

남한 강수량 분포 추정을 위한 PRISM 매개변수 및 수치표고모형 최적화*

박종철¹ · 정일원¹ · 장희준¹ · 김만규^{2*}

Optimization of PRISM Parameters and Digital Elevation Model Resolution for Estimating the Spatial Distribution of Precipitation in South Korea*

Jong-Chul PARK¹ · Il-Won JUNG¹ · Hee-Jun CHANG¹ · Man-Kyu KIM^{2*}

요 약

생태환경모델링, 수문모델링, 기후변화 영향평가 등 다양한 분야에서 정규 격자 형태의 기후자료에 대한 요구가 증가하고 있다. PRISM(Precipitation-Elevation Regressions on Independent Slopes Model)은 다양한 격자형태의 기후자료 생산방법 중 고지대의 강수량 추정에 유용한 방법이다. 그러나 국내에서는 이 모델의 매개변수 및 모델에 사용되는 수치표고모형의 공간해상도 최적화에 대한 논의가 충분하지 않았다. 이에 본 연구에서는 PRISM을 개발하였다. 그리고 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 기법을 이용하여 2000-2005년 1km 공간해상도의 남한 연평균 강수 격자자료를 생산하는 데 필요한 PRISM 매개변수 최적값 및 DEM의 적정 공간해상도를 추정하였다. 아울러 매개변수와 수치표고모형에 대한 PRISM의 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 PRISM 모델에서 관측소 최대 탐색반경(67km)과 최소반경(31km), 지형고도-강수량의 선형회귀식 산정에 필요한 최소 관측소 개수(4개), 수치표고모형의 적정 공간해상도(1×1km) 등을 결정하였다. 그리고 PRISM 모의 결과가 수치표고모형의 공간해상도에 매우 민감하다는 것을 확인하였다. 본 연구결과는 PRISM 기법을 국내에 적용할 때 정확도를 향상시키는데 기여할 것으로 기대된다.

주요어 : SCE-UA, 강수량, 내삽, 공간 해상도

2012년 5월 22일 접수 Received on May 22, 2012 / 2012년 7월 11일 수정 Revised on July 11, 2012 / 2012년 8월 2일 심사완료 Accepted on August 2, 2012

* 이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(UD110006MD).

1 포트랜드주립대학교 지리학과 Department of Geography, Portland State University, USA.

2 공주대학교 지리학과 Department of Geography, Kongju National University.

* Corresponding Author E-mail : aquasia@kongju.ac.kr

ABSTRACT

The demand for a climatological dataset with a regular spaced grid is increasing in diverse fields such as ecological and hydrological modeling as well as regional climate impact studies. PRISM(Precipitation–Elevation Regressions on Independent Slopes Model) is a useful method to estimate high–altitude precipitation. However, it is not well discussed over the optimization of PRISM parameters and DEM(Digital Elevation Model) resolution in South Korea. This study developed the PRISM and then optimized parameters of the model and DEM resolution for producing a gridded annual average precipitation data of South Korea with 1km spatial resolution during the period 2000–2005. SCE–UA (Shuffled Complex Evolution–University of Arizona) method employed for the optimization. In addition, sensitivity analysis investigates the change in the model output with respect to the parameter and the DEM spatial resolution variations. The study result shows that maximum radius within which station search will be conducted is 67km. Minimum radius within which all stations are included is 31km. Minimum number of stations required for cell precipitation and elevation regression calculation is four. Optimizing DEM resolution is 1×1 km. This study also shows that the PRISM output very sensitive to DEM spatial resolution variations. This study contributes to improving the accuracy of PRISM technique as it applies to South Korea.

KEYWORDS : SCE–UA, Precipitation, Interpolation, Spatial Resolution

서론

강수량의 공간적인 분포는 기후학, 수문학, 지리학, 농공학 등의 연구에서 중요한 정보로 이용되어 왔다. 강수량의 많고 적음의 공간적인 차이는 가뭄과 홍수의 형태로 지역 주민의 삶에 직접적인 영향을 미쳤다. 또한, 농업 경관이나 마을 입지 선정 등을 통해 간접적으로 투영되기도 한다. 최근에는 지역별로 상세한 기후변화 영향평가와 적응정책수립을 위해 고해상도의 공간기후정보가 이용되고 있다(Lettenmaier *et al.*, 2008).

지금까지 지점 강수량 자료를 이용하여 강수의 공간적인 분포를 결정하기 위해 Thiessen 폴리곤(Thiessen, 1911)과 같은 면적비중 방법, Kriging(Krige, 1951), Inverse Distance Weighting(Shepard, 1968)와 수치 내삽 방법 등이 개발되어 왔다.

특히 Kriging은 지질학 분야에서 시작되어 강수량 내삽을 포함한 다양한 분야에 적용(e.g., 김규범 등, 2005; 이재봉과 이홍로, 2005; 이상훈, 2008; 김호용, 2010a, 2010b; 이형석, 2010; 박현주 등, 2012)되고 있는 방법으로서 다른 내삽법에 비해 우수한 결과를 제시하는 것으로 알려져 있다(Hevesi *et al.*, 1992; Briggs and Cogley, 1996; Goovaerts, 2000; Lee, 2003; 조홍래와 정종철, 2006; 박노옥과 장동호, 2008; 박종철과 김만규; 2009).

하지만 Daly *et al.*(1994)은 기상관측소가 대부분 상대적으로 저지대에 있어 내삽을 기본 원리로 하는 IDW와 크리깅은 지형고도가 높은 지역의 강수량과 기온을 추정하는 데 한계가 있다고 지적하고 PRISM(Precipitation–elevation Regressions on Independent Slopes Model) 방법을 제안하였다. PRISM은 지형고도와 강수량이 선형관계에 있다는 가정 하에서 특정

지점의 강수량을 결정한다. 따라서 관측소 보다 높은 지역의 강수량을 추정하는 외삽에 장점이 있다(Daly and Johnson, 1998). 이 모델은 연평균, 월평균 강수량의 공간적 분포를 추정하기 위해 개발되어 미국 전역의 연평균과 월평균 강수량 등을 생산하는 데 사용되었으며, 중국과 몽골, 알래스카의 강수량 분포도 작성에도 활용되었다(Daly *et al.*, 1994; Johnson *et al.*, 1997; Kittel *et al.*, 1997; Daly *et al.*, 2000, 2001; Simson *et al.*, 2005). 이 모델은 1997년 기온 추정에도 사용되기 시작했고(Johnson *et al.*, 1997), 일기상 분포를 추정하는 모델로 발전하고 있다(Daly *et al.*, 2007).

국내에서도 강수량 관측소는 대부분 상대적으로 저지대에 위치해 있다. 따라서 분포형 강수량 자료를 생산함에 있어 고지대의 강수량 추정에 문제가 있다. 이에 국내에서는 신성철 등(2008)이 PRISM의 아이디어를 기반으로 5×5km 공간해상도의 강수량 분포를 추정하는 바 있다. 최근 김맹기 등(2012)은 MK-PRISM(Modified Korean Parameter - elevation Regressions an Independent Slopes Model)을 개발하여 1×1km 공간해상도¹⁾ 자료 생산을 진행하고 있다.

PRISM은 강수량을 추정할 지점에 대한 지형고도와 강수량 사이의 선형회귀식을 여러 단계의 과정을 거쳐 결정한다. 이때 회귀식 산정에 사용할 관측점의 최소 개수, 관측소를 탐색할 반경의 최대·최소거리, 관측소를 찾지 못했을 때 사용할 회귀경사 기본값 등 다양한 매개변수를 필요로 한다. 아울러 관측소 및 내·외삽 지점의 지형고도를 획득하는 데 사용할 DEM(Digital Elevation Model)을 필요로 한다(Daly *et al.*, 1994; Daly and Johnson, 1998).

Daly *et al.*(1994)은 지형고도와 강수량 사이의 선형회귀식 작성에 필요한 최소 관측소 개수가 미국 오레곤 주 북부지역을 분석할 때는 5개, 윌라메트 유역(Willamette River basin)은 3개, 미국 서부는 6개로 제안하였

다. 그리고 그들은 5' 공간해상도(약 6×9km)의 DEM을 연구에 사용하였다. 이 매개변수 값들은 매개변수 최적화 기법을 토대로 결정된 것이었다. 하지만 DEM의 공간해상도는 다소 임의적으로 선택한 측면이 있었다.

매개변수 값 및 DEM의 공간해상도에 관한 국내의 연구를 살펴보면, 김맹기 등(2012)이 1km 공간해상도의 자료를 생산할 때 지형고도-강수량 회귀식 산정에 최소 5개의 관측소가 필요하다고 제안한 바 있다. 그리고 DEM은 1km 공간해상도를 사용하였다. 하지만 최소 관측소 개수의 결정과정에 대해서는 논문에서 밝히지 않고 있고, DEM의 공간해상도는 그들이 생산하였던 강수 분포도의 공간해상도와 일치시킨 것으로 이해된다.

매개변수 값은 Daly *et al.*(1994)의 사례에서와 같이 PRISM 적용 지역의 강수 분포 패턴, 사용 가능한 관측소의 밀도, 생산하고자 하는 자료의 시간 규모 등에 따라 달라질 수 있다. 하지만 매개변수 값을 최적화하고자 하는 노력과 매개변수에 대한 모델의 반응을 이해하는 것은 모델 개선에 단서를 제공할 수 있다는 점에서 중요하다. 국내에서 PRISM을 적용함에 있어 매개변수 값의 최적화에 대해서는 아직까지 충분한 토의가 이루어지지 않았다. 그리고 DEM의 공간해상도가 적정하였는지에 대해서도 국·내외 모두 충분히 논의되지 않았다. 아울러 매개변수들과 DEM의 공간해상도 선택의 문제가 모의 결과에 얼마나 영향을 미치는지에 대하여는 토의가 이루어지지 않았다.

한편 PRISM은 어떤 지점의 강수량을 추정하기 위해 다수의 매개변수를 사용하고, 여러 공간해상도의 DEM 중 하나를 선택하여 사용해야하는 어려움을 갖고 있다. 이와 같이 다양한 매개변수와 자료를 사용하는 연구에서 연구자들은 종종 그 결정이 최선이었는지에 대해 의문을 갖곤 한다. 이 이슈는 많은 매개변수를 가진 모델을 사용하는 연구자들이 경험해 왔고 현재도 경험하고 있다. 매개변수 최적화 기법은 이러한 어려움을 해결하기 위

한 방안으로 제안되어 여러 연구자들에 의해 사용되고 있다.

매개변수 최적화는 모의된 값과 실측된 값 사이의 통계적인 차이를 최소화할 수 있는 매개변수 값을 찾아가는 방법이다. 매개변수 최적화 기법은 크게 매뉴얼 방식과 수학적 방법으로 나누어 살펴볼 수 있다. 매뉴얼 방식은 연구자가 변수를 하나씩 직접 수정해 가며 결과를 확인하는 방법으로 시간이 오래 걸리고, 연구자가 오랜 경험과 모델에 대한 깊은 이해가 필요하다는 어려움이 있다. 수학적 방법은 Pattern search method(Hooke and Jeeves, 1961), Simplex method(Nelder and Mead, 1965), Genetic algorithm-fine tuning(Holland, 1975), Adaptive random search(Pronzato *et al.*, 1984) 등이 개발되었다. 그러나 이 방법들은 전역 최적화(Global optimization)를 사용하지 않으며 실행 시간이 오래 걸린다는 단점이 있었다. 전역 최적화는 결정계수 또는 Nash-Sutcliffe 계수와 같은 목적함수를 사용하여 이 값을 최적화할 수 있는 매개변수를 찾아가는 방법이다. 최근에는 전역 최적화가 가능하고, 분석시간이 상대적으로 적게 소요되는 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution-University of Arizona: Duan *et al.*, 1992), GLUE(generalized likelihood uncertainty estimation: Beven and Binley, 1992), DREAM(developed differential evolution adaptive metropolis: Vrugt *et al.*, 2008) 등이 제안되었다. 특히 SCE-UA는 오픈 소스이며, 여러 소프트웨어와의 연결이 용이하다는 장점이 있어 다양한 연구에 활용되고 있다(e.g., Duan *et al.*, 1994; Gan and Biftu, 1996).

본 연구에서는 전역 최적화 기법인 SCE-UA를 이용하여 그 동안 국내에서 토의가 부족하였던 PRISM 매개변수 최적값 및 DEM의 적정 공간해상도 추정을 수행하였다. 아울러 PRISM 결과가 매개변수 및 DEM의 공간해상도에 얼마나 민감한지에 대하여 실험

하였다.

연구방법

이 연구에서는 국내에서의 PRISM 매개변수 및 DEM의 적정 공간해상도를 추정하기 위해 PRISM 초기 개념을 토대로 모델을 구축하고, 전역 최적화 기법을 이용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 그리고 최적화된 매개변수 및 DEM의 공간해상도를 토대로 민감도 분석을 수행하여 PRISM 결과가 매개변수 및 DEM의 공간해상도에 얼마나 민감한지에 대하여 실험하였다.

이 연구에서는 PRISM 입력자료로 2000-2005년(6년) 기상청 377개 지점의 AWS(Automatic Weather System) 기상관측 자료를 사용하였다. 기상청 AWS 자료는 이용 가능한 자료의 양과 질적인 측면에서 2000년 이후의 자료가 이전의 자료에 비해 PRISM 연구에 적합하다(김맹기 등, 2012). 이 연구에서는 최근 2011년 관측자료까지 연구에 포함하는 것이 가장 이상적이겠지만 본 연구진에서 기 확보하고 있는 자료 중 많은 관측소를 포함할 수 있는 기간을 선택하는 과정에서 2005년까지로 국한하였다. 이 연구의 목적이 자료생산 자체 또는 장기적인 추세를 보기 보다는 PRISM 모델의 입력자료 및 매개변수 최적화와 이것이 모의 영향에 미치는 영향 등을 파악하는 데 있으므로 6년 자료만을 사용하는 것도 무방할 것이다.

이 연구에서 추정하는 PRISM 매개변수는 관측소 탐색 최대반경(MAXRAD)과 최소반경(MINRAD), 선형회귀식 산정에 필요한 최소 관측소 개수(MINSTA) 및 지형고도-강수량 선형회귀경사 기본값(DB1) 이다(그림 1). 그리고 DEM의 적정 공간해상도를 찾기 위해서 1-10km 의 공간해상도를 실험하였다.

PRISM은 Daly *et al.*(1994)가 제안한 개념을 토대로 설계하였다. 초기 PRISM은 선형회귀식을 산정할 때 내·외삽 지점과 동일 사면에 위치한 관측소만을 사용하였다(Daly *et*

al., 1994). 그리고 그 결정방법은 내·외삽 지점 주변에서 높은 가중치를 가지고 있는 관측소를 이용하는 방법으로 발전하였다(Daly and Johnson, 1998). 그러나 최근의 모델은 매개변수의 수가 증가하고(예를 들어 해안으로부터의 거리), 가중치 개념이 도입되어 모델복잡도가 증가하였다. PRISM 초기 모델은 이미 미국의 연·월 강수량 추정에 사용된 바 있고(Daly et al., 1994) 상대적으로 개념이 간단하기 때문에 이 연구에서는 이를 토대로 실험 모델을 구현하였다.

이 연구에서 구현한 PRISM의 강수량 추정 과정은 그림 1과 같다. 먼저 강수량을 추정할 지점으로부터 최대반경(MAXRAD) 내에 있는 관측소 중 강수량 추정지점과 동일 사면에 있는 관측지점을 선택한다. 다음으로 최소반경(MINRAD) 내에 있는 관측소는 모두 선택한다. 두 과정을 통해 선택된 관측소는 최소개수(MINSTA)를 만족하여야 한다. 이를 만족하지 않을 때에는 필터링된 사면방향²⁾ 자료를 이용하여 관측소 개수가 만족하는지 여부를 분석한다. 관측소 개수를 만족하면 각 관측소의 지형고도와 연강수량 자료를 이용하여 선

형회귀식을 계산한다. 회귀경사는 유효범위 내에 있어야 하며 이를 만족하지 않을 때는 1개의 이탈 값을 삭제하여 만족 여부를 재확인한다. 이를 만족하지 않을 때에는 지형고도-강수량 회귀경사 기본 값(DB1)을 사용하여 강수량을 추정한다. PRISM의 개념은 Daly et al.(1994)의 연구에서 확인할 수 있다. 관측소의 지형고도(DEMR)는 NASA에서 제공하는 30m 해상도의 ASTER Global Digital Elevation Map(GDEM)을 1-10km 공간해상도로 재배열하여 사용하였다. 회귀경사의 유효범위($0-3\text{km}^{-1}$), 이탈 값 제거 개수 및 범위는 Daly et al.(1994)이 제안한 값을 사용하였다.

필터링된 사면방향도는 Daly et al.(1994)이 제안한 방법을 이용하여 작성하였다. 그들은 동-서의 경사를 지형고도(E_{ij})의 서쪽에 인접한 격자(E_{i-1j})와 동쪽에 인접한 격자(E_{i+1j})와의 고도차로 구하였다. 남-북 경사는 남쪽에 인접한 격자(E_{ij-1})와 북쪽에 인접한 격자(E_{ij+1})의 고도차를 이용하여 구하였다. 동, 서, 남, 북의 사면방향은 동-서, 남-북의 고도차를 이용하여 결정하였고, 고도차

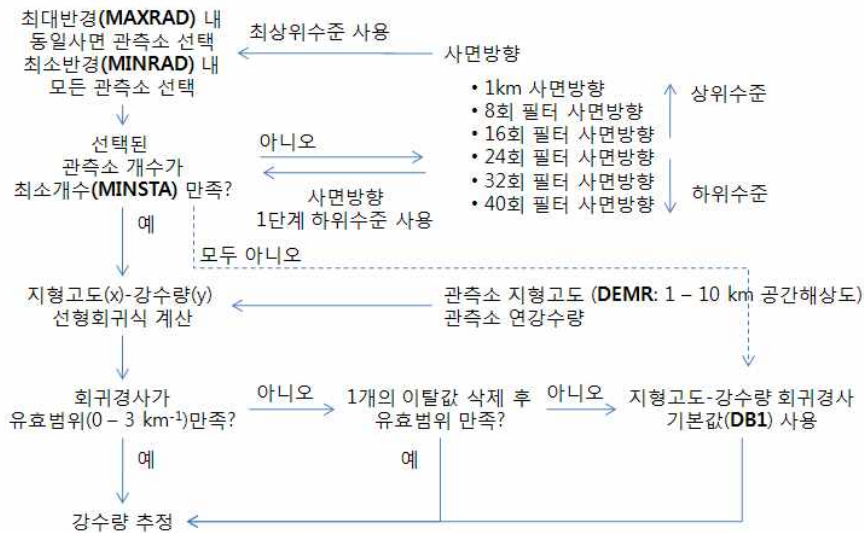


FIGURE 1. 본 연구에서 구현한 PRISM의 강수량 추정 과정

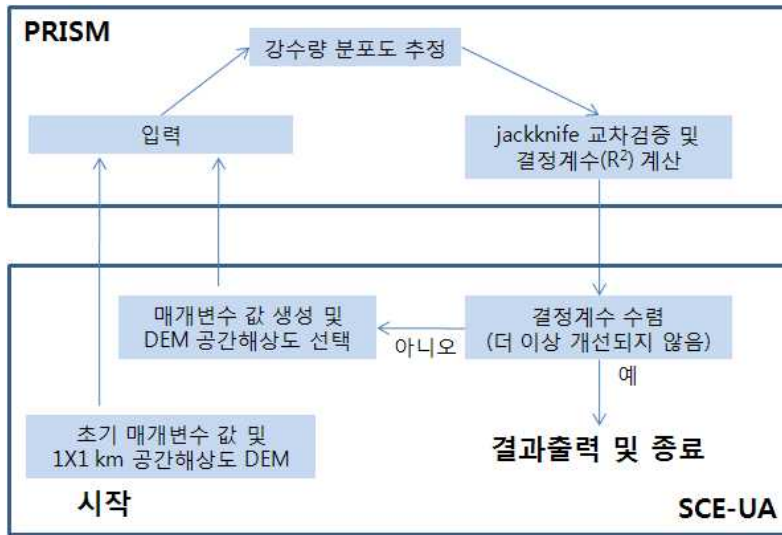


FIGURE 2. 본 연구에서 구현한 PRISM과 SCE-UA 연결 개념도

가 15m 이하일 때는 평탄면으로 간주하였다. 그리고 식 (1)의 필터를 수회 적용하여 필터링된 사면방향도를 작성하였다. 이 연구에서는 5개 수준의 필터링된 사면방향도를 작성하여 연구에 이용하였으며, 필터링 회수는 Daly *et al.*(1994)이 제안한 값을 사용하였다. 이 연구에서는 상위수준의 사면방향도를 이용하였을 때 강수량 추정지점의 사면방향과 동일한 사면에 위치한 관측소 개수가 특정 개수를 만족하지 않으면, 필터링이 많이 된 하위수준의 사면방향도를 사용하여 관측소의 사면방향을 재계산하도록 하였다.

$$E_{ij} = 0.5E_{ij} + 0.125(E_{i+1j} + E_{i-1j} + E_{ij+1} + E_{ij-1}) \quad (1)$$

이 연구에서 SCE-UA는 강수량 분포도의 결정계수(R^2)가 최대 또는 더 이상 변화가 없을 때까지 PRISM의 매개변수 값을 반복적으로 추정한다(그림 2). R^2 는 jackknife(Yates and Warrick, 1987) 교차검증 방법으로 작성하였다. 이 방법은 입력 자료에서 한 번에 하나씩의 관측소를 제외하고 자료를 생산한 후 그 지점에서의 관측 값과 모의 값을 비교

하는 방법이다. 이 방법은 입력 자료를 실험군과 검증군으로 자료를 구분하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성을 배제할 수 있어 유용하다. SCE-UA에서 매개변수 값을 추정하는 과정은 Duan *et al.*(1992)에서 확인할 수 있다.

이 연구에서는 실험대상 매개변수가 모의 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 각각에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석에는 위의 과정을 통해 결정된 PRISM 모델을 이용하였다. 각 매개변수의 변경 범위는 최적화된 값에서 상·하위 20%를 사용하였다. DEM의 민감도는 위의 최적화된 모델에 DEM의 공간해상도만 변경하여 확인하였다.

연구결과

1. 매개변수 값 및 DEM 적정 공간해상도 추정 결과

본 연구에서 2000-2005년 연평균 강수량을 생산하는 데 최적화된 매개변수 값은 관측소 탐색 최대반경(MAXRAD)과 최소반경(MINRAD)이 각각 67km와 31km이었다. 그리

TABLE 1. 매개변수 값과 결정계수

매개변수	Daly <i>et al.</i> (1994) 값 적용			최적값 적용
	WR	NO	WUS	
MAXRAD (km)	63	36	27	67
MINRAD (km)	36	27	9	31
MINSTA (개)	3	5	6	4
DB1 (km^{-1})	0.8	1.15	0.97	0.53
DEM (km)*	6×9	6×9	6×9	1×1
결정계수(R^2)	0.14	0.12	0.03	0.44

WR: Willamette River basin, NO: Northern Oregon, WUS: Western United States

* 이 연구에서는 Daly *et al.*(1994)이 사용한 5' 공간해상도의 DEM을 9×9km 공간해상도의 DEM으로 간주하여 적용하였다.

고 지형고도-강수량의 선형회귀식을 산정하는 데 필요한 최소한의 관측소(MINSTA)는 4개이었다. 선형회귀식을 산정할 수 없을 때 사용할 지형고도-강수량의 회귀경사 기본값(DB1)은 0.53km^{-1} 이었다. DEM의 공간해상도는 $1\times 1\text{km}$ 를 사용하였을 때 가장 좋은 결과를 획득하였다. 이 값들은 SCE-UA 매개변수 최적화 기법을 통해 도출한 것이다. 이와 같은 최적 값들을 사용하였을 때 예측된 강수량과 실측한 강수량 사이의 결정계수(R^2)는 0.44이었다.

표 1은 Daly *et al.*(1994)이 미국에서 적용하였던 값을 본 연구에서 사용했을 때의 결정계수와 본 연구에서 최적화 기법으로 도출한 값을 비교한 것이다. 본 연구에서 도출한 최적값은 DB1과 DEM을 제외하고, 미국의 Willamette River 유역의 매개변수와 유사하다. DB1 값이 미국 사례에서 보다 낮게 나온 것은 미국과 한국의 지형고도 차이 때문인 것으로 추측된다. DB1이 미국 사례보다 작다는 것은 국내에서 지형고도가 증가함에 따른 강수량의 증가량이 미국보다 적다는 것을 의미한다. 미국의 사례지역에는 남북으로 길고 높은 산맥(예를 들어 최고고도 4,392m의 Cascade Range)이 있어, 해안 방향인 서쪽 사면의 고지대에서 저지대에 비해 상대적으로 많은 강수량이 관측된다(Chang and Jung 2010). 국내에는 이와 같은 지형으로 태백산맥이 있지만 상대적으로 규모가 작기 때문에

DB1의 최적값이 미국보다 낮은 값에서 결정된 것으로 추측된다.

표 1에서 Daly *et al.*(1994)의 매개변수를 국내에 적용했을 때의 결정계수는 0.03-0.14로, 본 연구에서 도출한 값들을 적용했을 때의 결정계수 0.44와는 큰 차이를 보인다. 특히 Willamette River 유역의 값은 DEM, DB1을 제외하고 본 연구의 최적값과 유사함에도 불구하고 결정계수가 0.14에 불과하다. 이것은 DB1 또는 DEM의 공간해상도가 모의 결과에 중요한 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다. DB1이 다수의 의사결정 과정을 통해서도 지형고도-강수량의 선형회귀식을 산정할 수 없을 경우에 사용하는 값이기 때문에 모델 내에서 사용빈도가 높지 않다는 점을 감안하면 DB1 보다는 DEM의 공간해상도가 PRISM의 결과에 중요한 영향을 미치고 있는 것으로 추측된다. 이에 대해서는 연구결과의 '2장 매개변수 민감도 분석결과'에서 구체적으로 살펴보았다.

이 연구에서 최적화된 매개변수를 이용하여 작성한 2000-20005년 연평균 강수량 분포도(그림 3)는 한반도의 강수량 분포를 전반적으로 잘 묘사하고 있다. 특히 강원도 태백산지에서의 사면과 지형에 따른 강수 분포와 지리산 일대의 강수 분포를 대체로 잘 묘사하고 있다.

그러나 최적화 기법을 통해 추정된 매개변수를 사용하였음에도 전반적인 결정계수는

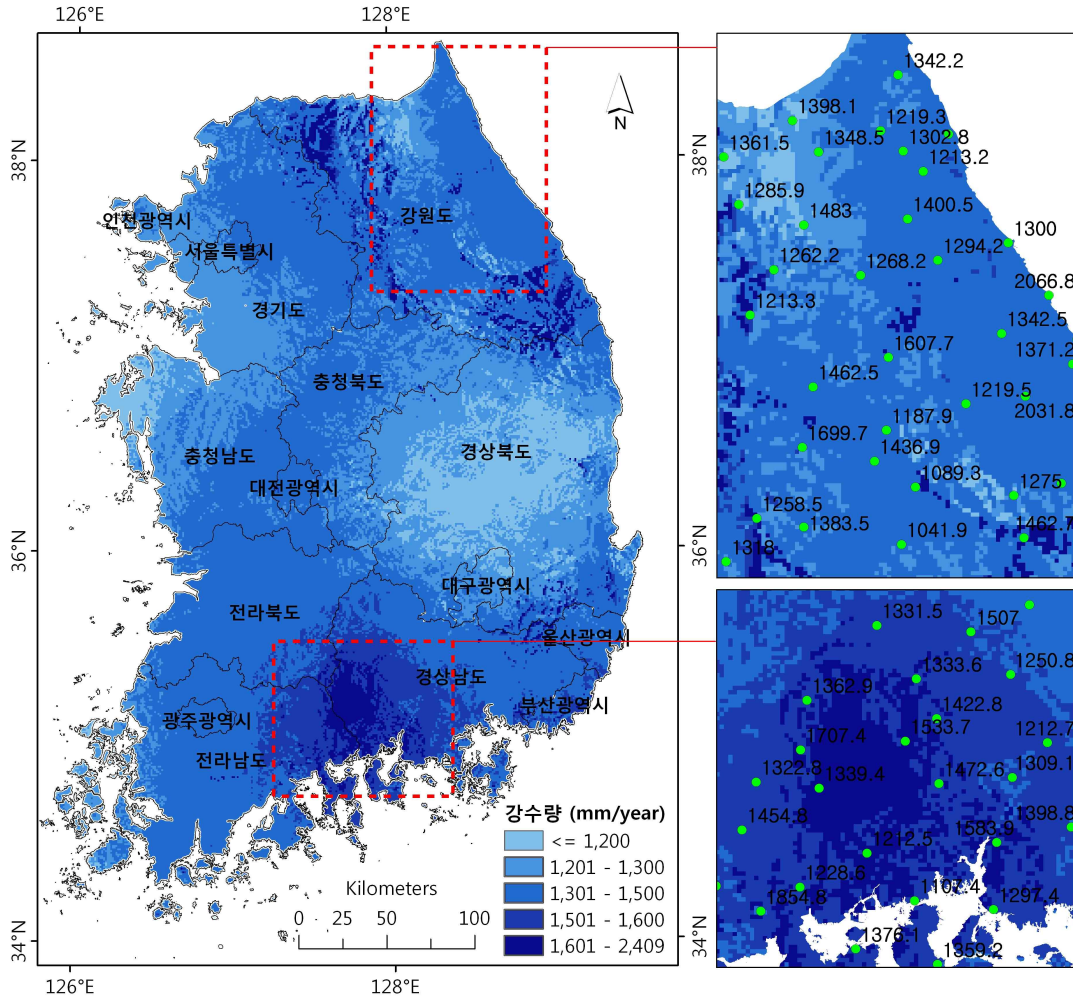


FIGURE 3. 2000-2005년 연평균 강수량 분포도

0.44로 높지 않았다. 이와 같은 결정계수 값이 나타나게 된 것이 연구지역 전반에 걸친 오차 때문인지 일부 지역의 큰 오차 때문에 발생한 것인지 파악하기 위해 그림 4와 같은 분석을 하였다. 그림 4는 예측오차가 작은 관측소부터 큰 관측소를 4분위수로 나누어 결정계수를 살펴본 것이다.

그림 4와 같이 오차가 작은 상위 25%의 관측지점들(Q1)의 결정계수는 0.96이었다. 오차가 작은 상위 50%까지의 관측지점들(Q1 - Q2)의 결정계수는 0.88이었다. 오차가 작

은 75%까지의 관측지점들(Q1 - Q3)의 결정계수는 0.71이었다. 이는 전체 검증지점의 75%에서 예측된 강수량과 모의된 강수량 사이에 높은 상관관계가 있었음을 의미한다. 그러나 오차가 가장 큰 하위 25%를 포함하면(Q1 - Q4) 결정계수는 0.44로 급격히 떨어진다. 이는 많은 지역에서 강수량 예측결과가 타당하였으나 일부 지역에서 예측을 크게 빗나갔다는 것으로 이해할 수 있다.

예측오차 4분위가 공간적으로 무작위로 분포하는지 아니면 군집을 이루어 분포하는지

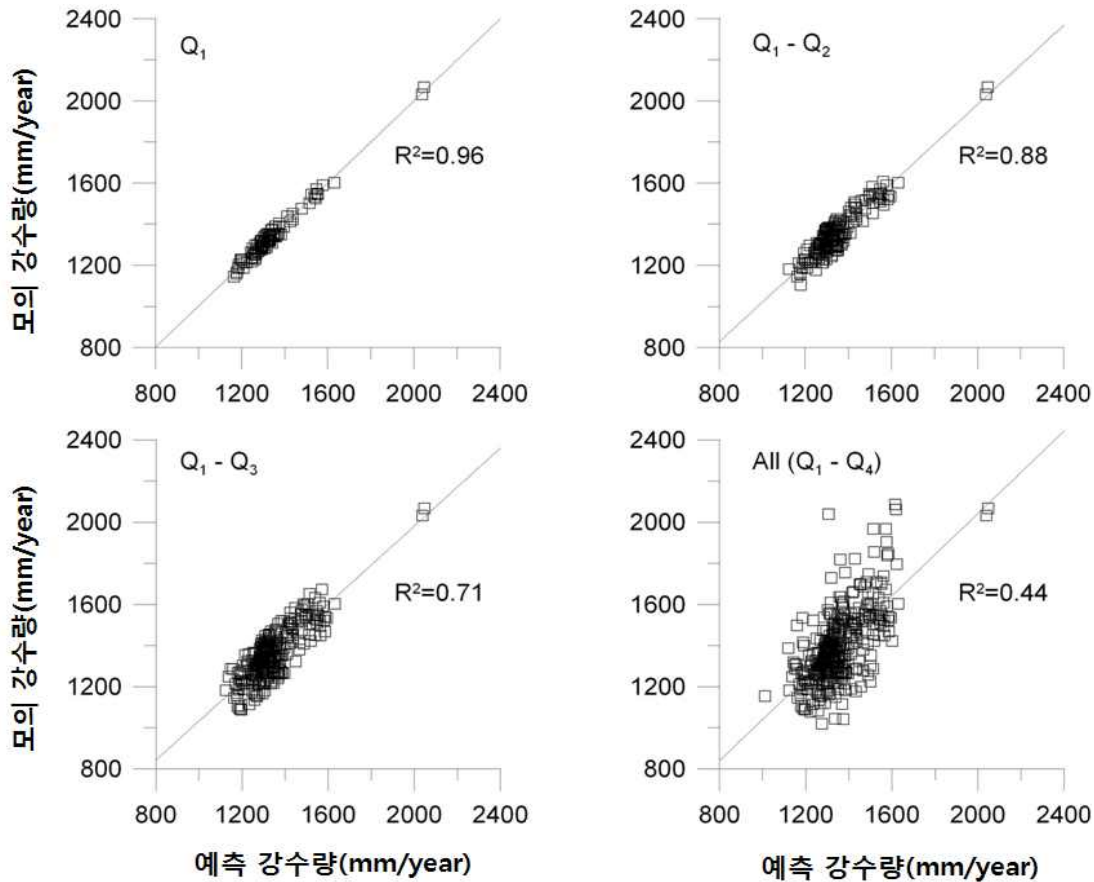


FIGURE 4. 예측오차 기준 4분위수에서의 모의 강수량과 관측 강수량의 결정계수(R^2)
(Q1: 1사분위, Q1 - Q2: 1 - 2사분위, Q1 - Q3: 1 - 3사분위, Q1 - Q4: 전체 자료)

통계적으로 확인하기 위해 Moran's I test (Moran, 1950)를 수행하였다. 이 방법은 속성들이 얼마나 밀집되어 있는가를 확인하는데 사용할 수 있다. 테스트 결과 예측오차 4분위와 1-3분위 사이의 Moran's I index는 0.04로 나타났다. 이것은 예측오차 4분위 지점들이 일부 군집을 이루는 곳이 있을 수 있지만 대부분 무작위로 분포하고 있다는 것을 의미한다. 그림 5는 예측오차의 분포를 나타낸 것이다. 예측오차의 크기를 비교하기 용이하도록 절대오차를 사용하였으며, 앞선 분석과의 일관성을 위해 오차를 4분위수로 구분하여 표현하였다. 그림에서 오차가 가장 큰 하

위 24% 지점들(예측오차 4분위)의 분포가 특정한 지점에 집중되어 있지는 않다는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.

예측오차 4분위가 어떤 지점들에서 발생하였는지 파악하기 위해 강수량과 지형고도 측면에서도 살펴보았다. 그림 6은 예측오차 4분위의 오차량, 관측소의 지형고도 그리고 실측된 강수량을 표현한 것이다. 그 결과 예측오차 4분위가 대부분은 강수량을 과소 추정된 결과에 의해 나타났다는 것을 알 수 있었다. 그림에서 예측오차 4분위의 대부분이 음의 예측오차를 보이고 있다. 아울러 많은 관측소들이 지형고도 300m 이하의 저지대에 분포해

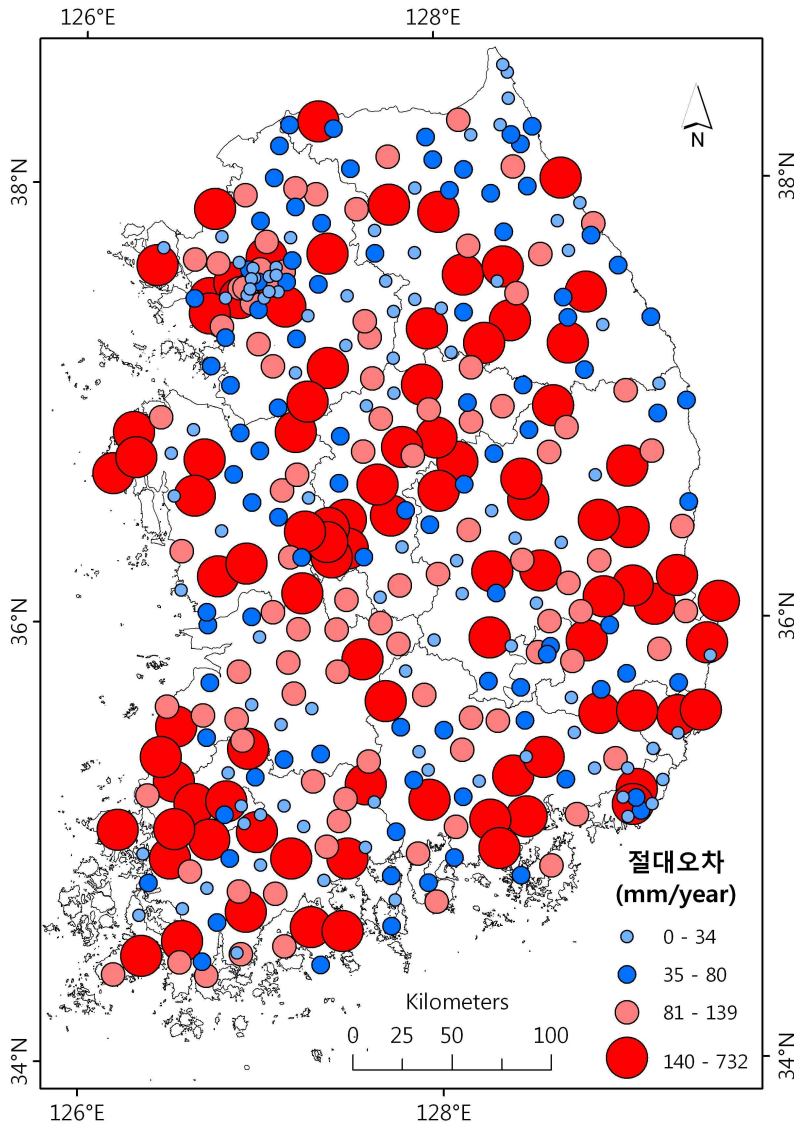


FIGURE 5. 2000–2005년 연평균 절대오차 현황

있음에도 1,500mm/year 이상의 많은 강수량을 나타낸 지점들이다. 이를 요약하면, 이 연구에서 구현한 모델과 매개변수들은 300m 이하의 저지대에 위치한 관측소에서 1,500mm/year의 많은 강수량을 보인 지점에서는 강수량을 이보다 매우 적게 예측하였다. 그리고 이러한 지역에서는 큰 예측오차를 보였다.

2. 매개변수 민감도 분석 결과

본 연구에서 수행한 민감도 분석에서 매개변수 값의 변경 범위는 표 2와 같다. DEM의 공간해상도에 대한 민감도는 매개변수 값을 최적값으로 고정하고, 분석에 사용하는 DEM의 공간해상도를 1–10km로 변경하며 실험하였다.

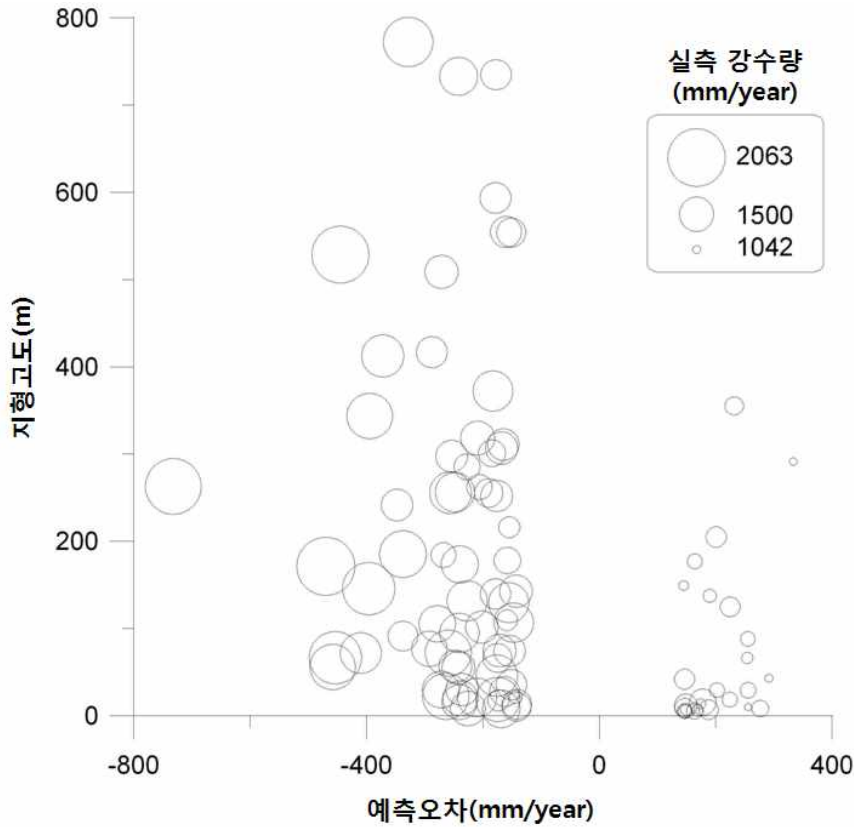


FIGURE 6. 예측오차 4분위의 오차 분포

그 결과 PRISM 결과는 최소 관측소 개수 (MINSTA) 또는 DB1 보다 관측소 탐색 최대반경 (MAXRAD) 과 최소반경 (MINRAD) 에 더욱 민감하였다. 그 중에서도 MINRAD 변화에 의한 민감도가 가장 컸다. 표 3은 민감도 분석 결과이다. MAXRAD와 MINRAD를 최적값에서 ±20%를 변경했을 때 결정계수의 변동평균은 0.03이었다. MAXRAD와 MINRAD

의 변경 시 RMSE의 변동평균은 각각 1.90와 2.35mm/year이었다.

DEM의 공간해상도를 변경했을 때 PRISM 결과의 변화는 매개변수 값의 변화 보다 매우 역동적이다. DEM의 공간해상도를 1km에서 저해상도로 변경했을 때 결정계수와 RMSE는 크게 나빠진다(그림 7). 1km 공간해상도의 DEM를 사용했을 때의 결정계수는 0.44이지

TABLE 2. 민감도 분석에서 매개변수 값의 변경 범위와 값

매개변수	매개변수 값의 변경 범위		
	최적값	+20 %	-20 %
MAXRAD (km)	67	80	54
MINRAD (km)	31	37	25
MINSTA (개)	4	5	3
DB1 (km ⁻¹)	0.53	0.64	0.42

TABLE 3. 민감도 분석 결과

매개변수		매개변수 값의 변경 범위			변동 평균
		최적 값	+20 %	-20 %	
결정계수	MAXRAD	0.44	0.40	0.42	0.03
	MINRAD	0.44	0.40	0.42	0.03
	MINSTA	0.44	0.43	0.44	0.01
	DB1	0.44	0.43	0.44	0.01
RMSE (mm/year)	MAXRAD	103.1	105.6	104.4	1.90
	MINRAD	103.1	105.6	105.3	2.35
	MINSTA	103.1	103.4	102.7	0.35
	DB1	103.1	104.2	103.4	0.70

만 6km 공간해상도를 사용했을 때 결정계수는 0.16까지 떨어진다. 아울러 1km 공간해상도의 DEM을 사용했을 때의 RMSE는 103.1mm/year 이었지만, 10km 공간해상도의 DEM을 사용했을 때 128.3mm/year까지 높아진다.

이것은 PRISM 모의 결과가 DEM의 공간 해상도에 의해 크게 좌우된다는 것을 의미한다. 앞서 Willamette River 유역에서 사용하였던 매개변수 값과 이 연구에서 결정된 매개

변수 값이 DEM과 DB1을 제외하고 매우 유사함에도 결정계수에는 큰 차이가 있음을 언급하였다. 민감도 분석 결과에 의하면, 이 차이는 DB1 보다는 DEM 공간해상도의 차이에 의해 발생한 것이다.

토의 및 결론

이 연구에서는 남한의 2000-2005년 연평

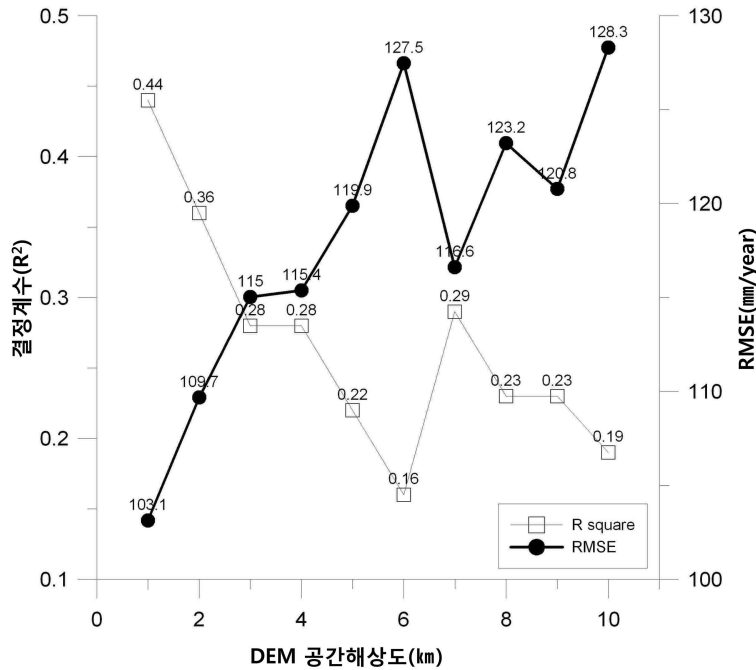


FIGURE 7. DEM 공간해상도 변경에 따른 결정계수와 RMSE의 변화

균 강수량 분포도를 PRISM을 이용하여 작성할 때 필요한 매개변수 최적값을 SCE-UA 기법을 이용하여 추정하였다. 그 결과 이 연구에서 최적화된 매개변수 값은 미국의 사례 연구에서 사용된 매개변수에 비해 좋은 결과를 산출하였다. 이것은 PRISM을 적용하고자 하는 지역의 공간적인 강수 분포 경향, 관측 지점의 밀집 정도 등에 따라 적절한 매개변수 값을 사용해야 가장 나은 산출물을 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 아울러 PRISM을 적용할 때 매개변수 최적 값에 대한 추정이 필요하다는 것을 의미한다. 본 연구에서 이용한 SCE-UA 등의 전역 최적화 기법은 매개변수 추정에 도움을 줄 수 있을 것이다.


이 연구에서 추정된 최적 매개변수 값을 국내의 선행 연구인 김맹기 등(2012)이 사용한 매개변수 값과 직접 비교하기는 무리가 있을 수 있다. 그 이유는 앞서 설명한 것과 같이 최적 매개변수가 이 연구에 국한될 가능성이 높기 때문이다. 하지만 생산하고자 하는 자료의 공간해상도, 대상 지역, 사용하는 관측지점이 유사하므로 본 연구의 결과를 그들의 연구 결과와 비교하였다.

이 연구에서 지형고도-강수량 사이의 선형 회귀식을 산정하는 데 필요한 최소 관측소 개수는 4개로 김맹기 등(2012)이 사용한 5개와 차이가 있었다. 그러나 매개변수 민감도 분석 결과 최소 관측소의 최적 개수인 4개로부터 1개의 차이는 모의 결과에 큰 영향을 미치지 않고 있었다. 그리고 이 연구에서 PRISM의 매개변수가 최적화된 상태에서 모의 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 DEM의 공간 해상도이었다. 이 연구에서의 적정 DEM 공간 해상도는 1km 이다. 이 값은 선행연구인 김맹기 등(2012)이 사용한 공간해상도와 같다.

그러나 1km 보다 더욱 높은 공간해상도의 DEM이 강수량 분포도 작성에 더욱 적정할 가능성도 있다. 1km 공간해상도는 이 연구에서 사용한 1-10km 공간해상도 중 가장 정밀한 것이었기 때문이다. 따라서 더 정밀한 공간해상도의 DEM(예를 들어 백m 단위)을 사

용하여 적정 DEM을 찾고자 하는 노력이 필요하다. 이 연구에서 미국 사례의 5' 공간해상도 보다 더 높은 공간해상도인 1km의 DEM이 적정 값으로 도출된 이유는 중 하나는 미국보다 더욱 조밀하게 분포한 기상관측소 때문일 수 있다. 국내의 관측소 밀도는 미국의 약 4.5배¹⁾ 조밀하기 때문에 관측소 간의 지형 고도-강수량 관계를 설정하는 데 미국보다는 정밀한 지형고도 자료가 유용했던 것으로 추정된다. 아울러 남한이 미국의 사례 지역보다 지형이 복잡하다는 측면에서도 고해상도 DEM이 필요함을 시사한다.

한편 이 연구에서 사용한 PRISM은 초창기 개념을 토대로 개발한 것이다. 따라서 이 연구에서는 초기 모델이 제안된 이후 추가된 해안으로부터의 거리(또는 해양도), 관측소 선택에서의 가중치 사용 개념 등이 연구에 반영되어 있지 않다. 이 연구에서 예측오차 4분위(실측된 강수량과 예측된 강수량 사이에 많은 오차가 있었던 지점들)의 오차는 개선된 PRISM을 이용했을 때 개선될 가능성도 있다. 이에 대해서는 추후 보완 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이 연구 결과는 PRISM을 이용한 남한 지방의 장기 강수량 자료 생산에 있어서, 매개변수 값 추정과 DEM의 공간해상도 선정에 기여할 수 있다는 점에서 의의가 있다. 아울러 이 연구에서 PRISM 초기 모델을 이용하였을 때 남한 지방의 강수량 분포에서 오차가 큰 지역을 확인하였다는 점은 추후 모델 개선에 도움을 줄 수 있을 것이다. 

주

- 1) 김맹기 등(2012) 등이 국내에서 생산하는 자료의 1×1km 공간해상도는 미국의 4×4 km 공간해상도 보다 조밀하다. 그들은 국내의 활용 가능한 관측소 수가 미국보다 조밀하기 때문에 이것이 가능할 것으로 기대하였다. 이들이 사용한 강수 관측소 수는 약 537개(김맹기 등, 2012)이다. 미국의

PRISM 연구 그룹이 사용한 관측소 수는 홈페이지에 공개된 자료에 의하면 9,110개이다(<http://www.climate-source.com>). 이를 밀도로 환산하여 비교하면 한국의 기상관측망이 미국보다 약 4.5배 조밀한 분포를 가지고 있다. 따라서 국내에서 미국보다 조밀한 해상도의 분포형 강수량 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

- 2) 필터링된 사면방향은 지형고도 값에 필터를 적용해 지형면을 부드럽게 만들어 사면방향의 분할을 줄인 것이다(Daly *et al.*, 1994). 조밀한 사면방향을 사용하면 특정 범위 내에서 내·외삽 대상지점과 동일 사면에 위치한 기상관측소를 찾기가 어려울 수 있기 때문이다. 필터의 적용 횟수가 많아질수록 지형면은 부드러워지고 사면방향 분할 개수는 감소한다.

참고문헌

- 김규범, 손영철, 김중욱, 이장룡. 2005. ArcView GIS의 Avenue(TM) Language를 활용한 수문지질도 작성 알고리즘 개발 및 적용 사례 연구. 한국지리정보학회지 8(3):107-120.
- 김맹기, 한명수, 장동호, 백승균, 이우섭, 김연희, 김성. 2012. 1km 해상도의 관측 격자자료 생산 기술. 기후연구 7(1):55-68.
- 김호용. 2010a. 공간통계기법을 이용한 도시교통량 예측의 정확성 향상. 한국지리정보학회지 13(4):138-147.
- 김호용. 2010b. 공간통계기법을 이용한 태양광발전시설 입지 정확성 향상 방안. 한국지리정보학회지 13(2):146-156.
- 박노옥, 장동호. 2008. 수치표고모형과 다변량 크리깅을 이용한 기온 및 강수 분포도 작성. 대한지리학회지 43(6):1002-1015.
- 박종철, 김만규. 2009. 공동 크리깅을 이용한 강수 분포도 작성에서 지형 사면방향 변수 사용에 대한 연구: 제주도를 사례지역으로. 한국지형학회지 16(3):59-66.
- 박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호. 2012. 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정-지상부 바이오매스를 대상으로-. 한국지리정보학회지 15(1):16-33.
- 신성철, 김맹기, 서명석, 나득균, 장동호, 김찬수, 이우섭, 김연희. 2008. GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 강수자료 추정. 대기 18(1):71-81.
- 이상훈. 2008. 클러스터링과 지구통계학 기법을 이용한 지하공간정보 모델 생성시스템 개발. 한국지리정보학회지 11(4):64-75.
- 이재봉, 이홍로. 2005. 객체지향 데이터 모델에 기반한 해양환경 분석에 따른 여장 등급 분류. 한국지리정보학회지 8(1):40-48.
- 이형석. 2010. 공간보간법의 매개변수 설정에 따른 평균제곱근 비교 및 평가. 한국지리정보학회지 13(3):29-41.
- 조홍래, 정종철. 2006. 강우자료에 대한 공간보간 기법의 적용. 한국GIS학회 14(1):29-41.
- Beven, K.J. and A.M. Binley. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes 6(3):279-298.
- Briggs, P. and J. Cogley. 1996. Topographic bias in mesoscale precipitation networks. Journal of Climatology 9:205-218.
- Chang, H. and I-W. Jung. 2010. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon. Journal of Hydrology 388(3-4):186-207.
- Daly, C., G.H. Taylor, W.P. Gibson, T.W. Parzybok, G.L. Johnson and P. Pasteris.

2001. High-quality spatial climate data sets for the United States and beyond. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43:1957-1962.
- Daly, C. and G.L. Johnson. 1998. PRISM spatial climate layers: Climate mapping with PRISM. pp.1-49.
- Daly, C., J. Smith and R. McKane. 2007. High-resolution spatial modeling of daily weather elements for a catchment in the Oregon Cascade Mountains, USA. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 46:1565-1586.
- Daly, C., R.P. Neilson and D.L. Phillips. 1994. A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology* 33(2):140-158.
- Daly, C., T.G.F. Kittel, A. McNab, W.P. Gibson, J.A. Royle, D. Nychka, T. Parzybok, N. Rosenbloom and G. Taylor. 2000. Development of a 103-year high-resolution climate data set for the conterminous United States. *Proceedings of the 12th AMS Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society: Asheville, NC, May 8-11, pp.249-252.
- Duan, Q., S. Sorooshian and V.K. Gupta. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research* 28(4):1015-1031.
- Duan, Q., S. Sorooshian and V.K. Gupta. 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology* 158:265-284.
- Gan, T.Y. and G.F. Biftu. 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resource Research* 32(12):3513-3524.
- Goovaerts, P. 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology* 228:113-129.
- Hevesi, J., J. Istok and A. Flint. 1992. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis. *Journal of Applied Meteorology* 31:661-676.
- Holland, J.H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor. pp.1-183.
- Hooke, R. and T.A. Jeeves. 1961. Direct search solutions of numerical and statistical problems. *Journal of Association for Computing Machinery* 8(2):212-229.
- Johnson, G.L., C. Daly, G.H. Taylor, C.L. Hanson and Y.Y. Lu, 1997. GEM model temperature and precipitation parameter variability, and distribution using PRISM. *Proceeding of the 10th AMS Conference*. pp.210-214.
- Kittel, T.G.F., J.A. Royle, C. Daly, N.A. Rosenbloom, W.P. Gibson, H.H. Fisher, D.S. Schimel, L.M. Berliner and VEMAP2 Participants. 1997. A gridded historical (1895-1993) bioclimate dataset for the conterminous United States. *Proceeding of the 10th AMS Conference*. pp.219-222.
- Krige, D.G. 1951. A statistical approach to some mine valuations and allied

- problems at the Witwatersrand, Master Thesis, Univ. of Witwatersrand. 272pp.
- Lee, E.K. 2003. A Space Model to Annual Rainfall in South Korea. *The Korean Communications in statistics* 10(2):445-456.
- Lettenmaier, D., D. Major, L. Poff and S. Running. 2008. Water Resources. In: M. Walsh et al. *The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity in the United States*. U.S. Climate Change Science Program and the subcommittee on Global Change Research, Washington, DC. pp.362.
- Moran, P.A.P. 1950. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika* 37(1):17-23.
- Nelder, J.A. and R. Mead. 1965. A Simplex method for function minimization. *Computer Journal* 7:308-313.
- Pronzato, U., E. Walter, A. Venot and J.F. Lebruchec. 1984. A general purpose global optimizer: implementation and applications. *Mathematics and Computers in Simulation* 26:412-422.
- Shepard, D. 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*. New York, NY, USA. pp.517-524.
- Simpson, J.J., G.L. Hufford, C. Daly, J.S. Berg and M.D. Fleming. 2005. Comparing maps of mean monthly surface temperature and precipitation for Alaska and adjacent areas of Canada produced by two different methods. *Arctic* 58(2):137-161.
- Thiessen, A.H. 1911. Precipitation averages for large area. *Monthly Weather Review* 39:1082-1084.
- Vrugt, J.A., C.J.F. ter Braak, M.P. Clark, J.M. Hyman and B.A. Robinson. 2008. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: doing hydrology backward with markov chain monte carlo simulation. *Water Resource Research* 44:W00B09:1-15.
- Yates, S.R. and A.W. Warrick. 1987. Estimating soil water content using cokriging. *Soil Soil Science Society of America Journal* 51:23-30. **KAGIS**