자료로 이 연구에서 생산한 기후자료와 비교하기에는 한계가 있다. 향후 정지궤도 기반 ECVs(Essential Climate Variables)을 구축을 수행하기 때문에 기후자료의 상호보완적 자료로서 활용될 수 있다. 따라서 위성영상을 기반으로 생산한 강수격자자료와 관련된 국외 연구의 조사하고 검증 결과를 조사하여 비교하였다. 전세계적으로 생산한 위성영상에 평가 결과를 기준으로 4개의 등급(Very Good, Good, Satisfactory, Unsatisfactory)의 통계적 성능 평가 기준을 정립하였고, 생산한 오차보정된 강수격자자료가 어느 등급에 해당하는지는 판단하여 최종적인 효용성을 검증하였다. Table 6는 Anjum et al. (2018); Brown (2006); Changming Li et al. (2018); Condom et al.

(2011); Fang, et al. (2019); Mahmoud et al. (2018); Wang et al. (2017); Zhu et al. (2018)이 제시한 고해상도 강수격자자료 통계적 성능 평가 기준을 보여주고 있다. 연구의 초기목표는 오차 보정된 자료의 통계적 성능을 충족 수준(Satisfactory)으로 맞추는 것으로 설정하였다. 평가측도가 우수 수준(Good) 이상을 달성하면 국내외 기술력과 비교하여 우수성이 입증된 것으로 판단하였다.

Table 6. Statistical performance evaluation criteria for high-resolution gridded precipitation.

Statistics	Performance Evaluation Criteria			
	Very Good	Good	Satisfactory	Unsatisfactory
COR	$COR \geq 0.9$	$0.8 \leq COR < 0.9$	$0.7 \leq COR < 0.8$	$COR < 0.7$
RMSE(mm)	$RMSE \leq 10$	$10 < RMSE \leq 20$	$20 < RMSE \leq 30$	$RMSE > 30$
PBIAS(%)	$ PBIAS \leq 5$	$ PBIAS \leq 7.5$	$ PBIAS \leq 10$	$ PBIAS > 10$
POD	$POD \geq 0.8$	$0.6 \leq POD < 0.8$	$0.5 \leq POD < 0.6$	$POD < 0.5$
FAR	$FAR \leq 0.3$	$0.3 < FAR \leq 0.4$	$0.4 < FAR \leq 0.55$	$FAR > 0.55$
CSI	$CSI \geq 0.6$	$0.54 \leq CSI < 0.6$	$0.3 \leq CSI < 0.54$	$CSI < 0.3$

라. 고해상도 관측자료 적용성 평가

(1) 고해상도 관측자료 기반 강수격자자료

(가) CPC 자료

CPC자료는 지상관측자료를 기반으로 육지내 일강수자료를 생산제공한다. 30,000개가 넘는 지상관측자료는 GTS(Global Telecommunication System), COOP등을 포함하여 다양한 자료를 수신하여 구축된다. GTS자료는 많은 나라에서 GTS 네트워크를 통하여 자료를 주고 받고 있으며, NOAA/CPC에서 일강수자료로 전처리하여 데이터베이스를 구축한다. 품질관리는 과거자료와 위성, 레이더 관측자료와 모델결과값 비교를 통하여 수행된다. 위성자료는 NOAA CMORPH(CPC Morphing technique)의 격자화된 0.25° 일강수자료를 이용하였고, 모델은 NOAA NCEP CFS(Global Forecast System) 6시간 간격 1.0° 의 위/경도 자료를 이용하여 품질관리에 이용된다. 품질관리된 자료는 일자료강수자료 격자화 하여 최종산출된다. 산출된 자료는 공간해상도 0.5° 위도/경도(720×360)로 1979년부터 현재까지 기간의 자료를 제공하고 있다. CPC자료는 지상관측에 의해 아프리카와 남극에서는 자료의 정확도가 다른 지역에 비해서 떨어지며, 이것은 지상관측자료의 질과 관측지점의 양에 따라 달라진다. 파일은 NetCDF 자료로 제공하고 있으며 파일포맷은 precip.yyyy.nc로 일강수자료를 제공한다 (Figure 18).

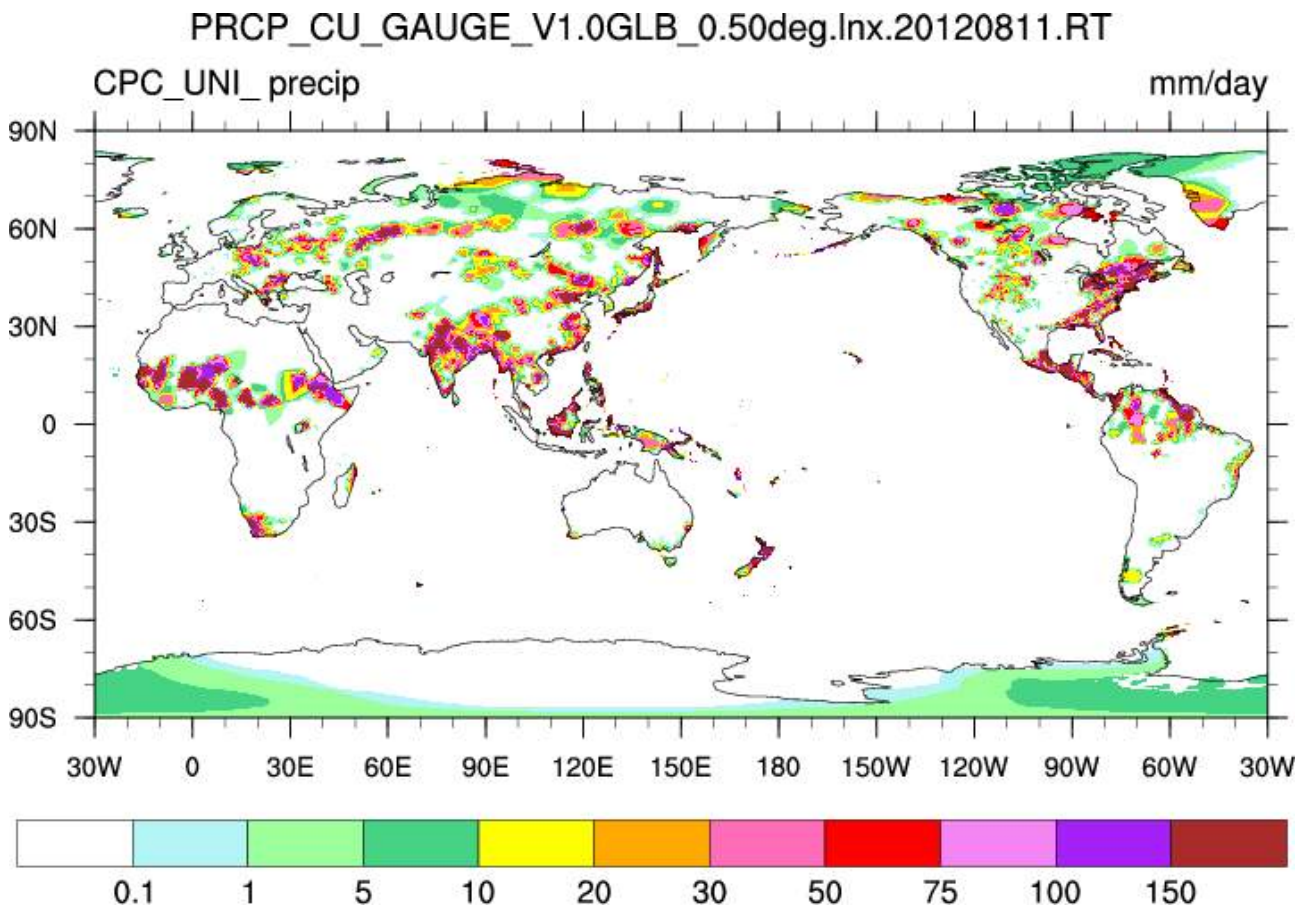


Figure 18. CPC precipitation gridded coverage at August 11, 2018

(나) APHRODITE 자료

APHRODITE(Asian Precipitation Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources)는 50년간의 지상관측자료를 이용하여 일강우 격자자료로 아시아 지역을 대상으로 자료를 산출하고 있음. 고해상도 격자자료를 기후정보 이용의 기초자료로 활용하기 위하여 생산하고 있다(Figure 19).

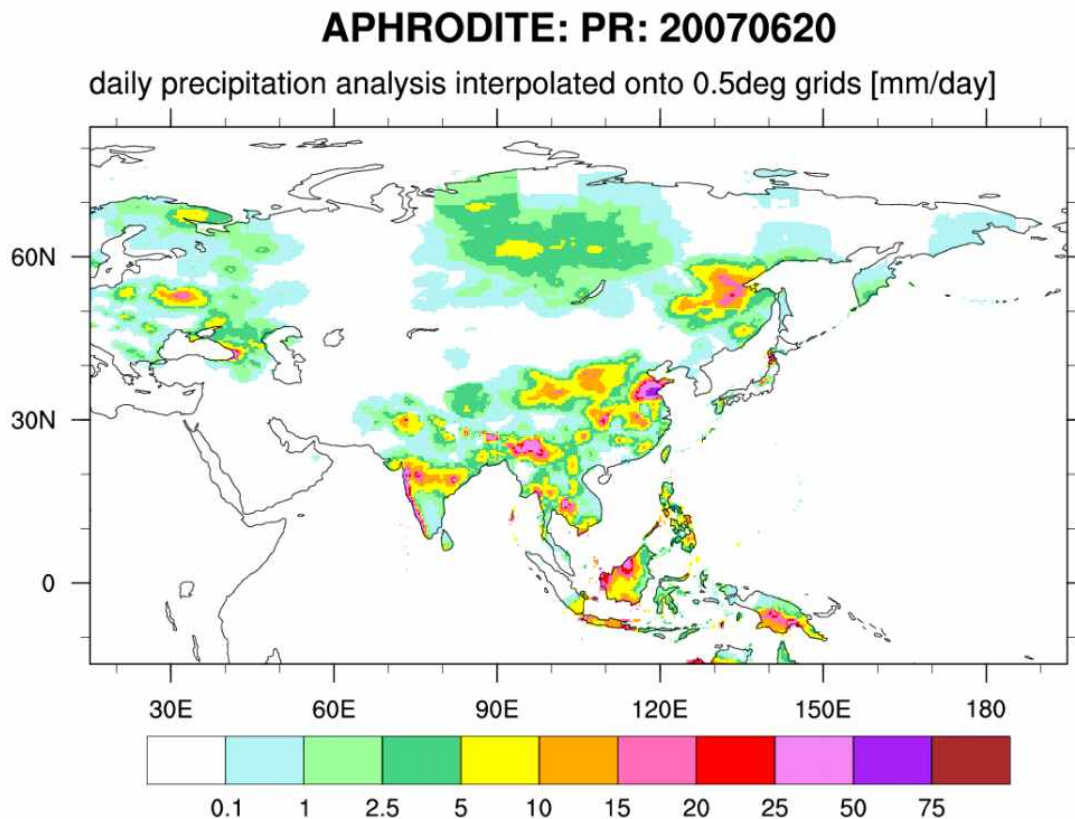


Figure 19. APHRODITE daily rainfall data at August 20, 2018

자료는 현재버전으로 V1101R1자료로 몬순 아시아 지역과 중동지역 및 러시아 지역에 대한 자료로 0.5° 와 0.25° 의 공간해상도 일강수량자료로 구성되어 있다. 자료 기간은 1951년부터 2007년까지 자료로 제공한다(Table 7).

Table 7. APHRODITE current version precipitation data

Name	Domain	Resolution	Period
Monsoon Asia(MA)	60°E-150°E, 15°S-55°N	0.5° and 0.25°, daily	1951-2007
Middle East(ME)	20°E-65°E, 15°S-45°N	0.5° and 0.25°, daily	1951-2007
Russia(RU)	15°E-165°E, 34°S-84°N	0.5° and 0.25°, daily	1951-2007

APHRODITE monsoon Asia Precipitation data자료는 1951년부터 2007년 12월 31일까지 일강수량자료로 지구관측범위는 경도 60° E-150° E, 위도 15° S-55° 의 커버리지를 가지고 0.5°, 0.25° 의 공간해상도 자료로 NetCDF 포맷의 파일로 제공한다. Figure 20는 지상관측자료를 나타내며 빨간점은 지역 지상관측자료, 그린점은 GHCN(Global Historical Climatology Network), CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center), NCAR-DS(National Center for Atmospheric Research Data Archive), NCDC(National Climate Data Center), FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations), GAME-T(GEWEX Asian Monsoon Experiment Tropics data center), MRC(The Mekong River Commission), ECAD(European Climate Assessment & Dataset)자료이며, 파란점은 GTS(Global Telecommunication System)의 강수량자료 관측지점 데이터이다.

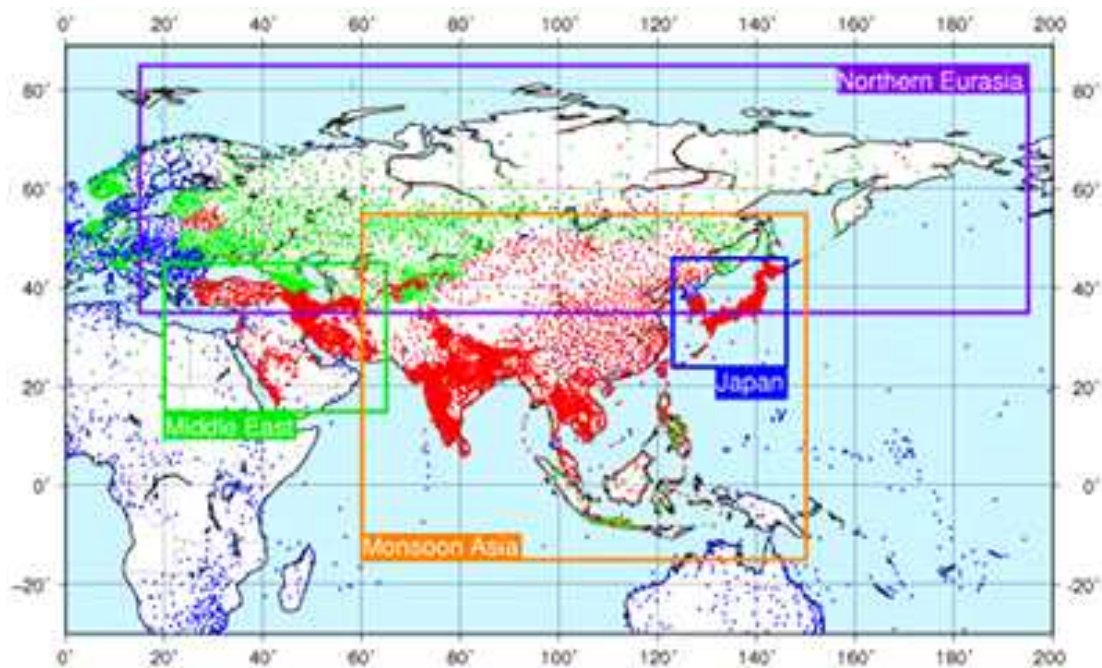


Figure 20. APHRODITE domain of current products

(다) CHIRPS 자료

CHIRPS(Climatic Hazards center InfraRed Precipitation with Stations)자료는 정지궤도 위성의 적외선센서와 지상관측자료 보정을 통하여 daily 자료를 생산 제공하고 있다. 관측기간은 1981년부터 2015년 11월까지 자료로 netCDF, binary, tif의 포맷으로 자료를 제공하고 있다. 관측범위 경도 -180° ~180° , 위도 50° N ~ 50° S의 지역을 관측범위로 공간해상도 0.25 × 0.25를 가진다. 자료는 크게 CHIRP의 위성기반 강수량과 CHIRPS prelim의 CHIRP과 GTS 지상관측자료 결합자료, CHIRPS final자료로 모든 지상관측자료 보정 강우량을 만들어 제공한다.

기후분야에 있어서 강우자료는 지상관측자료, 위성기반 강우자료, 재분석자료를 많이 이용한다. 지상관측자료는 대표적으로 CRU(Climatic Research Unit) 자료가 있으며, Harris et al(2013)의 방법에 의해 산출되며 0.5°의 해상도와 Monthly 자료로 제공된다. 위성기반은 CHIRPS(Climatic Hazards group Infrared Precipitation with Stations) daily 자료, CMORPH NOAA 기후예측센터에서 산출한 자료, Persiann-CDR 등이 대표적으로 이용되고 있다. 재분석자료는 ERA-Interim (European Center for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis Interim)의 25km 간격의 3시간 시간해상도를 가진 자료를 1974년부터 자료를 생산하여 현재 제공중이다 (Table 8). 위성강우 자료의 적용성 평가 검증자료로 기후분야에서 많이 연구하고 있는 CHIRPS, PERSIANN 자료를 이용하였다.

Table 8. Reanalysis, gauge, satellite data for climate research

1	CPC Unified	Climate Prediction Center (CPC) Unified	Gauge	0.5° ^a	Global	Daily	1979–present	Xie et al. (2007), Chen et al. (2008)
2	CRU	Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS)	Gauge	0.5°	Global	Monthly	1901–2014	Harris et al. (2013)
3	GPCC	Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) Full Data Reanalysis and First Guess	Gauge	0.5° ^b	Global	Monthly	1901–present	Schneider et al. (2014)
4	PREC/L	PRECipitation REConstruction over Land (PREC/L)	Gauge	0.5°	Global	Monthly	1948–present	Chen et al. (2002)
5	UDEL	University of Delaware (UDEL)	Gauge	0.5°	Global	Monthly	1901–2014	Matsuura and Willmott (2009)
6	CHIRPS	Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)	Gauge, satellite	0.05°	50° N–50° S	Daily	1981–present	Funk et al. (2015a)
7	CMORPH	CPC MORPHing technique (CMORPH)	Gauge, satellite	0.25°	60° N–60° S	Daily	1998–present	Joyce et al. (2004)
8	GPCP-1DD	Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 1-Degree Daily (1DD) Combination	Gauge, satellite	1°	Global	Daily	1996–2015	Huffman et al. (2001)
9	GSMaP-MVK	Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) Moving Vector with Kalman (MVK)	Gauge, satellite	0.1°	60° N–60° S	Hourly	2000–present	Iguchi et al. (2009)
10	IMERG	Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)	Gauge, satellite	0.1°	60° N–60° S	30 min	2014–present	Huffman et al. (2014)
11	PERSIANN-CDR	Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) Climate Data Record (CDR)	Gauge, satellite	0.25°	60° N–60° S	6 hourly	1983–2012	Ashouri et al. (2015)
12	TMPA 3B42	TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) 3B42	Gauge, satellite	0.25°	50° N–50° S	3 hourly	1998–present	Huffman et al. (2007)
13	MERRA-Land	Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA)-Land	Gauge, reanalysis	0.5° × 0.67°	Global	Hourly	1979–present	Reichle et al. (2011)
14	PFD	Princeton global meteorological Forcing Dataset	Gauge, reanalysis	0.25°	Global	3 hourly	1948–2012	Sheffield et al. (2006)
15	WFDEI	WATCH Forcing Data ERA-Interim (WFDEI)	Gauge, reanalysis	0.25°	Global	3 hourly	1979–2014	Weedon et al. (2014)
16	NCEP-CFSR	National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)	Reanalysis	0.3125°	Global	Hourly	1979–2010	Saha et al. (2010)
17	ERA-Interim	European Centre for Medium-range Weather Forecasts ReAnalysis Interim (ERA-Interim)	Reanalysis	0.25° ^c	Global	3 hourly	1979–2014	Dee et al. (2011)
18	JRA-55	Japanese 55-year ReAnalysis (JRA-55)	Reanalysis	1.25°	Global	3 hourly	1959–present	Kobayashi et al. (2015)
19	CHOMPS	Cooperative Institute for Climate Studies (CICS) High-Resolution Optimally Interpolated Microwave Precipitation from Satellites (CHOMPS)	Satellite	0.25°	60° N–60° S	Daily	1998–2007	Joseph et al. (2009)
20	SM2RAIN-ASCAT	Based on Advanced Scatterometer (ASCAT) data (Brocca et al., 2016)	Satellite	0.5°	Global	Daily	2007–2015	Brocca et al. (2014)
21	CMAP	CPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)	Gauge, satellite, reanalysis	2.5°	Global	5 day	1979–present	Xie and Arkin (1996, 1997)
22	MSWEP	Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)	Gauge, satellite, reanalysis	0.25°	Global	3 hourly	1979–2015	This study

CHIRPS 강우추정 알고리즘은 과거 자료의 지상관측자료와 DEM 정보 위성 평균값을 이용하여 CHPclim자료를 산출하고 정지궤도 위성의 휘도온도값은 IRP값으로 변환한다. IRP 값은 TRMM-V7강수량 기반으로 회귀식을 산출하고 b0, b1계수값을 산정한다. IRP 식은 다음과 같다. 산출된 CHPclim 강우량값에 IRP의 시간에 따른 변화량 값을 적용하면 CHIRPS값을 산출하게 된다. 여기에 지상관측값을 보정하여 결합하면 CHIRPS값을 최종산출하게 되고 응용분야에 활용한다 (Figure 21).

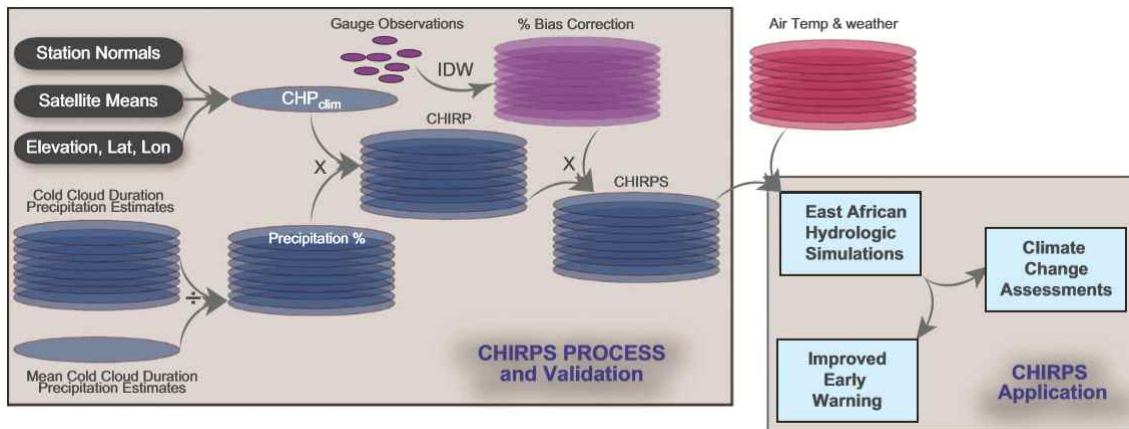


Figure 21. Flowchart of CHIRPS retrieval rainfall algorithm

CCD(Cold Cloud Duration)은 각각의 픽셀의 pentad 기간동안 적외 온도가 235°K 보다 적은 퍼센트를 구하고 정지궤도위성과 같은 시간, 같은 지역의 TRMM-V7에서 제공하는 daily 강수량값과의 회귀식을 통하여 b_0 , b_1 의 계수값을 계산하게 된다 (Figure 22).

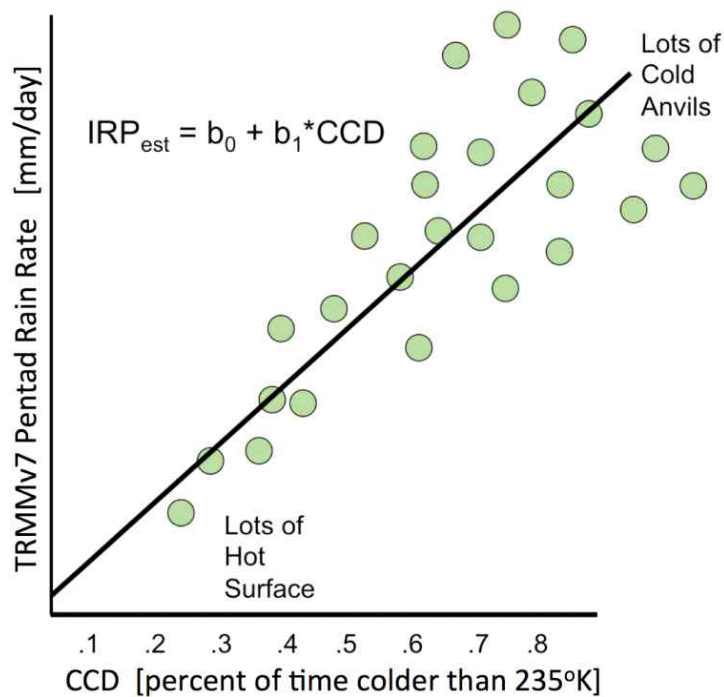


Figure 22. Function of regression for CCD and TRMMv7 rainfall data

지상관측자료는 GHCN-v2, GHCN-daily등과 같은 값을 받아서 품질 관리를 하게 된다. 값이 비정상적으로 크거나 작거나 $5 \times \text{CHIRP}$ 보다 클 경우에도 값을 제하게 된다. CHIRPS 버전 2.1은 지상관측자료를 현재보다 1,000개 이상 많이 추가하였으며, GPCC와 FAO 값도 추가하여 CHPclim 자료를 산출한다. CCD값을 반전시키고 과소 추정하거나 과대추정하는 지상관측자료값을 보정한 알고리즘을 이용하여 자료를 산출한다. 자료는 ftp나 브라우저로 자료를 받을 수 있으며,

FTP 주소는 chg-ftpout.geog.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/이며, CHIRPS자료이외에 아프리카, 중앙아메리카, 전지구 지역에 대한 자료를 제공하고 있으며, 6hourly, daily, dekad, monthly, pentad 등 지역 및 시간 해상도를 달리 하여 자료를 제공중이다.

africa_6-hourly	Africa subset 6-hourly fields at 0.1 degree resolution. Special binary format.
africa_daily	Africa subset daily fields at 0.05 and 0.25 degree resolution. BIL's and TIFF's.
africa_dekad	Africa subset dekadal fields. BIL's, PNG's and TIFF's.
africa_monthly	Africa subset monthly fields. BIL's, PNG's and TIFF's.
africa_pentad	Africa subset monthly fields. BIL's, PNG's and TIFF's.
camer-carib_dekad	Central America/Caribbean subset dekadal fields. BIL's and TIFF's.
camer-carib_monthly	Central America/Caribbean subset monthly fields. BIL's and TIFF's.
camer-carib_pentad	Central America/Caribbean subset pentadal fields. BIL's and TIFF's.
diagnostics	Various data/plots giving more detail about CHIRPS processing and results
docs	CHIRPS related documents.
EAC_monthly	East African Community monthly fields. BIL's and TIFF's.
EAC_monthly_EWX	East African Community monthly EWX fields. TIFF's.
global_2-monthly	Quasi-global 2-monthly fields. TIFF's.
global_2_EWX-monthly	Quasi-global 2-monthly EWX fields. TIFF's.
global_3-monthly	Quasi-global 3-monthly fields. TIFF's.
global_3_EWX-monthly	Quasi-global 3-monthly EWX fields. TIFF's.
global_annual	Quasi-global annual fields. NetCDF's and TIFF's.
global_daily	Quasi-global daily fields. NetCDF's and TIFF's.
global_dekad	Quasi-global dekadal fields. BIL's, NetCDF's and TIFF's.
global_dekad_EWX	Quasi-global dekadal fields. TIFF's.
global_monthly	Quasi-global monthly fields. BIL's, NetCDF's and TIFF's.
global_monthly_EWX	Quasi-global monthly fields. TIFF's.
global_pentad	Quasi-global pentadal fields. BIL's, NetCDF's and TIFF's.
prelim	Quasi-global Rapid CHIRPS with 2-day lag. GTS and Conagua (Mexico) stations only.
whem_daily	Western Hemisphere daily fields. TIFF's.

메타자료를 보게되면 daily 자료로 시간은 365일 지정되어 있고 위경도 행렬은 1440×400행렬로 25km의 지상해상도를 가지게 된다. 단위는 mm/day이며 위경도 정보를 제공한다. 강우자료는 daily 자료로 위경도자료와 같이 1440×400행렬로 25km의 지상해상도의 정보로 제공되며, 에러값은 -9999로 표시된다. 위도는 -50° S~50° N이고 경도는 -180° ~180° 이다. 단위는 mm/day으로 제공된다.

(라) PERSIANN-CDR

PERSIANN자료는 장기간의 기후연구 기초자료로 인공지능기법을 이용하여 위성자료 기반 공간해상도 0.25° 으로 1983년부터 현재까지 일강수자료를 산출하고 있다. 강우변환기법은 Gridsat-1B 적외체널을 기반으로 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) stage4 시간강수자료를 인공지능기법으로 학습하여 일강수자료를 생산하고 GPCP(Global Precipitation Climatology Project) 월강수자료를 이용하여 보정한다 (Figure 23).

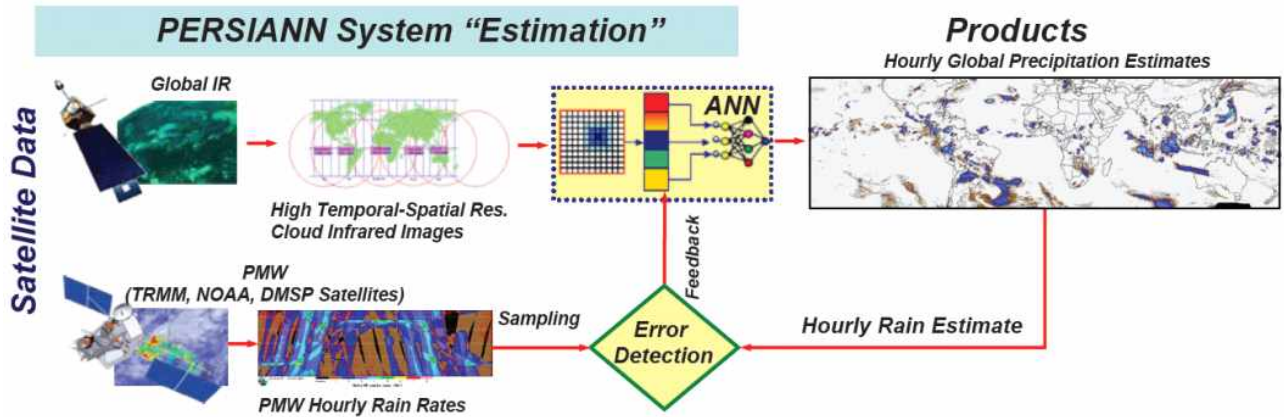


Figure 23. Flowchart of PERSIANN-CDR rainfall algorithm

(2) 고해상도 관측자료 적용성 평가 방법

고해상도 격자자료(오차보정된 강수격자자료)는 저해상도에서 소실된 극단기후정보를 복원할 수 있다. 따라서 고해상도 관측자료가 극단기후정보를 얼마나 복원했는지를 검증하여 적용성 평가를 수행하였다. 극단기후정보의 복원성을 검증하기 위해 기존에 제공하는 격자자료(Table 9)를 대상으로 극단기후와 관련된 기후지수(10년, 50년, 100년, 200년 빈도 확률강수량)를 생산하여 관측자료(ASOS 12개 지점 사용)의 값과 비교를 통해 정확도를 평가하였다. 극단기후정보의 복원성 검증을 위해 사용한 격자자료의 공간해상도는 모두 0.1° 로 동일하게 리샘플링하였다.

Table 9. Gridded data used for resilience evaluation of extreme climate information

Gridded data	Description	Period	Resolution
EC_SRE	Satellite image based precipitation gridded data with error-correction using station precipitation data	1988-2018	0.1°/daily
CPC	precipitation gridded data based on station precipitation data	1988-2018	
APHRODITE	precipitation gridded data based on station precipitation data	1988-2007	
ASOS-IDW	IDW interpolated precipitation gridded data using 55 ASOS	1988-2018	
ASOS-Kriging	Kriging interpolated precipitation gridded data using 55 ASOS	1988-2018	
PERSIANN	Satellite image based precipitation gridded data	1988-2018	
CHIRPS	Satellite image based precipitation gridded data	1988-2017	

극단기후와 관련된 기후지수로 선정한 확률강수량은 특정한 지속시간을 가지는 강수량이

몇 년에 한번 발생할 수 있는 확률을 가질 때의 강수량의 크기를 의미한다. 이번 연구에서 특정한 지속시간은 1일이고, 몇 년에 한번 발생한 확률인 재현기간은 10년, 50년, 100년, 200년이다. 예를 들어 24시간 지속시간 200년 빈도 확률강수량은 24시간 동안 지속되는 호우사상을 기준으로 200년 한번 발생할 수 있는 강수량의 크기를 의미한다.

최종적으로 고해상도 관측자료 복원성 검증은 Table 9에서 제시하는 기간을 기준으로 7개의 격자자료에 대해 RMSE와 PBIAS를 산정하여 2개의 평가측도를 선정하여 수행하였다.

3. 결과

가. 계절예측 격자형 상세화 기술 개발의 결과

1988-2013년 동안 영남지역 19개 관측지점의 ASOS자료를 이용해 격자 WG모형을 구축하였다. Figure 24은 관측지점 위치(좌측)와 모형에서 사용된 격자점(우측)을 나타낸다. 월, 월기 후상태, 지점으로 이루어진 모든 조합의 각 경우에 대해서 구축된 모형으로 500개씩 상세화 모의자료를 생성하여 2-가-(3)절에서 설명한 평가방식을 적용하였다. 또한, 평가의 객관성을 확보하기 위해, 다지점 상세화 자료를 역거리가중법(inverse distance weight method, IDW)으로 격자화시킨 자료에 대해서도 같은 평가방식을 적용해, 도출된 결과와 비교한다. 아래에서 각 기후특성별로 결과를 제시한다.

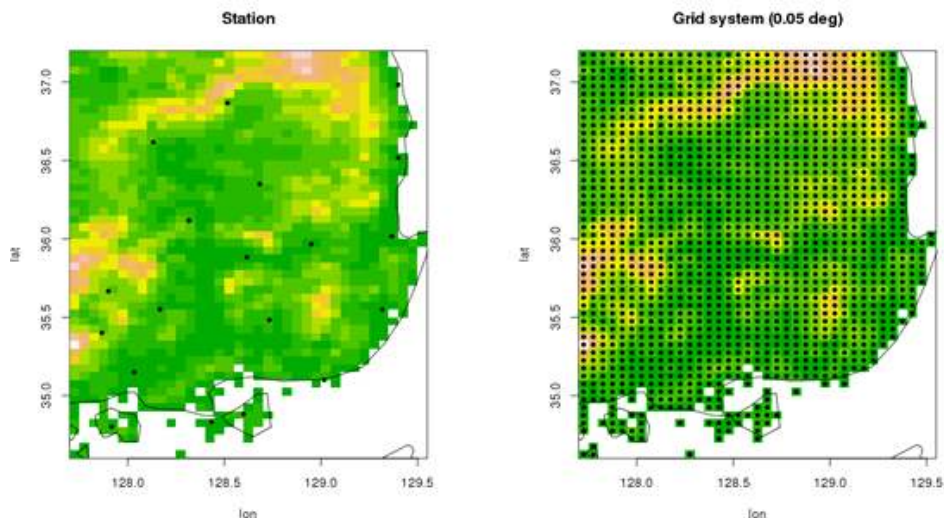


Figure 24. ASOS station location (left) and the grid system (right, resolution: $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$) used for this study.

(1) 일강수량 재현성 평가결과

모의와 관측 간 일강수량 평균비를 각 경우에 따라 계산한 결과, Table 10에서 제시된 것 같이 월습윤상태에 따른 차이가 두드러졌다. 특히, 월습윤상태가 BN(평년보다 월강수량이 적어 건조) 일강수량이 관측대비 1.8배로 과대모의된다. 반대로, AN(평년보다 월강수량이 많아 습윤)일 때는 적정하게 모의된다. 평균적으로 일강수량이 관측대비 1.34배로 과대모의된다. 흥미롭게, Table 11에서처럼 다지점 상세화 자료의 IDW보간도 거의 동일한 재현성을 나타낸다.

Table 10 Average mean ratios on the AWS stations for each case of month and monthly wetness (BN: drier than normal, NN: Near normal, AN: wetter than normal). When monthly wetness is BN, the daily precipitation amount is over-simulated.

Month	BN	NN	AN	Average
Jan	1.54	1.33	0.96	1.28
Feb	1.91	0.91	1.17	1.33
Mar	1.34	1.04	0.94	1.11
Apr	1.58	1.12	0.95	1.22
May	1.82	1.11	1.08	1.34
Jun	1.62	1.37	1.12	1.37
Jul	1.30	1.25	1.08	1.21
Aug	1.54	1.17	1.07	1.26
Sep	2.86	1.18	1.01	1.68
Oct	2.43	1.66	1.03	1.71
Nov	1.23	1.36	0.91	1.17
Dec	2.56	0.86	0.89	1.44
Average	1.81	1.20	1.02	1.34

Table 11. Comparison with the IDW interpolation of multi-site downscaling data in terms of daily precipitation amount reproducibility. The IDW interpolation reveals essentially same performance.

	BN	NN	AN	Average
Grid WG model	1.81	1.20	1.02	1.34
IDW Interpolation	1.81	1.17	1.01	1.33

(2) 일강수량 공간상관 재현성 평가결과

먼저, 일강수량 공간상관의 재현성을 상관계수 차로 평가한 결과를 제시한다. Table 12은 월습윤상태에 대한 Eq. [8]에서 제시된 MAE의 평균을 제시한다. 그 결과, 봄철과 여름철에 상관계수 차를 기준으로 공간상관이 잘 재현되는 반면에 겨울철에는 재현성이 낮다. 겨울철은 비가 적은 계절인데, 이 때는 공간상관의 비정상성(non-stationarity)이 강해져서 나타난 결과로 해석된다. 한편, 보간된 다지점 자료와 비교한 결과, Table 13에서 제시된 것처럼 격자 WG모형이 재현성능 우위에 있다.

다음으로 EOF모드의 모의와 관측 간 일치성을 기준으로 공간상관 재현성을 평가한다. Figure 25은 7월 월습윤상태가 NN인 경우 주요 3개 EOF모드 형태를 비교한 것이다. 처음 2개 모드는 각각 basin-wide와 dipole형태로 공간변동으로 해석할 수 있고, 관측과 모의의 모드형태가 매우 유사하다. 한편, Figure 26은 각 월의 주요 2개 EOF모드의 일치도와 설명력을 나타낸다. 월습윤상태 BN의 12월을 제외하면 첫 번째 모드의 일치도는 전반적으로 높은 반면에 두 번째 모드는 월과 월습윤상태에 따라 정도가 다르다. 대체적으로, 월상태가 습윤할수록 일치도가 높아지는 경향이 있다.

Table 12. Average MAE of correlation coefficient differences between observation and simulation of daily precipitation on monthly wetness.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
0.101	0.099	0.102	0.065	0.640	0.058	0.061	0.070	0.06	0.074	0.082	0.090
0.101			0.062			0.064			0.082		

Table 13. Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of daily precipitation spatial correlation reproducibility. Grid WG model has better performance than IDW interpolation.

	DJF	MAM	JJA	SON	Average
Grid WG model	0.101	0.062	0.064	0.082	0.077
IDW Interpolation	0.133	0.085	0.091	0.111	0.105

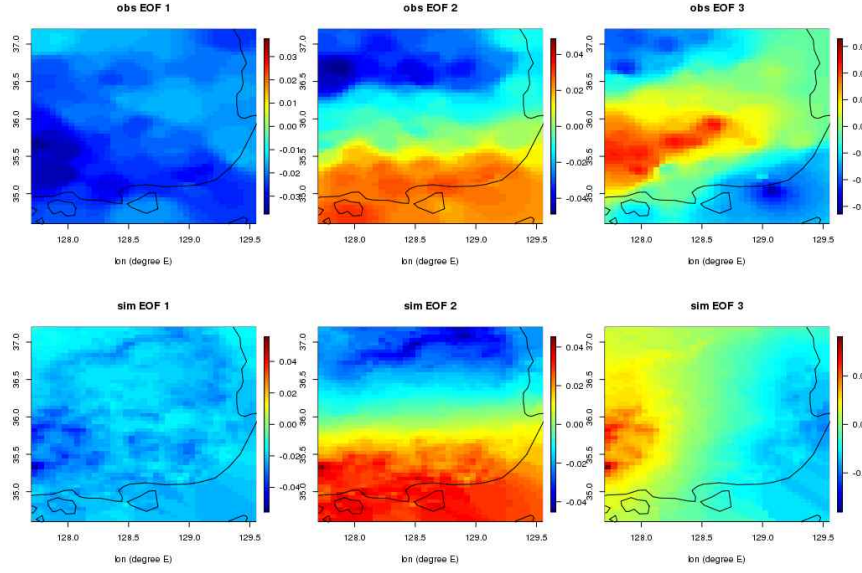


Figure 25. Consistency of the first 3 EOF modes for July with monthly wetness NN. The first and second modes are interpreted as basin-wide and dipole type variations, respectively. They are fairly well simulated.

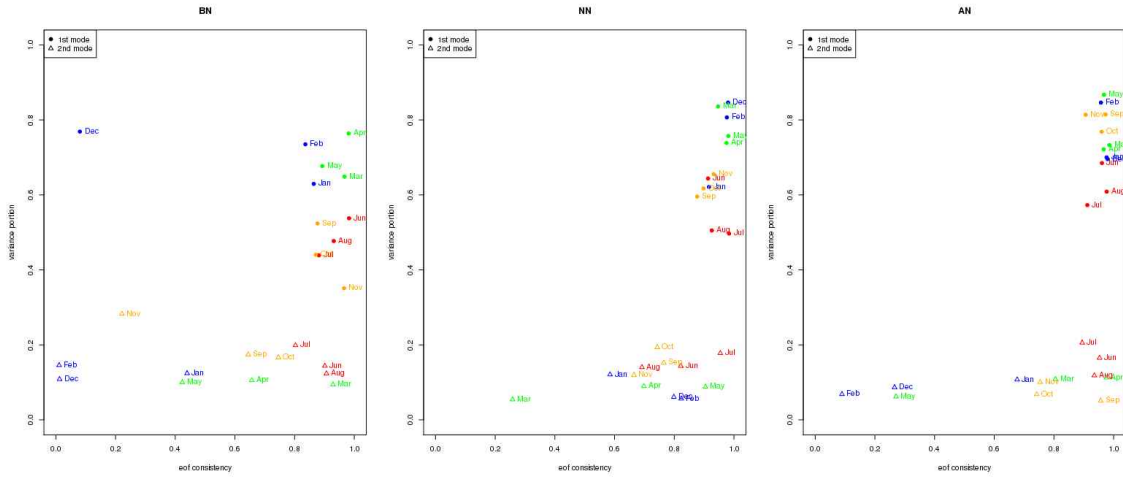


Figure 26. Consistency and variation portion of the first 2 modes for month and monthly wetness. Overall, the consistency of the first mode is fairly good expect Dec with monthly wetness BN, meanwhile, that of the second depends on month and monthly wetness. As monthly climatic state is wetter, the consistency gets higher.

(3) 일기온 재현성 평가결과

일기온에 대해 모의와 관측 간 평균차를 계산한 결과, Figure 27과 Table 14-15에서 나타나듯이, 일최고기온은 평균적으로 0.625℃의 평균차로 모의되고 있는 반면에 일최저기온은 평균 0.975℃의 평균차를 보인다. 즉, 일최고기온이 일최저기온보다 재현성이 높다. 일최저기온은 여름철에 0.58℃의 평균차로 다른 계절보다 재현성이 가장 좋다. 다지점 상세화 자료의 IDW보간과 비교하면, Table 16-17에서 확인할 수 있듯이, 일최고/최저기온 모두 격자 WG모형이 재현성능 우위에 있다.

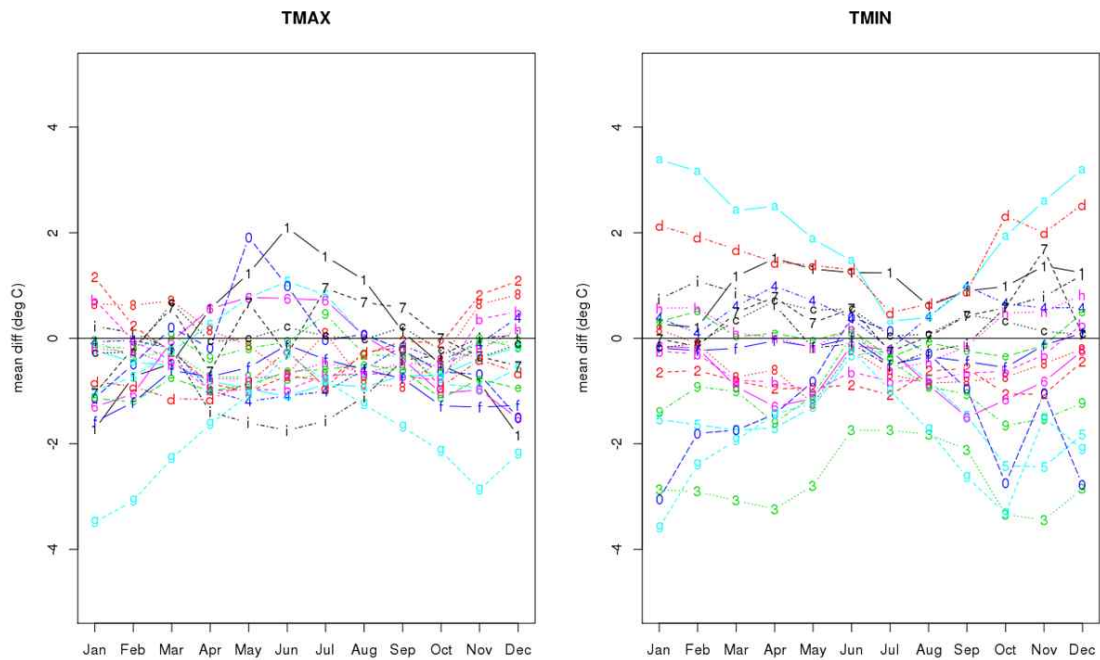


Figure 27. Average mean differences of observed and simulated temperatures of ASOS stations on monthly warmness. Overall, the distribution of TMAX is better reproduced than TMIN.

Table 14. Average mean differences of observed and simulated TMAX on the ASOS stations and monthly warmness.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
0.77	0.89	0.64	0.53	0.73	0.86	0.77	0.71	0.57	0.49	0.70	0.64
0.76			0.71			0.42			0.61		

Table 15. Average mean differences of observed and simulated TMIN on the ASOS stations and monthly warmness. The mean difference is smallest in JJA.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
1.17	1.15	0.99	0.99	1.09	1.15	0.56	0.57	0.63	0.91	1.36	1.19
1.10			1.07			0.58			1.15		

Table 16. Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMAX distribution reproducibility. Grid WG model has better performance.

	DJF	MAM	JJA	SON	Avg.
Grid WG model	0.76	0.71	0.42	0.61	0.63
IDW Interpolation	1.10	0.90	0.96	0.83	0.95

Table 17. Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMIN distribution reproducibility. Grid WG model has better performance.

	DJF	MAM	JJA	SON	Avg.
Grid WG model	1.10	1.07	0.58	1.15	0.98
IDW Interpolation	2.06	1.42	0.84	1.85	1.54

(4) 일기온의 공간상관 재현성 평가결과

일기온에 대한 공간상관 재현성을 3-가-(2)절에서처럼 평가하였다. Tables 18-19는 각각 일최고기온과 일최저기온에 대해 상관계수 차의 MAE를 제시한 것인데, 여름보다는 겨울에, 일최저기온보다는 일최고기온의 공간상관 재현성이 낮다. Tables 20-21은 다지점 상세화 자료의 IDW보간과 비교할 때, 일최고/최저기온 모두에 대해 MAE 기준으로 두 배 정도 우위의 공간상관 재현성을 보이고 있다. 한편, Figure 28는 월기온상태가 BN인 6월에 대해서 일최저기온의 관측과 모의의 주요 3개 EOF모드를 비교한 것으로, 격자 WG모형이 거의 완벽히 모든 모드를 재현하고 있다. Figures 29-30는 각각 일최고기온과 일최저기온에 대해 모든 월과 월기온상태

에서 EOF모드 일치성을 보여주는데, 거의 일치하고 있다.

Table 18. Average MAE of correlation coefficient differences of between observation and simulation of TMAX on monthly warmness.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
0.020	0.021	0.022	0.029	0.043	0.049	0.066	0.052	0.056	0.041	0.047	0.021
0.021			0.040			0.058			0.036		

Table 19. Average MAE of correlation coefficient differences between observation and simulation of TMIN on monthly warmness.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
0.079	0.058	0.066	0.074	0.078	0.097	0.101	0.081	0.122	0.047	0.048	0.082
0.068			0.083			0.101			0.059		

Table 20. Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMAX spatial correlation reproducibility. Grid WG model has better performance than IDW interpolation.

	DJF	MAM	JJA	SON	Average
Grid WG model	0.021	0.040	0.058	0.036	0.039
IDW Interpolation	0.045	0.095	0.112	0.095	0.087

Table 21. Comparison with the IDW interpolation of multi-site data in terms of TMIN spatial correlation reproducibility. Grid WG model has better performance than IDW interpolation.

	DJF	MAM	JJA	SON	Average
Grid WG model	0.068	0.083	0.101	0.059	0.078
IDW Interpolation	0.094	0.143	0.198	0.122	0.139

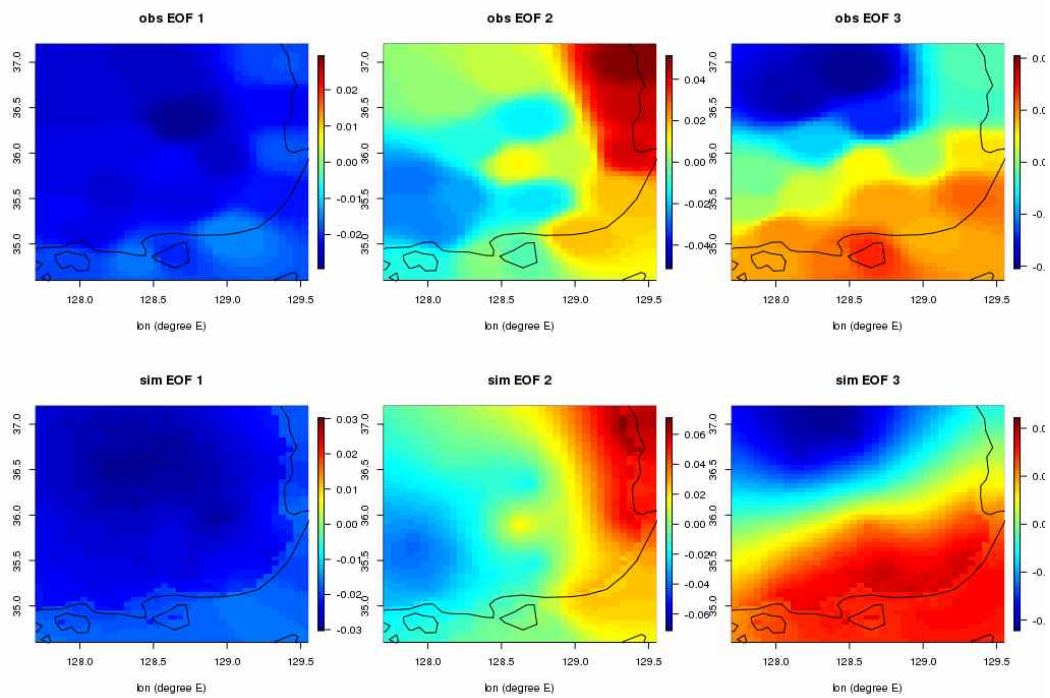


Figure 28. Consistency of the first 3 EOF modes of TMIN for June with monthly warmth BN. The first and second modes are interpreted as basin-wide and dipole type variations, respectively. All of the modes are fairly almost perfectly simulated.

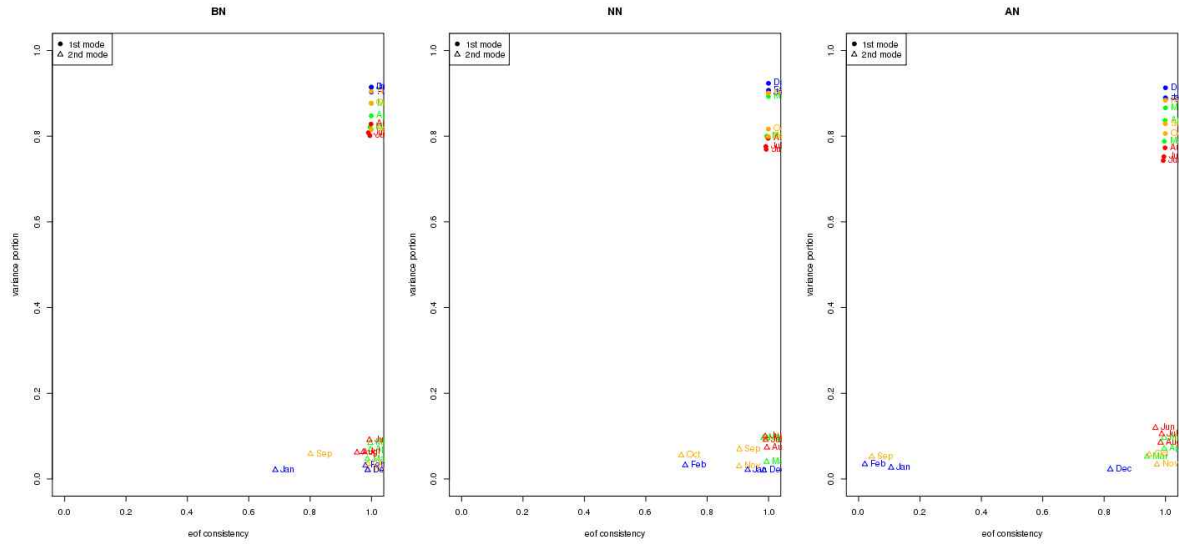


Figure 29. Consistency and variation portion of the first 2 modes of TMAX. Overall, the consistency of both modes are very good.

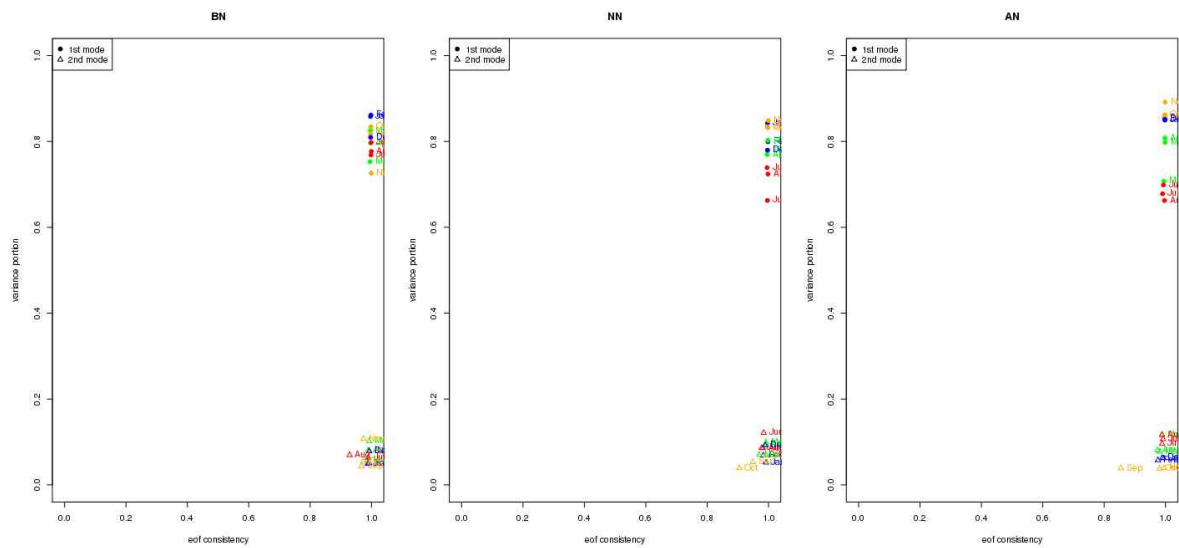


Figure 30. Consistency and variation portion of the first 2 modes of TMIN. The consistency of both modes are almost perfect for every case.

(5) 월누적 강수량과 월평균기온 재현성 평가결과

마지막으로, 대표적인 월기후특성인 월누적강수량과 월평균기온의 재현성을 살펴본다. Table 22은 월습윤상태에 따른 모의와 관측 간 월누적강수량 평균비를 계산한 결과이다. 3-가-
-
(1)절의 일강수량 경우처럼 월상태가 건조할수록 월누적강수량이 과대모의되고 전체적으로는 1.85배 정도이다. 이러한 과대모의는 다지점 상세화 자료의 IDW보간에서도 거의 동일하게 나타난다. 한편, Table 23-24에서 확인할 수 있듯이, 월평균기온은 전체적으로 약 0.68℃의 평균

차로 모의되고 있어 다지점 상세화 자료의 IDW보간보다 재현성능 우위에 있다.

Table 22. Averages mean ratios of monthly total precipitation on the AWS stations for each case of month and monthly wetness. When monthly wetness is BN, the monthly total precipitation is most over-simulated.

	BN	NN	AN	Average
Jan	2.28	1.72	1.49	1.83
Feb	3.77	1.42	1.69	2.29
Mar	1.70	1.55	1.29	1.51
Apr	1.69	1.37	1.11	1.39
May	2.71	1.39	1.05	1.72
Jun	1.97	1.89	1.43	1.76
Jul	1.62	1.28	1.10	1.33
Aug	1.80	1.29	1.15	1.41
Sep	3.83	1.49	1.08	2.13
Oct	4.62	2.92	1.28	2.94
Nov	2.21	1.41	1.00	1.54
Dec	3.97	1.63	1.31	2.30
Average	2.68	1.61	1.25	1.85
IDW Interpolation	2.69	1.57	1.31	1.86

Table 23. Average mean difference of monthly average temperature on ASOS stations and monthly warmness.

DJF			MAM			JJA			SON		
Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov
0.80	0.88	0.70	0.63	0.67	0.66	0.52	0.58	0.56	0.65	0.85	0.74
0.77			0.65			0.55			0.75		

Table 24. Comparison with IDW interpolation of multi-site data in terms of monthly average temperature reproducibility. Grid WG model outperforms.

	DJF	MAM	JJA	SON	Average
Grid WG model	0.77	0.65	0.55	0.75	0.68
IDW Interpolation	1.38	0.79	0.65	1.16	1.00

나. 계절예측 상세화 적용성 평가의 결과

영남지역 19개 관측지점의 1988-2013년 ASOS자료를 이용해 다지점 WG모형을 구축하였다. 관측지점의 위치는 Figure 24의 좌측그림에서 찾을 수 있다. 또한, 1988-2010년 각 해의 APCC hindcast 결과에 대해 구축된 WG모형을 이용한 계절예측 상세화 방법(김무섭 등, 2019)으로 날씨시나리오 500개씩 생성하여, Figure 9의 과정을 거쳐 계절기후지수의 예측정보를 생산하였다. 또한, ASOS자료로 동일 기간 19개 지점의 계절기후지수의 실제값을 계산하였다. 아래에서, 생산된 예측정보와 실제값을 이용해 2-나-(2)절에서 소개된 방식으로 계절예측 상세화 적용성을 평가한 결과를 제시한다.

(1) 예측 정확도 평가 결과

계절기후지수 예측정보의 정확도를 평가한다. Figure 31-32은 각 계절별로 Eq. [10]에서 제시된 AMSE비와 ROC곡선의 AUC의 19개 지점 평균으로써 계절기후지수의 예측정확도를 보여준다. 여름을 제외한 모든 계절에서 계절기후지수들이 실효성 있는 정확도를 보이고 있다. 반면에, 여름철의 기온과 관계된 계절기후지수는 모두 그렇지 못하다. 한편, 여름철에서 강수와 관계된 지수의 일부는 실효성 있는 정확도를 보인다. Figure 33는 계절기후지수 예측정확도의 예측선행시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 봄철 서리일수(SFD)와 생육일수(SGSL)는 뚜렷한 예측정확도의 감소가 나타난 반면에 여름철의 지수를 제외한 나머지는 그러한 감소경향이 두드러지지 않는다. 한편, 여름철 기후지수는 이해하기 힘든 정확도 변화를 보인다.

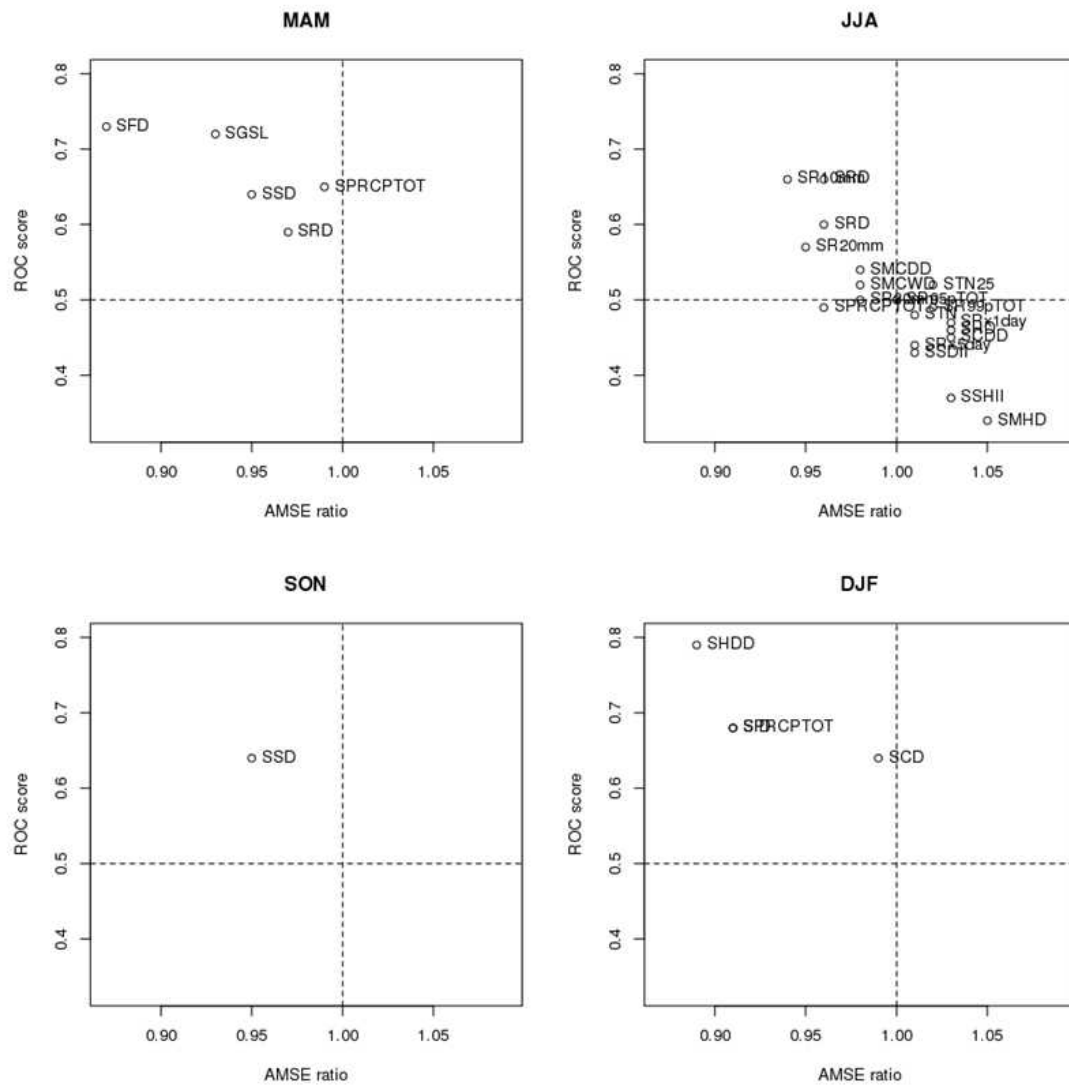


Figure 31. AMSE ratios and ROC scores (AUC) of seasonal climate indices for 4 seasons. For every season except JJA, all of the seasonal climate indices reveal accuracy in terms of point prediction and risk alarm.

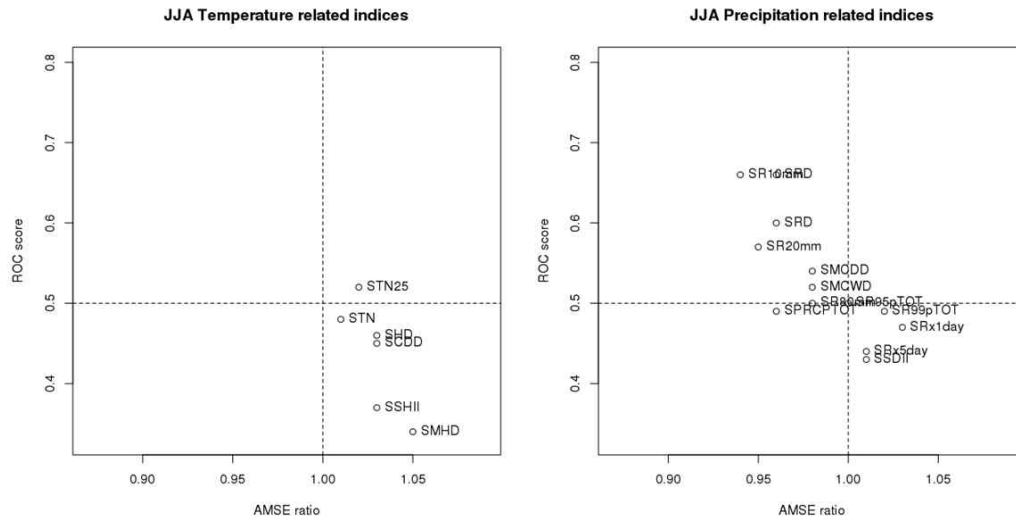


Figure 32. AMSE ratios and ROC scores (AUC) of seasonal climate indices for JJA. Seasonal climate indices related to temperature do not have accuracy, meanwhile, some of those related to precipitation reveal accuracy.

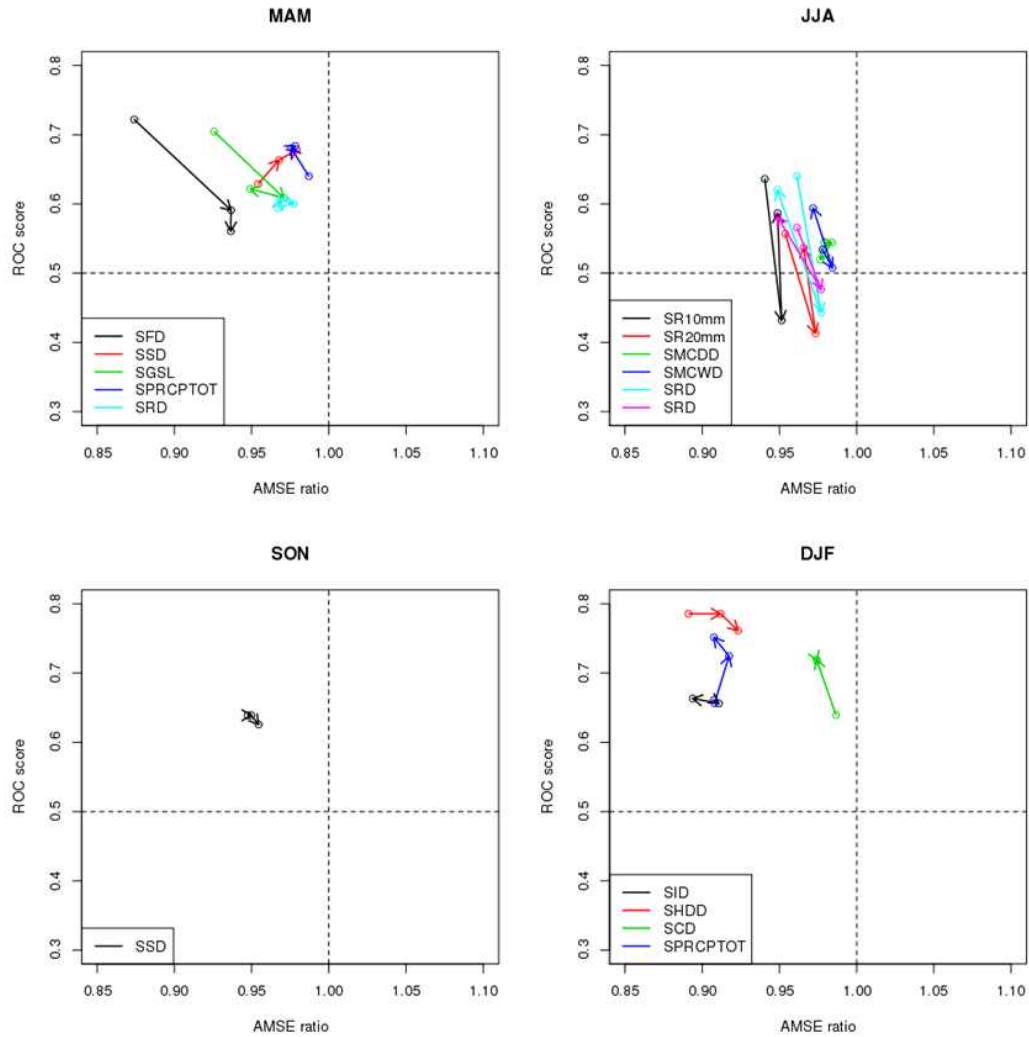


Figure 33. The prediction accuracy change of the seasonal climate indices according to lead time. For every season except JJA, most of the indices do not exhibit significant decline of accuracy. In JJA the indices reveal obscure accuracy change.

(2) 불확실성 표현 적절성 평가 결과

실효성 있는 예측정확도를 보인 계절기후지수에 대해서 불확실성 표현 적절성을 평가한다. Table 25은 Eq. [11]에서 제시된 CVM의 19개 지점 평균값과 유의수준 5%와 1%에서 CVM 검정을 통과한 지점 수의 평균을 제시한다. 가을철 온난일수 (SSD)와 여름철 20mm이상 강수일수가 가장 높은 불확실성 표현 적절성을 보이고 있고, 예측정확도가 높은 생육일수(SGSL)과 서리일수(SFD)가 비교적 양호하다.

Table 25. Average CVM on the ASOS stations and average pass number (Avg Pass) of the seasonal climate indices.

Seasonal Climate Index	Season	CVM	Avg Pass	AUC
SSD	SON	0.06	19.0	0.63
SR20mm	JJA	0.07	19.0	0.56
SCD	DJF	0.08	14.5	0.63
SGSL	MAM	0.10	16.0	0.71
SID	DJF	0.12	14.5	0.67
SR10mm	JJA	0.12	13.5	0.65
SFD	MAM	0.13	11.5	0.73
SRD	JJA	0.14	7.5	0.66
SRD	JJA	0.14	7.5	0.59
SHDD	DJF	0.15	9.0	0.78
SPRCPTOT	DJF	0.15	8.5	0.68
SSD	MAM	0.16	8.5	0.63
SMCWD	JJA	0.17	3.0	0.52
SPRCPTOT	MAM	0.17	6.0	0.65
SRD	MAM	0.20	1.0	0.59
SMCDD	JJA	0.30	0.0	0.54

(3) 평가 요약

예측 정확도와 불확실성 표현 적절성 평가 결과를 살펴보면 여름을 제외한 계절에서 고려된 모든 기후지수는 유의미한 예측정확도를 지니다. 다만, 여름기온과 관련된 기후지수는 모두 예측정확성이 없는 것으로 분석되었다. 여름강수와 관련된 지수 일부(SR10mm, SR20mm)는 유의미한 정확도를 지니며 불확실성 표현도 상대적으로 적절한 것으로 분석되었다.

예측선행시간에 따른 예측정확도 변화를 살펴보면 선행시간에 따른 서리일수(SFD)와 생육일수(SGSL)을 제외한 나머지 지수는 선행시간 증가에 따른 예측정확도 감소가 뚜렷하지 않는 것으로 나타났다. 여름강수와 관련된 지수들은 선행시간에 따른 예측정확도의 변화가 심한 것으로 분석되었다.

다. 고해상도 격자자료 생산 및 검증의 결과

(1) 원시위성 강수격자자료 생산 및 검증 결과

양상불 기법에 의해 구축된 원시위성강우자료는 1988년부터 1997년까지 검증 지상관측자료인 12개의 ASOS자료와 비교결과 정지궤도 적외채널을 이용하였음에도 불구하고 상관계수 0.486 RMSE 14.046의 비교적 정확도 높은 결과값을 산출하였으나 기후자료의 기초자료로 이용하기 위하여 지상관측 보정이 필요한 것으로 판단되어 오차보정의 입력자료로 활용하였다. TRMM TMPA와 GPM IMERG의 경우에는 수동마이크로파와 능동마이크로파를 이용하여 강수를 관측할 수 있는 다양한 위성들을 결합하여 일강우자료를 산출하였기 때문에 비교적 정확도 높은 결과값을 나타내었다 (Table 26). 원시위성 강수격자자료 평가 결과를 Table 27으로 정리하였다. 여러 측도에서 대체로 충족(Satisfactory) 이상의 정확도를 보이나, COR와 PBIAS 측면에서는 불충분한 정확도를 보였다. 정확도 향상을 위해 오차보정이 필요한 것으로 판단되었다. Table 28은 원시위성 강수격자자료를 설명하고 있다. 위성관측기반으로 장기간(31년: 1988-2018년)의 고해상도(daily/0.1°) 강수격자자료(prcp) 생산을 완료하였다.

Table 26. Statistics evaluation result for Gridsat-CDR, TRMM TMPA and GPM IMERG rainfall estimation

Statistics	All satellite products	GridSat-CDR	TRMM TMPA and GPM IMERG
	1988-2018	1988-1997	1998-2018
COR	0.694	0.486	0.772
RMSE	10.736	14.046	9.389
PBIAS	10.144	9.617	5.827
POD	0.650	0.594	0.684
FAR	0.390	0.520	0.331
CSI	0.463	0.362	0.511

Table 27. Statistics evaluation result raw satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)

Statistics	All satellite products (1988-2018)	
	Before EC (Raw_SRE)	
COR	0.694	Unsatisfactory
RMSE	10.736	Good
PBIAS	10.144	Unsatisfactory
POD	0.650	Good
FAR	0.390	Good
CSI	0.463	Satisfactory

Table 28. Product of raw satellite rainfall estimate. Raw_SRE: Raw Satellite Rainfall Estimate

Product	Period (31 year: 1988-2018 year)		Resolution	Time zone
	1988-1997	1998-2018		
Raw_SRE	Raw GridSat B1	Raw TRMM TMPA + Raw GPM IMERG	Spatial:0.1°×0.1° Temporal: 1 day	GMT+9

(2) 고해상도 강수격자자료 오차보정 기법 개발

(가) 오차보정의 매개변수 교차검증 결과

Figure 34-35는 오차보정의 매개변수 추정을 위한 교차검증을 수행한 결과를 보여주고 있다. 매개변수 추정은 GridSat과 TRMM+GPM으로 구분하여 수행하였으며 6개의 평가측도에 대한 결과를 상자그림으로 나타내었다. 전반적으로 평가측도가 개선된 것을 확인할 수 있으며 이 중 COR, FAR, CSI가 상당히 개선되는 것으로 분석되었다.

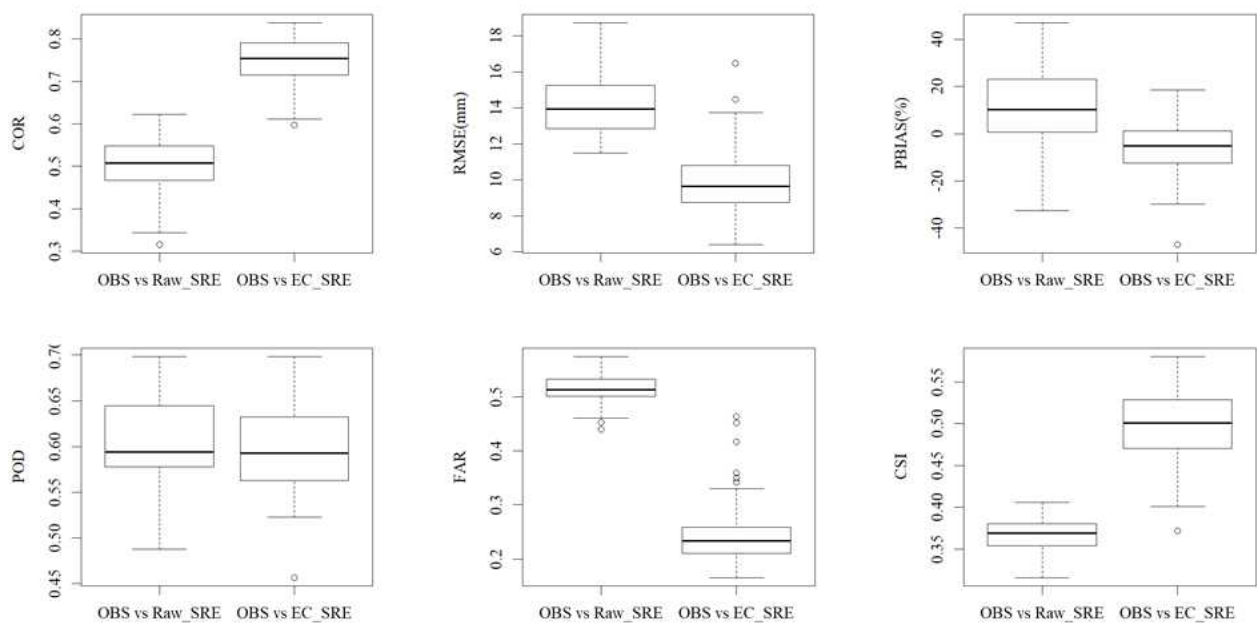


Figure 34. Cross-validation result for estimating parameters of error-correction(GridSat)

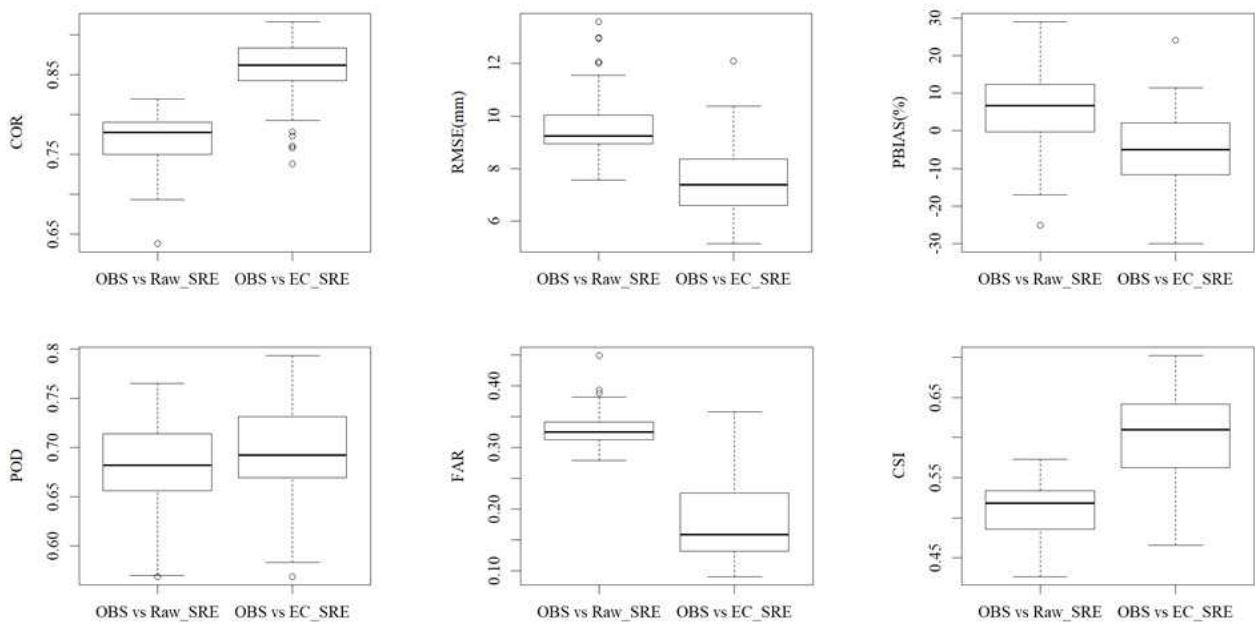


Figure 35. Cross-validation result for estimating parameters of error-correction(TRMM+GPM)

(나) 오차보정된 강수격자자료 검증 결과

오차보정된 강수격자자료 평가 결과를 상자그림으로 나타내었다 (Figure 36). 단 그림에서 Raw_SRE는 원시위성 강수격자자료, EC_SRE는 오차보정된 강수격자자료를 의미한다. 탐지확률을 제외한 모든 평가측도에서 오차보정 전보다 상당히 개선되었다. 탐지확률은 일부 지점에 대해 개선되었다.

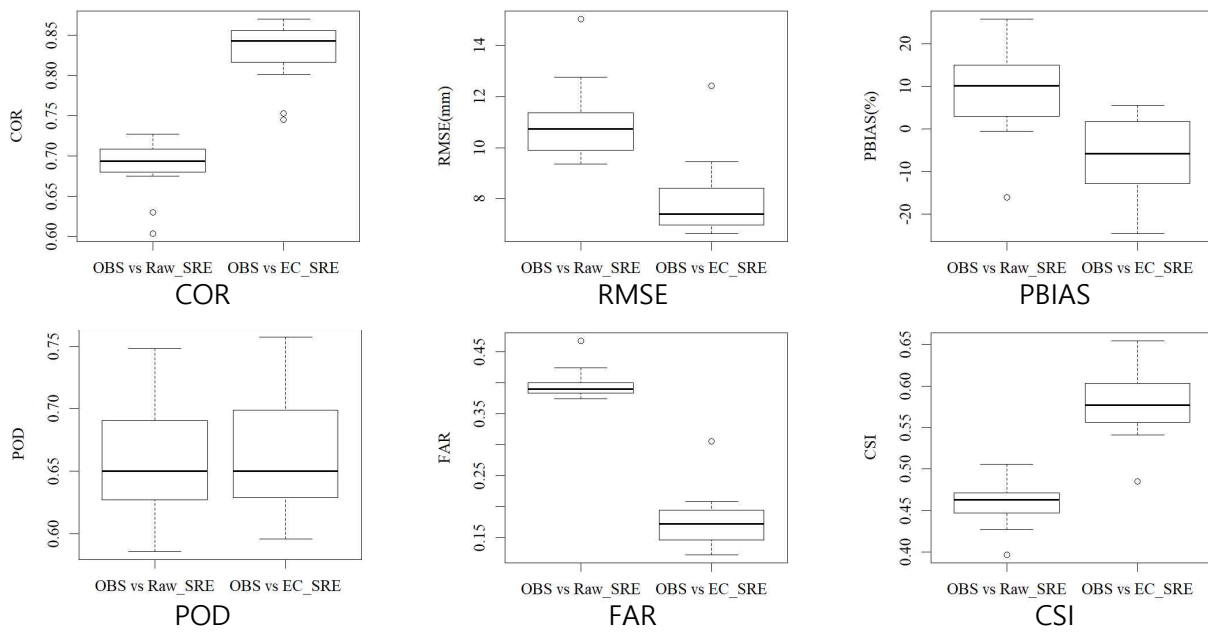


Figure 36. Box-plot of evaluation result of error-corrected satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)

국내외에서 생산한 위성영상 기반 격자자료와 비교하여 우수성을 확보하기 위해 오차보정된 강수격자자료 평가 결과를 ASOS 12개 지점의 중간값으로 나타내고 통계적 성능평가를 수행하였다. COR과 PBIAS는 불충족 수준(Unsatisfactory)에서 우수 수준(Good)으로 월등히 향상됨. 또한 RMSE와 오보율(FAR)은 오차보정 후에 성능이 매우우수 수준(Very good)로 평가되어 오차보정 기법의 우수성을 부각하고 있다. 오차보정을 통한 탐지확률(POD)의 개선 자체는 미미하나 이는 원천자료의 탐지확률이 우수하고 오차보정 후에도 우수수준을 보여주어 자료의 신뢰성은 높다고 판단된다 (Table 29).

Table 29. Statistics evaluation result error-corrected satellite precipitation gridded data (31 year: 1988-2018, median of 12 ASOS stations)

Statistics	All satellite products (1988-2018)			
	Before EC (Raw_SRE)		After EC (EC_SRE)	
COR	0.694	Unsatisfactory	0.843	Good
RMSE	10.736	Good	7.395	Very good
PBIAS	10.144	Unsatisfactory	-5.871	Good
POD	0.650	Good	0.650	Good
FAR	0.390	Good	0.173	Very good
CSI	0.463	Satisfactory	0.577	Good

Figure 37은 강수격자자료의 지점별 오보율을 도식화한 결과를 보여주고 있다. 원시위성 강수격자자료에 비해 오차보정된 강수격자자료의 오보율이 전반적으로 개선된 것을 확인할 수

있다.

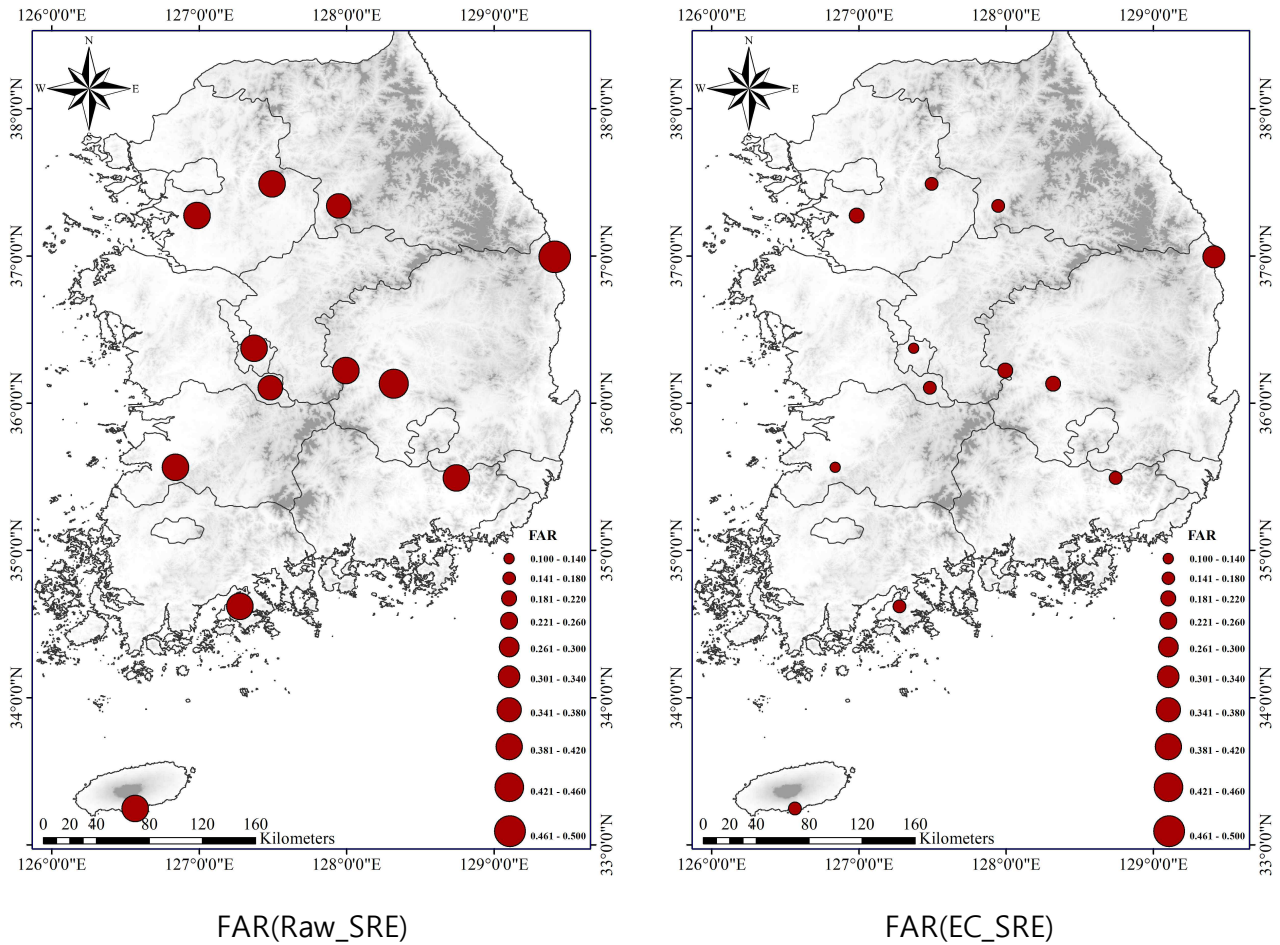


Figure 37. False Alarm Ratio by stations

Figure 38는 강수격자자료의 지점 간 상관계수를 도식화한 결과를 보여주고 있다. 원시 및 오차보정된 위성자료의 공간상관이 지점 관측자료의 공간상관과 유사한 것으로 분석되었다. 지점 간 상관계수의 평균절대오차(MAE)는 0.058에서 0.034로 개선되었다. 탐지확률을 제외한 모든 측도와 공간상관에서 오차보정된 자료가 원시자료보다 상당히 높아진 정확도를 보이며, 통계적 성능 평가에서도 매우 우수 수준(Very good)과 우수 수준(Good)을 보여주어 오차보정된 강수격자자료의 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

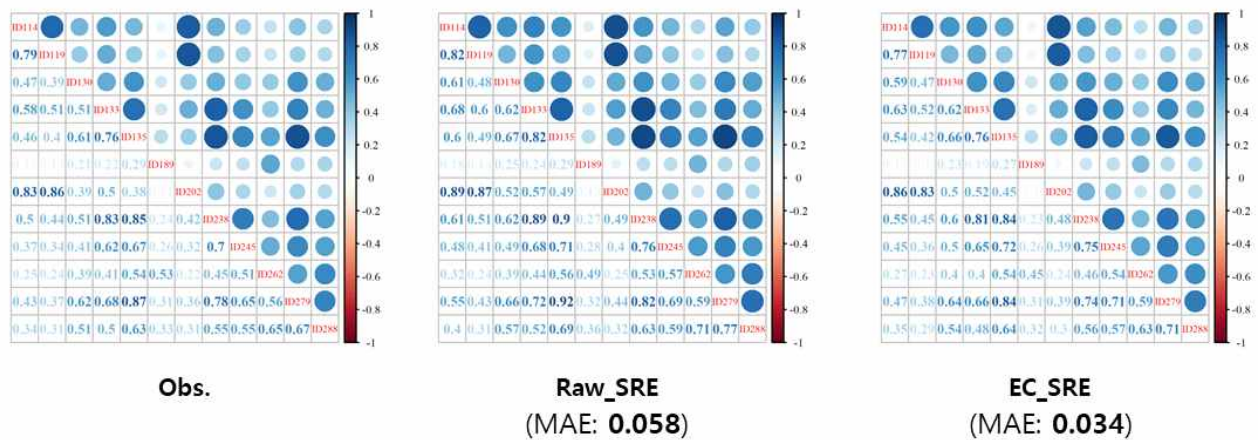


Figure 38. spatial correlation analysis result of precipitation gridded data

연구의 초기목표는 오차보정된 자료의 통계적 성능을 충족 수준(Satisfactory)으로 맞추는 것으로 설정하였다. 6개 평가측도 모두 우수 수준(Good) 이상을 달성하였으며 2개의 평가측도는 매우 우수 수준(Very good)을 달성하여 초기목표를 초과달성한 것으로 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 오차보정 기법의 우수성이 확보되었다고 사료된다.

(다) 오차보정된 강수격자자료 생산물

Table 30는 오차보정된 강수격자자료를 설명하고 있다. 지상관측자료와 위성관측기반으로 장기간(31년: 1988-2018년)의 오차보정된 고해상도(daily/0.1°) 강수격자자료(prcp) 생산을 완료하였다 (Figure 39).

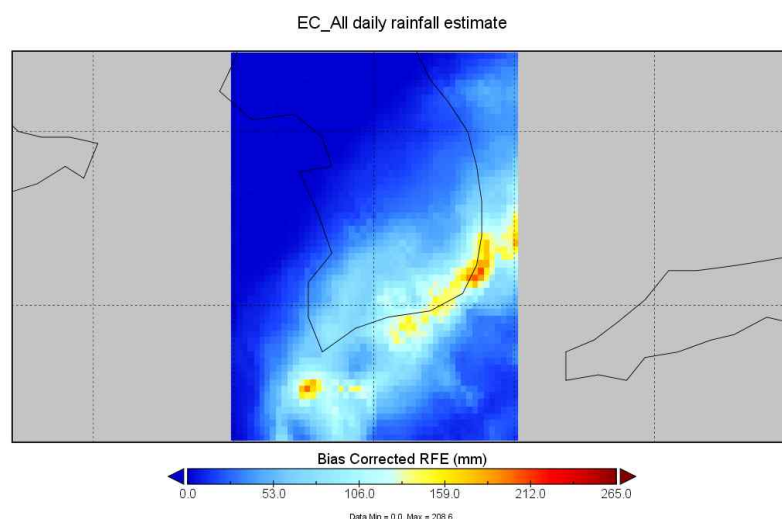


Figure 39. Spatial distribution of error-corrected precipitation gridded data (2016.10.05. / 0.1°)

Table 30. Product of error-corrected satellite rainfall estimate. EC_SRE: Error-corrected Satellite Rainfall Estimate

Product	Period (31 year: 1988-2018 year)		Resolution	Time zone
	1988-1997	1998-2018		
EC_SRE	EC GridSat B1	EC TRMM TMPA + EC GPM IMERG	Spatial:0.1°×0.1° Temporal: 1 day	GMT+9

—

라. 고해상도 관측자료 적용성 평가의 결과

(1) 고해상도 관측자료 기반 강수격자자료 생산 결과

(가) 한반도 지역 적용성 평가

고해상도 관측자료의 복원성을 확인하기 위해 태풍 차바 상륙 당시(2016.10.05) 강수분포(해상도: 0.1°)를 Figure 40에 나타내었다. 한반도 지상관측자료에 의하며 울산지역에 많은 양의 폭우가 발생하여 홍수를 유발하였으나 동시간의 지상관측 격자자료 CPC, 위성강우자료인 CHIRPS, PERSIANN-CDR자료는 집중호우에 대한 정보를 정확하게 제공하지 못하는 것으로 나타났다. 반면 오차보정된 위성강우자료는 울산지역의 홍수사상 강우정보를 비교적 정확하게 제공하는 것으로 판단된다. 따라서 장기간의 상세화된 위성강우자료는 지자체 기후적용 정보와 수문분야의 정책적 활용 기초자료로 제공할 수 있게 되었다.

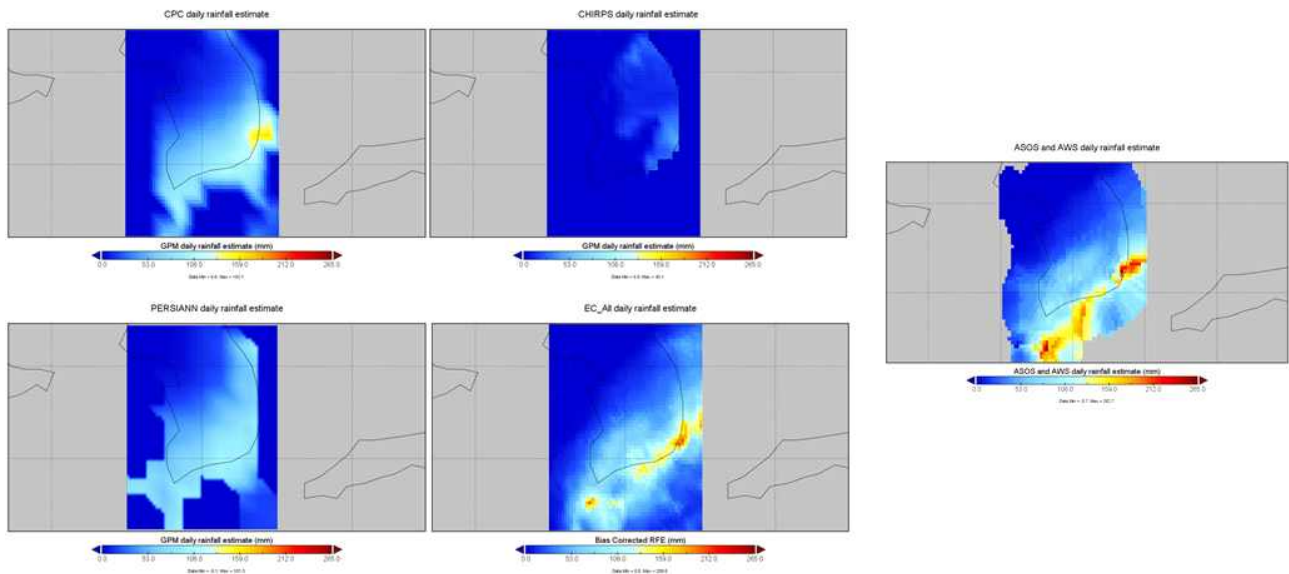


Figure 40. precipitation distribution at typhoon Chaba landing (October 05, 2016) (Resolution: 0.1°)

(나) 동아시아 지역 대상 검증 결과

동아시아 지역의 적용성 평가를 위하여 2011년에 발생한 태국 홍수사상에 대한 사례분석을 하였다. 2014년 7월말부터 10월까지 지속적으로 집중호우가 발생하여 방콕의 대홍수가 발생하여 238명이 사망하고 5.1억달러의 피해를 입었다. 그림 와 같이 2011년 9월 12일 태국 북부 홍수사상을 보면 지상관측자료 기반 CPC자료와 달리 위성강우자료는 북동부의 강수사상을 잘 표현하는 것을 볼 수 있다. 일 강수자료를 월강수로 변환하여 홍수피해가 가장 컸던 10월 방콕의 주변의 월강수자료를 보게되면 지상관측해상도가 낮은 CPC자료에서는 방콕의 집중호우의 정보가 낮게 관측하는 반면에 위성강우에서는 방콕주변의 강수에 대해서 집중호우를 잘 모의하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 관측자료가 적은 동아시아지역에서는 공간해상도가 높은 위성

강우자료의 활용성이 기후 및 수문등의 분야에서 활용성이 높은 것을 알 수 있다.

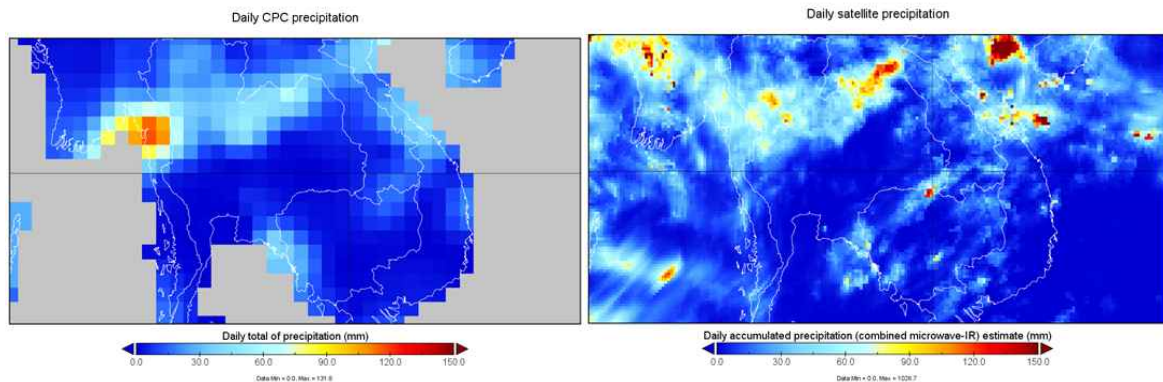


Figure 41 Comparison with CPC and Satellite daily rainfall for Thailand flood case (September 12, 2011)

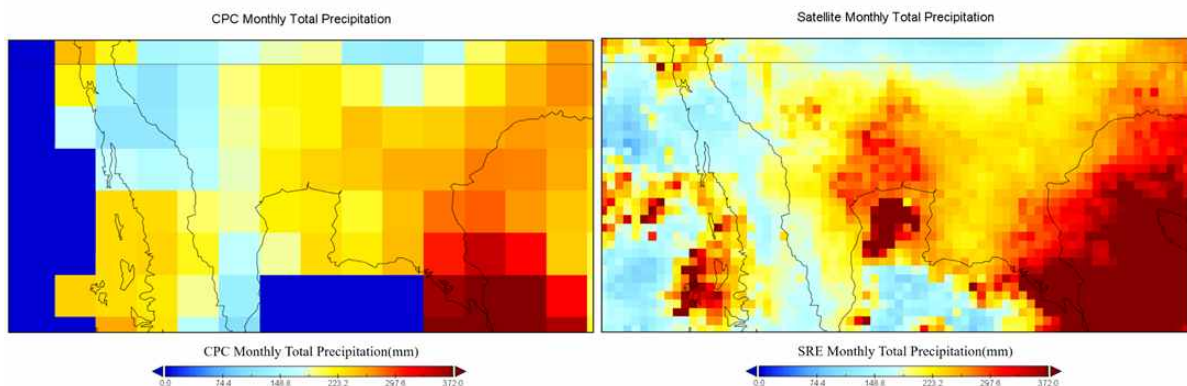
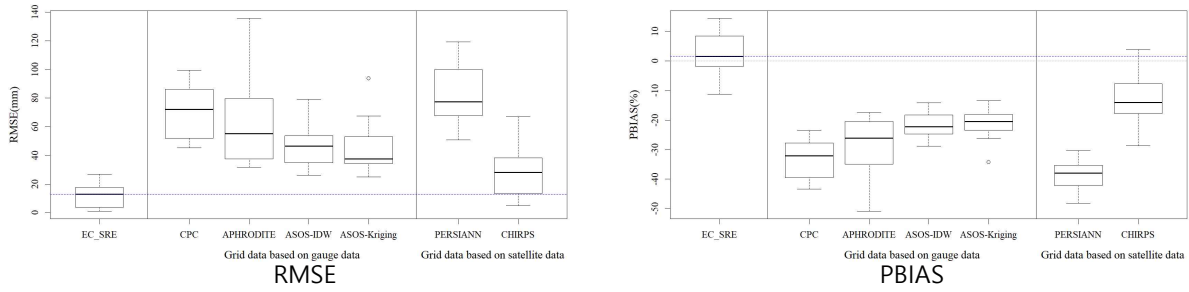


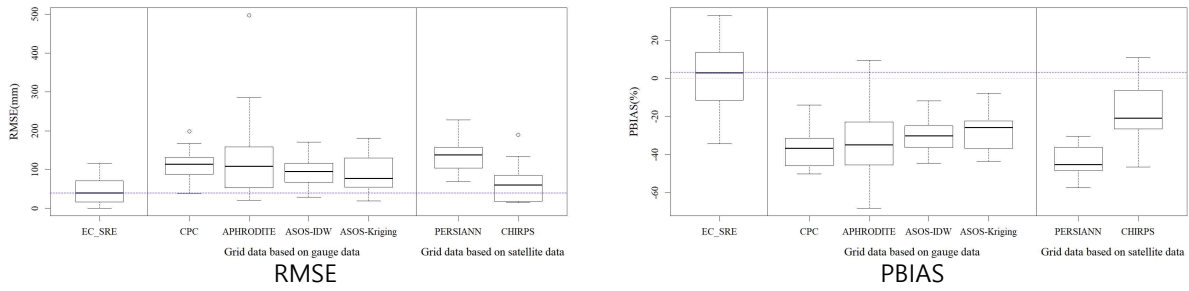
Figure 42 Comparison with CPC and Satellite Monthly rainfall for Bangkok area (September 12, 2011)

(2) 고해상도 관측자료 적용성 평가 결과

격자자료 기반 기후지수를 생산하여 고해상도 관측자료 적용성을 평가하였다. 10년, 50년, 100년, 200년 빈도 확률강수량을 산정하여 비교한 결과 모든 지수에서 RMSE와 PBIAS가 상당히 개선된 것으로 나타났다 (Figures 43-44). 특히 PBIAS는 다른 격자자료에 비해 월등히 개선된 결과를 나타내고 있다.

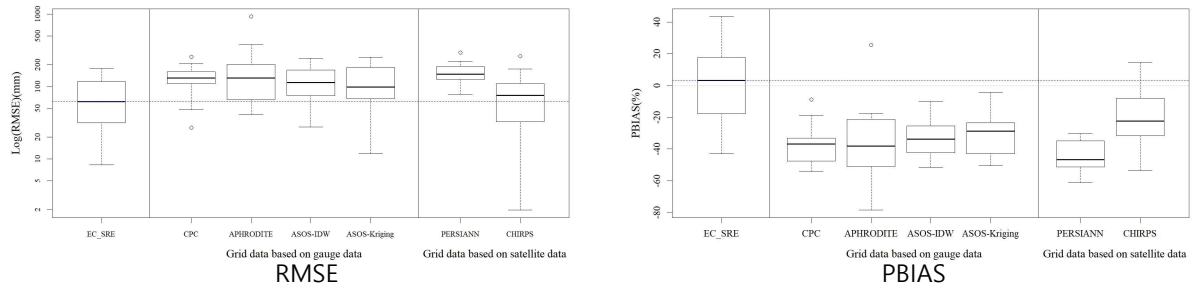


(a) 10-year probable rainfall

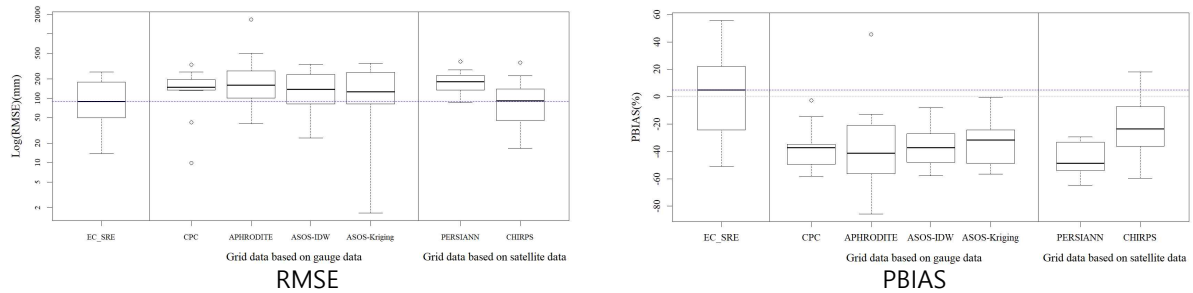


(b) 50-year probable rainfall

Figure 43. Comparison result of 10- and 50-year probable rainfall



(a) 100-year probable rainfall



(b) 200-year probable rainfall

Figure 44. Comparison result of 100- and 200-year probable rainfall

Table 31은 오차보정된 강수격자자료와 검증을 위한 6개의 격자자료의 평가 결과를 ASOS 12개 지점의 중간값으로 나타낸 결과를 보여주고 있다. 오차보정된 강수격자자료 평가 결과의 중간값이 검증을 위한 6개의 격자자료의 평가 결과의 중간값의 범위와 비폭하였을 때 상당히 개선된 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 이 연구에서 생산한 고해상도 격자자료 (오차보정된 강수격자자료)의 극단기후정보 복원성이 있다고 사료된다.

Table 31. Comparison result of probable rainfall by return period (comparison with 12 ASOS data)

Statistics	Extreme climate index	Gridded data		
		EC_SRE	Six gridded data for evaluation	
			Min.	Max.
RMSE(mm)	10-year probable rainfall	12.817	28.179	77.457
	50-year probable rainfall	40.389	60.700	138.509
	100-year probable rainfall	62.049	75.222	148.056
	200-year probable rainfall	88.517	91.260	180.697
PBIAS(%)	10-year probable rainfall	1.502	-38.010	-14.029
	50-year probable rainfall	2.804	-45.158	-20.830
	100-year probable rainfall	3.183	-46.728	-22.334
	200-year probable rainfall	4.964	-48.758	-23.631

4. 요약 및 결론

가. 상세화 기술 총론

APCC의 대표적인 기후정보인 계절예측은 다양한 모델예측자료에 기반한 앙상블기법으로 생산되어 비교적 정확도 높은 기후전망을 안정적으로 제공한다. 하지만, 월단위로 평균적인 기후중심의 정보가 생산되고 있고 공간격자간격도 기후인접분야에 바로 적용되기에는 많이 성긴 실정이다. 계절예측은 기후서비스의 주요한 근간이 되지만 공간적으로 저해상도이고 월평균 기후중심의 정보제공으로 유용성이 낮으며 사용이 제한적이다. 실제 공공영역에서도 극한기후와 관련된 상세기후정보에 대한 요구가 높아지고, 기후인접분야와 같은 전문영역에서는 적절한 기후영향예측을 위해서 상세화된 계절예측자료가 필요한 실정이다. 계절예측 상세화 기술 개발은 이러한 요구에 부합하기 위해 현행 계절예측 서비스의 한계를 극복하고 보다 발전적인 형태의 서비스를 제공하자는 목적으로 수행되었다.

계절예측 상세화 기술 개발 연구의 성과물은 유역규모에서 APCC 계절확률예측 기반 고해상도 격자 일별 날씨시나리오자료와 고해상도 격자자료이다. 이를 통해, 미관측지점에 대해서 보다 정확한 계절예측정보를 제공할 수 있고 기후영향예측의 기반자료로 용이하게 이용할 수 있다. 일반적으로 예측 결과를 표출할 때 예측의 불확실성도 함께 제시하여야 하며, 이 과제에서 개발된 계절예측 상세화 기술로 다량의 시나리오를 손쉽게 그리고 신속히 생산할 수 있어 예측의 불확실성 표현을 용이하게 할 수 있다. 또한 저해상도 재분석자료보다 신뢰성 높은 고해상도 격자자료를 추가 제공함으로써 기후변화로 인한 자연재해에 선제적으로 대응할 수 있는 사회적 기초자료로 의미가 있다.

나. 상세화 기술 각론

(1) 계절예측 격자형 상세화 기술 개발

계절예측 기반 기후영향평가에 활용도 높은 고해상도 격자자료를 생산하기 위해서 격자 WG모형을 구축하였다. 기존 다지점 WG모형의 세부모형을 격자모형으로 확장하는 방식으로 격자 WG모형을 개발하였고, 주요 기후특성의 재현성을 평가하였다. 특히, 다지점 자료의 보간을 통해 격자자료를 얻는 방식과 비교했을 때 재현성능 우위에 있음을 확인하였다. 이는 격자 WG모형이 생산하는 격자자료가 미관측지점에 대해 보다 신뢰도 높은 기상변수의 값을 제공함을 의미한다. 또한, 기존 다지점 자료보다 명확한 강수와 기온의 공간적인 패턴을 제시하여 수자원 관리와 같은 유역 전반의 기상변수값을 필요로 하는 분야에 유용하다. 재현성 평가에서 다지점 자료 보간 방식보다 우위의 성능이 보였지만 모든 면에서 만족스러운 성능을 보이는 것은 아니다. 향후 연구에서 격자모형의 보완과 고도화를 통해 재현성능개선에 힘을 기울여야 한다.

(2) 계절예측 상세화 기술 적용성 평가

계절예측 상세화 자료는 여러 분야에서 다양한 방식으로 적용될 것으로 기대되는데, 일반적인 적용방식 제시와 생산될 정보에 대한 평가가 필요하다. 이 과제에서는 구체적인 경우로 APCC 계절예측에 다지점 상세화 기술을 적용해 상세기후예측정보를 생산하는 과정을 제시하고 생산된 정보의 유용성을 평가하였다.

일반적으로 또는 적용분야에 따라 필요한 기후지수를 선별하였다. 통상적으로 인용되는 연단위로 정의된 기후지수들을 계절규모의 지수로 재정의하였다. 계절예측 상세화 기술로 생산된 다량의 시나리오자료의 기후지수값을 계산해 지수의 확률분포를 얻고, 이를 다가올 계절에서 기후지수의 예측으로 해석하였다. 예측의 정확도와 확률분포로 표현된 예측 불확실성의 적절성을 평가하였다.

봄철 서리일수(SFD), 생장일수(SGSL), 겨울철의 건물난방지수(SHDD) 등이 높은 정확도를 보였다. 여름에 강수와 관련된 많은 기후지수가 고려되었는데, 그 중 강수일수와 관련된 기후지수(SRD, SR10mm 등)가 상대적으로 높은 정확도를 보였다. 폭염과 관련된 지수는 모두 정확성이 떨어지는 것으로 나타났다.

정확도가 높은 생장일수(SGSL)와 서리일수(SFD)의 불확실성은 대체적으로 적절히 표현되는 것으로 판단된다. 병결일수(SID)와 10m 이상 강수일수(SR10mm)도 불확실성 표현 적절성이 높은 것으로 나타났다.

(3) 고해상도 격자자료 생산 및 검증

동아시아 지역의 고품질 기후정보 서비스를 위하여 고해상도 강수격자자료 데이터베이스를 구축하였다. 격자자료를 구축하기 위하여 세계최초로 강수레이더를 탑재한 TRMM 위성의 Level 3 TMPA 격자자료(1998년 1월-2014년 7월)와 듀얼레이더를 탑재한 GPM IMERG 격자자료(2014년 8월-2018년 12월)를 수집하여 0.1°로 자료를 상세화하였다. 이로써 1998년부터 2018년 기간에 대해서 자료를 구축하였다.

WMO 기후분석표준에 맞추기 위해서는 장기간(30년)자료 구축이 필요하다. 이를 위해 1998년 이전 기간에 대해서는 정지궤도 적외선센서 자료(GridSat B1)를 이용하였다. NOAA에서 개발한 Hydro-Estimator와 GMSRA(GOES Multispectral Rainfall Algorithm)을 앙상블 기법에 의해 결합하여 한반도 지역에 맞게 개선한 알고리즘으로 적외선센서 자료를 한반도시간(KST) 일강수자료로 변환하였다.

강수 변환 알고리즘 개선으로 원시위성강수자료는 단일 적외채널(GridSat B1)을 이용하였음에도 정확도가 비교적 높은 것으로 분석되었다. 생산된 원시위성강수자료는 정확도 개선을 위하여 오차보정을 위한 입력자료로 활용되었다.

오차보정은 지상관측강수량과 원시위성자료 간의 비(比)를 공간보간해서 각 격자점의 강수량을 원시위성자료의 값과 비의 곱으로 얻는 방식으로 수행하였다. 지상관측자료를 이용해, 오차보정된 위성강수자료를 교차검증방식으로 평가하였다. 탐지확률을 제외한 모든 평가측도에서 오차보정 전보다 상당히 개선되었다.

이 연구에서 산출된 고해상도 위성강우 격자자료는 국외기관 PERSIANN-CDR, CHIPRS에서 제공하지 못하는 한반도 지역시간의 일강수자료 제공이 가능하며, 비교검증결과 정확도가 개선되었으며, 기상청 국가기상위성센터에서 구축하고 있는 ECVs(Essential Climate Variables)의 강우자료와 상호보완적으로 장기간의 기후정보로써 활용될 것이다.

(4) 고해상도 관측자료 적용성 평가

관측자료 상세화를 통해 미관측지점에 보다 정확한 극한기후정보를 제공하고자 하였다. 위성자료 기반 관측자료 상세화 기술이 개발취지에 잘 부합하는지 알아보기 위해, 오차보정된 위성강수자료(daily, 0.1°)에 기반한 극한기후지수의 정확도를 평가하였다. 지상관측이 부족한 동아시아 지역의 적용성을 알아보기 위하여 2011년 7월말부터 3개월동안 지속된 태국의 홍수사상에 대하여 지상관측자료를 기반으로 산출한 저해상도 CPC 자료와 위성강우자료를 비교한 결과 50km의 CPC자료에 비하여 10km 해상도의 위성강우자료가 홍수사상에 대해서 잘 모의하는 것으로 나타났다. 관측지점이 부족한 동아시아 지역에서 상세화된 위성강우 격자자료는 장기간의 기후연구와 수문, 농업 등의 활용분야에서도 적용성이 높다고 판단된다.

격자자료 기반 기후지수를 생산하여 고해상도 관측자료 적용성을 평가하였다. 10년, 50년, 100년, 200년 빈도 확률강수량을 산정하여 비교한 결과 모든 지수에서 RMSE와 PBIAS가 상당히 개선된 것으로 나타났다. 특히 PBIAS는 다른 격자자료에 비해 월등히 개선된 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 이 연구에서 생산한 고해상도 격자자료(오차보정된 강수격자자료)의 극단기후정보 복원성이 있다고 사료된다.

다. 상세화 기술 활용 방안

(1) 계절예측 격자형 상세화 기술 활용 방안

계절예측 상세화 기술 개발은 궁극적으로 기후영향평가를 위한 계절예측 기반의 자료 생산에 있다. APCC를 이를 달성하기 위해서 APCC Integrated Modeling Solution (AIMS)이라는 플랫폼을 개발 중이며, 현재 다지점 WG모형이 탑재된 상태이다. 향후 보완 및 고도화를 거쳐 격자 WG모형도 AIMS에 탑재할 계획이다. 이를 통해 기후영향평가의 요구에 더욱 적합한 자료를 제공할 수 있을 것이라 기대된다.

(2) 계절예측 상세화 적용성 평가 기술 활용 방안

기후영향예측은 농업분야의 작황, 수자원분야의 유입량, 보건분야의 온열질환자 수 등에 대한 실효성 있는 운영 또는 대응전략을 수립하는 데 필수적인 정보이다. 특히, 효과적인 예측을 위해서 극한기후와 관련된 상세기후정보 또는 전문적으로 상세화된 기후자료가 필요한데, 계절예측 상세화 기술은 계절전망으로부터 필요한 자료를 생산하는 데 주요하게 활용할 수 있다. 계절예측 상세화 적용성 평가의 결과는 특정지역의 상세기후정보나 기후영향예측에 적합한

자료를 제공할 수 있다. 개발된 상세화 기술을 활용하면 농업, 수자원 등의 기후민감 분야에서 활용이 가능할 것으로 사료된다.

농업분야의 경우 작황에 대한 기후영향정보를 제공하는데 상세화 기술을 활용할 수 있다. 서리일수, 생장일수 등의 예측정보를 생산하여 농작물의 작황에 미치는 영향을 사전 분석하여 실효성 있는 운영 또는 대응전략을 수립하는데 활용이 가능하다. 주요 작물을 선정하여 작물별 한계온도와 생육적정온도를 적용하여 작물 맞춤형 기후예측정보를 제공한다면 의사결정자와 실무자가 의사결정과 영농활동을 수립하는데 기초자료로 사용이 가능할 것이라 판단된다.

수자원분야의 경우 봄철 가뭄에 대비한 물관리 운영계획을 수립하는데 있어 상세화 기술을 활용할 수 있다. 우리나라의 경우 농업용저수지에서 대부분의 논 농사의 용수공급을 하기 때문에 농작물에 생장에 중요한 영농 시기(모내기)에 적절한 용수 확보는 농작물 작황에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 본격적인 모내기철이 시작되기 전에 용수공급에 문제가 없는지 점검하여 사전 계획을 수립해야한다. 상세화 기술을 이용하면 농업용저수지의 유입량 예측정보를 제공할 수 있어 농업용수 부족에 따른 사전 대응이 가능하다. 또한 유입량 예측정보를 가뭄 예경보 발표에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 고해상도 격자자료 활용 방안

위성영상 기반 고해상도 강수격자자료는 아태 지역의 장기간의 기후자료가 없는 지역을 대상으로 신뢰성 있는 기후자료를 제공할 수 있다는 점에 가장 큰 의미를 가진다. 대부분의 기후응용분야가 장기간의 기후자료 구축이 필수적이며, 양질의 기후자료가 구축되지 않는다면 연구와 사업이 수행되기 어려운 실정이다. 이러한 점을 고려하였을 때 30년 동안의 강수격자자료를 제공하는 것은 기후자료를 기반으로 하는 연구 및 사업을 추진하는데 필수적인 역할을 할 뿐만 아니라 격자자료가 가지는 공간적인 장점을 고려한 다양한 응용분야 연구를 수행할 수 있다.

구체적으로 장기간의 고해상도 강수격자자료는 수자원분야 해외사업에 기초자료로 활용할 수 있다. 현지 기상청에서 얻을 수 있는 자료의 공간적인 분포와 시간적인 기간을 고려하면 장기간의 고해상도 강수격자자료를 사용하는 것이 사업을 계획적으로 추진하는 데 있어 도움이 될 것이라 판단된다. 또한 수문해석 등과 같이 공간적인 분포가 중요한 분야에서 강수격자자료를 직접 활용하는 것이 보다 오차가 적은 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

사사

이 연구는 APCC의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

- 김무섭, 2018: Weather Generator를 이용한 APCC 계절예측의 통계적 상세화-동아시아 겨울/여름몬순 기반으로- APEC기후센터, 46 pp., ISBN: 979-11-5698-195-4.
- 김무섭, 김원무, 정여민, 2019: Weather Generator를 이용한 APCC 계절예측 상세화 방법 개발 - 계절확률예측 기반으로 - APEC기후센터, 37 pp., ISBN: 979-11-5698-243-2.
- Anjum, M. N., Y. Ding, D. Shangguan, I. Ahmad, M. W. Ijaz, H. U. Farid, Y. E. Yagoub, M. Zaman, and M. Adnan, 2018: Performance evaluation of latest integrated multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan. *Atmos. Res.* 205, 134-146, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.010>.
- Brown, J. E. M., 2006: An analysis of the performance of hybrid infrared and microwave satellite precipitation algorithms over India and adjacent regions. *Remote Sens. Environ.* 101, 63-81.
- Condom, T., P. Rau, and J. C. Espinoza, 2011: Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007. *Hydrol. Process.* 25, 1924-1933.
- Duan, Z., and WGM. Bastiaanssen, 2013: First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure. *Remote Sensing of Environment* 131, 1-13.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J.m and Lister, D.H., 2013: Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. In press, *Int. J. Climatol.*, Doi: 10.1002/joc.3711
- Fang, J., W. Yang, Y. Luan, J. Du, A. Lin, and L. Zhao, 2019: Evaluation of the TRMM 3B42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over China. *Atmos. Res.*, 223, 24-38, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>.
- Laurent, L., P. Audois, I. Marie-Joseph, M. Becker, and F. Seyler, 2013: Calibration of TRMM 3B42 with geographical differential analysis over North Amazonia. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013 IEEE International*, 2234-2237.
- Li, C., G. Tang, and Y. Hong, 2018: Cross-evaluation of ground-based, multi-satellite and reanalysis precipitation products: Applicability of the Triple Collocation method across Mainland China. *J. Hydrol.*, 562, 71-83, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.039>.
- Mahmoud, M. T., M. A. Al-Zahrani, and H. O. Sharif, 2018: Assessment of global precipitation measurement satellite products over Saudi Arabia. *J. Hydrol.*, 559, 1-12,

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.015>.

- Min, Y. M., V. N. Kryjov, S. M. Oh, and H. J. Lee, 2017: Skill of real-time operational forecasts with the APCC multi-model ensemble prediction system during the period 2008–2015. *Clim. Dyn.* 49, 4141–4156, doi: 10.1007/s00382-017-3576-2.
- Wang, Z., R. Zhong, C. Lai, and J. Chen, 2017: Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmos. Res.*, 196, 151–163, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020>.
- Weigel, A. P., M. A., Liniger, and C. Appenzeller, 2007: Generalization of the discrete Brier and ranked probability skill scores for weighted multimodel ensemble forecasts. *Mon. Weather Rev.* 135, 2778–2785.
- Zhu, H., Y. Li, Y. Huang, Y. Li, C. Hou, and X. Shi, 2018: Evaluation and hydrological application of satellite-based precipitation datasets in driving hydrological models over the Huifa river basin in Northeast China. *Atmos. Res.*, 207, 28–41, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.022>.

부록 A.

부록 B.