가변적 지역평균 단순 크리깅을 이용한 남한 지역 고해상도 기온 및 강수 분포도 작성 및 평가

장동호¹ · 위눈솔¹ · 박노옥²

¹공주대학교 지리학과 · ²인하대학교 공간정보공학과
(2015년 6월 16일 접수, 2015년 6월 29일 수정, 2015년 6월 29일 게재 확정)

High-resolution Spatial Mapping and Evaluation of Temperature and Rainfall in South Korea using a Simple Kriging with Local Means

Dong-Ho Jang¹ · Nun-Sol Wi¹ · No-Wook Park²

¹Department of Geography, Kongju National University

²Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

(Received 16 June 2015, Revised 29 June 2015, Accepted 29 June 2015)

Abstract : This paper evaluates the applicability of a simple kriging with local means(SKLM) for high-resolution spatial mapping of monthly mean temperature and rainfall in South Korea by using AWS observations in 2013 and elevation data. For an evaluation purpose, an inverse distance weighting(IDW) which has been widely applied in GIS and cokriging are also applied. From explanatory data analysis prior to spatial interpolation, negative correlations between elevation and temperature and positive correlation between elevation and rainfall were observed. Bias and root mean square errors are computed to compare prediction performance quantitatively. From the quantitative evaluation, SKLM showed the best prediction performance in all months. IDW generated abrupt changes in spatial patterns, whereas cokriging and SKLM reflected not only the topographic effects but also the smoothing effects. In particular, local characteristics were better mapped by SKLM than by cokriging. Despite the potential of SKLM, more extensive comparative studies for data sets observed during the much longer time-period are required, since annual, seasonal, and local variations of temperature and rainfall are very severe in South Korea.

Key Words : temperature, rainfall, spatial interpolation, co-kriging

주요어 : 기온, 강수, 공간 내삽, 공동크리깅

1. 서론

기온, 강수 등 기상관측 자료의 공간적 분포는

기후모델의 검증자료와 수문모델링 및 생태환경모델링 연구의 중요한 정보로 이용되고 있다. 특히, 최근에는 지역별로 상세한 기후변화 영향평가와

적응정책 수립을 위해 고해상도의 격자형 공간기후정보가 이용되고 있다(Lettenmaier *et al.*, 2008).

기상관측 자료를 이용한 고해상도의 격자형 기후자료를 생산하기 위해서는 많은 수의 관측지점이 필요하고, 공간적으로 균질하게 분포하여야 한다. 하지만, 기상청이 운영하고 있는 유·무인 관측지점들의 수는 2015년 현재 767개소로 1km 이하의 고해상도의 격자형 기후자료를 생산하기에는 한계가 있다. 또한 관측지점들은 지리적으로 특정 지역에 집중되어 있거나, 고도 300m 이하의 고도에 대부분 분포하고 있어서 공간적으로 비균질하게 분포하여 국지적인 기후 특성을 정량적으로 분석하기에는 어려움이 많다(Hong *et al.*, 2007).

따라서 국지기후 특성을 분석할 수 있는 고해상도의 격자형 기후자료 산출을 위해서는 보다 조밀한 공간 단위의 기상관측 자료가 필요하다. 또한 격자형 기후자료 생산에 영향을 줄 수 있는 고도자료, 사면 향, 해양으로부터의 거리 등의 부가적인 GIS 공간자료를 활용한 분석 기법 및 공간적으로 비균질하게 분포하는 관측자료를 이용한 통계적 내삽 기법 개발이 필요하다.

격자형 기후자료는 역학적 또는 통계적 내삽 방법으로 생산될 수 있다. 역학적 내삽은 통계적 내삽방법에 비해 물리적으로 정확한 기상자료를 생산할 수 있다는 것이 장점이다. 하지만 높은 컴퓨팅 파워와 많은 계산 시간을 필요로 한다는 점에서 활용에 한계가 있다. 이에 비해 통계적 내삽방법은 역학적 내삽에 비해 물리적 의미는 다소 결여될 수 있지만, 데스크탑 컴퓨터에서도 실험이 가능하고 계산 시간이 짧다는 장점이 있다. 특히 최근에는 기상관측 지점이 증가됨에 따라 격자형 기후자료의 생산에서 통계적 내삽을 활용하는 다양한 연구들이 증가하고 있다(Park *et al.*, 2014).

일반적인 격자형 기후자료 작성을 위해서는 공간적으로 산재되어 있는 샘플 자료를 통계적으로

내삽하는 방식이 많이 이용되어 왔다. 그러나 관측지점이 아닌 다른 격자에서의 값을 추정하는 단계에서 불확실성이 존재하게 된다. 만약 관측자료와 적절한 수준의 상관성을 보이면서, 공간적으로 많은 위치에서 자료 획득이 가능한 부가자료를 내삽 과정에 포함시킨다면, 이러한 불확실성 효과를 줄일 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 GIS 공간자료는 격자형 자료생산에서 유용하게 사용될 수 있을 것이다(Goovaerts, 1997).

기존 연구에 많이 적용되어온 통계적 내삽 방법으로는 거리역비례 가중치(inverse distance weighting; IDW: Shepard, 1968), 크리깅(Kriging: Krige, 1951), Spline(Lyche and Schumaker, 1972) 등이 활용되어 왔다. 하지만 이러한 방법들은 지형에 따라 다르게 분포하는 기상 현상, 예를 들어 지형성 강수와 기온감률에 따른 기온의 변화 등을 격자형 기후자료로 생산하는데 한계가 있었다(Park *et al.*, 2014). 따라서 최근에는 지형의 영향을 반영할 수 있는 부가적인 환경변수를 활용한 내삽방법이 주로 활용되고 있다. 대표적인 방법으로는 공동크리깅(Cokriging; CK: Mayers, 1982), PRISM(Parameter-elevation Regressions an Independent Slopes Model: Daly *et al.*, 1994), 인공신경망(Artificial Neural Network or ANN: Minsky and Papert, 1969) 등이 있다.

이중 인공신경망은 과거 자료를 활용하여 지점사이의 관계를 학습시킴으로써 결과를 유도할 수 있는 장점이 있지만, 일종의 블랙박스 형태의 결과 도출 과정, 입력 변수의 수 증가에 따른 많은 계산량 요구 등의 단점이 존재한다. PRISM은 기후의 분포 패턴과 지형조건 등의 관계를 토대로 특정 지점의 선형회귀식을 산출하여 기후 값을 추정하는 방법으로, 다양한 부가자료에 가중치를 사용하여 지형효과를 반영한 기후자료를 생산할 수 있는 장점이 있다(Daly *et al.*, 2002). 그러나 다양

한 GIS 공간자료를 구축하고 분석해야 하며 모델을 직접 구현하기 때문에 연구 활용에 어려움이 있다. CK는 PRISM과 마찬가지로 부가 자료를 함께 이용할 수 있는 내삽방법으로, 두 개 이상의 변수를 선형조합하는 과정에 공간 자기상관성 정보를 반영하여 내삽을 수행한다.

부가 자료를 이용한 격자형 기후자료 생산 연구는 국내외적으로 다양한 응용분야에서 수행되어왔다. 외국에서는 기상 레이더, 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM), 지향면, 해양도, 습도 및 바람장 등과 같은 여러 기후인자를 공동크리깅이나 PRISM 모델을 적용하여 기온 혹은 강수 분포도 제작 연구를 수행하였다(Goovaerts, 2000; Kyriakidis *et al.*, 2001; Simpson *et al.*, 2005; Daly *et al.*, 2007; Fowler *et al.*, 2007; Hengl *et al.*, 2011). 이중 Daly *et al.*(2007)은 고도, 사면 방위, 해양도 등의 여러 기후인자를 PRISM 모델로 통합하여 격자형 기후자료를 산출하였으며, Fowler *et al.*(2007)는 다양한 부가자료 변수를 다중선형 회귀분석 기법을 활용하여 통계적 다운스케일링 방법으로 격자형 기후자료를 생산하였다. 이밖에도 GIS를 활용하여 여러 기상요소의 기후도를 산출하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다.

국내에서도 격자형 기후자료 생산은 수치표고 모델을 포함한 부가자료를 이용하여 기온 및 강수 분포도 제작(Park and Jang, 2008; Beak and Jang, 2011; Park *et al.*, 2012; Park and Kim, 2013; Park and Jang, 2013), 생태·수문 모델링을 통한 증발산량 및 일사량 분포도 제작(Park, 2009; Choi and Yun, 2011), 풍력자원지도 제작(Jeong *et al.*, 2010; Lee and Kim, 2012; Park *et al.*, 2014) 등의 연구가 수행되었다. 이밖에도 격자자료 생산을 위한 수치표고모델을 이용한 지하수위 분포도 작성(Jeong and Lee, 1995), 고해상도 원격탐사 자료를 이용한 퇴적물 입도 분포도 제작(Park *et al.*, 2009), 지질

도를 이용한 지화학 원소 분포도 제작(Park, 2011) 등과 같이 다양한 분야에서의 연구 사례가 보고되었다.

이전 연구들에서는 주로 1km 중간해상도의 DEM을 사용하거나 제주도와 같은 소규모 지역에 대하여 100m 고해상도의 DEM을 적용하여 격자형 기후자료를 생산하였다. 그러나 기상청의 동네예보와 같은 국지기후 특성을 분석할 수 있는 고해상도의 격자형 기후자료 생산을 위해서는 100m급 이하의 DEM과 통계적 다운스케일링 기법 개발 및 전국을 대상으로 한 격자형 기후자료 분포도 제작이 필요하다.

이 연구에는 기상관측 자료인 기온, 강수자료와 1:25,000 축척의 수치지형도로부터 추출한 100m급의 DEM을 이용하여 계절별 기온 및 강수분포도를 작성하였다. 분포도 작성에는 지형효과를 고려한 고도자료의 통합을 위하여 가변적 지역평균 단순 크리깅(simple kriging with local means: SKLM) 기법을 적용하였으며, 격자형 기후자료 생산에 널리 이용되는 IDW와 CK의 적용 결과와 비교함으로써 전국의 월평균기온 및 월강수량 분포도 작성 시 SKLM의 적용 가능성을 분석하였다.

2. 연구지역 및 사용자료

1) 연구지역

연구지역은 남한지역을 포함한 도서지역으로, 지리적 좌표는 124°51'10"E~130°50'13"E, 33°10'34"N~38°32'33"N에 해당되며, 전체 격자 사이즈는 5,327×6,019pixel이다.

연구지역은 지리적으로 중위도 온대성 기후대에 위치하여 사계절이 뚜렷하게 나타난다. 겨울에는 한랭 건조한 대륙성 고기압의 영향을 받아 춥고 건조하며, 여름에는 고온 다습한 북태평양 고기압

의 영향으로 무더운 날씨를 보이고, 봄과 가을에는 편서풍대에 자리하고 있어 이동성 고기압의 영향으로 맑고 건조한 날이 많다.

남한의 연평균기온은 6.6~16.6℃의 분포를 보이며, 가장 높은 곳은 서귀포시로 16.6℃이며, 가장 낮은 곳은 강원도 대관령으로 6.6℃이다. 연평균기온은 위도에 따라 북쪽으로 갈수록 낮고, 내륙 산지에서 낮다. 연강수량은 825~2,007mm로 기온에 비해 지역적 차이가 크다. 연강수량이 많은 지역은 제주도를 비롯한 경상남도 남해안지역과 강원도 영동 산지지역으로 평균 1,700mm 이상 내린다. 반면에 인천시 백령도는 825mm로 남한에서 가장 강수량이 적다. 또한 바람은 겨울에 북서풍, 여름에는 남서풍이 강하며, 계절에 따른 풍계가 뚜렷이 나타난다. 9월과 10월은 바람이 비교

적 약하며, 해안지방에는 해륙풍의 영향이 뚜렷하다(KMA, 2012).

2) 사용자료

본 연구에서는 월별 기온 및 강수분포도 작성 가능성 검토를 위해 연구지역에 위치한 총 623개 AWS(Automatic Weather System, 자동기상관측장비)에서 2013년 1월부터 12월까지 측정된 일관측 자료를 이용하여 총 12개월의 평균기온 및 강수자료를 작성하였다. 특히, 격자형 기후자료 생산에는 지상관측자료 중 약 80%인 498개 AWS자료를 이용하였으며, 검증에는 나머지 125개 AWS자료를 사용하였다(Figure 1a). 연구에 사용된 DEM 자료는 1:25,000 수치지형도에서 등고선, 해안선, 수준점 등을 이용하여 작성되었으며, 공간해상도는

Figure 1. Location of (a) AWS, (b) DEM of study area.

Table 1. Observed data of monthly mean temperature and precipitation in 2013.

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature	Min	-12.3	-9.6	-4.5	-1.5	11.2	14.4	18.2	17.2	11.4	7.4	-3.9	-9.5
	Max	7.0	6.8	12.2	14.3	19.7	25.1	28.9	29.7	25.4	19.8	14.2	9.3
	Mean	-2.8	-0.2	5.6	9.5	16.9	21.9	25.3	26.4	20.5	14.7	6.5	0.7
Precipitation	Min	0.0	0.0	0.0	0.0	29.0	5.0	5.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0
	Max	185.0	176.5	370.0	378.0	731.5	393.0	1175.5	662.0	320.0	288.5	577.5	230.5
	Mean	25.0	50.1	56.1	72.8	128.2	91.1	367.1	158.9	125.1	45.3	62.5	21.0

100×100m 자료이다(Figure 1b).

Table 1은 2013년 관측된 전국의 월별 평균 기온 및 강수량 통계를 나타낸다. 월평균기온은 1월이 가장 낮으며, 8월이 가장 높았다. 월강수량은 12월이 가장 적었고, 7월이 가장 많았으며 8월에도 높은 강수량이 나타났다.

기온 및 강수 특성과 관련된 환경 변수로는 일반적으로 해발고도, 해안선으로부터의 거리, 토지피복, 사면방위 등을 고려할 수 있다. 이중 기후요소의 시·공간 변동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 해발고도이다. 특히, 기온은 해발고도의 영향을 많이 받는데, 대류권 내에서는 고도가 상승함에 따라 기온은 하강한다. 또한 강수에 직접적인 영향을 주는 것은 수증기로서 해발고도가 상승하면 일정고도까지는 수증기량이 증가하여 구름이 두꺼워지지만, 그 이상의 상승 고도에서는 수증기량이 감소하여 구름이 얇아진다. 따라서 강수의 대부분은 하층운에서 내리고 상층으로 갈수록 강수가 드물어진다(Lee, 2007). 즉, 산지에서 강수는 고도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 응결고도를 넘어서면 오히려 감소하게 된다. 따라서 상대적으로 강수는 기온보다는 해발고도의 영향을 덜 받는다(Park *et al.*, 2008).

따라서 본 연구에서는 여러 환경변수 중 우선적으로 해발고도 자료를 이용하여 기온, 강수 분포도 작성에 지형효과를 고려하고자 한다. 특히, 고도자

료의 통합을 위하여 SKLM 기법을 적용하였으며, GIS 툴에서 널리 활용되는 IDW 기법과 CK 기법도 함께 적용하였다. 이때 IDW 기법은 기온 및 강수 자료만을 사용하였으며, SKLM 및 CK 기법은 이차변수로 고도자료를 사용하여 적용하였다.

3. 격자형 기후자료 생산을 위한 방법론

1) 거리역비례 가중치(IDW)

격자형 기후자료 생산을 위한 내삽방법의 하나인 IDW는 미관측지점에 대한 추정치 산정을 주변 관측 지점들 중 거리가 가까울수록 관측치의 영향을 크게 반영하는 기법이다. 이는 미관측 지점과 주변 관측지점들 간의 거리와 관측치가 반비례한다는 가정을 바탕으로 한다(Burrough and McDonnell, 1998). IDW에 대한 기본 수식은 다음과 같다.

$$\hat{Z}(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) \quad (1)$$

여기서 $\hat{Z}(u_0)$ 는 위치 u_0 에서 예측하고자 하는 값을 나타내며, n 는 관측지점 u_i 에 사용할 가중치, $Z(u_i)$ 는 관측지점 u_i 에서의 관측값을 나타낸다. 가중치 λ_i 는 거리가 증가함에 따라 그 값이 줄어들게

된다. 최종적으로는 정규화를 통해 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{Z}(u_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) d_{i0}^{-\omega}}{\sum_{i=1}^n d_{i0}^{-\omega}} \quad (2)$$

여기서 d_{i0} 는 각 관측지점(u_i)과 예측지점(u_0) 사이의 거리를 나타내며, ω 는 거리에 따른 가중치의 변화 정도를 나타낸다. 일반적으로 $\omega=2$ 를 적용하는데, 다시 말하면 가중치는 일반적으로 관측지점과 미관측지점 사이의 거리 제곱에 반비례한다.

2) 공동크리깅(CK)

크리깅은 미지의 값을 공간적인 상호관계를 가지는 확률 변수의 가중치 선형 조합으로 유추하는 기법이다(Goovaerts, 1997). 크리깅은 샘플 자료 사이의 거리에 따른 값의 변동성을 통계적으로 정의하여 베리오그램을 작성하고 이를 토대로 내삽을 수행한다.

단변량 크리깅에는 단순 크리깅(simple kriging), 정규 크리깅(ordinary kriging), 일반 크리깅(universal kriging), 구역 크리깅(block kriging) 등이 있다(Goovaerts, 1997; Deutsch and Journel, 1998). 이러한 단변량 크리깅은 기지점들의 분포 특성이 내삽하려고 하는 대상의 공간적 분포 특성과 일치할 때 좋은 내삽 결과를 기대할 수 있지만 그렇지 않을 경우에는 좋은 내삽 결과를 기대하기 어려울 수 있다. 예를 들어 강수량은 고도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 응결고도를 넘어서면 오히려 감소하게 된다. 하지만 강수량의 관측은 대부분 저지대에서 이루어지기 때문에 기지점의 자료가 산정부에서의 늘어나거나 감소한 강수량을 정확하게 반영하지 못할 때가 있다. 이와 같이 관측 자료가 지형에 따른 강수량의 공간적 분포 특성을 잘 반영하지 못할 때는 단변량 크리깅으로

복잡한 지형에서의 강수량 내삽에서 좋은 결과를 기대하기 어렵다.

다변량 크리깅은 단변량 크리깅의 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 방법이다. 즉, 고려하고 있는 자료와 상관성이 존재하면서 보다 많은 위치에서 획득된 부가 자료의 이용이 가능할 경우에는 다변량 크리깅을 통해 샘플링되지 않은 지점에서의 예측 능력을 향상시킬 수 있다. 이러한 다변량 크리깅 기법으로는 공동 크리깅, 외부 추세 크리깅(kriging with an external drift: KED), 가변적 지역평균 단순 크리깅(simple kriging with varying local means: SKLM) 등이 있다(Goovaerts, 1997; Deutsch and Journel, 1998; Wackernagel, 2003).

단변량 크리깅이 오직 하나의 변수 값을 알고 있을 때 위치에 따른 동일 변수의 자기상관을 이용하여 내삽을 수행하는 반면 CK는 두 개 이상의 변수를 선형조합하여 내삽을 수행한다. CK에서 예측하고자 하는 변수를 주변수, 주변수가 아닌 변수를 이차변수라 하며 이차변수는 여러 개가 될 수 있다. CK의 일반식은 다음과 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} \lambda_{jk} u_j(x_{jk}) \quad (3)$$

여기서 z 는 주변수, n 은 사용된 주변수의 총자료수, n_i 는 사용된 이차변수의 총개수, u_j 는 j 번째 이차변수, m_j 는 j 번째 이차변수의 총자료수, λ 는 가중치, 그리고 x 는 각 자료의 위치이다. 주변수 값을 예측하기 위하여 총 (n_i+1) 의 변수와 $(n+n_i \times m_j)$ 개의 자료가 사용된다(Goovaerts, 1997).

CK는 샘플 자료의 수가 적고 상호관계가 있는 이차변수의 양은 많을 때 이차변수의 분포 정보를 추가적으로 이용함으로써 불확실성을 줄일 수 있다. CK는 강수량 또는 기온 등의 내삽에 폭 넓게 활용되고 있으며 이 때의 이차변수는 지형고도가 사용되었다(Park and Jang, 2008). 지형고도는 강

수량 또는 기온의 공간적 분포와 밀접하게 관련되어 있으며 연속적인 분포 자료를 획득하기도 용이하기 때문이다. 본 연구에서는 고도자료를 이차변수로 사용하였으며, 주변수 z 와 하나의 이차변수 u 를 사용하여 CK를 적용하면 다음과 같은 식으로 간단히 표시된다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^m k_j u_j \quad (4)$$

여기서, z 는 주변수, n 은 주변수의 자료수, u 는 이차변수, m 는 사용된 이차변수의 자료수, 그리고 k 는 이차변수에 사용된 가중치이다(Goovaerts, 1997). CK는 주변수와 이차변수들의 베리오그램을 각각 작성한 후 주변수와 이차변수들 사이의 베리오그램을 작성함으로써 내삽을 수행한다. 이 때 주변수와 이차변수들 사이의 베리오그램은 양의 정부호를 만족하도록 설계하는 것이 중요하다.

3) 가변적 지역평균 단순 크리깅(SLKM)

CK는 부가 자료를 직접 크리깅 시스템에 이용하여 예측을 수행하지만, 원 변수의 베리오그램 모델과 더불어 고려하고 있는 부가 자료의 베리오그램 및 교차 베리오그램을 필요로 하는 계산상의 번거로움이 존재한다(Park and Jang, 2013). 반면 SKLM은 단순 크리깅에서 일정하다고 간주하는 평균을 부가 자료로부터 계산된 예측 위치마다 변하는 지역 평균으로 대체하는 방식을 이용하기 때문에 부가 자료가 지역 평균 계산 과정에 반영된다. CK와 달리 SKLM은 부가 자료의 개수가 많아 지더라도 지역평균 계산에만 기여하기 때문에 잔차의 공간 예측과 관련된 크리깅을 한번만 적용하면 된다(Park and Jang, 2013). 이러한 적용 가능성 등을 종합적으로 검토하여 이 연구에서는 지형자료의 이용을 위한 다변량 크리깅 기법으로 SKLM을 이용하였으며, 그 적용식은 식 (5)에 제시하였

다(Goovaerts, 1997; Park and Jang, 2013).

$$Z_{SKLM}^*(u) = m^*(u) + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{SKLM}(u) [Z(u_{\alpha}) - m^*(u_{\alpha})] \quad (5)$$

여기서 $m^*(u)$ 은 연구 지역 위치별 지역 평균을 나타낸다.

Figure 2는 SKLM의 실제 적용 절차를 예시한 것이다. 우선 AWS 위치에서의 기온 혹은 강수와 고도값을 대상으로 선형 회귀모형을 적용하여 지역평균을 계산한다. AWS 위치에서의 선형 회귀모형식을 연구지역의 고도값에 적용하면 연구지역 모든 위치에서의 기온 혹은 강수의 지역평균을 얻게 된다. AWS 위치에서의 관측값과 고도를 이용한 지역평균의 차이로 정의되는 잔차(residual)가 SKLM에서 실제 크리깅 적용 대상이 된다. 이 잔차를 대상으로 베리오그램 모델링을 수행한 후에 단순 크리깅을 적용하면 연구지역 모든 위치에서의 잔차값을 얻게 된다. 최종적으로 고도를 이용

Figure 2. A Practical application procedure of SKLM.

한 지역평균과 잔차의 단순 크리깅 예측값을 더하여 연구지역 모든 위치에서의 기온 혹은 강수량을 얻게 된다.

4. 분석 결과

1) 베리오그램 및 고도와의 상관성 분석 결과

623개 지상관측소에서 측정된 기온 및 강수 자료와 DEM을 이용한 CK 및 SKLM에는 Gamma Design Software사의 GS+ ver. 7.0과 ESRI사의 ArcGIS ver. 9.2 Geostatistical Analyst 프로그램을 이용하였다. 우선 베리오그램 모델링을 수행하였는데, 연구지역의 자료에는 이방성(anisotropy)이 존재하지 않는 것으로 나타나서 등방성 모델을 고려하였다.

Figure 3은 계절별 베리오그램 중에서 2013년 2월과 7월 기온 및 강수 자료의 베리오그램을 나타내고 있다. 전체적으로 베리오그램값이 천천히 변하는 양상이 나타나서, 연구지역의 모든 베리오그램은 이러한 양상을 반영할 수 있는 가우시안 모델을 적용하였다. 교차 베리오그램에서는 기온과 고도가 음의 상관관계를, 강수와 고도는 양의 상관관계를 반영하고 있다. 이때 강수와 고도의 교차 베리오그램이 짧은 이격거리에서 분산이 큰 것으로 나타났는데, 이는 강수와 고도의 낮은 상관관계에 기인하는 것으로 판단된다.

SKLM 적용을 위해 본 연구에서는 월별 평균기온 및 강수량과 고도와의 상관관계 분석을 수행하였다(Table 2). 먼저, 고도자료와 월평균기온의 선형 상관계수를 살펴보면, 기온과 고도는 음의 상관관계가 존재함을 확인할 수 있다. 즉 고도가 높아질수록 기온이 하강하는 전형적인 양상을 보이고 있다. 그러나 연간 선형 상관계수의 크기는 월별 혹은 동일 계절별로도 다소 차이를 보였다. 즉,

9월과 10월 및 4월에는 비교적 높은 상관관계가 나타났으며, 반면 5월과 6월에 가장 낮은 선형 상관성을 보이고 있다. 이러한 원인을 밝히기 위하여 본 연구에서는 동일 달의 강수량 및 최저·최고기온, 운량 등을 비교하였으나, 특별한 경향성을 파악할 수가 없었다. 향후 다른 기후요소 및 해수온도 변화 등과의 관련성 검토를 통해 그 원인을 살펴볼 필요가 있다.

다음으로, 고도자료와 강수량과의 선형 상관성을 살펴보면, 모든 월에서 양의 상관관계를 보이고 있다. 그러나 상관성의 강도는 기온에 비해 상대적으로 낮았으며, 계절별로 큰 차이를 보이고 있는데, 겨울철과 봄철에 상관성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 즉 강수량이 적은 겨울철과 봄철에 선형 상관성이 상대적으로 높았으며, 7월부터 9월까지 강수량이 많아질수록 선형 상관성은 나타나지 않았다. 이러한 양상은 베리오그램 분석을 통해 7월부터 9월까지의 고도와 무관한 강수량 패턴을 보이며, 다른 달에서는 고도가 높아질수록 강한 변동성이 나타났던 결과와 대체로 일치한다.

SKLM의 적용시 필요한 지역 평균 도출에는 월 평균기온 및 강수량을 종속변수로, 고도를 독립변수로 고려하는 선형회귀분석을 적용하였다. 월평균기온의 선형회귀분석을 적용한 결과, 9월, 10월 및 4월에 유의미한 회귀계수값이 나타났다. 이러한 결과는 앞선 베리오그램 모델링 결과와 월별 기온과 고도자료와의 상관성 분석 결과와 일치한다. 즉 봄철과 가을철은 상대적으로 고도의 영향이 크지만, 여름 및 겨울철은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 반면 강수량은 전 계절에 걸쳐 유의미한 회귀계수값이 나타나지 않았다. 따라서 고도보다는 해안선으로부터의 거리나 토지피복 등 다양한 다른 요인들이 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 이렇게 회귀분석을 통해 설명되지 않는 부분을 나타내는 잔차 성분들의 공간 자

Figure 3. Variogram and cross variogram with elevation of temperature and precipitation in February/May.

Table 2. Correlation coefficient between elevation and monthly mean temperature/precipitation.

Month (YYYY.MM.)	Correlation coefficient	Correlation coefficient with elevation	
		temperature	precipitation
2013.01.		-0.478	0.358
2013.02.		-0.516	0.354
2013.03.		-0.454	0.361
2013.04.		-0.628	0.406
2013.05.		-0.412	0.347
2013.06.		-0.433	0.307
2013.07.		-0.561	0.103
2013.08.		-0.505	0.229
2013.09.		-0.784	0.187
2013.10.		-0.658	0.313
2013.11.		-0.550	0.508
2013.12.		-0.535	0.557

기 상관성 정보를 SKLM을 통해 모델링하여 기온 및 강수분포도 작성에 이용하였다.

2) 기후자료 생산 내삽 기법별 비교

베리오그램 분석 결과를 바탕으로 월평균기온 및 강수량의 공간 예측에 IDW, CK, SKLM을 적용하였다. 이중 SKLM은 추계론적 성분으로 간주하는 잔차 성분에 대해 크리깅을 수행하기 때문에 잔차의 베리오그램 모델을 필요로 한다. 따라서 표본 위치에서의 잔차 성분을 이용하여 베리오그램을 모델링하고 이를 잔차의 단순 크리깅 가중치 결정에 사용하였다. 연구지역 내의 AWS 관측소 사이의 거리와 공간 분포를 고려하여 실제 크리깅에는 최소 2개 및 최소 16개의 관측자료를 이용하였으며, 각 월별 탐색 반경의 크기는 베리오그램 모델의 상관거리를 고려하여 다르게 결정하여 크리깅을 수행하였다. 모든 크리깅 기법에서는 부가자료의 공간해상도인 100m와 같은 격자 간격에서의 값을 예측하도록 하였다.

지형자료를 고려하는 다변량 크리깅 기법인 CK 및 SKLM과 IDW의 기후자료 생산을 위한 예측 능력의 상호 비교를 위해 검증 지점 관측값 사이의 편의(bias)와 평균제곱근오차(RMSE)를 구하였다. 그 결과, IDW와 CK, SKLM에 의한 월평균기온의 최소값과 최대값 사이의 범위가 관측자료에서보다 다소 감소하였으며, 평균값도 계절적 차이는 있지만 관측자료보다 약간 높게 나타났다. 이는 검증 지점에서의 추정값이 IDW와 CK, SKLM에 의한 내삽으로 공간적으로 연속성이 증가된 결과에 기인하는 것으로 판단된다(Table 3).

관측자료와 각 내삽기법별 예측결과와의 편의를 살펴보면, 전체적으로 모든 내삽기법에서 매우 양호한 월평균기온을 산출하였다. 하지만 각 내삽기법별 격자형 기온자료 산출수준은 계절에 따라 다양하게 나타나고 있다. 즉, IDW는 모든 계절에 걸쳐 예측값이 과대 예측되었으며, CK는 겨울과 가을철에, SKLM은 봄철과 가을철에 각각 더 과대 예측되었다. 각 내삽기법별 편의를 종합하여 보면, IDW보다는 CK 및 SKLM이 편이의 값이 작아 격자형 기온자료 산출에 유리하였으며, 특히 SKLM이 가장 유용한 것으로 판단되었다.

평균제곱근오차에서도 편의와 유사한 결과가 도출되었는데, 전체적으로 IDW보다는 CK 및 SKLM이 RMSE 값이 작아 격자형 기온자료 산출에 유리하였으며, 특히 SKLM이 가장 유용한 것으로 판단되었다. 즉, IDW 결과에 비해 SKLM 결과가 최소 0.2℃(10월), 최대 0.59℃(8월) 정도 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기온과 연관성이 높은 지형자료를 함께 공간 예측에 이용할 경우, CK 및 SKLM이 지형 효과를 반영하면서 상대적으로 예측 능력이 높은 기온분포도 작성이 가능함을 나타내며, 특히 SKLM이 더 유용한 것으로 판단된다.

다음으로 강수량에 대한 편의와 평균제곱근오차

Table 3. A comparison of monthly mean temperature estimated by interpolation and observed in 2013.

		February	May	July	October
Observed data	Min (℃)	-10.9	9.5	16.6	6.1
	Max (℃)	6.0	19.2	27.9	19.4
	Max-Min (℃)	16.9	9.7	11.3	13.3
	Mean (℃)	-0.2	16.9	25.3	14.7
IDW	Min (℃)	-4.8	14.2	22.8	11.0
	Max (℃)	5.6	19.1	28.3	18.4
	Max-Min (℃)	10.4	4.9	5.5	7.4
	Mean (℃)	-0.4	17.1	25.4	14.7
	Bias (℃)	-0.09	-0.05	-0.01	-0.12
	RMSE (℃)	1.42	1.07	1.34	1.16
CK	Min (℃)	-5.0	14.0	23.2	10.9
	Max (℃)	5.8	18.6	27.3	18.7
	Max-Min (℃)	10.8	4.6	4.1	7.8
	Mean (℃)	-0.2	17.0	25.4	14.7
	Bias (℃)	-0.08	0.00	0.01	-0.15
	RMSE (℃)	1.34	1.04	1.24	1.16
SKLM	Min (℃)	-10.8	11.36	17.9	4.9
	Max (℃)	5.1	18.8	27.6	19.1
	Max-Min (℃)	15.9	7.44	9.7	14.2
	Mean (℃)	-1.5	17.1	25.4	14.7
	Bias (℃)	0.09	-0.04	0.01	-0.09
	RMSE (℃)	0.98	0.68	0.75	0.92

를 살펴보면, 강수량이 많은 8월이 가장 크고 겨울철인 2월이 가장 작았다. 각 내삽기법별 강수량의 편차는 IDW보다 CK 및 SKLM이 작아 격자형 강수량 자료 산출에 유리하였으며, 특히 SKLM이 가장 유용한 것으로 판단되었다. 즉, SKLM 결과의 편차가 IDW 결과에 비해 최소 0.05mm(2월), 최대 0.8mm(8월)까지 감소하였다. 평균제곱근오차에서는 5월 자료에서 SKLM 결과가 IDW 결과에 비하여 0.36mm 증가하였으나 2월, 7월, 10월 자료에서는 SKLM 결과가 IDW 결과에 비해 최대 5.17mm(8월)까지 감소하였다. 따라서 월강수량 관측자료와 고도자료의 사이의 상관관계가 낮음에도 불구하고 분포도 작성 시 IDW에 비하여 CK 및 SKLM

이 지형 효과를 반영하면서 상대적으로 예측 능력이 높은 강수량분포도 작성이 가능함을 확인할 수 있으며, 특히 SKLM이 CK보다 더 나은 결과를 보여주었다(Table 4).

3) 계절별 평균기온 분포 특성 분석

이 연구에서는 2013년의 계절별 월평균기온 및 강수량 분포도를 생산하였다(Figure 4, Figure 5). 먼저, 각 내삽기법별 월평균기온 분포도를 살펴보면, IDW 결과에서는 지역적으로 값이 급변하는 양상을 나타내는데, 이는 미관측지점의 추정값이 관측지점과의 거리에 크게 영향을 받기 때문이다. 이에 반해 CK 및 SKLM 결과는 고도자료의 지형

Table 4. A comparison of monthly precipitation estimated by interpolation and observed in 2013.

		February	May	July	October
Observed data	Min (℃)	0.0	61.0	8.5	2.0
	Max (℃)	122.5	342.5	1228.5	254.0
	Max-Min (℃)	122.5	281.5	1220	252
	Mean (℃)	50.8	131.1	367.5	48.6
IDW	Min (℃)	14.5	71.1	18.5	6.8
	Max (℃)	107.3	286.7	1011.6	272.9
	Max-Min (℃)	92.8	215.6	993.1	266.1
	Mean (℃)	49.8	125.9	373.8	46.9
	Bias (mm)	-0.20	3.16	1.91	2.68
	RMSE (mm)	11.79	25.94	61.43	25.14
CK	Min (℃)	16.8	75.9	16.6	5.1
	Max (℃)	98.9	244.2	1000.4	269.2
	Max-Min (℃)	82.1	168.3	983.8	264.1
	Mean (℃)	49.3	125.9	375.6	47.7
	Bias (mm)	-0.24	2.12	1.77	2.13
	RMSE (mm)	10.83	25.81	59.22	23.96
SKLM	Min (℃)	15.9	29.1	7.6	5.7
	Max (℃)	100.4	239.7	1071.3	273.2
	Max-Min (℃)	84.5	210.6	1063.7	267.5
	Mean (℃)	49.3	125.0	375.7	47.9
	Bias (mm)	-0.15	3.06	1.63	1.88
	RMSE (mm)	10.94	26.30	56.26	23.34

효과가 반영된 분포 양상을 나타내며, IDW 결과에 비해서는 지역적으로 다소 평활화된 결과를 보여준다. 특히, SKLM의 경우 같은 고도자료를 반영한 CK와 유사한 공간적 분포 특성이 나타나지만, 동질지역은 다소 차이가 나타난다.

예를 들어, 겨울철 평균기온 분포에서 SKLM은 동부 산지의 동쪽 사면과 서쪽 사면의 평균기온이 뚜렷하게 구분된다. 이에 비해 CK의 평균기온 분포에서는 사면의 영향이 나타나지만 상대적으로 높은 산지의 기온분포 특성이 지역적으로 잘 나타나지 않고 있다. 아울러, 내륙 산지의 능선(태백산맥, 소백산맥)을 따라 나타나는 최저 평균기온의 공간분포 역시 SKLM에 비해 뚜렷하지 않다. 따라

서 고도를 반영한 지역적인 공간적 분포 특성은 전체적으로 CK보다는 SKLM이 비교적 잘 반영되는 것으로 판단된다.

가장 예측 능력이 우수한 것으로 나타난 고도자료를 반영한 SKLM의 예측 결과를 이용하여 남한 지역의 주요 월별 평균기온 분포 특성을 분석하였다. 그 결과, 남한 동부의 태백산맥과 소백산맥을 따라 평균기온의 패턴이 분명하게 구분되어 나타나고 있다. 즉, 2월의 평균기온은 남해안과 동해안을 따라 높게 나타나며, 반면에 동부 산지 및 내륙 쪽으로는 평균기온이 낮게 분포한다. 이는 남해 및 동해안을 따라 난류가 흐르면서 상대적으로 높은 평균기온이 나타났다.

Figure 4. Distribution of seasonal monthly mean temperature produced by IDW, CK, and SKLM.

Figure 5. Distribution of seasonal monthly mean precipitation produced by IDW, CK, and SKLM.

5월은 전체적으로 2월과 유사한 공간분포 패턴을 보이며, 특히 1,000m 이상의 산지지역에서 낮은 평균기온 분포가 나타난다. 하지만 동해안과 서해안의 평균기온 분포에서는 상대적으로 2월에 비해 큰 차이가 나타나지 않으며, 또한 영남내륙 및 수도권 지역을 중심으로 평균기온이 높게 분포한다.

7월에는 전체적으로 산지지역을 제외한 대부분의 지역에서 평균기온이 높게 분포하며, 해안보다는 내륙 쪽이 상대적으로 기온이 높게 나타난다. 이것은 7월이 전형적인 여름철 기온 특성이 나타난 결과로, 북태평양 고기압의 영향과 장마 및 집중호우 등으로 강수량이 많아지면서 지역별로 평균기온 차가 크지 않은 것으로 판단된다. 마지막으로 10월은 남해안 및 도서지역을 중심으로 높은 기온 분포 패턴이 나타났고, 영남 내륙 역시 평균기온이 주변보다 높은 분포패턴이 나타나는 것이 특징적이다.

다음으로 내삽기법별 강수량 분포도를 살펴보면, IDW 결과에서는 월평균기온 분포도에서와 마찬가지로 지역적으로 값이 급변하는 양상을 나타냈다. 이에 반해 CK 및 SKLM 결과는 월평균기온 분포도와는 다르게 고도자료의 지형효과가 반영되지 못하고 지역적으로 평활화된 분포양상을 보여주었다. 이는 월강수량 관측자료와 고도자료 사이의 낮은 상관관계에 기인한다.

예를 들어, 겨울철 강수량 분포를 살펴보면, 모든 내삽기법에서 제주도를 포함한 남해안 지역을 따라 강수량이 뚜렷하게 구분된다. 이러한 결과는 강수량 분포에서 고도보다는 해안선으로부터의 거리나 사면의 방향 등의 다른 지형적 요소들이 더 큰 영향을 준 것으로 사료된다.

남한지역의 주요 월별 강수량 분포 특성을 분석하여보면, 전체적으로 계절에 따라 강수량 분포는 다른 양상을 보인다. 즉, 2월의 강수량은 남해안

및 제주도를 중심으로 많으며, 동해안을 따라서는 평균 강수량이 적게 분포한다. 특히, 영남내륙 및 강원 동해안 지역의 강수량이 상대적으로 적게 분포한다. 5월은 전체적으로 2월과 유사한 공간분포 패턴을 보이지만, 영남내륙 및 강원 동해안 지역에서 강수량이 적은 곳이 더 광범위하게 나타난다.

7월에는 전체적으로 경기북부 및 영서지방을 중심으로 강수량이 많으며, 반면에 제주도를 포함한 남해안 지역은 상대적으로 적은 공간분포 패턴이 나타난다. 이것은 7월이 전형적인 여름철 강수량 분포 특성이 나타난 결과로, 남쪽은 북태평양 고기압의 영향으로 장마가 북상하여 무더운 날씨가 지속되고, 반면에 경기북부를 중심으로 한 영서지방은 장마의 영향으로 집중호우가 내리면서 강수량이 많아진 결과이다. 마지막으로 10월은 남동해안 지역을 중심으로 높은 강수량 분포 패턴이 나타났고, 영남 내륙 역시 강수량이 주변보다 높은 분포 패턴이 나타났다.

5. 결론

공간적으로 소수의 지점에서 자료가 획득되는 기후자료는 연관성이 있는 고도자료와 같은 부가적인 환경 변수를 함께 사용함으로써 공간 분포도 작성의 정확도를 향상시킬 수 있다. 이 연구에서는 전국에 걸친 고해상도 격자형 기후자료 산출을 위하여 AWS 등 지상관측소의 월평균기온 및 월강수량 관측자료와 고도자료를 이용한 SKLM 내삽기법의 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 GIS 툴에서 널리 이용되는 IDW 및 CK 내삽기법을 적용한 결과와 비교하였다.

첫째, 베리오그램 모델링 결과, 기온과 고도는 음의 상관관계를, 강수와 고도는 양의 상관관계를 반영하고 있으며, 이때 강수와 고도의 교차 베

리오그램이 짧은 이격거리에서 분산이 큰 것으로 나타났는데, 이는 강수와 고도의 낮은 상관관계에 기인하는 것으로 판단된다.

둘째, 월평균 기온 및 강수량은 고도자료와 밀접한 연관성을 나타내었지만, 월별 혹은 계절별로 상관관계의 강도는 달라졌으며, 특히 5월부터 8월 사이에는 고도와 상관성이 매우 약하게 나타났다. 이러한 결과는 앞선 베리오그램 모델링을 통한 분석 결과와도 일치하였다. 향후 다른 기후요소 및 해수온도 변화 등과의 관련성 검토를 통해 그 원인을 살펴볼 필요가 있다.

셋째, 고도자료를 다변량 크리깅 기법인 SKLM을 통해 평균기온분포도 작성에 적용한 결과, 모든 달에서 IDW 및 CK에 비해 높은 예측 능력을 보였다. 고도자료를 크리깅 과정에 적용할 경우, IDW 결과보다는 최소 0.2°C (10월), 최대 0.59°C (8월) 정도 RMSE가 작은 것으로 나타났다. 따라서 고도자료를 함께 이용함으로써 높은 예측 능력을 가지는 월별 기온분포도 작성이 가능함을 확인하였다.

넷째, 고도자료를 다변량 크리깅 기법인 SKLM을 통해 강수량분포도 작성에 적용한 결과, 평균기온분포도와 마찬가지로 IDW 및 CK에 비해 높은 예측 능력을 보였다. RMSE에서는 5월 자료에서 SKLM 결과가 IDW 결과에 비하여 0.36mm 증가하였지만, 2월, 7월, 10월 자료에서는 SKLM 결과가 IDW 결과에 비해 최대 5.17mm (8월)까지 감소하였다. 따라서 월강수량 관측자료와 고도자료의 사이의 상관관계가 낮음에도 불구하고 분포도 작성 시 IDW에 비하여 CK 및 SKLM이 지형 효과를 반영하면서 상대적으로 예측 능력이 높은 강수량분포도 작성이 가능함을 확인하였다.

다섯째, 각 내삽기법별 월평균기온 분포도 작성 결과, IDW 결과에서는 지역적으로 값이 급변하는 양상을 나타내는데 반해, CK 및 SKLM 결과

는 고도자료의 지형효과가 반영된 분포 양상을 나타내며 지역적으로 다소 평활화된 결과를 보여준다. 특히, SKLM의 경우 같은 고도자료를 반영한 CK와 유사한 공간적 분포 특성이 나타나지만, 동질지역이 다소 차이가 나타나고, 국지적인 공간분포 특성이 잘 반영되어 지역적인 공간적 분포 특성은 전체적으로 SKLM이 비교적 잘 반영되는 것으로 판단된다.

마지막으로 각 내삽기법별 강수량 분포도 작성 결과, 월평균기온 분포도에서와 마찬가지로 IDW에서는 지역적으로 값이 급변하는 양상을 나타냈다. 이에 반해 CK 및 SKLM 결과는 월평균기온 분포도와는 다르게 고도자료의 효과가 반영되지 못하고 지역적으로 평활화된 분포양상을 보여주었다. 이는 월강수량 관측자료와 고도자료 사이의 낮은 상관관계에 기인한다. 하지만 공간적인 분포에서는 지형효과를 일부 반영한 국지적인 분포 패턴이 두드러진 SKLM이 비교적 잘 반영되는 것으로 나타났다.

결과적으로 기온 및 강수 분포도 작성 시 IDW에 비하여 CK 및 SKLM이 더 나은 결과를 보여주었다. 특히, SKLM의 경우 같은 고도자료를 반영한 CK와 유사한 공간적 분포 특성이 나타나지만, 국지적인 공간분포 특성이 보다 잘 반영되어 CK보다 공간분포도 작성에 유리한 것으로 판단된다. 그러나 우리나라의 기온 및 강수의 년별, 계절별, 지역별 편차가 심하기 때문에 보다 장기적인 시계열 자료에 대한 두 기법의 비교연구가 요구된다.

사사

이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013S1A3A2052995). 박노옥의 참여는 2015년

도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었음(NRF-2015R1A1A1A05000966).

참고문헌

- Beak, 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).
- Burrough, P. A. and McDonnell, R., 1998, *Principles of geographic information systems*, Oxford University Press.
- Choe, J. G., 2002, *Spatial Data Modeling - Kriging and Optimization*, Goomibook (in Korean).
- Choe, J. G., 2007, *Geostatistics*, Sigma press (in Korean).
- Choi, G., 2013, Spatial patterns of seasonal extreme precipitation events in Mt. Halla, *Journal of Climate Research*, 8(4), 267-280 (in Korean).
- Choi, M. H. and Yun, J. I., 2011, A sub-grid scale estimation of solar irradiance in North Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 13(1), 41-46 (in Korean).
- Chung, S. Y. and Lee, K. K., 1995, Application of cokriging for the estimation of groundwater level distribution at the Nanjido level distribution at the Nanjido waste landfill area, *Journal of Korean Society of Soil and Ground Water Environment*, 2(2), 58-63 (in Korean).
- 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., Smith, J., and McKane, R., 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.
- Deutsch, C. V. and Journel, A. G., 1998, *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., and Tebaldi, C., 2007, Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling, *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547-1578.
- Goovaerts, P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.
- Goovaerts, P., 2000, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, 228, 113-129.
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., Percec Tadic, M., and Pebesma, E. J., 2011, Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images, *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2) 265-277.
- Hong, K. H., Suh, M. S., Rha, D. K., Jang, D. H., Kim, C. S., and Kim, M. K., 2007, Estimation of High Resolution Gridded Temperature Using GIS and PRISM, *Atmosphere*, 17(3), 255-268 (in Korean).
- Jeong, S. H., Park M. S., and Kim, K. H., 2010, Spatial prediction of wind speed data, *The Korea Journal of Applied Statistics*, 23(2), 345-356 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration(KMA), 2012, *The climate atlas of KOREA* (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.
- Kyriakidis, P. C., Kim, J., and Miller, N. L., 2001, Geostatistical mapping of precipitation from rain gauge data using atmospheric and terrain

- characteristics, *Journal of Applied Meteorology*, 40(11), 1855-1877.
- Lee, S. H., 2007, *Climatology*, Purungil (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).
- Lettenmaier, D., Major, D., Poff, L., and Running, S., 2008, *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.
- 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., 2009, *Prediction of the Hydrological Effect of Environmental Change using Physical based Deterministic Water Balance Model: A Case Study on the Catchment of Guryang Stream in Yongdam Dam Upper Basin*, Unpublished Ph.D. thesis, Kongju National University (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, J. C., Lim, Y. J., and Jang D. H., 2014, Improvement of a Modified Korean Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model for Wind Speed Interpolation, *Journal of Climate Research*, 9(3), 225-241 (in Korean).
- Park, N. W., 2011, Integration of categorical data using multivariate kriging for spatial Interpolation of ground survey data, *Journal of Korea Spatial Information Society*, 19(4), 81-89 (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).
- Park, N. W. and Jang, D. H., 2013, Geostatistical analysis of monthly temperature distributions using topographic data: A case study around Jirisan areas, *Journal of Climate Research*, 8(3), 217-235 (in Korean).
- Park, N. W., Jang, D. H., and Chi, K. W., 2009, Integration of IKONOS imagery for geostatistical mapping of sediment grain size at Baramarae beach, Korea, *International Journal of Remote Sensing*, 30(21), 5703-5724.
- Shepard, D., 1968, A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, New York*, 517-524.
- 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.
- Wackernagel, H., 2003, *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Springer.

책임 편집: 장동호

영문 교열: 조창현