

Research Paper

남한 지역 고해상도 기후지도 작성을 위한 공간화 기법 연구

조아영* · 류지은** · 정혜인*** · 최유영*** · 전성우***

고려대학교 생명과학과*, 고려대학교 환경GIS/RS 센터**, 고려대학교 환경생태공학과***

Applicability of Various Interpolation Approaches for High Resolution Spatial Mapping of Climate Data in Korea

Ayeong Jo* · Jieun Ryu** · Hyein Chung*** · Yuyoung Choi*** · Seongwoo Jeon***

Department of Lifescience, Korea University*

Environmental GIS/RS Center, Korea University**

Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University***

요약: 본 연구의 목적은 다양한 지리통계학적 공간화 기법을 적용한 격자기후자료와 기상청에서 제공하는 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS) 격자기후자료를 비교 분석하여 남한 지역의 고해상도 격자기후지도 작성 방안을 모색하는 것이다. 2017년의 595개 기후관측자료 중, 80%의 지점자료를 이용하여 순간 온도와 1시간 누적강수량에 대한 격자기후자료를 생성하였고 나머지 117개의 지점자료를 검증에 이용하였다. ArcGIS10.3.1과 Python3.6.4을 이용하여 관측자료 및 DEM을 IDW, 공동크리깅, 크리깅에 적용한 후, 공간보간 결과를 3개 군집으로 나누어 검증하였으며 LDAPS 격자기후자료를 바탕으로 유역 별 패턴 비교를 수행하였다. 결과적으로 순간 온도의 공간화에는 고도를 부변수로 추가한 공동크리깅이, 1시간 누적강수량 공간화에는 IDW가 가장 적합하였다.

주요어: 격자기후자료, 지리통계학적 공간보간, 역거리가중기법, 공동크리깅, 크리깅

Abstract: The purpose of this study is to build a new dataset of spatially interpolated climate data of South Korea by performing various geo-statistical interpolation techniques for comparison with the LDAPS grid data of KMA. Among 595 observation data in 2017, 80 % of the total points and remaining 117 points were used for spatial mapping and quantification, respectively. IDW, cokriging, and kriging were performed via the ArcGIS10.3.1 software and Python3.6.4, and each result was then divided into three clusters and four watersheds for statistical verification. As a result, cokriging

First Author: Ayeong Jo, Department of Lifescience, Korea University, Seoul, Korea, Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: ayoung6432@korea.ac.kr

Corresponding Author: Seongwoo Jeon, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea,

Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: eepps_korea@korea.ac.kr

Co-Authors: Jieun Ryu, Environmental GIS/RS Center, Korea University, Seoul, Korea, Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: ulygajok@gmail.com

Hyein Chung, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea,

Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: bproud0514@naver.com

Yuyoung Choi, Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea,

Tel: +82-2-3290-3543, E-mail: cuteyu0@korea.ac.kr

Received: 2 July, 2018. Revised: 27 September, 2018. Accepted: 2 October, 2018.

produced the most suitable grid climate data for instantaneous temperature. For 1-hr accumulated precipitation, IDW was most suitable for expressing local rainfall effects.

Keywords : Grid climate data, Geo-statistical interpolation, IDW, Cokriging, Kriging

I. 서론

기후변화에 대한 전 지구적 관심 증가와 컴퓨터 기술 발달 및 고해상도 지리정보 구축이 가속화 되면서 환경생태, 농업기상, 지리학, 대기환경 등 다양한 분야에서 고해상도 격자형 기후자료를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Fick & Hijmans 2017). 격자형 기후자료는 기후모델, 통계분석, 생태계, 서식지 연구 및 기후 공간화 연구의 중요한 기초 자료로 사용되며 기후변화 영향평가와 적응정책수립 등(Jang et al. 2015) 기후변화 관련 정책 결정에 과학적이고 객관적인 정보를 제공한다는 점에서 그 필요성이 점차 증대되고 있다.

고해상도 격자기후자료 생성에는 위성영상 기반의 기후 지도를 구축하거나 관측자료를 이용하여 내삽하는 방법이 있다(Chervenak et al. 2003). 위성영상은 과거보다 상세한 정보 수집과 이용이 가능해졌으나 시간 단위로 급속하게 변하는 기후현상 분석이 어렵고 데이터 처리 과정에서 고도의 전문 지식을 필요로 한다(Daly 2006; Ninyerola et al. 2007). 관측자료 내삽에는 역학적 또는 지리통계학적 내삽을 이용할 수 있다. 역학적 내삽법은 지리통계학적 내삽법에 비해 물리적으로 정확한 기상자료를 생산하지만, 높은 컴퓨팅 파워와 많은 계산 시간을 필요로 한다는 점에서 한계가 있다(Jang et al. 2015). 기상청에서 제공하는 고해상도 격자기후자료는 기상학적 모델링을 통해 구축되어 시·군 등 행정구역 범위의 지역 기후변화로 인한 기상현상 분석과 지역 맞춤형 기후정보 제공에 적합하나, 남한 전역의 시계열적 기후변화 연구나 전국 단위의 환경평가 및 산림계획에 활용하기 어렵다.

지리통계학적 내삽법은 일반 컴퓨터에서 실험이 가능하며 계산 시간이 짧다는 장점이 있으나(Park & Jang 2011) 관측되지 않은 격자의 값을 추정하는 과정에서 불확실성이 나타난다(Jeong & Choi 2011).

따라서 단순한 공간 보간법만 이용할 때 생기는 문제를 극복하기 위해 원격탐사자료, GIS 주제도, 해발고도, 경사 등을 내삽 과정에 포함시키는 연구들이 진행되었다(Creutin et al. 1988; Daly et al. 2003). 우리나라에서는 복잡한 지형과 몬순의 영향으로 기상요소의 시·공간적 변동성이 큰 점을 고려해서(Baek & Jang 2011) 통계적 내삽에 관측자료 외 수치표고모델(DEM), 원격탐사자료 등 부가자료를 이용하여 불확실성의 한계를 극복하고자 한 연구 사례가 보고된 바 있다(Park & Jang 2008; Park & Kim 2009). Kim et al.(2014)은 기온감률 효과에 따른 공간 내삽의 기온 추정값 비교 연구에서, 단순한 공간 내삽기법만으로 추정된 값보다 해발고도에 따른 기온감률 효과를 적용하였을 때 정확도가 향상되는 결과를 도출하였다. Park & Jang(2008)과 Park & Kim(2009)은 제주 지역을 대상으로 다변량 크리깅을 이용한 기온과 강수량을 추정 시 이차변수로 각각 수치표고모델과 지형 사면방향을 적용한 연구를 수행한 바 있다. 선행 연구들에서도 관측 자료의 공간적인 부재에 의한 지리통계학적 내삽법의 불확실성 효과를 줄이는 결과를 확인할 수 있었으나, 이차변수로 사용되는 자료의 해상도가 낮거나, 사례 지역이 제주도 등의 소규모 지역으로 제한된 연구가 많았다. 그러나 전국 단위의 시계열적 기후변화 연구나 남한 전역의 환경평가 및 정책 연구에 활용할 수 있는 격자형 기후자료 산출을 위해서는 전국을 대상으로 한 고해상도의 기온 및 강수 분포도 작성이 요구된다.

본 연구의 목적은 통계적 내삽 기반의 격자자료와 역학적 내삽 기반의 격자자료를 비교하여 시간과 비용 측면에서 효율적이고 비교적 정확도가 높은 공간화 기법을 연구하는 것이다. 각 방법의 장단점을 고려하여 접근성이 높은 지리통계학적 내삽법을 채택하였고 기상관측자료인 기온, 강수 자료와 지형자료인 DEM을 이용하여 남한 전역의 계절별 기온 및 강

수분포도를 작성하였다. 내삽에는 대표적인 공간통계기법인 역거리가중법(IDW), 크리깅(Kriging), 공동크리깅(Cokriging)을 적용하였고 역학적 내삽과 통계적 내삽의 정확도 비교를 위해 기상청의 국지에 보모델 산출 수치예보자료를 이용하여 통계적 내삽 결과와 비교·분석하였다.

II. 연구 자료

본 연구에 사용한 자료는 크게 기상청에서 역학적 내삽법을 통해 구축한 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS) 산출 격자기후자료와 통계적 공간내삽에 사용할 기상 관측자료 및 환경 변수로 구성되어 있다.

1. 국지예보모델 격자기후자료(LDAPS)

기상청의 수치예보는 고성능 컴퓨터에서 계산되는 수치예보모델을 통해 현재의 대기상태로부터 미래의 날씨를 예측하여 격자자료 형태로 제공된다. 수치예보모델은 지구의 기상시스템을 대기 상태와 운동을 지배하는 역학·물리 방정식을 이용하여 기상학적으로 모델링한 것이다. 이 과정에서 종류나 규모, 해상도 등에 따라 제한된 시간 내 방대한 양의 수치연산을 수행해야 하므로 고성능 수치계산을 목적으로 만들어진 슈퍼컴퓨터에서 제공하는 특수한 프로그래밍 환경을 이용하여 작성·실행되어야 한다.

기상청의 주요 수치예보모델인 전지구, 지역, 국지예보모델 산출자료는 2013년 9월부터 제공되고 있으며 본 연구에서는 다양한 수치예보모델 산출자료 중 공간해상도가 가장 높은 국지예보모델(LDAPS, 1.5km 공간해상도) 산출 단일면 자료를 사용하였다. LDAPS 산출자료는 3시간 간격으로 전지구모델로부터 경계장을 제공받아 1일 8회 모델링을 수행하여 (03:00, 09:00, 15:00, 21:00; 36시간단위 예측, 00:00, 06:00, 12:00, 18:00; 3시간단위 예측) 시간단위의 등압면 자료와 단일면/토양면 자료¹⁾ 형태로 제공된다(KMA, National climate data service system).

본 연구는 기온과 강수에 대한 최신 격자자료 연구

에 2017년 LDAPS 산출 단일면 자료의 78종 변수 중 순간 온도와 1시간 누적강수량을 채택하였다. 6시간 간격으로 총 36시간의 예측 격자자료(h000~h036)를 제공하는 LDAPS의 특성을 고려하여 09:00, 00hr 자료를 이용하여 통계적 공간내삽 결과와 비교하였다.²⁾

2. 기상관측 기후자료

우리나라는 기온과 강수 패턴이 계절마다 크게 차이가 나며 통상적으로 태양의 위치로 계절의 분기점을 결정하므로 24절기 중 태양의 고도에 따라 결정되는 절기인, 춘분, 하지, 추분, 동지를 대상으로 계절에 따른 격자기후자료 비교연구를 수행하였다³⁾(Jin and Park 2015). 다만, 격자기후자료 작성 시 영향을 미칠 수 있는 바람, 국지적인 비, 기압골 등의 기상 요인을 최대한 배제하고자, 순간 온도 공간화 연구에는 평균 풍속 2m/s 미만, 구름량(1/10) 3.5 미만, 상대 습도 80% 미만의 각 계절별 절기에 가까운 날을 채택하여 3월 31일, 6월 21일, 9월 23일, 12월 24일 09:00에 측정된 순간 온도를 연구 대상으로 하였다(KMA Monthly Weather Report). 1시간 누적강수량 공간화 연구에는 각각 3월과 12월 중 우리나라를 지나는 저기압의 영향으로 전국적으로 비가 내리고 춘분과 동지에 가장 가까운 날을 채택하여(KMA Monthly Weather Report), 최종적으로 3월 31일,

1) LDAPS 산출 단일면 예보자료는 기상요소 중 강수량, 기온과 같이 연직으로의 변화가 없는 단일층에서 나타나는 기상요소와 토양층에서 정의되는 변수들을 표현한다. 단일면/토양면 변수(78종)는 일조(7종), 구름(12종), 강수(4종), 바람(3종), 토양(30종), 습도(11종), 기온(5종) 등의 표면 및 대기 정보를 격자 형태의 자료로 제공된다. 본 연구에서는 기상 관측자료인 기온, 강수 자료 중 평균 순간 온도와 1시간 누적강수량을 연구 대상으로 채택하였다.

2) LDAPS는 기상청에서 한반도 영역의 단기예측 모의(36시간)에 적용된다. 본 연구는, 통계적 내삽 결과의 정확도를 검증하기 위해 LDAPS 자료 중, 아침 9시를 기준으로 00시간 후의 예측 자료(09:00, 00hr)를 채택하였다. 09:00, 00hr LDAPS 격자자료는 아침 9시에 측정된 관측값 이용하여 생성한 격자자료와 동일한 조건을 갖는다고 판단하여 이를 검증에 이용하였다.

3) 춘분과 추분은 태양이 적도에 위치하고 하지는 태양이 북회귀선에 위치하여 태양의 남중고도가 가장 높으며 동지는 태양이 남회귀선에 위치한다.

Table 1. Observed data of instantaneous temperature and precipitation in 2017.

		2017.03.31	2017.06.21	2017.09.23	2017.12.24
Temperature (°C)	Min	-4.3	13.3	11.0	-4.4
	Max	12.0	27.1	24.5	14.9
	Mean	7.8	23.2	19.0	4.9
Precipitation (mm)	Min	0.0			0.0
	Max	7.1	-	-	20.7
	Mean	0.4			2.4

12월 24일 09:00에 측정된 1시간 누적강수량을 연구 대상으로 하였다.

기상청에서 제공하는 시간별 종관기상관측자료(ASOS)와 방재기상관측자료(AWS)를 이용하여 4개의 순간 온도 및 2개의 1시간 누적강수량에 대한 기후 자료를 작성하였다(Table 1). 좌표 정보를 추가한 총 595개 지상관측자료 중, 80%에 해당하는 478개의 관측자료(Interpolation)를 이용하여 IDW과 크리깅을 적용하였고, 고도자료와의 통합에는 공동크리깅을 적용하였다. 나머지 20%의 관측자료(Verification)는 검증에 사용하였다(Figure 1(A)).

3. 환경변수

기온 및 강수 특성과 관련된 지리적 환경변수로는 일반적으로 해발고도, 해안선으로부터의 거리, 토지

피복, 사면방위 등을 고려할 수 있다(Baek & Jang 2011). 다양한 지형학적 인자 중 해발고도는 기후요소의 시·공간 변동에 가장 큰 영향을 미치는데, 대륙권 내에서 고도가 100m 상승함에 따라 기온은 0.6°C 씩 하강한다(Baek et al. 2011). 따라서 공간 보간에 고도를 환경변수로 설정하여 EarthExplorer에서 제공하는 30m(1 arc second) 공간해상도의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM을 사용하였다(Figure 1(B)).

III. 연구방법

다양한 공간 연구의 기초 자료로 사용되는 고해상도 격자형 기후자료를 생성하기 위해 기상청에서 제공하는 계절별 지상기상관측자료를 이용하여 각 지

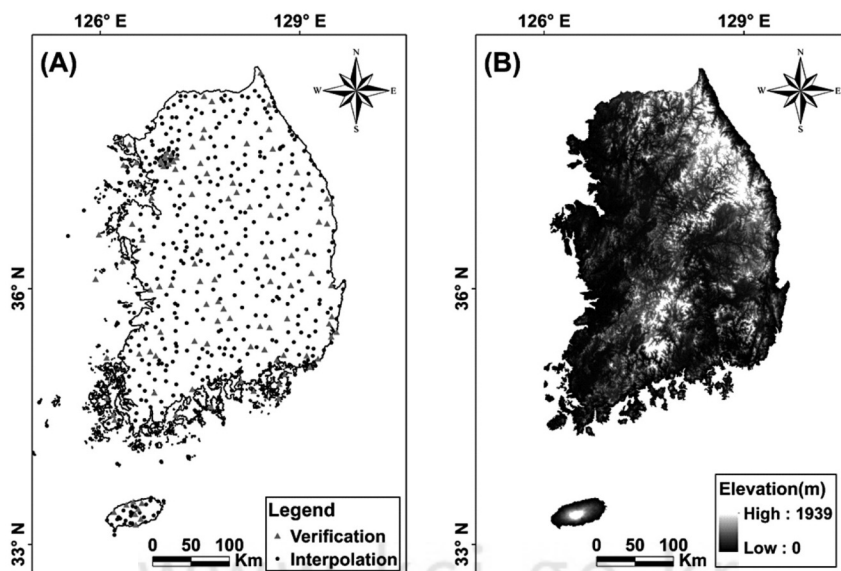


Figure 1. (A) Location of AWS, (B) DEM of study area.

점에 대해 순간 온도 및 1시간 누적강수량의 좌표 정보를 구축하였다. 통계적 내삽법으로는 가장 대표적인 공간보간 기법인 IDW와 크리깅 및 공동크리깅을 적용하였다.

우리나라의 지형을 고려한 공간보간 기법 별 정확도 검증을 위해 일차적으로 고도와 경사를 고려하여 관측자료의 군집 분석을 수행한 후, 군집별로 20% 관측지점을 임의 추출하였다. 이 후, 통계적으로 정확도를 검증하기 위해 군집 별로 나누어 관측자료와

각 기법 별 보간 결과 및 기상청의 LDAPS 격자기후 자료에 대한 편이와 평균제곱근오차(RMSE) 를 도출하였다. 공간 보간의 예측 정확도를 객관적으로 판단하기 위해 총 5회의 임의 추출 및 교차검증을 반복 수행하였다. 그 후, 구축한 격자형 기후자료를 대권역 별로 나누어, 기상청에서 제공하는 LDAPS 격자기후 자료와 통계적으로 공간 보간한 자료들의 공간 패턴을 비교·분석하였다(Figure 2).

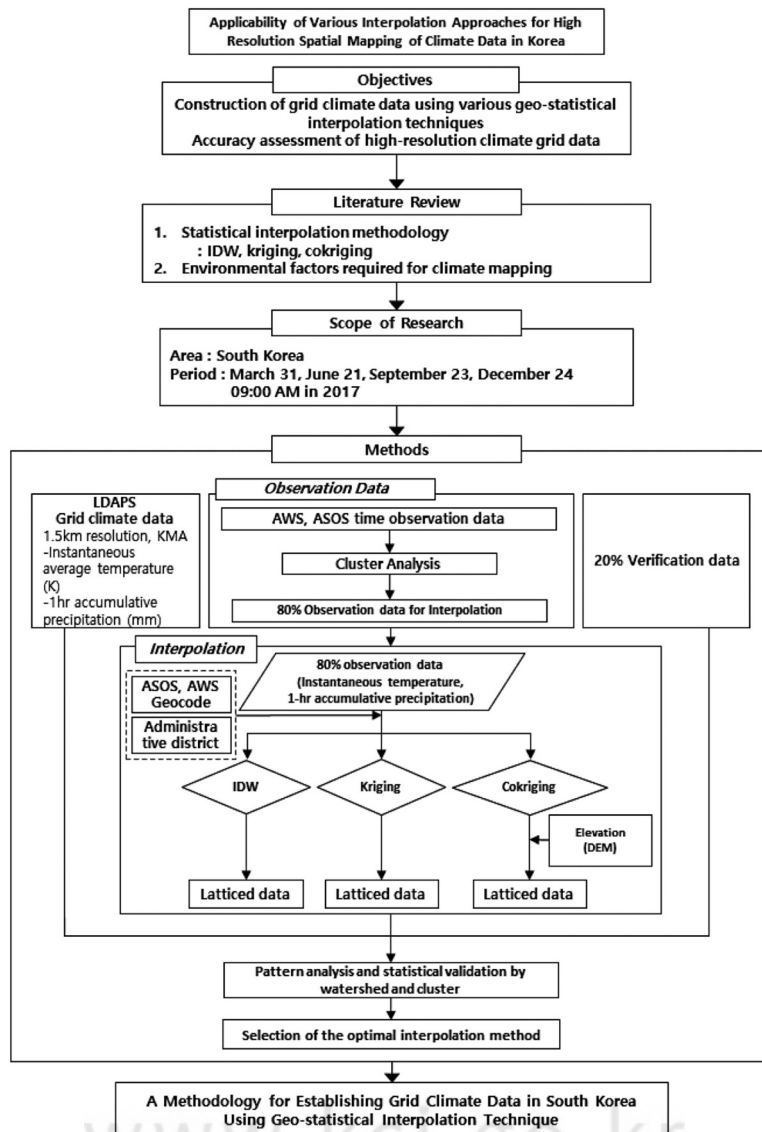


Figure 2. Research flow chart.

1. 격자기후자료 생성

순간 온도와 1시간 누적강수량에 대한 격자형 기후자료 생산에 595개 지상관측자료 중 80%의 관측자료를 이용하여 IDW과 크리깅을 적용하였고, 고도자료와의 통합에는 공동크리깅을 적용하였다. 특히, 크리깅과 공동크리깅 적용 전, 샘플 자료 사이의 거리에 따른 값의 변동성을 통계적으로 정의하여 베리오그램을 작성하여 이를 토대로 내삽을 수행하였다(Supplementary Table 1-2). 나머지 20%의 관측자료는 검증에 사용하였다. 최종적인 격자자료 생성에는 임의 추출을 통해 생성한 5개의 training sets에 대하여 각각의 통계적 공간 내삽을 수행한 후, Arc GIS ver. 10.3.1 프로그램의 raster calculator를 이용하여 5개 격자자료 평균을 도출하였다.

1) 역거리가중기법(Inverse Distance Weighting, IDW)

통계적 내삽법의 하나인 역거리가중기법은 미관측 지점에 대한 추정치 산정 시 알려진 주위 값들 중 거리가 가깝게 위치할수록 관측치의 영향을 크게 반영하는 기법이다. 즉, 미관측지점과 주변 관측지점들 간의 거리가 멀어짐에 따라 가중치가 지수적으로 감소한다는 가정을 바탕으로 한다. IDW에 대한 기본 수식은 다음과 같다.

$$z_g(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i Z(x_i) \quad (1)$$

여기서 $z_g(x)$ 는 위치 x 에서의 예측값을 나타내며, N 는 관측지점 x_i 에 사용할 가중치, $Z(x_i)$ 는 관측지점 x_i 에서의 관측값을 나타낸다. 가중치 α_i 는 거리와 반비례하기 때문에 거리가 증가함에 따라 그 값이 감소한다. 최종적으로는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{(1/d_i)^p}{\sum_{j=1}^N (1/d_j)^p} \quad (2)$$

여기서 d_i 는 관측지점(x_i)과 예측지점(x) 사이의 거리이다. P 는 거리에 따른 가중치의 변화 정도를 나타낸다. P 가 0이면 IDW의 결과는 산술평균과 동일하며, 무한대로 커지면 티센면적가중법(Vornoi Diagram)의 추정 결과와 같아진다(Hwang & Ham 2013).

2) 크리깅(Kriging, K)

범용적으로 사용되는 통계적 내삽법 중 하나로, 공간적 상호관계를 가지는 확률 변수의 선형 조합으로 미지의 값을 유추하는 기법이다. 추정 시 실측값과의 거리 및 이웃한 값과의 상관성을 고려하며, 보통 실측값 사이의 거리에 따른 값의 변동성을 통계적으로 정의하여 베리오그램을 작성하고 이를 토대로 내삽을 수행한다. 단변량 크리깅에는 단순크리깅, 정규크리깅, 일반크리깅, 구역크리깅 등이 있다.

본 연구에서는 오차의 분산을 최소화 하는 정규크리깅(ordinary kriging) 방법을 사용하였다. 정규크리깅에서는 추정 지점을 기준으로 지역적으로 평균이 일정하다고 가정하는데 임의의 격자점에서의 정규크리깅 추정치는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_g(x) &= E(x) + \sum_{i=1}^{N(x)} \alpha_i(x) [Z(x_i) - E(x)] \\ &= \sum_{i=1}^{N(x)} \alpha_i(x) Z(x_i) + [1 - \sum_{i=1}^{N(x)} \alpha_i(x)] E(x) \end{aligned} \quad (3)$$

크리깅 가중치의 합이 1이 되는 경우 지역 평균값($E(x)$)을 제거할 수 있어 정규크리깅 추정치는 다음과 같아진다.

$$Z_g(x) = \sum_{i=1}^{N(x)} \alpha_i(x) Z(x_i), \sum_{i=1}^{N(x)} \alpha_i(x) = 1 \quad (4)$$

여기서 정규크리깅 가중치 $\alpha_i(x)$ 는 추정 분산을 최소화하여 추정할 수 있다(Hwang & Ham 2013).

3) 공동크리깅(Cokriging, CK)

공동크리깅은 주변수에 영향을 주는 타 요인을 고려할 수 없는 단변량 크리깅의 단점을 보완하여 제안된 방법으로, 부가 자료의 이용이 가능할 경우 다변량 크리깅을 통해 샘플링 되지 않은 지점에서의 예측 능력을 향상시킬 수 있다. 이러한 다변량 크리깅 기법으로는 공동크리깅, 외부추세 크리깅, 가변적 지역 평균 단순크리깅 등이 있다.

단변량 크리깅은 오직 하나의 변수 값을 가지고 위치에 따른 동일 변수의 자기 상관을 이용하여 내삽을 수행하는 반면, 공동크리깅은 두 개 이상의 변수를 선형 조합하여 내삽을 수행한다. 공동크리깅에서 예

측하고자 하는 변수를 주변수, 주변수가 아닌 변수를 이차 변수라 하며 이차 변수는 여러 개가 될 수 있다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^{M(x)} \alpha_i z_i + \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{m_j} \alpha_{jk} u_j(x_{jk}) \quad (5)$$

여기서 z 는 주변수, N 은 사용된 주변수의 총 자료 수, N_s 는 사용된 이차변수의 총 개수, u_j 는 j 번째 이차 변수, m_j 는 j 번째 이차변수의 총 자료 수, α 는 가중치, x 는 각 자료의 위치이다. 주변수의 값을 예측하기 위하여 총 (N_s+1) 의 변수와 $(N+N_s \times m_j)$ 개의 자료가 사용된다(Jang et al, 2015).

4) 통계적 공간보간 결과 검증

각 공간보간법에 의해 작성된 순간 온도 및 1시간 누적강수량에 대한 격자기후자료의 정확도를 통계적으로 검증하기 위하여 기상관측자료의 20%에 해당하는 117개 검증지점 관측값과 공간보간 예측값 사이의 편이(bias)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하였다. 특히 고도 별 정확도를 검증하기 위해서 20%의 검증자료를 이용하여 최종적으로 생성한 격자자료의 각 군집 별 편이와 RMSE를 비교하였고 기상청에서 제공하는 LDAPS 단일면 격자 기후자료의 편이와 RMSE를 추가적으로 도출하여 공간보간 결과와 통계적으로 비교·분석하였다. 추가적으로, 공간 보간의 예측 정확도를 객관적으로 판단하기 위해 총 5회의 임의 추출 및 공간보간 결과에 대하여 각각의 교차검증을 반복 수행하였다(Supplementary Table 3-4).

$$Bias(MAE) \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (6)$$

$$RMSE \quad \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (7)$$

여기서 E 와 O 는 각각 추정값과 관측값을 나타내며, n 은 표본의 총 수이다. 편이 측정에 일반적으로 사용되는 평균절대오차(MAE, mean absolute error)는 추정값과 실제값의 차이에 대한 절댓값의 평균으로써, 추정값의 불확실성을 측정하는 통계값이다. 평균 제곱근 오차는 추정값과 실제값의 차이(잔차)의 제곱합을 산술평균한 값의 제곱근으로서 정밀도를

표현하기 위해 흔히 사용하는 측도이다(Walther & Moore 2005).

2. LDAPS와 통계적 공간보간 결과 비교 방법

LDAPS 단일면 격자기후자료와 통계적 공간보간 결과를 비교하기 위해 고도와 경사를 고려한 통계적 내삽의 정확도 차이와 유역별 공간 패턴의 차이를 분석하였다.

1) 군집 분석

본 연구의 대상지인 남한은 남북 방향의 긴 국토와 북에서 남으로 발달한 산맥으로 인해 남·북간 및 동·서간의 기후 차이가 크고 국토의 70%에 이르는 산지의 영향으로 고도에 따른 기후의 차이가 매우 크다(Park 2014). 이러한 지형 특성으로 인해서 해발고도와 경사의 영향을 고려한 우리나라의 기온 및 강수 특성에 대한 선행 연구가 다양하게 수행되어 왔다.

기후에 영향을 미치는 인자인 고도와 경사를 고려하여 공간 보간 결과의 정확도를 비교·분석하고자 고도와 경사를 기준으로 우리나라를 3개의 군집으로 구분하고, 각 군집을 대상으로 공간보간 결과의 정확도를 비교하였다.

가장 먼저, 관측자료의 계층적 군집 분석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 계층적 군집 분석인 Ward 연결법은 군집 분석의 각 단계에서 데이터들을 군집화 할 때 군집의 평균과 데이터들 사이의 오차제곱합이 최소가 되도록 병합시킨다(Punj & Stewart 1983). 고도와 경사를 변수로 하여 관측자료를 군집화 한 결과, 총 3개의 유의미한 군집이 도출되었다. 이후, K-평균 알고리즘을 통해 입력 데이터에 군집별 레이블을 설정하였고, 공간보간에 사용할 관측자료(80%, Training set)와 검증에 사용할 관측자료(20%, Test set)를 군집별로 임의 추출 하였다.

2) 지형 특성별 비교

군집 1은 설악산, 오대산, 계룡산, 지리산, 한라산 등 큰 산 정상을 포함하고 평균 해발고도 949m, 평균 경사 21.4°의 높은 고도와 경사를 갖는다. 군집 2는 태백산맥과 소백산맥의 능선을 따라 이루어져 있고 평

Table 2. Three clusters separated with elevation and slope

	Cluster1	Cluster2	Cluster3
Property	High altitude, slope	Middle altitude, slope	Low altitude, slope
Number	24	98	473
Average slope (°)	21.4	13.5	5.1
Average elevation (m)	942	387	60
Training	20	79	379
Test	4	19	94

군 해발고도 387m, 평균 경사 13.5°의 중간 고도와 경사를 특징으로 한다. 군집 3은 평균 해발고도 60m, 평균 경사 5.1°로 논산·호남평야 및 김포평야를 포함한 저지대로 이루어져 있다(Table 2). 군집 분석의 결과를 바탕으로 20% 검증자료와 각 기법별 공간보간 결과 및 LDAPS 격자기후자료를 바탕으로 군집별 편이와 RMSE를 도출하여 고도와 경사에 따른 통계적 내삽 결과의 정확도 차이를 비교·분석 하였다.

3) 유역별 비교

우리나라의 하천은 크게 한강, 금강, 낙동강, 영산·섬진강의 4개 권역으로 나뉘며 일반적으로 물리적 경사가 큰 편이다(Chun et al. 2015). 4대강 중 한강의 유역면적이 약 26,000km²로 가장 크고, 낙동강은 하천경사가 가장 낮아 넓은 평야지대를 형성한다.

공간보간 결과와 LDAPS 격자기후자료의 공간패턴 차이를 유역별로 비교하고자 수자원단위지도를 바탕으로 제주 지역을 영산·섬진강 유역에 포함시켜 우리나라를 총 4대강 권역으로 구분한 후(Figure 3),

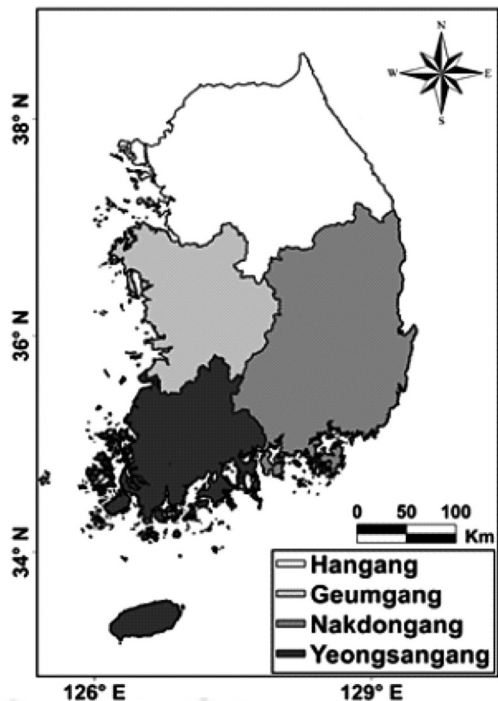


Figure 3. Classification of South Korea by watershed boundary

각 격자자료를 구역별로 나누어 공간 패턴을 비교·분석하였다.

각 구역 내 순간 온도와 1시간 누적강수량에 대한 최대값과 최소값이 관측된 지점에서의 공간보간 결과 및 LDAPS 격자기후자료 예측값을 비교하였고, 특히 LDAPS 격자기후자료에 비해 과대 예측되거나 LDAPS 격자기후자료와 상이한 차이를 보이는 지역의 경우 관측값과 공간보간 예측값을 통계적으로 비교한 후 기상청의 문헌을 참고하여 해당 지역의 기상학적·지리적 특성을 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 격자기후자료 생성

계절별 기후관측자료를 바탕으로 공동크리깅, IDW, 크리깅을 적용하여 총 12개의 순간 온도(Figure 4) 및 6개의 1시간 누적강수량(Figure 5) 격자자료를 생성하였다. 우선, 관측자료의 관측값과 공간보간 예측값 사이의 통계를 살펴보면, 전반적으로 통계적 공간보간 격자기후자료의 예측 최대값과 최소값 사이의 범위가 관측 최대값과 최소값 사이의 범

위보다 낮게 나타났음을 확인할 수 있다(Table 3).

순간 온도의 경우, 관측 최대-최소값 사이 범위보다 공동크리깅 예측 최대-최소값 범위가 3.9℃ 가량 작았고 IDW 3.6℃, 크리깅 5.3℃ 가량 낮게 나타나, 각각 29%, 27%, 38%의 감소를 보였다. 그러나 공간보간 예측 평균값은 관측 평균값과 0~0.1℃의 차이로 거의 유사하였다. 공간보간 예측 평균값과 관측 평균값이 거의 유사하나 공간보간 예측 최대-최소값 사이 범위가 관측 최대-최소값 사이 범위보다 작아지는 것은 통계적 공간내삽으로 인해 검증지점에서의 공간적 연속성이 증가되었기 때문으로 유추할 수 있다. Jang et al.(2015)의 남한 고해상도 기후 분포도 작성 연구에서도 IDW, 공동크리깅, 가변적 지역 평균 단순크리깅을 적용한 월평균기온 예측 최대-최소값 사이 범위가 관측자료에서보다 감소하였는데, 이는 검증 지점에서의 추정값이 통계적 공간내삽에 의하여 공간적으로 연속성이 증가된 결과에 기인하는 것으로 보고하였다.

1시간 누적강수량 또한 예측 최대-최소값 사이의 범위가 관측 최대-최소값 사이 범위보다 작아지는

Table 3. Comparison of instantaneous temperature and 1-hr accumulative precipitation estimated by geo-statistical interpolation and observed in 2017.

Temperature (°C)		2017.03.31	2017.06.21	2017.09.23	2017.12.24
Observed	Max-Min	13.2	11.6	11.9	16.7
	Mean	7.9	23.2	19.6	4.4
Cokriging	Max-Min	8.0	8.7	8.2	13.0
	Mean	7.8	23.1	19.7	4.4
IDW	Max-Min	8.9	10.1	8.0	12.2
	Mean	7.9	23.1	19.6	4.4
Kriging	Max-Min	6.6	6.4	6.5	12.8
	Mean	7.8	23.2	19.7	4.5
Precipitation (mm)		2017.03.31	2017.12.24		
Observed	Max-Min	4.74	15.88		
	Mean	0.65	1.97		
Cokriging	Max-Min	3.65	10.47		
	Mean	0.74	2.02		
IDW	Max-Min	3.86	9.81		
	Mean	0.73	2.04		
Kriging	Max-Min	3.14	9.19		
	Mean	0.71	1.95		

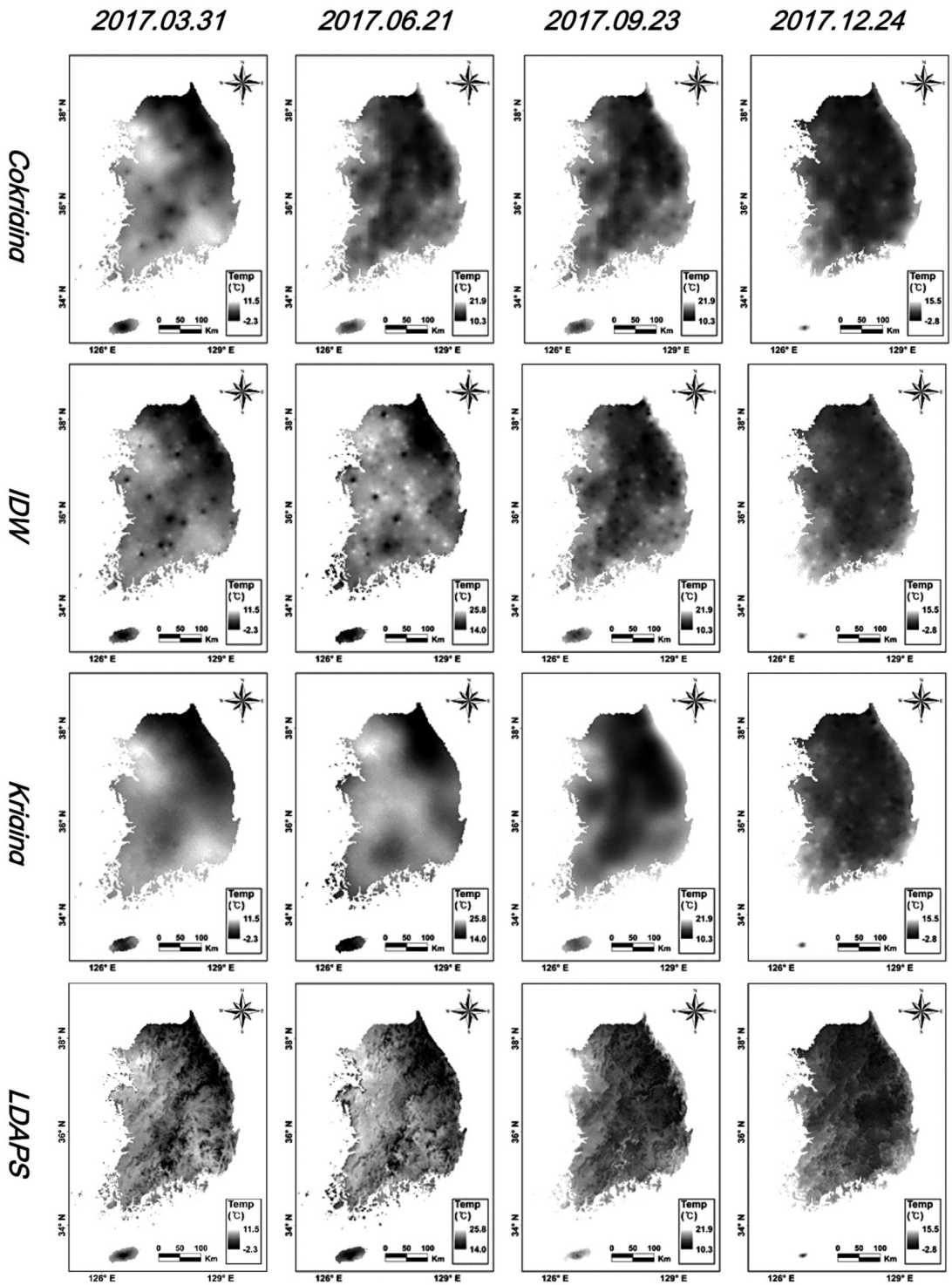


Figure 4. Grid climate data of instantaneous temperature generated by cokriging, IDW, kriging and LDAPS

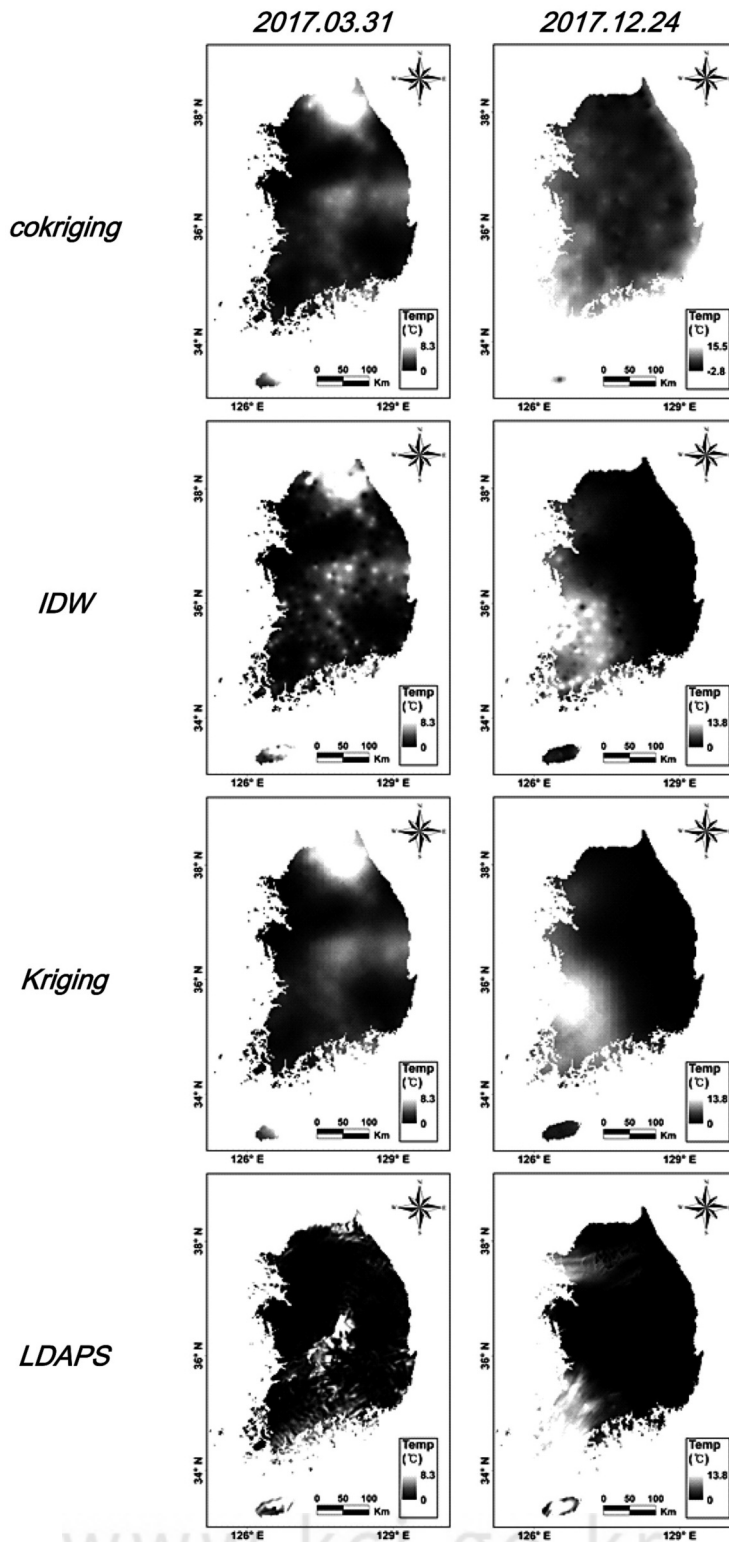


Figure 5. Grid climate data of 1-hr accumulated precipitation generated by cokriging, IDW, kriging and LDAPS

경향을 보였다. 3월 31일과 12월 24일의 1시간 누적 강수량에 대한 공동크리깅 예측값의 경우, 최대-최소 범위가 관측 최대-최소 범위보다 각각 1.1mm, 5.5mm 낮게 나타났고, IDW의 경우 각각 0.9mm, 6.1mm, 크리깅의 경우 각각 1.6mm, 6.7mm 낮게 나타났다. 즉, 3월 31일의 1시간 누적강수량에 대한 최대-최소 사이 범위 감소율은 공동크리깅 23%, IDW 19%, 크리깅 33%이며 12월 24일은 관측자료 최대-최소 사이 범위에 비해 각각 34%, 38%, 42%의 감소를 보였다. 1시간 누적강수량에 대한 공간보간 예측 평균값은 관측 평균값과 0.02~0.09mm 정

도로 미비한 차이를 보였다. 이러한 양상은 공간내삽의 결과로 검증 지점에서의 추정값의 공간적 연속성이 증가하는 통계적 내삽의 특징을 잘 설명해 주는 결과이다.

2. 통계적 공간내삽 격자기후자료와 LDAPS 격자기후자료 비교

1) 격자기후자료 생산 공간보간 기법별 비교

각 공간보간 기법별 예측 능력을 통계적으로 분석하기 위해 검증자료의 관측값과 예측값 사이의 편이

Table 4. Clusteral classification and comparison of temperature estimated by interpolation and observed in 2017.

Temperature (°C)			2017.03.31	2017.06.21	2017.09.23	2017.12.24
Cluster1	Cokriging	Bias	4.62	3.03	2.58	1.74
		RMSE	5.03	3.58	3.26	2.37
	IDW	Bias	4.18	3.09	2.34	1.72
		RMSE	4.79	3.49	3.01	2.35
	Kriging	Bias	5.71	3.98	2.65	1.72
		RMSE	5.96	4.38	3.29	2.32
	LDAPS	Bias	3.73	2.05	2.73	1.03
		RMSE	3.86	2.48	2.83	1.67
	Average	Bias	4.56	3.04	2.58	1.55
		RMSE	4.91	3.48	3.10	2.18
Cluster2	Cokriging	Bias	0.91	1.27	1.29	1.10
		RMSE	1.21	1.66	1.69	1.34
	IDW	Bias	0.97	1.23	1.15	1.03
		RMSE	1.27	1.63	1.57	1.29
	Kriging	Bias	1.13	1.23	1.22	1.12
		RMSE	1.43	1.64	1.59	1.39
	LDAPS	Bias	0.96	1.33	2.65	1.11
		RMSE	0.74	1.74	2.91	1.44
	Average	Bias	0.99	1.27	1.58	1.09
		RMSE	1.16	1.67	1.94	1.37
Cluster3	Cokriging	Bias	0.62	0.85	0.92	0.87
		RMSE	0.83	1.37	1.62	1.30
	IDW	Bias	0.69	0.82	1.15	1.04
		RMSE	1.04	1.09	2.33	1.44
	Kriging	Bias	0.71	0.81	1.09	0.97
		RMSE	0.98	1.04	2.30	1.36
	LDAPS	Bias	0.79	1.34	2.58	1.12
		RMSE	1.12	1.61	2.87	1.43
	Average	Bias	0.70	0.96	1.44	1.00
		RMSE	0.99	1.28	2.28	1.38

와 RMSE를 도출한 결과, 순간 온도에 대한 공동크리깅의 편이와 RMSE의 평균은 각각 1.07℃, 2.03℃, IDW의 경우 1.02℃, 1.53℃, 크리깅의 경우 1.03℃, 1.57℃로 기법별 뚜렷한 차이를 관찰할 수 없었다. LDAPS 격자기후자료의 편이와 RMSE는 각각 1.91℃, 2.83℃로, LDAPS 격자기후자료와 비교했을 때에도 전체적으로 모든 내삽기법에서 양호한 결과를 보였다. 따라서 군집별로 나누어 검증자료와 각 공간보간 결과 및 LDAPS 격자기후자료의 편이와 RMSE를 도출하였다(Table 4).

순간 온도에 대한 관측값과 공간보간 예측값 사이 편이는 평균적으로 고도와 경사가 낮아질수록 작아졌다. 군집 1 격자자료의 편이 평균값은 계절별로 각각 4.56℃, 3.04℃, 2.58℃, 1.55℃ 이었고 군집 2의 편이 평균값은 각각 0.99℃, 1.27℃, 1.58℃, 1.09℃ 이었다. 군집 3은 각각 0.70℃, 0.96℃, 1.44℃, 1.00℃의 편이를 보여, 고도가 낮아지고 경사가 완만해질수록 최소 0.6℃, 최대 4℃ 가량 편이가 낮아졌다. 순간 온도에 대한 격자기후자료의 산출 정확도는 계절에 따라서도 다르게 나타났는데 높은 고도에서의 겨울철 예측값 편이가 다른 계절에 비해 최소 0.84℃에서 최대 3.99℃ 가량 낮아, 고지대의 겨울철 예측 정확도가 비교적 높게 나타났다. 봄철 예측값 편이의 경우, 군집 1에서는 평균 4.84℃이며

고도가 낮아질수록 편이가 급격하게 줄어들어 군집 3의 봄철 예측값 편이는 1.03℃로 가장 낮았다(Figure 6(A)).

고도·경사와 정확도 사이 상관관계에 대한 경향성은 LDAPS 격자기후자료의 편이에서도 확인할 수 있었다. 높은 고도의 군집 1에서 최대 3.73℃(3월 31일)의 큰 편이를 보였으나, 동일 계절의 군집 3 편이는 0.79℃로 군집 1의 편이보다 약 2.94℃ 만큼 작아져, 고도와 경사가 낮아질수록 편이 값이 작아지는 경향이 나타났다. 이는 높은 고도에서는 관측지점의 분포 정도와 부변수의 영향으로 정확도가 크게 좌우되기 때문으로 추정된다(Park & Kim 2013). 또한 본 연구 자료의 관측 시기가 09:00임을 고려하면, 오전에 대기가 비교적 안정하여 토지 이용이 활발한 저지대에서도 지형 영향이 뚜렷하게 나타나 고도가 낮은 지역의 예측 정확도가 높은 것으로 사료된다(Shin et al, 1999).

LDAPS 격자기후자료의 군집 1 겨울철 예측값 편이는 1.03℃로써 동일 군집의 다른 계절에 비해 1~2℃ 정도 낮아, LDAPS 격자기후자료에서도 고지대의 겨울철 순간 온도에 대한 공간보간 예측 정확도가 다른 계절에 비해 비교적 높게 나타났다. 통계적 공간내삽 결과와 LDAPS 격자기후자료에서 공통적으로 고지대 겨울 예측 정확도가 다른 계절보다 비교

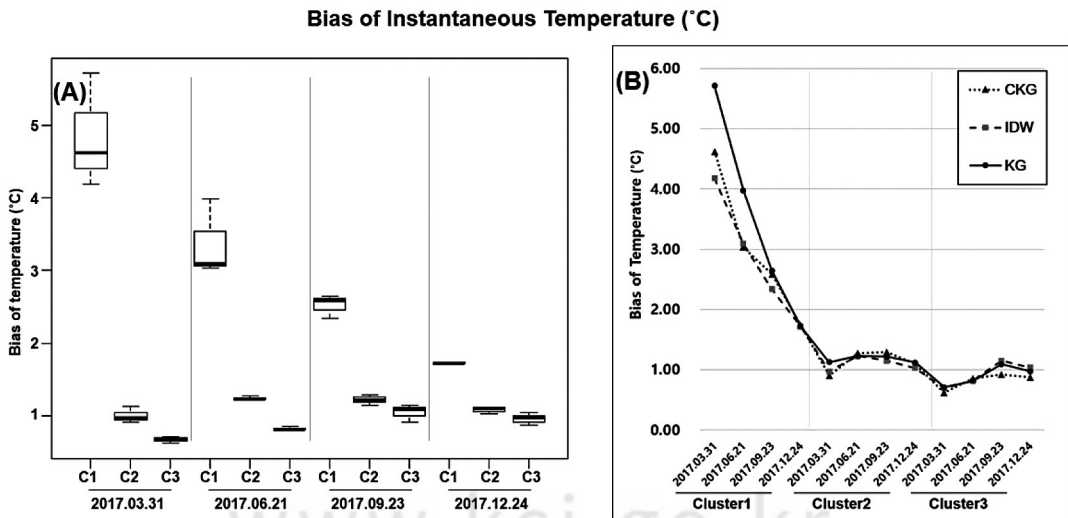


Figure 6. Bias of estimated instantaneous temperature expressed by expressed by boxplot (A) and line graph (B).

적 높게 나타났는데, 이는 GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 기온자료 추정 연구(Hong et al. 2007)의 K-PRISM 격자형 기온자료 산출 과정에서도 동일한 양상을 보였다. 이러한 결과는 겨울이 다른 계절에 비해 대기가 상대적으로 안정하고 건조하여 예측 능력이 비교적 높게 나타나기 때문이다.

각 내삽 기법별 편이를 단순 비교하였을 때, 크리깅보다는 공동크리깅과 IDW가 순간 온도에 대한 격자기후자료 산출에 유리하였다(Figure 6(B)). 모든 군집에서 순간 온도에 대한 공동크리깅 격자기후자료 예측값 편이가 크리깅을 적용한 예측값 편이보다

작았고, 특히 군집 1에서 그 차이가 가장 뚜렷하게 관찰되었다. 군집 1에서 공동크리깅과 크리깅의 기법별 편이가 최대 1.09℃ 차이를, 군집 2에서는 약 0.22℃, 군집 3에서는 약 0.12℃ 가량의 차이를 보였다. 따라서, 공동크리깅이 크리깅에 비해 해발고도가 높을수록 고도의 영향에 따른 기온 분포를 더 잘 나타내었음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 공동크리깅이 추가적인 변수로 고도를 반영하여 공간 보간을 수행하므로 크리깅에 비해 지형 효과를 반영한 보다 정확한 결과를 도출하였다고 판단할 수 있다.

Baek & Jang(2011)의 통계적 공간보간법 비교 연

Table 5. Cluster classification and comparison of precipitation estimated by Interpolation and observed in 2017

Precipitation (mm)		2017.03.31	2017.12.24	
Cluster1	Cokriging	Bias	0.50	0.83
		RMSE	0.63	1.54
	IDW	Bias	0.36	0.72
		RMSE	0.45	1.40
	Kriging	Bias	0.48	0.82
		RMSE	0.66	1.61
	LDAPS	Bias	0.83	0.75
		RMSE	1.15	1.53
	Average	Bias	0.54	0.78
		RMSE	0.72	1.52
Cluster2	Cokriging	Bias	0.41	0.50
		RMSE	0.50	1.10
	IDW	Bias	0.32	0.54
		RMSE	0.41	1.18
	Kriging	Bias	0.43	0.61
		RMSE	0.53	1.39
	LDAPS	Bias	0.82	1.58
		RMSE	1.08	3.26
	Average	Bias	0.50	0.81
		RMSE	0.63	1.73
Cluster3	Cokriging	Bias	0.33	1.03
		RMSE	0.58	1.90
	IDW	Bias	0.27	1.06
		RMSE	0.55	1.87
	Kriging	Bias	0.33	1.04
		RMSE	0.59	1.83
	LDAPS	Bias	0.28	1.65
		RMSE	0.76	3.15
	Average	Bias	0.30	1.20
		RMSE	0.62	2.19

구에서도 공동크리깅에 고도 자료를 추가하여 격자 자료의 정확도가 향상된 결과를 보고한 바 있다. 또한, 통계적 검증 결과 공동크리깅이 IDW에 비해 격자후자료 작성에 더 효과적이라고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 IDW와 공동크리깅 사이의 통계적 검증 차이는 10% 미만으로 큰 차이가 없었다. IDW와 공동크리깅의 편이 차이는 약 0.02~0.15℃ 사이로 그 차이가 작아 통계적 분석만을 고려하기에 다소 한계가 있었다. 공동크리깅과 IDW에서 군집별 편이 평균값 또한 군집 1에서 각각 2.99℃, 2.83℃, 군집 2에서 1.14℃, 1.10℃, 군집 3에서는 0.82℃, 0.93℃으로 약 10% 미만의 차이를 보였다. RMSE는 크리깅보다는 IDW와 공동크리깅의 RMSE 값이 평균적으로 약 0.3~2℃ 가량 작아 통계적으로 보다 정확한 격자형 기온자료 산출에 적합하다고 판단하였다. IDW와 공동크리깅의 RMSE값은 편이와 마찬가지로 시기와 군집에 따른 차이가 5% 내외로 매우 작아, 통계적으로 비교·분석하기에 한계가 있었다.

다음으로 1시간 누적강수량 격자후자료의 정확도 검증을 수행하였다. 군집을 고려하지 않고 단순히 공간보간 결과의 편이과 RMSE를 도출했을 때, 공동크리깅, IDW, 크리깅의 순서대로 편이는 3월 31일에 0.32mm, 0.11mm, 0.33mm, 12월 24일에 각각 0.83mm, 0.83mm, 0.89mm이었고, RMSE는 3월

31일에는 각각 0.53mm, 0.33mm, 0.53mm, 12월 24일에는 1.61mm, 1.58mm, 1.60mm 값이 도출되었다. 평균적으로 IDW의 편이와 RMSE 값이 공동크리깅과 크리깅에 비해 각각 0.15mm, 0.12mm 가량 작았고, 공동크리깅과 크리깅은 차이가 5% 내외로 큰 차이를 관찰할 수 없었다. 따라서 고도에 따른 각 공간보간 기법별 정확도를 검증하기 위하여, 군집별로 1시간 누적강수량에 대한 관측값과 각 내삽기법별 예측값의 편이와 RMSE 값을 도출하였다(Table 5).

1시간 누적강수량의 경우 순간 온도와 마찬가지로 고도가 낮아질수록 편이와 RMSE값이 작아지는 양상을 확인할 수 있었다(Figure 7(A)). 다만, 12월 24일의 군집 3의 편이와 RMSE값이 군집 2의 값에 비해 각각 0.5mm, 0.7mm 가량 더 높게 도출되었다. 이는 남서쪽 평지의 국지적인 강수 영향으로 인해 편이와 RMSE 상대적으로 높아진 것으로 보인다(Figure 5).

각 내삽기법별 1시간 누적강수량 예측 정확도는 IDW가 공동크리깅에 비해 군집 1에서 29%, 군집 2에서 21%, 군집 3에서는 18% 가량 더 높았고, 크리깅에 비해서는 군집 1, 2, 3에 대해 각각 25%, 25%, 18% 가량 더 높았다. 공동크리깅과 크리깅을 적용한 격자후자료의 예측값 편이 차이는 전반적으로 1~5% 사이로 차이가 미비했다(Figure 7(B)).

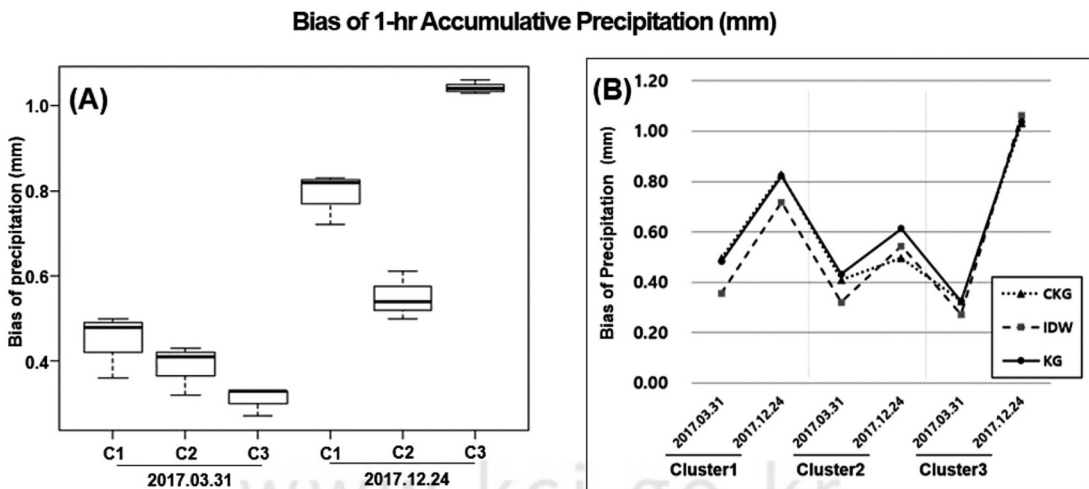


Figure 7. Bias of estimated 1-hr accumulative precipitation expressed by boxplot (A) and line graph (B).

2) 격자 기후자료 생산 공간보간 유역별 패턴 비교

통계적 내삽법을 적용한 격자기후자료의 유역별 패턴을 비교하기 위해 수자원단위지도를 바탕으로 우리나라를 4대 권역으로 나누어 유역 격자기후자료를 생성하였다(Supplementary Table 5-8). 본문에는 기법별 특성이 가장 잘 드러난 영산·섬진강 유역의 2017년 3월 31일 순간 온도 및 1시간 누적강수량 격자자료를 분석하였다(Figure 8).

영산강은 노령산맥과 전남 동부에서 남서 해안으로 전개되는 산계를 중심으로 수지상 하계망을 이루고, 섬진강유역은 소백·지리 산맥이 발달하여 고산준령으로 둘러싸여 있다(Oh 2007). 영산강 유역의 순간 온도의 경우, 노령산맥에서 남서 해안으로 이어지면서 고도가 낮아질수록 기온이 상승하는 패턴이 모든 격자기후자료에서 나타났으나, IDW의 경우 국지적으로 기온이 급변하는 양상이 나타나 기온 분포의 연속성이 잘 반영되지 않았고, 크리깅의 경우 내륙산지의 능선을 따라 나타나는 고도에 따른 기온 분포가 뚜렷하지 않았다. LDAPS 격자기후자료의 순간 온도 분포도에서 제주지역은 고도가 높아짐에 따라 기온이 낮아지는 패턴이 뚜렷하게 나타나는데, 이러

한 분포 패턴은 공동크리깅과 IDW의 결과에서는 확인되지만 크리깅의 경우 동심원의 형태로 형성되는 고도로 인한 기온 감률 패턴을 관찰하기 어려웠다(Figure 8).

통계적 공간보간을 적용한 격자기후자료과 LDAPS 격자기후자료에서 나타나는 순간 온도 분포패턴의 정확도를 비교하기 위해 영산강 유역 검증지점의 관측 평균값과 격자기후자료의 예측 평균값 및 최대·최소값이 관측된 지점에서의 관측값과 예측값을 비교하였다. 이 후 공간보간 결과와 LDAPS 격자기후자료 사이에 상이한 차이를 보이는 지점을 선정하여(Figure 9) 관측값과 공간보간 결과의 예측값을 비교·분석하였다(Table 6).

순간 온도에 대한 검증지점의 공동크리깅 예측값 평균은 8.3℃, IDW와 크리깅 격자기후자료의 예측 평균값은 8.2℃로 관측 평균값과 거의 유사하였다.

영산강 유역 내 검증지점의 최대 순간 온도는 순천(광주지방기상청)지역으로 10.5℃를, 최소값은 진달래밭(제주기상청)지역의 -0.5℃로 관측되었다. 그러나 모든 격자기후자료에서 동일 지점의 예측 최대값은 관측값보다 낮아지고 최소값은 높아졌다. 최대값

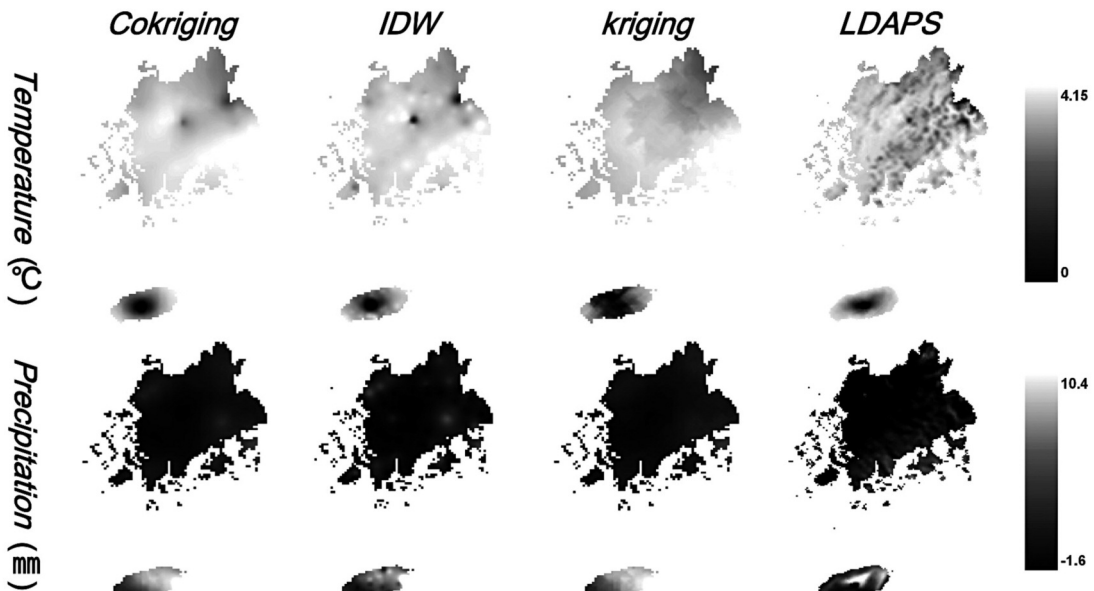


Figure 8. Instantaneous temperature and 1-hr cumulative precipitation grid data of Yeongsangang River Basin on March 31th.

Table 6. Maximum, minimum and average value of observed and estimated temperature at Yeongsangang River Basin

Temperature (°C)	Observed	Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS
Sungsamjae	1.3	5.8	4.3	7.7	0.0
Mudeungsan	1.7	6.9	5.2	8.5	6.1
Suncheon (Max)	10.5	8.6	8.6	8.7	7.4
Jindo	5.4	7.7	6.8	8.4	7.0
Daehul	8.4	7.3	6.6	6.7	8.0
Jindalaebat (min)	-0.5	3.5	2.7	5.2	-1.6
Average	8.6	8.3	8.2	8.2	8.2

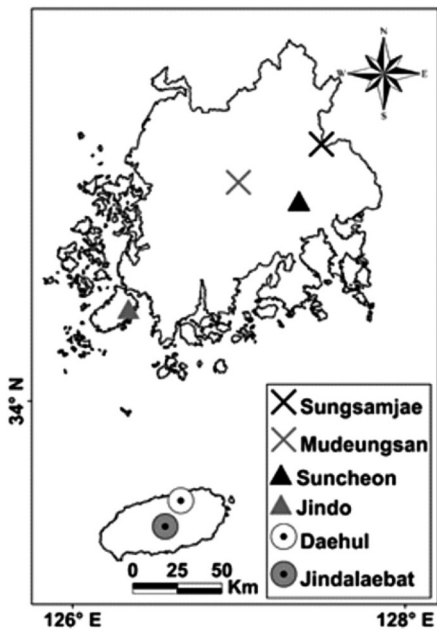


Figure 9. Six observed spots in Yeongsangang River Basin.

은 관측값에 비해 공동크리깅 11.4%, IDW 9.5%, 크리깅 15.2% 가량 낮아졌으며, 최소값은 공동크리깅 29.9%, IDW 20.6%, 크리깅 33.6% 가량 높아졌다. 영산강 유역 내 검증지점에서 순간 온도에 대한 관

측값과 LDAPS 격자기후자료의 예측값 및 공간보간 예측값의 차이를 비교했을 때, 관측값과 가장 가까운 예측값을 도출하는 공간보간 기법은 IDW로 평균적으로 약 7.1%의 차이를 보였고 공동크리깅과 크리깅의 예측값은 관측값과 각각 8.4%, 11.6%의 차이가 났다. 그러나 LDAPS 격자기후자료와 가장 가까운 예측값을 도출하는 공간보간 기법은 공동크리깅으로 약 7.8%의 차이를 보였고 IDW와 크리깅의 예측값은 LDAPS 격자기후자료의 예측값과 각각 9.5%, 9.7%의 차이를 나타냈다.

영산강 유역의 1시간 누적강수량 분포 패턴을 비교했을 때, 공동크리깅과 크리깅 예측 결과에서 강수가 제주 동쪽 지역에 집중되어 있고 서쪽으로 갈수록 점점 줄어드는 패턴이 공통적으로 나타났다. 특히, 공동크리깅과 크리깅의 결과에서는 LDAPS 격자기후자료와 달리 동서 방향으로 강수량이 낮아지는 정도가 완만하게 나타나 국지적인 강수 영향을 관찰하기 어려웠다. 그에 반해 IDW를 적용한 경우, 제주 동쪽 지역에서 국지적 강수가 뚜렷하게 관찰된다. Jang et al.(2015)의 연구에서는 베리오그램 모델링을 통해 비교적 건조한 봄·겨울에 고도와 강수의 상관성이 상대적으로 높으나 강수량이 많아질수록 상

Table 7. Observed and Estimated value of 1-hr accumulative precipitation at eight spots in Jeju region

Precipitation (mm)	Observed	Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS
SungsamJae	0.0	0.2	0.2	0.3	0.0
Mudeungsan	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
Suncheon	0.0	0.5	0.9	0.3	0.2
Jindo	0.9	0.3	0.5	0.2	0.0
Daehul	0.0	1.6	1.3	1.7	1.2
Jindalaebat	1.5	1.5	1.4	1.4	0.0

관성이 낮아지는 것을 확인한 바 있다.

1시간 누적강수량은 최대, 최소, 평균값을 비교하기에 값이 작아 한계가 있었으므로 영산강 유역 내 지도상에서 큰 분포 패턴 차이를 보이는 2개 지점(대흘, 진달래밭)에서의 관측값과 공간보간 예측값을 비교하였다(Table 7).

관측값과 가장 유사하게 예측하는 공간보간법은 IDW로서 편이가 0.3mm로 가장 작았고, 공동크리깅과 크리깅의 예측값 편이는 각각 0.8mm, 0.6mm이었다. 특히 공동크리깅과 크리깅의 결과는 지도상에서 매우 유사한 강수분포 패턴을 보였는데, 두 공간내삽 예측값의 차이 또한 3% 내외였다. 이는 공동크리깅을 적용한 강수량 분포도 작성에 고도자료의 지형효과가 반영되지 못한 것으로 사료된다. Hong et al.(2007)의 제주 공간화 연구에서는 봄·여름 강수 분포도 작성에 고도 외 사면방향 또한 주요 환경변수임을 보고한 바 있다. 본 연구에서도 강수량 예측 시, 해발고도가 결정적인 환경요인이 아닌 것을 확인하였다. 따라서 보다 정확도 높은 강수량 격자기후자료를 생성하기 위하여 고도 외 해안선으로부터의 거리, 토지피복, 사면 방향 등 다른 환경 요인을 고려해야 할 것으로 사료된다.

지도상에서 LDAPS 격자기후자료와 큰 차이를 보이는 지역은 제주의 대흘, 진달래밭으로 LDAPS 격자기후자료에서는 한라산 근처에서 강수량이 높게 나타났고 고도가 낮아질수록 강수량은 급격하게 낮아졌다. 그리고 동쪽 해안에 국지적인 강수가 관찰되며 그 외 지역은 전체적으로 강수가 낮게 예측되었다. 그러나 공동크리깅과 크리깅의 결과에서는 이러한 강수 패턴을 확인하기 어려웠고, IDW의 경우 한라산 부근과 제주 동쪽 지역에서 강수가 높게 나타났으나 LDAPS 격자기후자료보다 더 넓은 범위에서 예측되었다.

2개 지점의 관측값과 공간보간 예측값을 비교한 결과, LDAPS 격자기후자료 예측값은 관측값과 1.0mm의 상이한 결과를 보였다. 이러한 예측 오류는 LDAPS 격자기후자료 생성 시 전지구모델로부터 경계장을 제공받아 모델링을 수행하는 과정에서 비롯된 것으로 보인다. IDW를 적용한 결과는 LDAPS

격자기후자료에 비해 예측 오차가 약 60% 가량 낮아져 가장 정확도가 높았고 공동크리깅과 크리깅의 예측 오차는 LDAPS 격자기후자료에 비해 각각 43%, 37% 감소하였다.

V. 결론

고해상도 격자기후자료 생성에는 점자료로 제공되는 기후관측자료의 내삽 과정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 남한의 고해상도 격자기후자료를 구축하기 위하여 순간 온도 및 1시간 누적강수량 관측자료와 DEM을 이용하여 다양한 통계적 공간내삽기법의 적용성을 평가하고자 하였다. 우리나라 일기예보의 기초자료가 되는 역학적 내삽 기반 LDAPS 격자기후자료와 비교하여 통계적 공간내삽 정확도를 평가함으로써 추후 기후변화 정책 연구에 활용할 수 있는 남한의 격자기후자료 구축 가능성을 모색했다는 점에서 의의가 있다.

첫째, 공동크리깅, IDW, 크리깅을 적용한 격자기후자료의 예측값과 관측값을 비교한 결과, 예측값과 관측값의 평균은 유사하였으나 공간보간 예측 최대-최소값 사이의 범위가 관측 최대-최소값 사이의 범위보다 낮게 나타났다. 이는 통계적 공간내삽 과정에서 검증지점에서의 공간 연속성이 증가된 결과에 기인한다.

둘째, 순간 온도의 공간보간 산출 정확도는 고도·경사가 낮아질수록 높아졌다. 이는 LDAPS 격자기후자료에서도 동일하게 나타났다. 고도가 높은 산지지역은 연구에 채택하는 관측자료의 분포 정도에 따라 결과가 상이하고, 부변수의 영향을 얼마나 고려하는가에 의해 정확도가 크게 좌우된다. 고도·경사가 낮은 지역은 대부분 토지 이용이 활발하여 상대적으로 지형인자의 기온 결정력이 약하지만, 오전에는 비교적 대기가 안정되어 지형 영향이 뚜렷하여 저지대의 순간 온도 예측정확도가 높은 것으로 보인다. 고지대 겨울 예측 정확도는 다른 계절보다 비교적 높았는데, 이는 겨울철 대기가 상대적으로 안정하여 예측 능력이 향상된 결과로 사료된다.

셋째, 순간 온도 격자기후자료 작성 시, 지형효과

를 반영한 공동크리깅의 정확도가 크리깅에 비해 대폭 향상되었고, LDAPS 격자기후자료와 비교하였을 때에도 공동크리깅이 크리깅보다 LDAPS 격자기후자료와 더욱 유사한 분포 결과를 보였다. 따라서 온도 분포도 작성 시, 공동크리깅에 관측자료와 함께 고도 등의 환경변수를 추가함으로써 격자자료의 정확도를 향상시킬 수 있는 것으로 보인다.

넷째, 공동크리깅과 크리깅을 적용한 1시간 누적 강수량 격자자료 분포 패턴이 매우 유사하였고 통계 검증 차이 또한 3% 미만이었다. 이는 강수 분포도 작성에 부변수로 활용한 고도의 지형효과가 반영되지 못하여 두 공간내삽의 결과가 유사하며 지역적으로 평활한 분포 양상을 보이는 것으로 사료된다. 이에 반해 IDW 결과와 LDAPS 격자기후자료를 비교한 결과, 남한 등 비교적 작은 공간 범위에서는 IDW가 국지적인 강수 영향을 비교적 잘 나타내었다고 판단하였다.

결과적으로 기온 분포도 작성에는 공동크리깅이, 강수 분포도 작성에는 IDW가 더 나은 결과를 보여주었다. 그러나 기온과 강수 분포가 일별·시간별 날씨 패턴에 의존적이라는 점을 고려할 때, 연구를 통해 도출한 격자기후자료의 분포 패턴을 일반화하여 해석하기에는 연구 시기 범위가 한정적이므로 장기간 관측자료에 대한 추가 연구가 필요하다. 계절과 지역 특성에 따라 기온과 강수량의 시공간적 상관성 및 고도 외 환경변수와의 연관성 정도가 바뀔 수 있다는 점을 고려하면, 토지피복, 사면, 해안선으로부터의 거리 등 다양한 환경 변수와 기후의 상관관계에 대한 추가 연구를 통해 본 연구에서 적용한 통계적 공간보간 기법에 대한 추가적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 “기상See-At기술개발사업(KMIPA2015-6140)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ann C, Ewa D, Carl K, Bill A, Ian F, Veronika N, Jason L, Alex S, Arie S, Bob D, Dean W, Don M. 2003. High-performance remote access to climate simulation data: a challenge problem for data grid technologies. *Parallel Computing*. 29: 1335-1356.
- Baek GH, Lee MG, Kang BJ. 2011. Development of Spatial Statistical Downscaling Method for KMA-RCM by Using GIS. *The Korean Association of Geographic Information Studies*. 14(3): 136-149. [Korean Literature]
- Baek SG, Jang DH. 2011. Evaluation for Applicability of Cokriging for High Resolution Spatial Mapping of Temperature and Rainfall, *Climate Research*. 6(3): 242-253. [Korean Literature]
- Bruno AW, Joslin LM. 2005. The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance. *Ecography*. 28: 815-829.
- Chun SH, Kim CB, Kim WR, Park SG, Chae SK. 2015. Analysis of Stream Environmental Assessment Systems in Korea : Focus on the Biological Aspect, Ecology and Resilient Infrastructure. 2(2): 108-117.
- Creutin JD, Delrieu G, Lebel T. 1988. Rain measurement by raingage-radar combination: a geostatistical approach. *Journal of Atmospheric and Pceanic Technologies*. 5: 102-115.
- Daly C, Helmer EH, Maya Q. 2003. Mapping the Climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra. *International Journal of climatology*. 23: 1359-1381.
- Daly C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *Int.*

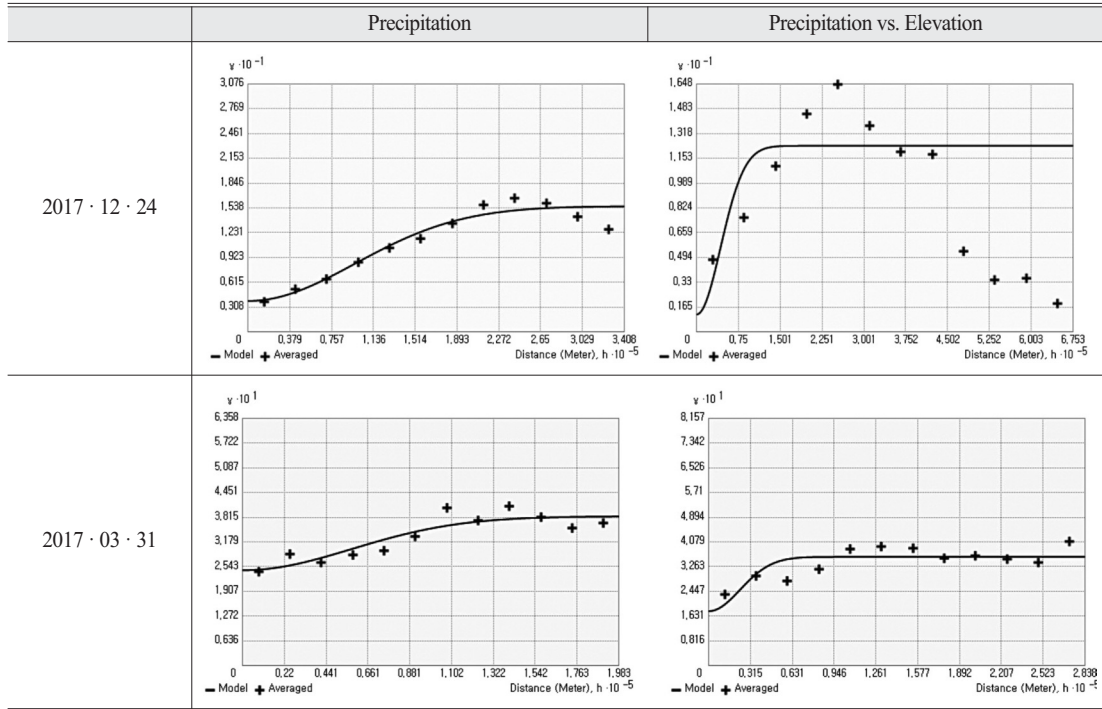
- J. Climatol. 26: 707-721.
- Girish P, David WS. 1983. Cluster Analysis in Marketing Research: Review and Suggestions for Application. *Journal of Marketing Research*. 20(2): 134-148.
- Hong KO, Suh MS, Rah DK, Chang DH, Kim CS, Kim MK. 2007. Estimation of High Resolution Gridded Temperature Using GIS and PRISM. *Atmosphere*. 17(3): 255-268. [Korean Literature]
- Hwang SH, Ham DH. 2013. Evaluation of Spatial Downscaling Methods for Enhancement of Spatial Precipitation Estimation. *Journal of KOSHAN*. 13(4): 149-163. [Korean Literature]
- Jang DH, Wi NS, Park NW. 2015. High-resolution Spatial Mapping and Evaluation of Temperature and Rainfall in South Korea using a Simple Kriging with Local Mean. *Climate Research*. 10(2): 165-182. [Korean Literature]
- Jeong JJ, Choi YG. 2011. Study on Interpolation Methods to Generate GIS-based Climate Maps. *Climate Research*. 6(2): 159-170. [Korean Literature]
- Jin MJ, Park SY. 2015. Temperature Changes of Climatic Solar Terms and Their Spatiotemporal Characteristics in South Korea. *The Korean Geographical Society*. 50(1): 23-36. [Korean Literature]
- Kim JP, Lee WS, Cho HG, Kim GS. 2014. Estimation of High Resolution Daily Precipitation Using a Modified PRISM Model. *Korean Society of Civil Engineers*. 34(4): 1139-1150. [Korean Literature]
- KMA. 2017. 11-1360395-000252-01
- KMA. 2017. 11-1360000-000002-06
- Kim YS, Shim KM, Jung MP, Choi IT. 2014. Accuracy Comparison of Air Temperature Estimation using Spatial Interpolation Methods according to Application of Temperature Lapse Rate Effect. *The Korean Society of Climate Change Research*. 5(4): 323-329. [Korean Literature]
- Miquel N, Xavier P, Joan MR. 2007. Objective air temperature mapping for the Iberian Peninsula using spatial interpolation and GIS. *Int. J. Climatol*. 27: 1231-1242.
- Park JC, Kim MK. 2009. A Study on the Use of a Terrain Aspect Variable in Producing the Precipitation Distribution Map applying Cokriging: A Case of Jeju Island. *Journal of the Korean Geomorphological Association*. 16(3): 59-66. [Korean Literature]
- Park JC, Kim MK. 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. [Korean Literature]
- Park NW, Jang DH. 2008. Mapping of Temperature and Rainfall Using DEM and Multivariate Kriging. *The Korean Geographical Society*. 43(6): 1002-1015. [Korean Literature]
- Park NW, Jang DH. 2011. Use of Space-time Autocorrelation Information in Time-series Temperature Mapping. *The Korean Association of Regional Geographers*. 17(4): 432-442. [Korean Literature]
- Park SJ. 2014. Generality and Specificity of Landforms of the Korean Peninsula, and Its Sustainability. *The Korean Geographical Society*. 49(5): 656-674. [Korean Literature]
- Stephen EF, Robert JH. 2017. WorldClim2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol*. 37: 4032-4315.

부록

Supplementary Table 1. Variogram and cross variogram with elevation of temperature in 2017; the variogram modeling was performed using ArcGIS ver. 10.3.1 Geostatistical Analyst program, and Gaussian models were applied to all variograms in the study area as the variogram values slowly changed. Among 5 repetitive actions, 3rd replicates were tabulated

	Temperature	Temperature vs. Elevation
2017 · 12 · 24		
2017 · 09 · 23		
2017 · 06 · 21		
2017 · 03 · 31		

Supplementary Table 2. Variogram and cross variogram with elevation of precipitation in 2017; the variogram modeling was performed using ArcGIS ver. 10.3.1 Geostatistical Analyst program, and Gaussian models were applied to all variograms in the study area as the variogram values slowly changed. Among 5 repetitive actions, 3rd replicates were tabulated



Supplementary Table 3. Cross-validation of five cases performed via three geo-statistical spatial interpolation on temperature; bias and RMSE of cokriging results are lower than those of other spatial interpolation methods.

Temperature (°C)			2017.03.31	2017.06.21	2017.09.23	2017.12.24
Event1	Cokriging	Bias	0.91	1.21	0.99	0.92
		RMSE	1.52	2.58	1.37	1.15
	IDW	Bias	1.02	1.24	1.07	0.97
		RMSE	1.69	2.58	1.40	1.27
	Kriging	Bias	1.09	1.22	0.95	0.95
		RMSE	1.77	2.60	1.31	1.25
Event2	Cokriging	Bias	1.10	1.24	0.97	0.95
		RMSE	1.98	2.60	1.37	1.38
	IDW	Bias	1.38	1.25	0.98	1.10
		RMSE	2.46	2.61	1.37	1.63
	Kriging	Bias	1.43	1.25	0.98	0.99
		RMSE	2.54	2.61	1.37	1.42
Event3	Cokriging	Bias	0.86	1.01	1.03	0.94
		RMSE	1.47	1.41	1.43	1.33
	IDW	Bias	0.83	1.04	1.41	1.06
		RMSE	1.40	1.46	3.26	1.42
	Kriging	Bias	1.06	1.07	1.51	1.04
		RMSE	1.78	1.46	3.31	1.41
Event4	Cokriging	Bias	0.86	0.95	1.31	1.19
		RMSE	1.52	1.35	2.84	2.12
	IDW	Bias	0.85	0.95	1.33	1.22
		RMSE	1.54	1.32	284	1.80
	Kriging	Bias	1.03	1.07	1.01	1.23
		RMSE	1.72	1.63	1.54	1.83
Event5	Cokriging	Bias	0.86	1.04	1.39	0.86
		RMSE	1.30	1.38	3.42	1.17
	IDW	Bias	0.96	1.00	1.28	0.97
		RMSE	1.52	1.36	2.67	1.27
	Kriging	Bias	1.04	1.09	1.26	0.91
		RMSE	1.66	1.45	2.64	1.21

Supplementary Table 4. Cross-validation of five cases performed via three geo-statistical spatial interpolation on precipitation; bias and RMSE of IDW results are lower than those of cokriging and kriging results, which show almost same values.

Precipitation (mm)			2017.03.31	2017.09.23
Event1	Cokriging	Bias	0.35	0.94
		RMSE	0.53	1.63
	IDW	Bias	0.10	0.81
		RMSE	0.30	1.58
	Kriging	Bias	0.35	0.87
		RMSE	0.53	1.65
Event2	Cokriging	Bias	0.38	0.68
		RMSE	0.76	1.23
	IDW	Bias	0.32	0.61
		RMSE	0.74	1.17
	Kriging	Bias	0.38	0.67
		RMSE	0.75	1.29
Event3	Cokriging	Bias	0.43	1.02
		RMSE	0.69	2.37
	IDW	Bias	0.37	0.93
		RMSE	0.65	2.22
	Kriging	Bias	0.44	1.00
		RMSE	0.71	2.36
Event4	Cokriging	Bias	0.31	0.97
		RMSE	0.46	1.88
	IDW	Bias	0.29	0.84
		RMSE	0.47	1.88
	Kriging	Bias	0.31	0.97
		RMSE	0.46	1.93
Event5	Cokriging	Bias	0.32	0.97
		RMSE	0.46	2.33
	IDW	Bias	0.30	0.89
		RMSE	0.47	2.20
	Kriging	Bias	0.32	0.92
		RMSE	0.50	2.33

Supplementary Table 5. Gridded climate data of Instantaneous temperature and 1-hr cumulative precipitation at Hangang River Basin in 2017.

Hangang River		Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS	
Temperature (°C)	03 · 31					11.5 -2.2
	06 · 21					25.8 15.6
	09 · 23					21.7 10.3
	12 · 24					10.1 -2.8
Precipitation (mm)	03 · 31					3.0 0
	12 · 24					6.0 0

Supplementary Table 6. Gridded climate data of Instantaneous temperature and 1-hr cumulative precipitation at Geumgang River Basin in 2017.

Geumgang River		Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS	
Temperature (°C)	03 · 31					
	06 · 21					
	09 · 23					
	12 · 24					
Precipitation (mm)	03 · 31					
	12 · 24					

Supplementary Table 7. Gridded climate data of Instantaneous temperature and 1-hr cumulative precipitation at Nakdonggang River Basin in 2017.

Nakdonggang River		Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS	
Temperature (°C)	03 · 31					11.5 -2.3
	06 · 21					25.1 14
	09 · 23					21.6 10.7
	12 · 24					12.5 -1.8
Precipitation (mm)	03 · 31					5.5 0
	12 · 24					1.5 0

Supplementary Table 8. Gridded climate data of Instantaneous temperature and 1-hr cumulative precipitation at Yeongsangang River Basin in 2017.

Yeongsangang River		Cokriging	IDW	Kriging	LDAPS	
Temperature (°C)	03 · 31					
	06 · 21					
	09 · 23					
	12 · 24					
Precipitation (mm)	03 · 31					
	12 · 24					