개선된 PRISM 모형을 이용한 고해상도 일강수량 추정

김종필* · 이우섭** · 조현곤*** · 김광섭****

Kim, Jong Pil* · Lee, Woo-Seop** · Cho, Hyungon*** · Kim, Gwangseob****

Estimation of High Resolution Daily Precipitation Using a Modified PRISM Model

ABSTRACT

This study modified the Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model (PRISM) and investigated the applicability of the modified model (M-PRISM) in estimating 1 km × 1 km gridded daily precipitation over South Korea. The model parameters of M-PRISM were estimated by regression curves and were validated using the Jackknife method at the Korean Meteorological Administration (KMA) stations. The results indicate that M-PRISM shows better performance in estimating the frequency of daily precipitation than PRISM while M-PRISM has similar performance to PRISM in estimating the daily precipitation amount. Thus the M-PRISM model proposed in this study can be very useful to estimate high resolution daily precipitation.

Key words : Precipitation, PRISM, Topology, Spatial interpolation, GIS

초 록

본 연구에서는 M-PRISM 모형을 이용하여 1 km × 1 km 공간해상도 일강수량 추정에 대한 적용성을 검토하였다. 또한 회귀모형을 이용하여 M-PRISM 모형 매개변수를 추정하였으며, 잭나이프 방법을 이용하여 모형을 검증하였다. 기상청 385개 강수 관측지점에 대하여 M-PRISM 을 이용하여 일강수량을 추정하고 PRISM 모형과 비교하였다. 비교결과, 강수의 정량적 크기를 추정에서는 두 모형에서 뚜렷한 차이를 찾아볼 수 없었으나, 강수의 발생빈도 추정에 있어서는 M-PRISM 모형이 더 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안한 M-PRISM 모형 은 고해상도의 일강수량을 추정함에 있어서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 강수량, PRISM, 지형, 공간 내삽, GIS

1. 서론

강수의 시공간적 분포특성에 대한 이해는 물 순환을 연구하는데 가장 중요한 요소 중 하나이다. 강수의 관측은 조선 세종 때 측우기를 기점으로 매우 오랜 역사를 가지고 있다. 그러나 현재까지 강수 관측은 우량계를 이용한 점 기반으로 이루어지고 있어서 강수의 공간적 분포에 대한 파악이 어렵다. 특히 최근에는 지구온난화로 인하여 국지성 집중호우의 발생빈도가 증가하면서 비교적 협소한 지역에 대한 공간 강수량에 대한 파악이 더욱 중요한 실정이다.

* (재) APEC 기후센터 위촉연구원 (APEC Climate Center · jpkim@apcc21.org)

** (재) APEC 기후센터 선임연구원 (APEC Climate Center · wslee@apcc21.org)

*** 정회원 · 경북대학교 건설환경에너지공학부 박사과정 (Kyungpook National University · gonny@knu.ac.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 건설환경에너지공학부 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · kings@knu.ac.kr)

Received December 20, 2013/ revised January 21, 2014/ accepted May 30, 2014

지점 기반의 자료를 이용한 공간적인 내삽은 역거리가중법(Inverse Distance Weighted Method), 쌍일차보간법(Bilinear Interpolation), 크리깅(Kriging) 등 다양한 방법들이 제시되고 있다. 그러나 강수는 다른 기상인자와 달리 일 단위 이하의 비교적 짧은 시간 단위에서 그 공간적 연속성은 매우 낮다. 따라서 지상 우량계 자료만을 이용하여 단순한 통계적 내삽기법을 적용해서는 강수의 공간적인 분포특성을 파악하기는 상당히 힘들다.

최근에는 원격탐사기술이 발달되면서 기상레이더나 인공위성 등을 이용한 강수의 공간 관측이 가능해졌다. 그러나 원격탐사방법은 지상에 도달한 강수를 직접적으로 측정하는 것이 아니라 특정 고도에 존재하는 강수입자로부터 되돌아오는 반사도를 이용한다. 그렇기 때문에 이러한 강수 관측방법은 강수형태, 강수입자가 낙하하면서 생기는 크기와 위치의 변화, 마이크로파(microwave)의 굴절 및 감쇄 등 다양한 오차의 원인을 내포하고 있으며(Wilson and Brandes, 1979), 지상관측자료와 비교할 때 상당한 편의(bias)를 가지고 있다(Seo et al., 1999; Berndt et al., 2014).

한편, Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model (PRISM)은 고도, 거리, 경사각, 해양의 영향 등의 지형학적 특성과 기상인자 사이의 관계식을 이용하여 고해상도 격자형 기상 자료를 생산할 수 있다(Daly et al., 1994; 2002; 2008). PRISM 모형은 고해상도 지형 자료 등 보조 자료를 사용함으로써 다른 통계 모형들이 표현할 수 없었던 지형학적 특성을 반영할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 PRISM 모형은 주로 기상인자들의 월 자료 추정을 위하여 개발되었기 때문에(Scully, 2010), 일 단위 모형화가 필요한 수자원, 환경, 농업 등 응용 분야에 활용하기 어렵다. 그 뿐만 아니라 특정한 영향변경을 결정하고 그 영향원 내에 위치하고 있는 우량계 자료를 참조하기 때문에 우량계 밀도가 낮은 지역이나 복잡한 지형에 대한 적용이 어렵다(Kim et al., 2012). 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Kim et al. (2012)은 Thornton et al. (1997)의 연구에서 제시된 방법을 이용하여 격자형 강수자료를 추정할 때 공간적인 연속성을 확보하기 위하여 우량계의 밀도에 따라 영향반경을 조절할 수 있도록 하였으며, 강수의 발생 유무를 판단하기 위하여 간단한 확률 개념을 도입하여 PRISM 모형을 수정하였다(이하, M-PRISM).

본 연구에서는 Kim et al. (2012)에서 제시된 M-PRISM 모형을 이용하여 우리나라 1 km 공간해상도의 격자형 일강수량 추정에 대한 적용성을 검토하고, PRISM 모형의 분석결과와 비교분석하였다. 여기에서 제시된 PRISM 모형은 M-PRISM 모형의 검증에 위하여 선행연구(Daly et al., 2002)를 토대로 재구성한 것으로서 기존 연구들(e.g. Daly et al., 2002; Hong et al., 2007; Shin et al., 2008)에서 제시된 결과와는 차이가 있음을 명시한다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 입력자료

2.1.1 지형 자료

미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서는 SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) DEM (Digital Elevation Model) 자료를 제공하고 있다. SRTM DEM은 전 지구 규모에서 3"(적도기준 약 90 m) 해상도의 표고자료이다. PRISM 모형은 지형 자료의 공간해상도에 따라 생산되는 공간 강수량의 해상도가 결정된다. 따라서 고해상도의 지형 자료를 이용할수록 더욱 고해상도의 공간 강수량 정보를 생산할 수 있다. 그러나 지형 자료의 공간해상도가 과도하게 높을 경우 모형의 계산시간이 길어지기 때문에 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 DEM의 공간해상도를 1 km × 1 km로 설정하였다.

Kim et al. (2012)의 연구에서와 마찬가지로 울릉도와 독도의 경우 강수관측지점이 매우 적고 육지로부터 거리가 상당히 떨어져 있기 때문에 모의결과를 왜곡시킬 우려가 있는 것으로 판단하여 제외하고, 33.11°N~38.61°N, 125.08°E~129.59°E 지역에 대하여 DEM을 추출하였다. 이렇게 추출된 DEM으로부터 각 격자점을 중심으로 인접한 8개 격자점에서의 고도와 거리를 이용하여 경사도를 계산하고 최급구배 방향을 선택하여 그 격자점에서의 경사각으로 정의하고, 다시 북쪽으로부터 시계방향으로 1부터 8까지 값을, 평지의 경우 0을 할당하였다. 또한 해양의 영향을 반영하기 위하여 Daly et al. (2002)이 제안한 것과 같이 각 격자점으로부터 해양까지의 최단거리와 고도를 고려하여 총 6개 범주로 분류하였다. 지형 관련 매개변수 산정에 대한 보다 상세한 정보는 Daly et al. (2002), Hong et al. (2007), Kim et al. (2012) 등의 문헌을 참고하기 바란다.

2.1.2 일강수량 자료

본 연구에서는 기상청으로부터 2009년 1월 1일부터 12월 31일까지 일강수량 자료와 관측지점의 위치정보를 제공받아 활용하였다. 현재 기상청에서는 약 450개 지점 이상의 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS)와 76개 지점의 종관기상관측소(Automated Synoptic Observing System, ASOS)를 통하여 강수를 관측하여 제공하고 있다. 관측지점의 좌표를 이용하여 1 km DEM 자료로부터 각 관측지점의 고도를 계산하였다. 하지만 점 형태의 기상관측지점과 격자 형태의 DEM 자료는 공간적으로 완전히 일치하는 것이 아니기 때문에 몇 가지 문제점이 발생할 수 있다. 예를 들어, 매우 작은 규모의 섬이나 요철이 심한 해안가에 설치된 관측소는 DEM 자료상에서는 마치 해양에 위치하고 있는 것으로 분석될 수 있다. 이러한 경우에 입력자료로부터 그 지형적

특성을 정확히 파악할 수 없기 때문에 계산에서 제외하였다. 또한 AWS의 경우 설치환경에 따라 위치가 종종 변경되는 지점들이 나타났으며, 이러한 지점들도 분석의 일관성을 유지하기 위하여 모두 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 1 km DEM 자료를 기준으로 육지에 해당되며, 설치된 위치가 일정한 곳만을 선택하여 385개 관측지점(AWS 322개 지점과 ASOS 63개 지점)의 자료를 이용하였다.

2.2 연구방법

2.2.1 M-PRISM 모형

본 연구에서는 고해상도 일 단위 공간 강수장을 추정하기 위하여 Kim et al. (2012)에서 제시된 M-PRISM 모형을 적용하였다. 적용된 모형은 PRISM 모형과 마찬가지로 강수와 지형과의 관계를 이용한다. 임의의 격자점에서 강수량 추정치는 다음과 같은 가중 회귀식을 통하여 계산된다(Daly et al., 2002; Hong et al., 2007; Shin et al., 2008; Um and Jeong, 2011).

$$\hat{p} = \beta_0 \hat{z} + \beta_1 \quad (1)$$

여기서, $\hat{p}$, $\hat{z}$ 는 각각 격자점에서의 강수량 추정치와 고도, β_0 와 β_1 는 그 격자점에서의 가중 회귀계수를 나타낸다.

각 격자점에서 가중 회귀계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i (p_i - \bar{p})(z_i - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n \omega_i (z_i - \bar{z})^2}, \quad \beta_1 = \bar{p} - \beta_0 \bar{z} \quad (2)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i p_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

여기서, n 은 영향반경 내의 관측자료의 개수이며, ω_i 는 영향반경 내의 i 번째 관측치에 대한 합성 가중치로서 거리, 고도, 경사향, 해양도에 따라 결정된다. p_i 와 z_i 는 각각 영향반경 내에 존재하는 i 번째 관측지점의 강수량과 고도를 나타낸다.

합성 가중치(w)는 다음과 같이 계산된다.

$$\omega = (F_r \omega(r)^2 + F_z \omega(z)^2)^{1/2} \omega(f) \omega(c) \quad (4)$$

여기서, $\omega(r)$ 은 거리에 대한 가중치를, $\omega(z)$ 는 고도에 대한 가중치를, $\omega(f)$ 는 경사향에 대한 가중치를, 그리고 $\omega(c)$ 는 해양도에 대한 가중치를 의미한다. 또한 F_r 과 F_z 는 각각 거리와 고도의 가중치에 대한 중요도를 나타낸다. 각 인자에 대한 가중치 결정 방법은 Kim et al. (2012)를 참고하기 바란다.

M-PRISM 모형과 기존 PRISM 모형의 가장 큰 차이점은 관측 지점의 공간적 분포밀도에 따라 영향반경의 크기를 변화시킨다는 점과 강수의 발생 유무를 결정하기 위하여 확률개념을 도입하였다는 점이다. 이러한 관측지점의 분포밀도 및 강수의 발생확률을 결정하기 위하여 가우스 필터를 이용한 가중치를 적용하고 있으며, 가우스 필터의 형상매개변수에 따라 이 가중치는 변하게 된다. 여기서 가우스 필터는 거리에 대한 가중함수(weighting function)로서 각 지점의 관측자료로부터 가중평균값을 구하기 위하여 사용되며, 형상매개변수는 이 가중함수의 형상을 결정하게 된다. 또한 강수가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역은 임계강수확률에 의해 결정하도록 되어있다. 각 계산격자에서 강수의 발생 유무는 영향반경 내에 존재하는 관측지점의 강수유무에 대한 가중평균값이 임계강수확률을 초과할 경우 그 격자에서 강수가 발생한 것으로 간주하게 된다. 따라서 이러한 가우스 필터의 형상매개변수와 임계강수확률에 따른 모형의 예측 정확도의 변화에 대한 분석이 필요하다. 가우스 필터의 형상매개변수와 임계강수확률에 대한 수식을 포함한 보다 자세한 설명은 Thornton et al. (1997) and Kim et al. (2012)의 연구를 참고하기 바란다.

2.2.2 모형 평가

M-PRISM 모형의 강수 발생에 대한 예측성을 정성적으로 비교하기 위해서 Table 1에서 보는 바와 같이 네 가지의 경우를 고려하였다(Mason, 2003). 추정결과와 검증을 위하여 각 경우의 수로부터 편의(Bias, *BIAS*), 적중률(Hit Rate, *H*), 오경보율(False-Alarm Ratio, *FAR*), 정확도(Proportion Correct, *PC*), 임계성공지수(Critical Success Index, *CSI*) 등의 평가지수를 사용하였으며, 각 평가지수는 다음과 같이 Eqs. (5)~(9)을 이용하여 계산될 수 있다.

$$BIAS = \frac{\text{forecasted events}}{\text{observed events}} = \frac{a+b}{a+c} \quad (5)$$

Table 1. Contingency Table for Comparing between the Observed and the Estimated Rainfall Occurrence

	Yes observed	No observed
Yes estimated	a	b
No estimated	c	d

$$H = \frac{\text{hits}}{\text{observed events}} = \frac{a}{a+c} \quad (6)$$

$$FAR = \frac{\text{false alarms}}{\text{forecasted events}} = \frac{b}{a+b} \quad (7)$$

$$PC = \frac{\text{correct forecasts}}{\text{all forecasts}} = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad (8)$$

$$CSI = \frac{\text{hits}}{\text{all forecasted or observed events}} = \frac{a}{a+b+c} \quad (9)$$

여기서, *BIAS*는 강수가 관측된 경우의 수(*a+c*)와 강수가 발생한 것으로 예측한 경우(*a+b*)의 수의 비율로, 1일 때 예측성이 가장 높음을, 1보다 클 경우는 실제보다 더 많은 지점에서 강수가 발생한 것으로 예측한 경우를, 1보다 작을 경우는 실제보다 더 적은 지점에서 강수가 발생한 것으로 예측한 경우를 의미한다. *H*는 강수가 관측된 경우의 수(*a+c*)와 강수의 발생을 예측하여 적중한 경우의 수(*a*)의 비율로, 0에서 1까지의 값을 가지며, 1일 때 가장 예측성이 높음을 나타낸다. *FAR*은 강수가 발생한 것으로 예측된 경우의 수(*a+b*)와 그 중에서 실제로 강수가 관측되지 않은 경우의 수(*b*)의 비율로 나타내며, 0에서 1까지의 값을 가지고, 0일 때 가장 예측성이 높음을 의미한다. 또한, *PC*는 모든 경우의 수(*a+b+c+d*)와 강수 발생 유무를 적중한 경우의 수(*a+d*)의 비로 표현되며, 0에서 1까지의 범위에서 1일 때 예측성이 가장 높음을 의미한다. *CSI*는 강수가 발생된 것으로 관측되었거나 예측된 경우의 수(*a+b+c*)와 그 중에서 강수가 발생을 예측하여 적중한 경우의 수(*a*)의 비율로서 역시 0에서 1까지의 범위를 가지며 1일 때 예측성이 가장 높은 것을 의미한다.

또한 강수량 관측치와 추정치 사이의 정량적 비교를 위하여 다음과 같이 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, *RMSE*)와 절대평균오차(Mean Absolute Error, *MAE*)를 계산하여 비교하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{est} - P_{obs})^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{est} - P_{obs}| \quad (11)$$

3. 모형 적용 및 검증

3.1 지형 관련 매개변수 결정

지형 관련 매개변수들은 대부분 기존 PRISM 모형과 관련된 것으로서, Daly et al. (2002)의 연구에서 제시된 결과를 토대로 결정하였으며, Table 2에서 제시된 바와 같다. z_{min} 과 z_{max} 는 최소 고도차와 최대 고도차를 의미하며, 고도차가 z_{min} 보다 작을 경우 동일한 기후특성을 갖는 것으로, z_{max} 보다 클 경우 유사성이 전혀 없는 것으로 간주한다. 또한 c_{max} 는 최대 해양도 차이를 나타내며, 해양도 차이가 c_{max} 보다 클 경우 역시 기후특성에 대한 유사성이 전혀 없는 것으로 판단하게 된다. F_r 과 F_z 는 앞에서 언급한 바와 같이 거리와 고도에 대한 가중치의 중요도를 나타내는 것으로 표에서 제시된 것과 같이 0.8과 0.2로 설정하였다.

3.2 형상매개변수 및 임계강수확률 결정

최적의 형상매개변수 및 임계강수확률을 계산하기 위하여 각 매개변수의 변화에 따라 정확도(*PC*)의 변화특성을 분석하였다. 대상기간 전체에 대하여 분석이 이루어져야 되지만, 계산시간에 따른 제약으로 본 연구에서는 임의로 2009년 7월 4일의 강수사상을 선정하여 이에 대한 분석을 수행하였다. 2009년 7월 4일 강수사상은 분석에 사용된 전체 385개 관측지점 중 약 42.6%에 해당하는 164개 지점에서 강수가 관측되었다. 만약 전체 관측지점에서 강수가 관측되지 않았거나 전체 지점 모두 강수가 관측된 사상을 적용하게 되면, *PC*가 1이 되기 때문에 형상매개변수에 따른 영향을 파악할 수 없다.

Fig. 1는 형상매개변수 및 임계강수확률의 변화에 따른 M-PRISM 모형 정확도의 변화를 보여주고 있다. 형상매개변수는 0.5부터 11.5까지 0.5의 간격으로 변화시켰으며, 그림에서 보는 바와 같이

Table 2. Input Values of the Model Parameters Related to Topography

Parameter	Description	Values
F_r	Importance factor for distance weighting	0.8
F_z	Importance factor for elevation weighting	0.2
z_{min}	Minimum elevation difference	100.0
z_{max}	Maximum elevation difference	500.0
c_{max}	Maximum coastal proximity difference	5.0

Fig. 1. Scatter Plots of PC Scores According to (a) Shape Parameters of the Gaussian Filter and (b) Critical Values of Precipitation Occurrence Probability in the M-PRISM Model

Table 3. Selected Rain Events for Model Verification

Case	Rainfall-detected Stations / Total Weather Stations	Rain Event (yyyy-mm-dd)	Rainfall (mm/day) with No Rain		Rainfall (mm/day) without No Rain	
			Max.	Mean	Mean	Min.
I	48 / 385 (12.5%)	2009-08-01	46.0	1.2	9.6	0.1
II	92 / 385 (23.9%)	2009-07-27	93.0	2.7	11.2	0.1
III	164 / 385 (42.6%)	2009-07-04	45.0	2.6	6.1	0.1
IV	290 / 385 (75.3%)	2009-07-24	114.0	11.2	14.8	0.1
V	385 / 385 (100.0%)	2009-08-11	177.0	43.0	43.0	1.0

접합곡선(fitting curve)을 구하였다. 산출된 곡선식으로부터 형상 매개변수가 6.25일 때, 정확도가 최대가 되는 것을 알 수 있었다. 이는 Thornton et al. (1997)에서 제시된 결과와도 일치하였다. 또한 임계강수량은 0.0부터 1.0까지 0.1의 간격으로 변화시키면서 형상매개변수와 동일한 방법으로 접합곡선을 구한 다음 곡선식으로부터 0.45일 때, PC가 최대가 되는 것으로 나타났다.

3.3 모형 검증 및 결과 비교

강수추정모형의 검증을 위하여 잭나이프(Jackknife) 방법을 이용하였다. 이 방법은 전체 분석지점 중 하나의 관측지점을 결측(missing)으로 가정하여 그 값을 추정하는 방법으로, 이 과정을 전체 분석지점에 대하여 반복적으로 적용한 후 결측으로 처리된 분석지점의 추정치와 관측치를 비교함으로써 예측모형을 검증하게 된다. 잭나이프를 이용한 방법은 관측지점의 수가 많을수록 또 분석기간이 길수록 계산시간이 오래 길어진다. 따라서 본 연구에서는 계산시간을 고려하여 2009년 1월 1일부터 동년 12월 31일까지 365일에 대하여 모형 검증을 수행하였다.

검증방법은 먼저 1월 1일에 대하여 첫 번째 관측지점을 결측으로

가정한 다음 PRISM과 M-PRISM 모형을 이용하여 그 지점에서의 일강수량을 추정한다. 그런 다음 다시 두 번째 관측지점을 결측으로 가정하고 예측을 수행하게 된다. 이렇게 1월 1일에 대하여 전체 385개 관측지점에서의 일강수량이 추정되면, 1월 2일에 대하여 다시 385개 지점의 일강수량을 추정한다. 같은 방법으로 12월 31일까지 추정하게 되며, 385개 지점과 365일에 대하여 총 140,525회 모의를 반복하여 일강수량을 추정하였다. 강수량 추정치는 다시 Eqs. (5)-(11)을 이용하여 385개 관측지점에 대한 평가 지수를 계산한 다음 평균하여 관측자료와 비교하였다.

2009년 1월 1일부터 12월 31일까지에 대한 PRISM과 M-PRISM 모의결과 중에서 Table 3에서 제시된 바와 같이 임의의 5개 강수사상을 선정하여 관측자료와 비교분석하였다(Figs. 2-6). 이들 강수사상은 전체 385개 관측지점 중 48개 지점(약 12.5%)에서 강수가 관측된 사례(Case I)부터 전체 관측지점 모두(100%)에서 강수가 관측된 사례(Case V)까지 다양한 경우를 고려하였다.

Fig. 2은 강수 발생률이 가장 작은 2009년 8월 1일(Case I)에 대한 PRISM과 M-PRISM을 이용하여 추정된 일강수량과 관측치를 비교한 것이다. 서울지역의 강수량 분포를 보면, M-PRISM

개선된 PRISM 모형을 이용한 고해상도 일강수량 추정

Fig. 2. Comparison of the Precipitation Occurrence and Amount from (a) Rain Gauges, (b) PRISM, and (c) M-PRISM on 2009-08-01 (Case I)

Fig. 3. Comparison of the Precipitation Occurrence and Amount from (a) Rain Gauges, (b) PRISM, and (c) M-PRISM on 2009-07-27 (Case II)

Fig. 4. Comparison of the Precipitation Occurrence and Amount from (a) Rain Gauges, (b) PRISM, and (c) M-PRISM on 2009-07-04 (Case III)

Fig. 5. Comparison of the Precipitation Occurrence and Amount from (a) Rain Gauges, (b) PRISM, and (c) M-PRISM on 2009-07-24 (Case IV)

Fig. 6. Comparison of the Precipitation Occurrence and Amount from (a) Rain Gauges, (b) PRISM, and (c) M-PRISM on 2009-08-11 (Case V)

모형에서는 서울지역에 강수가 발생하지 않은 것으로 나타났지만, PRISM 모형 결과에서는 서울 전 지역에서 강수가 발생한 것으로 나타났다.

Case I의 경우(Fig. 7(a)), 관측 강수량과 M-PRISM 추정 강수량 사이의 PC 는 약 0.904, $BIAS$ 는 약 0.854로 강수량을 비교적 잘 추정하는 것으로 판단된다. 그러나 PRISM 모형을 이용하여 강수량을 추정한 결과에서는 $BIAS$ 가 약 2.938로 분석되어 실제 관측된 강수 발생 비율의 대략 3배나 되었으며, 또한 PC 의 경우도 0.738로 M-PRISM에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 강수 발생 비율이 약 24%(2009년 7월 27일)인 경우(Fig. 3)에서도 관측지점의 밀도가 높은 서울지역에서 PRISM의 강수 모의 능력이 상당히 떨어지는 것을 알 수 있다. Case II의 경우(Fig. 7(b)), FAR 은 PRISM이 M-PRISM보다 2배 정도 높은 값을 보인다. 2009년

7월 4일의 Case III (Fig. 7(c))에서는 전체 관측소 중 약 164개 (42.6%) 관측지점에서 강수량이 관측되었으며, 이 때 M-PRISM의 강수 발생분포는 관측자료와 매우 유사한 반면, PRISM의 경우에는 무강수 지역을 강수지역으로 추정하는 것을 볼 수 있다. 385개 전 지점에서 강수가 관측된 Case V에는 M-PRISM과 PRISM 모두 관측자료에서 강수가 관측된 지점의 비율을 유사하게 예측하였으며(Fig. 6), M-PRISM의 경우 $BIAS$, H , PC , CSI 모두 0.987로 분석되어 1에 근접하는 것을 알 수 있었다(Fig. 7(e)).

다시 말해서, Case IV와 V에서 보는 바와 같이 강수가 발생한 지점의 비율이 상대적으로 높은 사상에 대해서는 PRISM과 M-PRISM의 추정결과에서 비슷한 성능을 보여주고 있다. 그러나 Case I, II, III과 같이 강수가 발생한 지점의 비율이 상대적으로 낮은 사상에 대해서는 M-PRISM이 PRISM보다 강수 발생지역을

Fig. 7. Comparison of Station-averaged Skill Scores for Daily Precipitation Estimates from PRISM and M-PRISM on the Five Rainfall Events

Fig. 8. Comparison of Station-averaged Values of (a) RMSE and (b) MAE for Daily Precipitation Estimates from PRISM and M-PRISM on the Five Rainfall Events

잘 묘사하는 것을 알 수 있었다. Figs. 7(a)~(e)는 5개 강수사상에 대하여 두 모형으로부터 계산된 *BIAS*, *H*, *FAR*, *PC*, *CSI* 등 5가지 정성적 평가지수를 분석하여 비교한 것이며, Fig. 7(e)는 전체 관측지점에서 모두 강수가 발생했기 때문에 *FAR*이 0으로 나타났다.

Figs. 8(a) and 8(b)는 각각 강수 관측치와 두 모형을 이용한 강수 추정치 사이의 *RMSE*와 *MAE*를 비교한 그림이다. Case I부터 V까지의 *RMSE* 평균은 PRISM 모형의 경우 약 10.579 mm/day로 분석되었으며, M-PRISM의 경우 약 9.331 mm/day로

M-PRISM을 적용한 결과에서 관측치와의 오차가 약 11.8% 정도 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. *MAE* 평균에서도 PRISM의 경우 약 5.052 mm/day로, M-PRISM은 약 4.254 mm/day로 분석되어 역시 M-PRISM 모형의 결과에서 오차가 약 15.8% 정도 더 작은 것으로 나타났다.

Figs. 9(a)~9(e)는 전체 검증기간(2009년)에 대한 정성적 평가 지수들의 월별 평균값을 비교한 것이다. *BIAS*와 *H*의 경우 PRISM 모형의 예측성이 다소 우수한 것으로 나타났으나, *FAR*, *PC*, *CSI* 등의 평가지수는 모두 M-PRISM 모형이 PRISM 추정결과보

Fig. 9. Comparison of Station-averaged Skill Scores including (a) BIAS, (b) H, (c) FAR, (d) PC, and (e) CSI for Monthly Precipitation Estimates from Jan-01-2009 to Dec-31-2009

Fig. 10. Comparison of Station-averaged Values of RMSE and MAE for Monthly Precipitation Estimates from Jan-01-2009 to Dec-31-2009

다 우수함을 알 수 있었으며, 특히 *FAR*에서 현저하게 개선되었음을 알 수 있었으며, 계절별로 두 모형의 성능 차이는 일관된 것을 알 수 있었다.

Figs. 10(a) and 10(b)는 각각 강수 관측치와 두 모형을 이용한 강수 추정치 사이의 *RMSE*와 *MAE*의 월별 평균값을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 연중 계절에 관계없이 M-PRISM

모형 결과에서 계산된 추정 오차가 PRISM보다 낮게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4는 관측자료와 두 모형의 추정결과를 토대로 임계치에 따른 평균 강수일수를 비교한 것이다. 여기에서 제시된 평균 강수일

Table 4. Comparison of Station-averaged Rain Days for Different Thresholds at the 385 Weather Stations

	Thresholds (mm/day)								
	> 0	≥ 10	≥ 20	≥ 30	≥ 40	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 80
Observed	91.5	30.1	16.9	11.3	7.9	5.9	4.5	3.6	2.9
PRISM	101.5	27.4	15.4	10.2	7.1	5.2	4.1	3.2	2.6
M-PRISM	89.9	29.5	16.6	11.0	7.7	5.6	4.4	3.4	2.8

수는 관측지점에 대하여 평균한 값이다. PRISM 모형의 경우 일강수량 0 mm 이상의 강수일수에서는 약 10.9% 정도 과대 추정하는 것으로 나타났으며, 나머지 임계치 이상의 강수일수에서는 모두 약 $10 \pm 1.1\%$ 정도 과소 추정하는 것으로 나타났다. M-PRISM 모형의 경우는 전체적으로 과소 추정하는 경향을 보여주었으나, 관측자료로부터 계산된 결과와의 오차가 약 1.7%(일강수량 0 mm 이상 강수일수)에서 약 5.6%(일강수량 70 mm 이상 강수일수)로 PRISM보다 강수일수는 물론 임계치 이상의 호우일수를 추정함에 있어서도 우수한 결과를 보여주었다.

Fig. 11(a)는 각 관측지점에 대한 연강수량 관측치와 추정치를 비교한 것이다. 관측 강수량과 PRISM을 이용한 추정치 사이의 공간 상관계수는 약 0.595이고, M-PRISM의 경우는 약 0.806이었

Fig. 11. Comparison (a) between Annual Total Precipitation Amounts and (b) between Rain Days from the Observed and the Estimated Data at the 385 Weather Stations

Fig. 12. Comparison of the Station-Averaged (a) Daily and (b) Monthly Precipitation from the Observed and the Estimated Data at the 385 Weather Stations

Table 5. Comparison of Annual Total Precipitation Amounts (TOTAL), the Root Mean Squared Errors (RMSE), and the Correlation Coefficients (CC) at the 12 Optional Weather Stations

Station Name	Observed Annual Total	Estimated					
		PRISM			M-PRISM		
		Annual Total	RMSE (mm/day)	CC	Annual Total	RMSE (mm/day)	CC
Seoul (108)	1,564	1,375	3.426	0.982	1,365	3.633	0.982
Incheon (112)	1,382	1,330	2.185	0.991	1,310	1.957	0.991
Seosan (129)	1,074	1,119	3.244	0.965	1,101	3.236	0.965
Daejeon (133)	1,090	1,049	2.918	0.956	1,053	3.071	0.956
Chupungryeong (135)	1,011	1,045	5.300	0.865	990	4.018	0.865
Daegu (143)	833	817	1.201	0.989	800	0.981	0.989
Busan (159)	1,773	1,494	6.652	0.988	1,593	5.042	0.988
Mokpo (165)	1,088	1,096	1.994	0.985	1,094	2.178	0.985
Seogwipo (189)	2,007	1,573	5.666	0.948	1,620	5.680	0.948
Taebaek (216)	1,140	1,116	3.110	0.963	1,144	3.348	0.963
Buyeo (236)	1,090	1,138	3.468	0.938	1,065	2.773	0.938
Miryang (288)	1,131	1,151	2.811	0.975	1,162	3.021	0.975

으며, RMSE는 PRISM 모형의 경우 약 361.2 mm/year, M-PRISM은 약 191.1 mm/year로 M-PRISM의 결과가 PRISM보다 우수한 것을 알 수 있었다. Fig. 11(b)는 각 관측지점에 대한 연간 강수일수를 비교한 것으로 관측자료의 강수일수와 PRISM 추정결과 사이의 공간 상관계수는 약 0.242로 나타났으며, M-PRISM은 약 0.566으로 역시 M-PRISM이 더 우수함을 알 수 있었다. Fig. 12(a)는 전체 관측지점의 일강수량을 평균하여 비교한 것으로, PRISM 모형의 추정결과는 관측 강수량에 비해 과소 추정하는 것으로 나타났으며, M-PRISM은 관측 강수량과 유사한 결과를 보여주고 있다. Fig. 12(b)는 전체 관측지점에 대한 월별 평균 강수량을 비교한 것이다. 전체 분석기간에 대해서 두 모형 모두 과소 추정하는 것으로 나타났으나, 두 모형의 결과를 비교할 때 M-PRISM의 추정결과가 PRISM보다 강수량 관측치를 더 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 PRISM의 경우 강수 지역을 제대로 표현하지 못하기 때문에 발생한 것으로 Figs. 11(a) and 11(b)에서 나타난 것과 같이 특정 관측지점에서는 연간 강수가 전혀 발생하지 않은 것으로 묘사되고 있어서 Fig. 12에서 나타난 것과 같이 전체 관측지점에 대한 강수량 평균이 과소 추정되는 것처럼 나타난다. 그러나 이렇게 강수가 전혀 발생되지 않은 것으로 나타난 지점들을 제외한 경우에는 PRISM과 M-PRISM 모두 관측 강수의 정량적 크기를 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다.

PRISM 모형의 추정 결과에서 나타나는 무강수 지역은 계산하고자 하는 임의의 격자로부터 관측지점까지의 거리를 나타내는 영향

반경의 크기가 작아서 참조할 수 있는 관측지점이 존재하지 않거나 부족하기 때문에 나타나는 현상이다. 이러한 무강수 지역을 없애기 위하여 영향반경을 무한히 크게 설정한다면 계산 격자로부터 아주 먼 거리에 위치한 관측지점의 값을 참조하여 전체적인 공간 강수장이 평활화(smoothing)된다거나 강수가 실제로 발생하지 않았던 지역에서도 상당량의 강수가 발생한 것으로 추정된다. 본 연구에서 제시된 결과를 통하여 M-PRISM 모형이 기존 PRISM 모형에서 발생할 수 있는 이러한 한계를 어느 정도 해결해줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5는 임의의 12개 관측지점을 선정하여 관측된 강수 시계열과 추정 결과를 비교한 것이다. 선정된 12개 관측지점의 연강수량 평균은 약 1,265 mm, PRISM 모형의 결과는 약 1,192 mm, M-PRISM은 약 1,191 mm로 연강수량 평균치에서는 두 모형의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 12개 지점의 연간 RMSE 평균은 PRISM 모형의 경우 약 3.498 mm/day, M-PRISM은 약 3.245 mm/day로 분석되었으며, 시계열에 대한 상관계수는 PRISM과 M-PRISM 모두 약 0.962로 매우 우수한 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 무강수 지점을 제외할 경우 두 모형 모두 강수의 정량적인 크기를 추정함에 있어서 매우 우수하다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합해볼 때, 본 연구에서 제안한 M-PRISM 모형은 강수의 정량적 크기를 추정함에 있어서는 PRISM 모형과 비슷한 예측성능을 가지고 있다. 그러나 강수 영역을 공간적으로 묘사함에 있어서는 PRISM 모형보다 상당히 우수함을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 M-PRISM 모형을 이용하여 2009년 강수사상에 대하여 1 km 해상도의 일강수량 추정에 대한 적용성을 검토하였다. 간단한 회귀식을 이용하여 모형 매개변수를 추정하였으며, 모형의 검증을 위하여 잭나이프 방법을 적용하여 전국 385개 강수 관측지점에 대하여 일강수량을 추정하고 PRISM 모형의 결과와 비교하였다. 비교결과, 전국적으로 강수가 발생했던 사상에 대해서는 PRISM과 M-PRISM의 추정결과가 비슷한 것으로 나타났으나, 일부 지역에만 강수가 발생했던 사상에 대해서는 M-PRISM이 더 우수한 결과를 보여주었다. 특히 강수가 발생한 지역을 묘사함에 있어서는 M-PRISM 모형이 매우 개선된 결과를 보여주는 것을 알 수 있었다. 또한 강수의 정량적 크기를 추정함에 있어서는 PRISM과 M-PRISM에서 큰 차이를 찾아볼 수 없었으나, 강수의 발생빈도 즉, 강수일수를 추정함에 있어서는 M-PRISM이 월등히 우수한 결과를 나타내었다. 이는 PRISM 모형은 일정한 크기의 영향반경을 설정하고 그 영역 내의 관측지점의 강수자료와 고도 사이의 회귀식을 이용하기 때문이다. 이러한 경우 영향반경 내에서 단 하나의 관측지점에서 강수가 발생하였을 사상에 대해서 영향반경 내 모든 격자점에서 강수가 발생한 것처럼 나타나거나 혹은 강수가 발생되지 않은 지점이 많은 경우 강수가 발생한 지점을 무강수 지점으로 표현하게 되는 단점이 있다. 반면 M-PRISM 모형은 관측자료의 공간적 분포밀도에 따라 영향원의 크기를 조절함과 동시에 강수 발생여부를 판단하기 위하여 간단한 확률개념을 적용함으로써 강수의 공간적 분포를 보다 현실적으로 묘사할 수 있었다. 따라서 M-PRISM 모형은 고해상도의 일강수량을 추정함에 있어서 매우 유용할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제시된 결과는 2009년도 강수사상에 대하여 한정되어 있어 여전히 한계를 가지고 있다. 따라서 향후 장기간의 강수사상에 대한 모형의 적용 및 검증이 요구되며, 보다 객관적인 방법을 이용하여 모형 매개변수에 대한 민감도 분석이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030040).

References

- Berndt, C., Rabiei, E. and Haberlandt, U. (2014). "Geostatistical merging of rain gauge and radar data for high temporal resolutions and various station density scenarios." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 508, pp. 88-101.
- Daly, C., Gibson, W. P., Taylor, G. H., Johnson, G. L. and Pasteris, P. P. (2002). "A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate." *Climate Research*, IRSC, Vol. 22, pp. 99-113.
- Daly, C., Halbleib, Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., Curtis, J. and Pasteris, P. P. (2008). "Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous united states." *International Journal of Climatology*, Wiley, Vol. 28, pp. 2031-2064.
- Daly, C., Neilson, R. P. and Phillips, D. L. (1994). "A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountain terrain." *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, AMS, Vol. 33, pp. 140-158.
- Hong, K. O., Suh, M. S., Rha, D. K., Chang, D. H., Kim, C. and Kim, M. K. (2007). "Estimation of high resolution gridded temperature using GIS and PRISM." *Atmosphere*, KMS, Vol. 17, No. 3, pp. 255-268 (in Korean).
- Kim, J. P., Kim, G. and Lee, W. S. (2012). "Estimation of monthly areal precipitation using daymet and PRISM." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 12, No. 5, pp. 83-90 (in Korean).
- Scully, R. A. (2010). *Intercomparison of PRISM and Daymet temperature interpolation from 1980 to 2003*, M.S. Thesis, Utah State University, Logan, Utah, U.S.A., pp. 6-8.
- Seo, D. J., Breidenbach, J. and Johnson, E. (1999). "Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 223, pp. 131-147.
- Shin, S. C., Kim, M. K., Suh, M. S., Rha, D. K., Jang, D. H., Kim, C. S., Lee, W. S. and Kim, Y. H. (2008). "Estimation of high resolution gridded precipitation using GIS and PRISM." *Atmosphere*, KMS, Vol. 18, No. 1, pp. 71-81 (in Korean).
- Thornton, P. E., Running, S. W. and White, M. A. (1997). "Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 190, pp. 214-251.
- Um, M. J. and Jeong, C. S. (2011). "Spatial analysis of precipitation with PRISM in Gengwondo." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 3, pp. 179-188 (in Korean).
- Wilson, J. W. and Brandes, E. A. (1979). "Radar measurement of rainfall - A summary." *Bulletin of the American Meteorological Society*, AMS, Vol. 60, pp. 1048-1058.