풍속 내삽에 활용하기 위한 MK-PRISM의 개선

박종철¹ · 임윤진² · 장동호³

¹공주대학교 지리정보과학연구소 · ²국립기상연구소 응용기상연구과 · ³공주대학교 지리학과
(2014년 9월 2일 접수, 2014년 9월 15일 수정, 2014년 9월 19일 게재 확정)

Improvement of a Modified Korean Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model for Wind Speed Interpolation

Jongchul Park¹ · Yoon-Jin Lim² · Dong-Ho Jang³

¹Institute of Geographic Information Science, Kongju National University
²Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research
³Department of Geography, Kongju National University
(Received 2 September 2014, Revised 15 September 2014, Accepted 19 September 2014)

Abstract : This study investigates the theoretical background of the interpolation methods that regards the topographical effect on the climate data, such as Co-kriging, Artificial Neural Network and MK-PRISM(Modified Korean Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model). Prior to applying the MK-PRISM to the interpolation of wind speed, this study has improved the model to be closer to the fundamental concept of the PRISM and verified its validity. Since each method has individual advantages and disadvantages, there will be a need for comparative studies in order to select an interpolation method that is suitable for the topography of Korea. This study has added a weighted value that considers the existence of clusters at the known point, and has supplemented the digital elevation models and aspects distribution of multiple scales for application. In addition, this study has allowed the consideration of sharp changes between the known point and unknown point when calculating the topographic facet weighting. The supplement model was verified through the interpolation of rainfall in Jeju Island. The coefficient of determination and KGE(Kling and Gupta Efficiency) of the model displayed the results of 0.86 and 0.87, respectively for August 2010 monthly precipitation in Jeju Island, and the model was accordingly verified. This study is able to provide the necessary information to the researchers who wish to interpolate the observation data of wind speed. Furthermore, the supplement MK-PRISM becomes available to the research on the interpolation of wind speed.

Key Words : wind speed, interpolation, MK-PRISM, Co-kriging, Artificial Neural Network

주요어 : 풍속, 내삽, MK-PRISM, 공동크리깅, 인공신경망

1. 서론

기상자료의 공간적인 분포는 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 정규격자 형태와 같은 분포형 기상자료는 생태환경모델링, 수문모델링, 기후변화 영향 평가 등 다양한 연구에서 기후와 연관된 지역적 현상을 이해하기 위해 사용되어 왔다(Park and Kim, 2013). 예를 들어 Jeong and Joh (2013)는 기상환경이 농업환경에 미치는 영향을 연구하기 위해 활용하였으며, Jang and Lee (2013)는 임상 변화와 기후변화에 따른 취약성을 평가하기 위하여 활용하였다. Lee *et al.* (2014)은 도시화의 영향을 평가하기 위해 활용하였으며, Park *et al.* (2014)은 가뭄평가를 위해 활용한 바 있다.

정규격자의 분포형 기상자료는 역학적 내삽과 통계적 내삽 방법으로 생산될 수 있다. 역학적 내삽은 통계적 내삽 방법에 비해 물리적으로 의미 있는 기상자료를 생산할 수 있다는 것이 장점이다. 하지만 높은 컴퓨팅 파워와 많은 계산 시간을 필요로 한다는 점에서 활용에 어려움이 있다. 이에 비해 통계적 내삽은 역학적 내삽에 비해 물리적 의미는 다소 결여될 수 있지만 데스크탑 수준의 컴퓨터에서 실험이 가능하고 계산 시간이 짧은 장점이 있다. 최근에는 기상관측 지점이 풍부해짐에 따라 통계적 내삽 결과의 정확도 역시 향상되면서 정규격자 기상자료의 생산에서 통계적 내삽을 활용하는 다양한 연구들이 있었다.

국내에서 자동기상관측망은 기상청에서 운영하는 지점만을 보았을 때 1997년 이전에 100개 미만이었다. 그러나 1997년부터 그 수가 400개 이상으로 증가하였고, 최근에는 600여 개에 달하고 있다. 이에 따라 국내에서도 통계적 내삽 방법을 활용한 정규격자의 기상자료 생산 연구가 활발히 진행되어 왔다.

과거에는 통계적 내삽 방법으로 Shepard(1968)

의 역거리가중치(Inverse Distance Weighting), Krige(1951)의 크리깅(Kriging), Lyche and Schumaker(1972)의 Spline 등이 활용되어 왔다. 하지만 이 방법들은 지형에 따라 다르게 분포하는 기상 현상, 예를 들어 지형성 강수와 기온감률에 따른 기온의 변화 등을 재현하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 최근에는 지형의 영향을 반영할 수 있는 내삽 방법이 주로 활용되고 있으며 그 대표적인 방법으로는 공동크리깅(Co-kriging: Mayers, 1982), PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model: Daly *et al.*, 1994), 인공신경망(Artificial Neural Network or ANN: Minsky and Papert, 1969) 등이 있다.

이 중에서 PRISM은 다른 내삽 방법에 비해 강우의 우산효과(rain shadow effect)와 지형성 강수(orographic precipitation) 등을 더욱 잘 재현하는 방법이다(Simpson *et al.*, 2005). 국내에서는 Park and Kim(2013)에 의해 PRISM이 지형성 강수의 재현에 매우 유용하다는 것이 확인된 바 있으며, Kim *et al.* (2012)에 의해 한국의 강수량과 기온 환경에 적합하도록 개발된 MK(Modified Korean)-PRISM이 개발되어 국립기상연구소의 격자형 기상자료 생산 방법 중 하나로 활용되고 있다.

하지만 기존에 정규격자 기상자료의 생산 연구는 그 대상이 주로 기온과 강수량이었으며(Shin *et al.*, 2008; Park and Jang, 2008; Baek and Jang, 2011; Park *et al.*, 2012; Park and Kim, 2013), 풍속 연구는 상대적으로 매우 부족하였다. 풍속은 수문, 생태 모델링에서는 증발산량 산정(Hijmans *et al.*, 2005), 고해상도 수치기상예측모델의 검증(Jiménez *et al.*, 2010), 풍력자원의 평가(Philippopoulos and Deligiorgi, 2012) 등에 중요한 자료이다. 이와 같이 다양한 연구에서 중요한 기상자료인 풍속은 강수량과 기온에 비해 공간적인 자기상관성이 떨어져 통계적 내삽이 쉽지 않아 그 연

구사례가 다른 기상자료에 비해 많지 않았다.

그러나 최근 들어 연구에 활용 가능한 관측지점의 수가 증가하면서 국외의 몇몇 연구에서 지형효과를 고려할 수 있는 내삽 방법을 활용하여 풍속 분포도를 작성하였다(Luo *et al.*, 2008; Philipopoulos and Deligiorgi, 2012; Robert *et al.*, 2013). 이 연구들은 지형효과를 고려하는 내삽 방법이 그렇지 않은 내삽 방법에 비해 더욱 타당한 풍속 분포도를 생산할 수 있는 것으로 보고하고 있다. 국내에서도 Jeong *et al.* (2010)과 Lee and Kim (2012) 등에 의해 풍속을 통계적으로 내삽한 연구 사례가 있었지만 지형효과를 고려하지 못하는 크리깅을 사용하였다.

따라서 국내에서도 지형효과를 고려한 풍속 분포도를 생산하기 위한 다양한 연구가 필요하며, 이를 위해서는 지형효과를 고려할 수 있는 내삽 방법에 대한 현황과 특징에 대한 이해가 선행될 필요가 있다. 아울러 MK-PRISM은 한국의 강수와 기온 분포 환경에 맞게 PRISM을 수정하여 구축한 것이므로 MK-PRISM을 풍속 내삽에 적용하기에 앞서 PRISM의 원개념에 더욱 가깝게 모델을 구현할 필요가 있다. 이에 본 연구는 국립기상연구소의 기상자료 생산에 주로 활용되고 있는 MK-PRISM을 중심으로 공동크리깅과 인공신경망의 이론적 배경을 고찰하였다. 또한 본 연구는 MK-PRISM에 PRISM의 몇몇 개념을 추가하여 모델을 개선하고 그 타당성을 검증하였으며 풍속 내삽에의 적용 가능성을 분석하였다.

2. 내삽 방법 현황

1) 공동크리깅(Co-kriging)

공동크리깅은 크리깅의 발전된 형태이기 때문에 공동크리깅을 이해하기 위해서는 크리깅에 대

한 이해가 선행되어야 한다. 크리깅은 여러 가지 유형의 자료를 내삽할 수 있는 지리통계학적(geostatistical approach) 방법이다. 크리깅은 기지점들 사이의 거리에 따른 값의 유사성을 통계적으로 정의하여 반베리오그램을 작성하고 이를 토대로 내삽을 수행한다. 반베리오그램은 문턱값(sill), 상관거리(range), 너깃(nugget)에 따라 다양하게 표현되며(Figure 1), 상관거리 내에서 값의 변화 양상을 선형, 구형, 지수, 가우스, 너깃, 멱급수(power), 로그 등의 모델로 정의할 수 있다.

크리깅에는 단순크리깅(simple kriging), 정규크리깅(ordinary kriging), 일반크리깅(universal kriging), 구역크리깅(block kriging) 등이 있다. 단순크리깅은 예측오차를 최소로 하는 기지점의 가중치를 구하여 미지점의 값을 예측하는 방법이다. 하지만 단순크리깅 추정식은 편향되어 추정식의 평균이 모집단의 평균과 일치하지 않는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해 크리깅 추정식이 편향되지 않으면서 오차분산을 최소로 하는 크리깅을 정규크리깅이라 한다. 정규크리깅은 추정식이 편향되지 않도록 기지점들 가중치의 합이 1이 되도록 가중치를 계산한다. 단순크리깅과 정규크

Figure 1. A concept of semivariogram for Kriging.

리깅은 모두 약 이차 불변성을 만족하는 자료들에 대하여 적용이 가능한 기법이다. 즉 자료들이 분포한 위치에 상관없이 그 평균이 같은 값을 나타낸다. 그러나 실제의 현장자료들은 특정 경향을 나타내거나 평균이 지역에 따라 변하는 경우가 많다. 이때 단순크리깅과 정규크리깅은 값의 공간적 분포특성을 잘 반영하지 못하는 경우가 있다 (Choe, 2007).

일반크리깅은 공간적으로 변화하거나 특정한 방향을 갖는 평균을 제거하지 않고 기지점의 가중치를 계산하는 방법이다. 평균이 점차 감소 또는 증가하는 경향을 포함하기 때문에 예측값은 주위 값보다 클 수도 있고 작을 수도 있다. 그러나 자료의 경향이 주관적 판단에 의해 결정되는 것이 적용상의 어려움이다. 아울러 남한 전체를 내삽하는 경우와 같이 경향성이 지역에 따라 매우 상이한 경우에 특정방향으로의 경향성을 부여하는 것은 좋은 결과를 기대하기 어렵다. 구역크리깅은 내삽 격자에 하부 격자를 구성하고 하부 격자의 가중치를 결정한 후 이를 산술평균하여 가중치를 계산하는 방법으로 내삽 격자의 중심점만을 내삽하는 방법에 비해 정확도를 향상시킬 수 있다.

크리깅은 기지점들의 분포 특성이 내삽하려고 하는 대상의 공간적 분포 특성과 일치할 때 좋은 내삽 결과를 기대할 수 있다. 하지만 그렇지 않을 경우에는 좋은 내삽 결과를 기대하기 어렵다는 것이 크리깅의 잠재적인 약점이다. 예를 들어 풍속은 일반적으로 분지 내에서 보다는 산정상부에서 상대적으로 빠르다. 그러나 풍속의 관측은 대부분 저지대에서 이루어지기 때문에 기지점의 자료가 산정상부에서의 빠른 풍속을 반영하지 못할 때가 있다. 이와 같이 관측 자료가 지형에 따른 풍속의 공간적 분포 특성을 잘 반영하지 못할 때는 크리깅으로 복잡한 지형에서의 풍속 내삽에서 좋은 결과를 기대하기 어렵다.

공동크리깅은 크리깅의 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 방법이다. 크리깅이 오직 하나의 변수 값을 알고 있을 때 위치에 따른 동일 변수의 자기상관을 이용하여 내삽을 수행하는 반면 공동크리깅은 두 개 이상의 변수를 선형조합하여 내삽을 수행한다. 공동크리깅에서 예측하고자 하는 변수를 주변수, 주변수가 아닌 변수를 이차변수라 하며 이차변수는 여러 개가 될 수 있다. 공동크리깅의 일반식은 식 1과 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{m_j} \lambda_{jk} u_j(x_{jk}) \quad (1)$$

여기에서, z 는 주변수, n 은 사용된 주변수의 총 자료수, n_s 는 사용된 이차변수의 총 개수, u_j 는 j 번째 이차변수, m_j 는 j 번째 이차변수의 총 자료수, λ 는 가중치, 그리고 x 는 각 자료의 위치이다. 주변수 값을 예측하기 위하여 총 (n_s+1) 의 변수와 $(n+n_s \times m_j)$ 개의 자료가 사용된다.

공동크리깅은 주변수의 자료가 적고 상호관계가 있는 이차변수의 양은 많을 때 이차변수의 분포 정보를 추가적으로 이용하여 주변수를 예측함으로써 불확실성을 줄일 수 있다. 공동크리깅은 강수량 또는 기온 등의 내삽에 폭 넓게 활용되고 있으며 이 때의 이차변수는 지형고도가 사용되고는 한다(Park and Jang, 2008). 지형고도는 강수량 또는 기온의 공간적 분포와 밀접하게 관련되어 있으며 연속적인 분포 자료를 획득하기도 용이하기 때문이다. 풍속의 공간적 분포 역시 지형고도와 상관관계가 있으므로 지형고도를 이차변수로 한 공동크리깅이 가능하다(Luo *et al.*, 2008).

공동크리깅에서는 주변수와 이차변수들의 반베리오그램을 각각 작성한 후 주변수와 이차변수들 사이의 반베리오그램을 작성함으로써 내삽을 수행한다. 이때 주변수와 이차변수들 사이의 반베리오그램은 양의 정부호를 만족하도록 설계하는

것이 중요하다.

2) 인공신경망(Artificial Neural Network)

인공신경망은 인간의 뇌에서 정보를 처리하는 방식에 착안하여 만들어진 방법이다. 인공신경망에서 자료의 입력과 출력, 출력 값의 추론과정은 생물학적인 뇌의 뉴런(neuron) 사이에서 일어나는 정보 전달 방식과 유사하다.

뉴런은 뇌에서의 기본적인 정보처리 단위이다. 뉴런들 사이에는 시냅스(synaps)라는 작은 틈이 있으며 각 뉴런에서 발생한 신호는 시냅스를 통해 다른 뉴런으로 전달된다(Figure 2). 인공신경망은 뉴런과 시냅스의 몇 가지 특징을 모방하여 설계되었다. 인공신경망의 기초 개념이 된 뉴런과 시냅스의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

뉴런은 임계치(threshold)의 개념을 갖고 있다. 주변의 뉴런으로부터 시냅스를 통해 들어오는 자극의 합이 임계치를 넘어서면 뉴런이 활성화되며, 활성화된 뉴런은 주변의 뉴런에게 자극을 전달한다. 뉴런은 시냅스를 통해 자극을 전달하는데 자극을 전달하기 위한 신경전달물질을 한쪽 방향으로만 전달하는 특징이 있다.

시냅스를 통한 정보전달 방식에서 또 다른 특

징 중 하나는 전달되는 자극이 시냅스의 연결 강도에 의해 달라진다는 것이다. 두 개의 뉴런으로부터 동일한 크기의 자극이 전달되었을 때 한 시냅스는 연결 강도가 강하고 다른 시냅스는 연결 강도가 약하다면 자극을 받는 뉴런에서는 다른 크기의 자극으로 인식한다. 예를 들어 두 뉴런에서 동일하게 2라는 자극을 보냈지만 연결 강도가 강한 쪽의 자극은 2로 인식하고 연결 강도가 약한 쪽의 자극은 1로 인식할 수 있다.

이와 같은 뉴런과 시냅스의 특징들을 모방하여 수학적으로 모델링한 것이 인공신경망이며 Figure 3과 같이 도식화하여 표현할 수 있다. 인공신경망에서는 입력 신호로부터 출력 신호가 나올 때까지 연결 강도가 서로 다른 링크로 연결되어 있다. 이때 연결 강도는 가중치로 표현된다. 인공신경망을 내삽에 응용할 때 입력 신호는 기지점에 대한 정보들이다. Robert *et al.* (2013) 등의 풍속 내삽 연구에서는 관측풍속, 기지점의 위·경도 좌표와 관측고도 등이 입력 신호로 사용되었다. Philippopoulos and Deligiorgi(2012)는 풍속 보다는 풍속 벡터(U-V)를 사용했을 때 더욱 좋은 예측 효과를 기대할 수 있다고 지적하기도 하였다. 인공신경망에서 출력 신호는 미지점의 풍속이다.

Figure 2. Structure of neuron and transmit signals.

Figure 3. An example of a simple feedforward network in interpolation of wind speed.

입력 링크를 통해 들어온 여러 신호를 토대로 뉴런은 새로운 활성화 수준을 계산하고 출력 링크로 출력 신호를 내보낸다. 인공신경망에서 각 뉴런의 활성화 함수는 뉴런으로부터의 입력 신호를 합산하여 뉴런의 활성화, 즉 다른 뉴런으로의 신호 출력 여부를 결정한다. 이때 뉴런은 다른 뉴런으로부터 들어온 신호에 가중치를 곱하고 그 합을 임계치와 비교한 후 가중치의 합이 임계치보다 같거나 크면 다른 뉴런으로 신호를 출력한다. 뉴런의 활성화 함수는 식 2와 같다.

$$X = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (2)$$

$$Y = \begin{cases} +1 & \text{if } X \geq \theta \\ -1 & \text{if } X < \theta \end{cases}$$

여기에서, X 는 뉴런으로 들어온 순가중치의 합이며 n 은 입력 링크의 개수이다. x_i 는 i 번째 입력 링크로부터 들어온 신호이며 w_i 는 i 번째 입력 링크의 신호이다. Y 는 뉴런의 출력 신호이며 θ 는 활성화 임계치이다.

임계치와 가중치의 합을 비교하여 뉴런의 활성화 여부를 결정하는 방식은 Figure 4와 같이 다양하다. 계단(step)과 부호(sign) 함수는 분류와 패턴인식 작업에서 결정을 내리는 뉴런에 주로 사용된다. 시그모이드(sigmoid) 함수는 무한대 사이에 있는 입력값을 0~1 사이에 있는 값으로 변환해 사용하며 주로 역전파 신경망에 사용된다. 선형(linear) 함수는 뉴런의 입력에 가중치가 적용된 것과 동일한 값을 출력한다.

인공신경망은 입/출력 변수 사이의 관계가 선형/비선형의 관계에 상관없이 사용 가능하며 과거 자료를 활용하여 지점 사이의 관계를 학습시킴으로써 결과를 유도할 수 있다는 것이 장점이다. 그러나 인공신경망은 예측 결과만을 제공할 뿐 Hidden layer에서의 가중치 등 결과를 도출하는 과정이 명확하지 않아 결과가 도출된 이유를

Figure 4. Activation functions in artificial neural networks.

설명하지 못하는 한계가 있다. 따라서 결과 값이 결과의 도출과정보다 중요한 경우에 사용할 수 있는 자료 분석 기법이다. 아울러 복잡한 학습과정 때문에 모형 구축에 시간이 소요되고 입력 변수의 수가 증가하면 망을 구성하는데 오랜 시간이 걸리며 예측력은 오히려 감소할 수도 있다는 단점이 있다.

3) MK-PRISM

PRISM은 기후의 분포 패턴과 지형조건 등의 관계를 토대로 특정 지점의 기후 값을 추정하는 방법이다. PRISM은 역거리가중치와 크리깅이 지형성 강수의 재현에 어려움이 있고, 공동크리깅에서 조차 강우의 우산효과 등을 재현하지 못한다는 점에 착안하여 개발된 방법론이다(Daly *et al.*, 1994). PRISM은 지형고도와 강수량이 선형관계에 있다는 가정 하에서 특정 지점의 강수량을 결정한다. 이 방법은 특정 격자의 값을 결정할 때 주변 관측소와의 거리, 지형고도, 해양도, 사면방향 등의 유사성을 토대로 기 관측지점의 값에 가중치를 부여하고 이를 토대로 강수량과 지형고도와의 1차 선형회귀직선을 작성하여 내삽을 수행한다. 따라서 A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate 라고도 한다(Daly *et al.*, 2002). 그러나 다양한 GIS 공간자료를 구축하고 분석해야 하며 모델을 직접 구현해야 하기 때문에 접근성이 떨어져 연구 활용에 어려움이 있다.

PRISM은 지형고도와 강수량의 1차 선형회귀식을 작성한 후, 이 식에 미지점의 지형고도를 대입하여 강수량을 예측한다. 따라서 관측지점 보다 높은 지역의 강수량을 추정하는 외삽에 장점이 있으며, 지리적인 유사성이 떨어지는 기지점이 내삽에 활용되는 것을 제한하여 강우의 우산효과를 재현할 수 있다(Daly and Johnson, 1998). PRISM의 일반식은 식 3과 같다(Daly *et al.*, 2008).

$$W = W_c [F_d W_d^2 + F_z W_z^2]^{1/2} W_p W_f W_l W_t W_e \quad (3)$$

여기에서, W 는 기지점의 가중치이며 W_c 는 기지점의 클러스터 여부에 따른 가중치이다. F_d 는 거리의 중요도이며 W_d 는 거리 가중치이다. F_z 는 지형고도의 중요도이며 W_z 는 지형고도의 가중치이다. W_p 는 해양도 가중치이며, W_f 는 사면방향에 따른 가중치, W_l 는 수직적인 층의 구분에 따른 가중치이다. W_t 는 산정부, 사면, 계곡과 같은 지형 유형에 따른 가중치이며, W_e 는 가중치 산정에서 지형효과의 고려 여부에 대한 가중치이다.

Kim *et al.* (2012)은 한국의 강수량과 기온 환경에 적합하게 식 3을 식 4와 같이 단순화하고 매개변수 값을 도출하여 MK-PRISM을 구현하였다. PRISM과 MK-PRISM의 구체적인 설명은 각각 Daly *et al.* (2008)과 Kim *et al.* (2012)에서 확인할 수 있다.

$$W = [F_d W_d^2 + F_z W_z^2]^{1/2} W_p W_f \quad (4)$$

본 연구에서는 PRISM(Daly *et al.*, 2008)의 개념을 MK-PRISM에 추가로 반영하여 3가지 측면에서 개선하였다. 첫 번째는 기지점의 클러스터 여부에 따른 가중치(W)를 추가하였다. 서로 인접한 기지점을 내삽에 이용하는 경우에 밀집한 기지점들이 특정한 방향에서 미지점에 과도하게 영향을 미치는 것을 제한하기 위한 것이다.

두 번째는 다중 스케일의 지형고도와 사면방향 분포도를 사용하여 각 내삽지점에서 다양한 스케일의 지형고도와 사면방향 분포도 조합을 실험하고 최적의 조합을 찾을 수 있도록 하였다. Daly *et al.* (1994)에 의하면 지형고도와 강수량의 선형관계를 찾고자 할 때 지형고도의 공간해상도에 따라 다른 결과를 얻을 수 있다는 것을 지적하였다. Figure 5를 살펴보면 기상관측 지점의 지형고도와

Figure 5. Relationships between measured annual precipitation and two elevation parameters (actual station elevation and the 5-min DEM elevation) at the station location in the Columbia River gorge. Triangles denote actual station elevation points and rectangles denote DEM elevation points. The relationship using the DEM elevation is much more useful because its 5-min resolution better approximates the scale of orographic processes illustrated in the data. All stations shown are located west of the Cascade Range crest (Daly *et al.*, 1994).

강수량을 비교했을 때의 결정계수는 0.03를 보였다. 반면 약 17 km 공간해상도의 지형고도를 사용했을 때는 결정계수가 0.82를 보였다. 따라서 강수량의 사례에서와 마찬가지로 풍속과 지형고도의 선형관계 역시 분석에 사용하는 지형고도의 공간해상도에 따라 다르게 나타날 수 있다. 현재 MK-PRISM은 1 km 공간해상도의 지형고도 자료만을 사용하고 있다. 이에 MK-PRISM에서 다양한 스케일의 지형고도를 사용하여 실험할 수 있도록 개선하였다.

사면방향 분포도 역시 다양한 스케일의 지형고도를 사용할 수 있도록 개선하였다. MK-PRISM은 1 km 공간해상도의 사면방향 분포도를 사용하고 있다. 이에 필터링 기법을 사용하여 생산한 광역적인 사면방향 분포도를 작성하여 모델 내에서 사용할 수 있도록 하였다.

마지막으로 사면방향에 따른 가중치(W_p)를 계산할 때 미지점과 기지점 사이에 반대 사면이 존재할 경우와 그렇지 않은 경우에 다른 가중치를 부여할 수 있도록 하였다. 미지점과 기지점이 동

일 사면일지라도 그 사이에 서로 반대 사면이 있으면 동일 사면으로 보기 어렵기 때문이다.

3. MK-PRISM의 개선

1) 클러스터 가중치의 반영

기지점의 클러스터는 수평적, 수직적 클러스터 여부를 모두 고려하여 평가한다. Figure 6은 기지점이 클러스터 되어 있는 사례를 개념적으로 보여준다. 각 기지점은 수평적, 수직적으로 일정한 거리 내에 다른 기지점이 있는 경우에 클러스터 되어 있는 것으로 간주되며 수평적, 수직적 클러스터를 모두 만족했을 때 클러스터된 것으로 간주된다. 클러스터 된 기지점은 그렇지 않은 기지점에 비해 낮은 가중치가 부여된다.

Daly *et al.* (2008)의 경우 수평적 클러스터의 임계값을 6~10 km를 사용하였다. 그들은 PRISM을 사용한 10여 년의 모델링 경험에서 기지점의 영향반경 대비 20% 미만에서 클러스터의 임계값

Figure 6. The concept of horizontal and vertical clustering.

을 결정하는 것이 합리적이라는 것을 발견하였고 일반적으로 30~50 km의 영향반경을 사용하는 것에 비추어 클러스터의 임계값을 결정하였다. 수직적 클러스터의 임계값은 강수량과 기온 모두에서 50 m를 사용하였다. 이것은 고도가 50 m 이내에 있는 것은 동일한 고도에 위치해 있다고 가정하는 것과 같다.

2) 다중 스케일의 지형고도와 사면방향 분포도

본 연구에서는 5개 스케일의 지형고도모형(Digital Elevation Model, DEM)과 6개 스케일의 사면방향 분포도를 구축하였다. DEM은 1 km 공간해상도의 자료와 이 자료를 Focal Statistics 한 4개의 DEM으로 구성하였다. Focal Statistics는 일정한 크기의 창을 이동시키며 창 내에 있는 격자의 통계 값을 중심 격자에 새롭게 부여하는 기법으로 격자 형태의 GIS 공간자료에서 엣지 또는 튀는 값을 제거하는 필터링 기법 중 하나이다.

필터링하여 생산된 DEM의 공간해상도는 원본 자료와 동일한 1 km이지만 각 격자의 지형고도 값은 주변 값과의 통계에 의해 결정된 것이다. 이 연구에서는 총 4개의 이동 창(반경 1 km, 2 km,

3 km, 4 km)을 사용하였으며, 통계 필터는 평균 필터(mean filter)를 사용하였다. 따라서 본 연구에서는 1 km 공간해상도를 갖는 원본 DEM과 각 반경 내의 지형고도를 평균한 DEM 등 총 5개의 DEM을 구축하였다.

사면방향 분포도는 총 6개 스케일의 자료를 구축하였으며, 이 자료에는 동, 서, 남, 북, 평지의 사면방향 정보가 포함되어 있다. 모든 사면방향 분포도의 공간해상도는 1 km로 동일하지만 Daly *et al.*(1994)이 제안한 필터링 기법의 적용 여부에 따라 국지적인 사면방향 분포도에서부터 광역적인 사면방향 분포도로 구분된다.

Daly *et al.*(1994)은 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, 고도차가 15 m 이하일 때는 평탄면으로 간주하였다. 그리고 식 5의 필터를 수회 적용하여 필터링 된 사면방향 분포도를 작성하였다(Park *et al.*, 2012 재인용).

$$E_{ij}=0.5E_{ij}+0.125(E_{i+1j}+E_{i-1j}+E_{ij+1}+E_{ij-1}) \quad (5)$$

Figure 7은 본 연구에서 생산한 사면방향 분포도의 제주도 사례를 보여주고 있다. Figure 7의 (a)는 필터링을 하지 않았을 때의 사면방향 분포도로 국지적인 사면방향 분포를 보여주고 있다. 이에 비해 (b)는 필터를 40회 반복적으로 적용하여 생산한 사면방향 분포도로 광역적인 사면방향 분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 필터링은 0회, 8회, 16회, 24회, 32회, 40회를 적용하였으며, 이는 Daly *et al.*(1994)이 경험적으로 산정한 횟수이다. 남한 지역에 대한 필터링 적용 결과 40회의

필터링을 적용하면 태백산맥 동안, 한라산을 중심으로 한 사면방향 등 광역적인 사면방향이 적절하게 분류된 것으로 판단되었다. 이에 본 연구에서는 Daly *et al.* (1994)의 연구와 동일하게 필터링 횟수를 적용하여 자료를 생산하였다.

Figure 8은 기존 MK-PRISM에서의 내삽 과정의 개념과 다중 스케일의 자료를 사용한 이후에

내삽 과정의 개념을 비교하여 보여주고 있다. 기존 MK-PRISM에서는 내삽을 수행하기에 앞서 1 km 해상도의 DEM과 1 km 해상도의 사면방향 분포도를 불러오지만 개선된 MK-PRISM에서는 5개 다중 스케일의 DEM과 6개 다중 스케일의 사면방향 분포도를 불러온다. 다중 스케일의 자료들은 매개변수별 가중치를 계산할 때 사용된다.

Figure 7. Jeju Island two different aspect grids produced by zero filtering pass (a) and 40 passes (b).

Figure 8. Comparison of overall structures of the MK-PRISM. The (a) represents a structure using single-scale DEM and aspect. The (b) represents a structure using multiple-scale DEM and aspect.

이때 두 자료의 조합에 의해 30개의 가중치가 작성되며, 개선된 MK-PRISM에서는 이 중 풍속과 지형고도와의 상관관계가 가장 강하게 나타나는 자료 조합을 사용하여 내삽을 수행한다.

3) 사면방향 가중치 산정방법의 개선

PRISM과 MK-PRISM의 사면방향 가중치(W_f) 계산 시에는 내삽 대상 지점의 사면방향과 동일한 사면방향에 위치한 기지점에 높은 가중치를 부여한다. 이때 PRISM은 미지점과 기지점을 직선으로 연결했을 때 그 사이에 미지점의 사면방향과 반대의 사면방향이 많을수록 낮은 가중치를 부여한다(Daly *et al.*, 2002).

Figure 9는 이와 같은 가중치 부여 방법을 개념적으로 보여주고 있다. Figure 9의 (a)에서는 미지점과 기지점이 동일한 사면방향에 위치해 있지만 그 사이에 3개의 반대사면이 있다. 이에 비해 Figure 9의 (b)에서는 미지점과 기지점 사이에 1개의 반대사면이 있다. 따라서 두 그림에서 기지점은 모두 미지점과 동일한 사면방향에 위치하지만 (a)에 비해 (b)의 미지점이 기지점과 더욱 유사한 사면으로 볼 수 있다. 이에 따라 (b)의 가중치가

(a)에 비해 높게 부여되어야 한다. 하지만 기존의 MK-PRISM에서는 이와 같은 개념을 반영하지 않고 있었다. 따라서 본 연구에서는 MK-PRISM의 W_f 가중치를 계산할 때 이 개념을 반영할 수 있도록 개선하였다.

4) 개선 결과의 타당성 검증

본 연구에서는 개선된 MK-PRISM을 향후 풍속 내삽에 적용하기에 앞서 기존 연구들에서 높은 모의 효율을 보였던 강수량에 적용해 봄으로써 모델의 타당성을 검증하였다. 사례지역으로는 제주도를 선택하였으며 검증 자료는 2010년 8월 강수량 자료를 사용하였다.

Table 1은 모델의 주요 매개변수와 본 연구에서 사용한 매개변수 값이다. 매개변수 값은 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona: Duan *et al.*, 1992) 매개변수 최적화 기법을 사용하여 추정하였다.

모델의 검증에는 jackknife 교차검증을 사용하였으며 모의 효율은 결정계수와 KGE(Kling and Gupta Efficiency)를 사용하였다. Figure 10은 본 연구에서 개선된 MK-PRISM으로 예측한 강수량

Figure 9. A topographic facet weighting difference account of sharp changes.

Table 1. PRISM parameter value for Jeju Island monthly precipitation.

Parameter (unit)		Value
Horizontal radius for search station (km)		36
Cluster	Horizontal minimum radius (km)	10
	Vertical minimum radius (m)	50
Distance	Power (-)	1, 1
Coastal proximity	Minimum weighting (-)	0.3
Topographic facet	Power (-)	0.4
	Minimum weighting (-)	0.3
Distance weighting importance scalar		0.5
Elevation weighting importance scalar		0.5

과 실측 강수량의 관계를 보여주고 있다. 예측 강수량이 실측 강수량과의 1:1 라인에 인접하여 분포하고 있음을 알 수 있었다. KGE는 0.87이고 결정계수(R^2)는 0.86으로 나타나 전반적으로 강수량 예측 결과가 실측 자료와 매우 유사하였음을 알 수 있었다.

Figure 11은 개선된 MK-PRISM을 활용하여 제작한 제주도의 강수량 분포도이다. 이 그림에서 강수량 분포는 부드럽게 잘 표현되었으며 지형에

의한 강수량 증가도 잘 묘사하고 있다. 제주도에서 가장 많은 강수량이 관측된 곳은 914.5 mm/month가 관측된 어리목 관측지점이었다. 이에 비해 개선된 MK-PRISM은 지형효과를 반영하여 한라산 정상부에서 1,405 mm/month의 강수가 분포하고 있는 것으로 예측하고 있었다. 이와 같은 결과는 개선된 MK-PRISM이 단순히 교차검증 결과의 모의효율만 높게 나타나는 것이 강수량 분포도 역시 매우 타당하게 생산할 수 있음을 보여주었다. 이는 MK-PRISM의 보완이 타당하게 수행되었음을 보여주는 결과이다.

5) 풍속 내삽에의 적용 결과

본 연구는 개선된 MK-PRISM이 강수량의 내삽에 활용 가능하다는 것을 확인하였으므로 MK-PRISM과 개선된 모델을 제주도의 풍속 내삽을 시도하고 그 적용 가능성을 살펴보았다. 실험자료는 19개 지점에서 관측된 2010년 제주도의 연평균 풍속이며 모의 효율은 jackknife 교차검증으로 작성하였다.

Figure 12는 두 모델을 제주도의 풍속에 적용했을 때의 모의 효율을 보여주고 있다. 그림의 (a)는 초기 MK-PRISM을 사용했을 때의 결과이며 (b)

Figure 10. A comparison of model estimated and measured precipitation.

Figure 11. August 2010 precipitation for Jeju Island estimated by the improved MK-PRISM.

Figure 12. A comparison of the model efficiency between the MK-PRISM and the improved MK-PRISM.

는 MK-PRISM의 결과이다. 두 결과에서 예측 값이 모두 관측 값과의 1:1 라인 주변에 대부분 분포해 있지만 몇몇 지점의 값은 관측 값과 많은 차이를 보였다. MK-PRISM은 Figure 12에서 붉은 상자 밖에 위치해 있는 지점들의 풍속을 예측하지 못하는 특성을 보이고 있었으며, 이 지점들은 상

대적으로 높은 풍속을 보이고 있었다.

이 지점들은 우도, 가파도, 마라도 그리고 고산이었다. 앞의 3 지점은 제주도 인근의 도서 지역으로 높은 풍속을 보이는 지역이었다. 이 지점들의 관측 값은 주변의 관측 값, 즉 제주도 본섬의 관측 값과 많은 차이를 보이기 때문에 주변의 관

Figure 13. 2010 annual mean wind speed for Jeju Island estimated by the improved MK-PRISM.

측 값으로 추정이 어려운 것으로 판단된다. 고산의 오차 역시 이와 유사한 측면에서 발생한 것으로 판단된다. 고산 기상관측소는 제주도 서쪽 해안, 해발고도가 70 m 이상인 지점에 위치해 있으며 그 주변에는 매우 평탄한 저지대가 넓게 나타나고 있다. 따라서 고산 기상관측소의 풍속은 해양으로부터의 영향과 산정부의 영향을 복합적으로 받아 매우 높게 나타나고 있는 것이다. 이에 비해 주변 지역의 관측 지점들은 해안 저지대에 위치해 있기 때문에 고산 기상관측소와 같은 높은 풍속이 나타나지 않고 있다. 이와 같은 기상관측 지점의 분포 특성으로 인해 고산의 풍속 역시 앞서 살펴보았던 주변 도서 지점들과 마찬가지로 상대적으로 튀는 값을 보였다.

이들 튀는 값을 제외했을 때의 초기 MK-PRISM과 개선된 MK-PRISM의 KGE를 비교해보면 각각 0.43과 0.57을 보이고 있었다. 아울러 개선된 MK-PRISM에서는 튀는 값들을 제외한 지점의 예측 값들이 관측 값과의 1:1 라인에 유사하게 분포해 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서

MK-PRISM을 개선한 효과가 풍속 내삽에서도 나타난 것으로 판단된다.

Figure 13은 개선된 MK-PRISM을 활용하여 작성한 2010년 제주도의 연평균 풍속 분포도이다. 지형에 따라 다양하게 분포하는 풍속을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 다만 서부 고산지역은 고산 관측지점의 영향으로 높은 풍속이 폭넓게 나타나고 있는 것으로 묘사하고 있다. 앞서 언급하였던 것과 같이 고산 관측지점의 풍속은 지형적 요인으로 인해 발생한 튀는 값으로 여겨진다. 따라서 고산 주변에 넓게 나타난 빠른 풍속은 과장된 것일 수 있다. 향후 풍속의 내삽에서 고산 지점과 같은 관측 자료를 어떻게 처리할 것인지에 대해서는 고민이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 한계에도 불구하고 모의효율과 풍속 분포도에서 보여준 전반적인 결과는 개선된 MK-PRISM을 풍속의 내삽에 활용할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 지형효과를 고려하여 풍속을 내삽할 수 있는 공동크리깅, Artificial Neural Network, MK-PRISM에 대하여 살펴보았다. 지금까지 강수량과 기온의 내삽에서는 지형효과를 고려할 수 있는 내삽법들을 비교한 다수의 연구가 있었다. 하지만 풍속의 내삽에서는 아직까지 이들 방법 간의 비교 연구가 없어 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 국내 풍속 내삽 연구에서는 지형효과를 고려할 수 있는 내삽 방법을 활용한 사례도 찾아보기 힘들기 때문에 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

한편 본 연구에서는 기 개발되어 강수량과 기온의 내삽에 활용되고 있었던 MK-PRISM의 몇몇 개념을 보완하였다. 첫 번째는 기지점의 클러스터 여부를 고려한 가중치를 추가하였으며, 두 번째는 다중 스케일의 지형고도와 사면방향 분포도를 사용할 수 있도록 보완하였다. 마지막으로 사면방향 가중치를 계산할 때 기지점이 미지점과 동일한 사면방향에 위치해 있어도 그 사이에 반대 사면이 많다면 기지점의 가중치를 낮출 수 있도록 보완하였다. 보완된 모델을 제주도의 강수량 내삽에 적용한 결과 결정계수와 KGE가 각각 0.86과 0.87을 보였다. 아울러 제주도의 강수량 분포도를 생산하여 강수량이 분포 특성을 정성적으로 분석한 결과, 개선된 MK-PRISM이 지형고도 증가에 따른 강수 증가를 타당하게 재현하고 있음을 확인하였다. 이를 통해 개선된 모델이 적절하게 구현되었음을 확인할 수 있었다.

아울러 본 연구에서 개선된 MK-PRISM을 제주도의 연평균 풍속의 내삽에 적용해 본 결과는 이 모델을 강수량 및 기온의 내삽 뿐 아니라 풍속의 내삽에도 적용 가능성이 있다는 것을 보여주었다. 다만 국지적인 지형요인으로 인해 주변 관

측 값보다 튀는 값들이 나타나는 것과 이로 인한 문제를 확인하였기 때문에 ‘튀는 값으로 판단되는 관측 자료의 처리, 이들 지점과 주변지점의 내삽을 어떻게 할 것인가’는 앞으로 MK-PRISM을 풍속의 내삽에 적용할 때 고민해 봐야 할 문제인 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 지형효과를 고려하여 풍속을 내삽할 수 있는 방법의 현황을 분석하고 그 장·단점을 기술함으로써 추후 풍속의 관측자료를 통계적으로 내삽하고자 하는 연구자들에게 내삽 방법에 대한 이해를 도울 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 본 연구에서 개선된 MK-PRISM은 향후 풍속의 내삽 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 “응용기상 기술개발연구(II)” 지원으로 수행되었습니다.

References

- Baek, S.-G. and Jang, D.-H., 2011, Evaluation for applicability of cokriging for high resolution spatial mapping of temperature and rainfall, *Journal of Climate Research*, 6(3), 242-253 (in Korean).
- Choe, J. G., 2007, *Geostatistics*, Sigma press, 186-187.
- Daly, C., Gibson, W. P., Taylor, G. H., Johnson, G. L., and Pasteris, P., 2002, A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate, *Climate Research*, 22, 99-113.
- Daly, C., Neilson, R. P., and Phillips, D. L., 1994, A statistical-topographic model for mapping Climatological precipitation over mountainous terrain, *Journal of Applied Meteorology*, 33(2),

- 140-158.
- Daly, C., Halbleib, M., 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*, 28(15), 2031-2064.
- Daly, C. and Johnson, G. L., 1998, *PRISM spatial climate layers: Climate mapping with PRISM*, Oregon State University, 1-49.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. K., 1992, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resource Research*, 28(4), 1015-1031.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., and Jarvis, A., 2005, Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978.
- Jang, D.-H. and Lee, S., 2013, Analysis of forest type changes for vulnerability assessment of climate changes in the mountainous regions of Gangwon-do, Korea, *Journal of Climate Research*, 8(2), 169-183 (in Korean).
- Jeong, J.-H. and Joh, C.-H., 2013, An analysis of the impact of extreme climate events on agriculture in Korea, *Journal of Climate Research*, 8(2), 153-167 (in Korean).
- Jeong, S.-H., Park, M.-S., and Kim, K.-W., 2010, Spatial prediction of wind speed data, *The Korean journal of applied statistics*, 23(2), 345-356 (in Korean).
- Jiménez, P. A., González-rouco, J. F., García-bustamante, E., Navarro, J., Montávez, J. P., Vilá-guerau de Arellano, J., Dudhia, J., and Muñoz-rola, A., 2010, Surface wind regionalization over complex terrain: evaluation and analysis of a high-resolution WRF simulation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 268-287.
- Kim, M.-K., Han, M.-S., Jang, D.-H., Baek, S.-G., Lee, W.-S., Kim, Y.-H., and Kim, S., 2012, Production technique of observation grid data of 1km resolution, *Journal of Climate Research*, 7(1), 55-68 (in Korean).
- Krige, D. G., 1951, A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand, Master's thesis of the University of Witwatersrand. 1-272.
- Lee, K., Baek, H.-J., and Cho, C., 2014, Future projection of changes in cooling and heating degree days in Korea, *Journal of Climate Research*, 9(1), 1-13 (in Korean).
- Lee, S.-W. and Kim, M.-K., 2012, Study on height of stony walls in coastal villages of Jeju Island, *Journal of the Korea Geographical Society*, 47(3), 390-406 (in Korean).
- Luo, W., Taylor, M. C., and Parker, S. R., 2008, A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales, *Climatology*, 28, 947-959.
- Lyche, T. and Schumaker, L.L., 1972, On the convergence of cubic interpolating splines, *University of Texas at Austin Center for Numerical Analysis*, 61, 1-31.
- Mayers, D. E., 1982, Matrix formulation of co-kriging, *Mathematical Geology*, 14(3), 249-257.
- Minsky, M. and Papert, S. A., 1969, *Perceptrons, an introduction to computational geometry*, MIT press, expanded edition.
- Park, J.-C., Choi, K.-J., and Song, S.-H., 2014, Prediction of regional drought considering aspect and elevation in Jeju Island under future climate Change, *Journal of Environmental Science International*, 23(4), 649-660 (in Korean).
- Park, J.-C., Jung I.-W., Chang, H.-J., and Kim, M.-K., 2012, Optimization of PRISM parameters and

- digital elevation model resolution for estimating the spatial distribution of precipitation in South Korea, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(3), 36-51 (in Korean).
- Park, J.-C. and Kim, M.-K., 2013, Comparison of precipitation distributions in precipitation data sets representing 1km spatial resolution over South Korea produced by PRISM, IDW, and cokriging, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16(3), 147-163 (in Korean).
- Park, N.-W. and Jang, D.-H., 2008, Mapping of temperature and rainfall using DEM and multivariate kriging, *Journal of the Korea Geographical Society*, 43(6), 1002-1015 (in Korean).
- Philippopoulos, K. and Deligiorgi, D., 2012, Application of artificial neural networks for the spatial estimation of wind speed in a coastal region with complex, *Renewable Energy*, 38, 75-82.
- Robert, S., Foresti, L., and Kanevski, M., 2013, Spatial prediction of monthly wind speeds in complex terrain with adaptive general regression neural networks, *Climatology*, 33, 1793-1804.
- Shepard, D., 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, New York, NY, USA, 517-524.
- Shin, S.-C., Kim, M.-K., Suh, M.-S., Rha, D.-G., 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*, 18(1), 71-81 (in Korean).
- Simpson, J. J., Hufford, G. L., Daly, C., Berg, J. S., and Fleming, M. D., 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.

책임 편집: 장동호

영문 교열: 조창현