

수치표고모델과 다변량 크리깅을 이용한 기온 및 강수 분포도 작성

박노옥* · 장동호**

Mapping of Temperature and Rainfall Using DEM and Multivariate Kriging.

No-Wook Park* · Dong-Ho Jang**

요약 : 이 논문에서는 기상관측소의 기온 및 강수 관측치를 이용한 공간적 분포도 작성에 수치표고모델(DEM)과 다변량 크리깅의 적용 가능성을 검토하였다. 기온 및 강수와 상관성을 가지면서 연구지역의 모든 지점에서 값을 제공하는 고도자료를 분포도 작성에 이용함으로써, 미관측 지점에서의 정보 부재 효과를 완화하면서 지형효과를 잘 반영하는 분포도를 작성하고자 하였다. 제주도 지역의 2005년 1월, 4월, 8월 및 10월의 월평균기온 및 월강수량 분포도 작성 사례 연구를 통해, 고도자료를 공동 크리깅에 의해 통합하였을 때 평활화 효과를 완화하면서 지형효과를 잘 반영하는 기온 및 강수 분포도 작성이 가능하였다. 또한 다변량 지구통계 기법인 정규 크리깅과 비교하였을 때, 보다 향상된 예측 능력을 나타내었다. 부가적으로 고도자료와의 상관성이 높을수록, 상대적 너겟 효과가 적을수록 예측 능력이 향상됨을 확인할 수 있었다.

주요어 : 크리깅, DEM, 기온, 강수

Abstract : We investigate the potential of digital elevation model and multivariate geostatistical kriging in mapping of temperature and rainfall based on sparse weather station observations. By using elevation data which have reasonable correlation with temperature and rainfall, and are exhaustively sampled in the study area, we try to generate spatial distributions of temperature and rainfall which well reflect topographic effects and have less smoothing effects. To illustrate the applicability of this approach, we carried out a case study of Jeju island using observation data acquired in January, April, August, and October, 2005. From the case study results, accounting for elevation via colocated cokriging could reflect detailed topographic characteristics in the study area with less smoothing effects. Colocated cokriging also showed much improved prediction capability, compared to that of traditional univariate ordinary kriging. According to the increase of the magnitude of correlation between temperature or rainfall and elevation, much improved prediction capability could be obtained. The decrease of relative nugget effects also resulted in the improvement of prediction capability.

Key Words : kriging, digital elevation model, temperature, rainfall

* 인하대학교 지리정보공학과 조교수(Assistant Professor, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University), nwpark@inha.ac.kr

** 공주대학교 지리학과 조교수(Assistant Professor, Dept. of Geography, Kongju National University), gisrs@kongju.ac.kr

1. 서론

기온, 강수 등의 기상 관측 자료는 다양한 유형의 수치 및 기후모델의 검증자료로 사용될 뿐만 아니라 일기예보와 기후변화 연구의 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 기상청에서는 상세한 기상정보를 제공하기 위하여 디지털예보시스템을 운영 중에 있으며, 이를 위해 기존의 정성적이고 광역 위주의 예보 대신 정량적이고 격자화된 기온 및 강수분포도가 이용되고 있다.

관측자료를 이용한 일기예보 및 기후변화 연구에서 문제가 되는 것은 기존 관측자료 획득의 기간이 짧고, 관측소가 공간적으로 비균질하게 분포한다는 점이다. 공간적으로 비균질하게 분포하는 관측자료를 이용하여 수치 또는 기후모델의 초기화나 검증을 하기 위해서는 반드시 규칙적인 격자점상의 값으로 내삽하는 기법이 필요하다(홍기욱 등, 2007). 특히 최근에는 컴퓨터 기술의 발달, 고해상도 지리정보의 구축 등으로 지리학, 수문학, 농업기상 및 대기환경분야에서의 고해상도 격자형 기상 및 기후자료의 필요성이 점차 증대되고 있다.

우리나라는 지형이 복잡하고 몬순의 영향을 받아 대부분의 기상요소의 시·공간적 변동성이 크기 때문에 국지적인 기후특성을 정량적으로 분석하기 위해서는 많은 수의 관측소가 필요하다. 현재 기상청은 한반도의 지상 기상관측을 위해 유인 기상관측소와 AWS(Automatic Weather System)를 운영하고 있다. 하지만 이들 관측지점들은 지리적으로 특정지역에 집중되어 있거나, 고도 300m 이하의 고도에 대부분 분포하고 있어서 국지적인 기후특성을 정량적으로 분석하기에는 어려움이 많다. 따라서 국지기후 특성을 분석할 수 있는 격자형 기후자료 산출을 위해 관측자료와 해발고도, 지면 피복상태, 수륙분포 등의 부가적인 지리적 인자를 고려한 분석기법 개발이 필요하다(홍기욱 등, 2007).

일반적인 주제도 작성을 위해서는 공간적으로 산재되어 있는 샘플 자료를 내삽하는 방식을 많이 이용하여 왔다. 그러나 샘플링이 되지 않은 위치에서의 값을

추정하는 단계에서 불확실성이 존재하게 된다. 만약 샘플 자료와 적절한 수준의 상관성을 보이면서, 공간적으로 많은 위치에서 자료 획득이 가능한 부가자료를 내삽 과정에 포함시킨다면, 샘플 자료의 공간적인 부재에 의한 불확실성 효과를 줄일 수 있게 된다. 이러한 관점에서 원격탐사 자료나 GIS 주제도는 유용하게 사용될 수 있다. 기존 연구에 많이 적용되어온 최소거리 내삽법이나, 불규칙 삼각망 기법과 달리 지구통계학적 크리깅은 이러한 부가자료를 크리깅 시스템에 통합시킬 수 있는 일종의 이론적 틀을 제공할 수 있다(Goovaerts, 1997).

외국에서는 강수분포도 작성을 위해 부가정보로 기상 레이더 자료를 이용하거나(Creutin *et al.*, 1988; Hevesi *et al.*, 1992), 토양수분도 작성에 Radarsat 자료를 이용하였다(Glenn and Carr, 2003). 또한 Daly *et al.*(2003)은 고도, 지향면, 해양도 등의 여러 기후인자를 PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 모델로 통합하여 격자형 기후자료를 산출하였다. 이밖에도 GIS를 활용하여 기상요소의 기후도를 산출하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다(Ninyerola *et al.*, 2000; Perry and Konrad, 2006). 이 외에도 지구통계학과 부가자료를 이용한 연구로는, 토양 유기물 분포도 작성 연구(Simbahan *et al.*, 2006), 지하수에 포함된 화학 성분 분포도 작성 연구(Goovaerts *et al.*, 2005), 지하수 수리전도도 작성 연구(Patriarche *et al.*, 2005) 등이 보고되었다.

국내에서 Park *et al.*(2008)은 입도분포도 작성을 위해 고해상도 IKONOS 자료와 입도자료와의 상관성을 다중 가우시안 크리깅을 이용하여 통합함으로써, 기존 현장조사 자료만을 이용하였을 경우와 비교하여 높은 예측 정확도를 얻을 수 있었다. 또한 홍기욱 등(2007)과 신성철 등(2008)은 GIS와 PRISM 모델을 이용하여 각각 기온 및 강수분포도를 작성하였다. 이외에도 정상용·이강근(1995)은 수치표고자료와 공동 크리깅을 이용하여 지하수위 분포도를 작성하였으며, 오석훈(2005)은 암반등급 해석을 위해 전기비저항 및 자기지전류 탐사자료를 시추자료와 함께 크리깅을 이용하여 통합하여 광역적인 지질조건을 보다 현실적으로 반영

하는 압반등급 분포도를 작성하였다.

이 연구에서는 보다 지형효과를 잘 반영할 수 있는 기온과 강수분포도 작성을 위해 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM)과 지구통계학적 크리깅의 적용 가능성에 대해서 논의하고자 하였다. 특히 지리적 기후인자 중 해발고도는 기온 및 강수와 밀접한 관련성이 있어서 정량적인 기후자료 산출을 위해 반드시 필요한 변수이다. 본 연구에는 기상관측 자료인 기온, 강수자료와 1:250,000 축척의 지세도로부터 추출한 DEM을 이용하여 계절별 기온 및 강수분포도를 작성하였다. 지구통계학적 크리깅 방법론으로는 단일 변량을 공간 추정에는 정규 크리깅(ordinary kriging)을, DEM의 통합에는 공동 크리깅(cokriging)을 각각 적용하였다. 최종적으로는 제주도의 주요 계절에 대한 월평균기온 및 월강수량 분포도 작성 사례 연구를 통해 지구통계학적 크리깅의 적용가능성에 대해 논의하였다.

역은 비슷한 연평균기온 분포 경향을 보인다. 연강수량은 1,438.4mm로서 대부분의 한반도 내륙 지역 보다 200~500mm 더 많으며, 특히 북서 사면에 위치한 제주와 고산에 비하여 남동 사면의 서귀포와 성산의 강수량이 1,800mm 이상으로 훨씬 많다(김성수 등, 2006). 이는 남서기류와 남동기류가 유입될 때 강수량이 많기 때문이다. 해발 1,950m의 한라산은 제주도의 지역별 기후특성에 미치는 영향이 크며, 특히 사면별 기후특성이 다양하여 남·북 사면 간의 기후차이가 뚜렷하다(기상연구소, 2004).

연구에 사용된 DEM 자료는 1:250,000 지세도에서 등고선, 해안선, 수준점 등을 이용하여 산출하였으며, 공간해상도는 100m×100m 자료이다. 월평균기온과 월강수량 자료는 2005년도 제주도 지역의 기상관측소 및 AWS 자료를 이용하였는데, 그 중 본 연구에서는 1월, 4월, 8월, 10월 등 사계절에 대해서만 사용하였다.

2. 연구지역 및 사용자료

제주도의 기후는 산간지방을 제외한 전 지역이 겨울철에 온화하고 강수량이 비교적 고르게 내리는 아열대 습윤기후에 해당된다(이승호, 1999). 특히, 제주도의 연평균기온은 15.6℃로 해양의 영향을 받아 전국에서 가장 온화하며, 다른 지역에 비해 기온변화가 작다. 연평균기온은 남사면의 서귀포가 가장 높으며, 다른 지

표 1. 제주도 지역 2005년 1월, 4월, 8월, 10월 관측된 기온 및 강수량 관측자료 기본 통계값

		1월	4월	8월	10월
기온(℃)	최소값	-3.90	10.6	20.7	10.7
	평균값	3.11	13.8	25.8	17.4
	최대값	5.80	15.4	27.9	19.7
강수(mm)	최소값	32.0	33.5	125.0	21.5
	평균값	47.4	112.0	253.4	53.5
	최대값	69.5	329.0	577.0	96.0

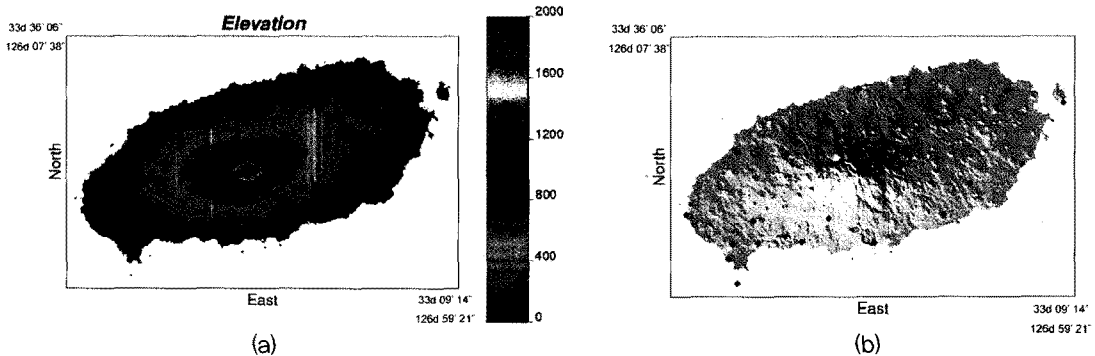


그림 1. (a) 제주도 지역의 DEM, (b) 음영기복도에 표시된 기상관측소와 AWS 위치도

제주도의 DEM 자료와 관측소 19개 지점은 그림 1에 제시되어 있으며, 표 1은 2005년 제주도 지역의 월평균 기온 및 월강수량 관측자료의 기본 통계값을 나타낸 것이다.

3. 지구통계학적 분석 방법론

1) 고도와 기온 및 강수량과의 연관성

지리적 인자 중 기후요소의 시·공간 변동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 해발고도이다. 특히, 기후요소 중 기온은 해발고도의 영향을 많이 받는데, 대륙권 내에서는 고도가 상승함에 따라 기온은 하강한다(이승호, 2007). 표 2에서 보는 것처럼, 제주도에서는 기온과 고도와의 상관성이 -0.9 이상의 매우 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 고도가 높아짐에 따라 기온은 일정하게 낮아지는 경향성을 보여준다. 유의성 검증을 수행한 결과, 유의수준 0.01에서 모두 유의하였다. 계절별로는 기온과 고도의 상관성이 큰 차이를 보이지 않았지만, 10월에 해당되는 가을철이 -0.981로 가장 높은 음의 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 제주도에서는 가을철과 같이 다른 계절에 비해 상대적으로 바람 및 강수가 적고 대기가 안정될수록 고도와 기온 간의 상관관계가 높은 것으로 판단된다.

수증기는 중력 때문에 지표면에 가까운 곳에 밀집되어 있다. 해발고도가 상승하면 일정고도까지는 수증기량이 증가하여 구름이 두꺼워지지만, 그 이상의 상층 고도에서는 수증기량이 감소하여 구름이 얇아진다. 따라서 강수의 대부분은 하층운에서 내리고 상층으로 갈수록 강수가 드물어진다(이승호, 2007). 즉, 산지에서 강수는 고도가 상승함에 따라 증가하는 경향을 보이지만, 응결고도를 넘어서면 오히려 감소하게 된다. 따라서 상대적으로 강수는 기온보다는 해발고도의 영향을 덜 받는다.

표 2에서 보는 것처럼, 제주도에서는 강수량과 해발고도와의 상관성이 계절적 편차가 큰 것으로 나타났다. 특히 여름철에 해당하는 8월에는 강수량과 고도와

표 2. 고도와 기온 및 강수량 사이의 상관계수

	기온 vs. 고도	강수량 vs. 고도
1월	-0.974	0.492
4월	-0.920	0.700
8월	-0.953	0.757
10월	-0.981	0.534

의 상관성이 0.757로 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 반면에 겨울철에 해당하는 1월에는 0.492로 상대적으로 낮은 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 고도가 높아짐에 따라 강수량은 일정하게 증가하는 경향성을 보이지만, 응결고도와 강수의 성인차로 인하여 계절별 편차가 큰 것으로 판단된다. 유의성 검증을 수행한 결과, 유의수준 0.01에서 4월과 8월의 상관계수는 유의하였으며, 1월과 10월은 유의수준 0.05에서 유의하였다.

2) 정규 크리깅

고급 내삽기법으로 많이 알려진 지구통계학적 크리깅은 미지의 값은 공간적인 상호관계를 가지는 확률 변수의 가중치 선형 조합으로 유추될 수 있다는 확률 함수 모델에 기반을 두고 있다(Goovaerts, 1997). 이때 공간적 상호관계는 일정한 이격거리 만큼 떨어진 자료들의 이질성을 나타내는 배리오그램을 통해 모델링된다(최종근, 2002).

n 개의 기온 혹은 강수 샘플 자료 $\{z(u_\alpha), \alpha=1, \dots, n\}$ 가 주어졌다고 할 때, 샘플 자료의 실험적 배리오그램은 식 1과 같이 이격 거리 h 만큼 떨어진 샘플 자료쌍 간의 값 차이의 제곱의 평균으로 표현된다.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha + h)]^2 \quad (1)$$

여기서 $N(h)$ 은 이격 거리 h 만큼 떨어진 샘플 자료쌍의 개수를 나타낸다. 배리오그램 함수에서 h 는 이방성(anisotropy)을 가정할 경우 방향과 거리 모두를 포함하는 벡터가 되며, 등방성(isotropy)을 가정할 경우 단

일 인자가 되어 거리만을 의미한다. 이렇게 샘플자료로부터 배리오그램이 계산되면, 고려할 수 있는 모든 이격 거리 h 에서의 배리오그램 값을 나타내는 배리오그램 모델링을 수행하게 되며, 차후에 이 배리오그램 값은 크리깅 시스템에 이용된다.

일반화된 최소사승회귀분석 방법론의 일종인 크리깅은 배리오그램으로부터 얻어지는 공간적 자기 상관 정보를 가중치로 이용한 이웃한 샘플 자료들의 선형조합으로 샘플링 되지 않은 위치에서의 값을 추정한다.

이 연구에서는 기온 혹은 강수량 자료를만 이용하여 샘플링 되지 않은 위치에서의 기온 혹은 강수량을 추정하는데 있어서 정규 크리깅을 적용하였다. 정규 크리깅 추정치 $z_{OK}^*(u)$ 는 식 2로 표현된다 (Goovaerts, 1997).

$$z_{OK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) z(u_{\alpha}), \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{OK}(u) = 1 \quad (2)$$

여기서 정규 크리깅 가중치 $\lambda_{\alpha}^{OK}(u)$ 는 불편향 조건과 추정 분산을 최소화함으로써 결정된다.

단일 변수의 공간 추정을 위한 크리깅 기법으로는 전술한 정규 크리깅 이외에도 자료 분포의 불변성을 가정하지 않고, 위치에 따른 자료 분포값이 부드럽게 변화하는 경향 모델을 사용하는 일반 크리깅(universal kriging)도 적용이 가능하다(Deutsch and Journel, 1998).

3) 공동 크리깅

일반적인 의미에서 공간 추정 과정을 수행할 때, 공간적 의존성의 구조가 다른 요소들에 의해 심하게 왜곡되는 변수의 경우, 정확한 추정이 이루어지지 않게 된다. 기온과 강수량과 같은 변수들은 이러한 예에 속하며, 공간적 의존성 구조를 훼손하는 인자가 고도이다. 이러한 단점을 극복하기 위해 이 연구에서는 고도 자료를 크리깅 시스템에 직접 고려할 수 있는 공동 크리깅을 적용하고자 하였다. 공동 크리깅은 부가자료를 공간 추정 과정에 포함할 수 있도록 크리깅 시스템을 확장한 것에 해당된다. 표 2에 나타난 것처럼 기온 혹은

강수량 샘플 자료는 고도 자료와 선형 상관관계를 가지고 있기 때문에, 미관측 지점에서의 기온 혹은 강수량을 추정하는 데 있어서 고도 자료가 부가적인 정보를 제공하여 추정 오차를 줄일 가능성이 크게 된다.

수치표고자료와 같이 연구지역의 모든 지점에서 자료의 이용한 자료를 공동 크리깅에 이용할 경우, 인접한 고도자료의 상관성이 기온 혹은 강수량 샘플값들의 상관성보다 크기 때문에 공동 크리깅 시스템의 가중치 행렬을 구하는데 있어서 불안정성을 가져온다고 알려져 있다(Goovaerts, 1997). 또한 추정 위치에 존재하거나 근접한 위치에 존재하는 고도자료가 거리적으로 떨어진 고도자료의 영향을 가리는 효과가 나타날 수 있다. 이러한 불안정성 효과를 해결하기 위해 이 연구에서는 기존 공동 크리깅에서 전역적으로 이용가능한 부가 자료의 이용을 추정위치에서의 부가 자료값으로만 제한하는 colocated 공동 크리깅을 적용하였다. Colocated 공동 크리깅에 대한 자세한 설명은 Goovaerts(1997), Deutsch and Journel(1998), Ma and Journel(1999)를 참조할 수 있으며, 이 논문에서는 적용된 식과 개괄적인 수행과정에 대해서만 기술하였다.

$$z_{CK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{CK}(u) z(u_{\alpha}) + \lambda^{CK}(u) [y(u) - m_y + m_z] \quad (3)$$

여기서 $y(u)$ 는 샘플링 되지 않은 위치 u 에서 고도값을 나타내며, m_y 와 m_z 는 고도 자료와 기온 혹은 강수량 자료의 평균값을 각각 나타낸다. 공동 크리깅에서의 가중치를 구하는데 있어서는, 기온 혹은 강수량 자료와 고도 자료 각각의 배리오그램 이외에도 두 변수 사이의 교차 상관성을 나타내는 교차 배리오그램을 계산해야 한다(식 4).

$$\hat{\gamma}_{zy}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(u_{\alpha}) - z(u_{\alpha}+h)][y(u_{\alpha}) - y(u_{\alpha}+h)] \quad (4)$$

식 4를 이용하여 실험적 교차 배리오그램을 계산한 후에, 교차 배리오그램 모델을 추정할 때에는 독립적으로 모델링을 수행하는 것이 아니라, 각각의 변수의

배리오그램의 특성을 고려하여 모델링을 수행해야 한다. 모델링 방법론으로는 세 개의 배리오그램을 함께 모델링하는 공동지역화 선형모델(linear model of coregionalization)과 하나의 배리오그램을 계산한 후에 나머지 2개의 배리오그램은 상관계수, 분산 등의 상수에 의한 비례관계를 이용하는 Markov 모델이 있다(Goovaerts, 1997). Markov 모델은 적용의 간편성이 있지만, 실제 자료의 실험적 배리오그램과 차이가 있을 수 있는 가정에 의한 간략화에 기반을 두고 있다는 단점이 있기 때문에, 이 연구에서는 공동지역화 선형모델을 적용하였다. 이 모델링 방법론에서는 모든 배리오그램은 동일한 구조를 가지는 기본 함수의 선형결합을 이용하여 모델링 되어야 한다는 조건과, 공동 크리깅 시스템의 역행렬 계산이 가능하도록 교차 배리오그램에서 이격거리가 증가하여 더이상 배리오그램 값이 변하지 않고 일정한 값을 나타내는 문턱값(sill) $Sill_{z_1}$ 과 일종의 잡음 효과인 너겟 효과(nugget effect) $Nugget_{z_1}$ 는 개별 변수의 배리오그램의 문턱값인 $Sill_z$ 와 $Sill_y$ 과 너겟 효과인 $Nugget_z$ 와 $Nugget_y$ 에 대한 다음 조건을 만족해야 한다(Goovaerts, 1997).

$$\begin{aligned} |Sill_{zy}| &\leq \sqrt{Sill_z \times Sill_y} \\ |Nugget_{zy}| &\leq \sqrt{Nugget_z \times Nugget_y} \end{aligned} \quad (5)$$

4) 예측 능력 검증

단변량 지구통계 기법인 정규 크리깅과 다변량 지구통계 기법인 공동 크리깅의 기온 및 강수 예측 능력의 정량적 비교를 위해 교차 검증 기법을 적용하였다(Isaaks and Srivastava, 1989). 일시적으로 1개의 기온 혹은 강수 샘플링 자료를 자료에서 제거한 후에, 나머지 자료들을 이용하여 그 위치에서의 값을 추정하고, 이러한 과정을 모든 샘플링 위치에서 반복하게 된다. 예측 능력의 정량적 비교에는 평균 절대 오차(Mean Absolute Error: MAE), 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error: RMSE)와 단변량 지구통계기법인 정규 크리깅의 오차에 대한 공동 크리깅의 상대적 향상 지수(Relative Index: RI)를 이용하였다.

$$\begin{aligned} MAE &= \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n |z(u_{\alpha}) - z^*(u_{\alpha})| \\ RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n [z(u_{\alpha}) - z^*(u_{\alpha})]^2} \\ RI_{MAE} &= \frac{(MAE_{OK} - MAE_{CK})}{MAE_{OK}} * 100 \\ RI_{RMSE} &= \frac{(RMSE_{OK} - RMSE_{CK})}{RMSE_{OK}} * 100 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $z^*(u_{\alpha})$ 는 샘플링 위치에서의 크리깅 추정치를 의미한다. 그리고 MAE_{OK} 와 MAE_{CK} 는 정규 크리깅과 공동 크리깅의 평균 절대 오차를 각각 나타내며, $RMSE_{OK}$ 와 $RMSE_{CK}$ 는 정규 크리깅과 공동 크리깅의 평균 제곱근 오차를 각각 나타낸다.

4. 적용 결과

1) 배리오그램 분석 결과

19개 지상관측소에서 측정된 기온 및 강수 자료와 DEM을 이용한 지구통계학적 분석에는 VARIOWIN(Pannatier, 1996), GSLIB(Deutsch and Journel, 1998)와 Fortran 프로그래밍을 이용하였다. 우선 배리오그램 모델링을 수행하였는데, 연구지역의 자료에는 이방성이 존재하지 않는 것으로 나타나서 등방성 모델을 고려하였다.

그림 2는 계절별 배리오그램 중에서 2005년 1월과 8월 기온 및 강수 자료의 배리오그램을 나타내고 있다. 관측 자료수가 적어서 짧은 이격거리에서의 배리오그램이 계산되지 않는데, 짧은 이격거리에서의 배리오그램의 양상을 모델링 수행시 반영하기 위해 기온 및 강수 자료와 상관성이 있는 연구지역의 모든 지점에서의 고도값의 배리오그램을 계산하였다. 그 결과 짧은 이격거리에서 천천히 배리오그램값이 변하는 양상이 나타나서, 연구지역의 모든 배리오그램은 이러한 양상을 반영할 수 있는 가우시안 모델을 적용하였다. 가우시안 배리오그램 모델은 짧은 이격거리에서 자료들의 상

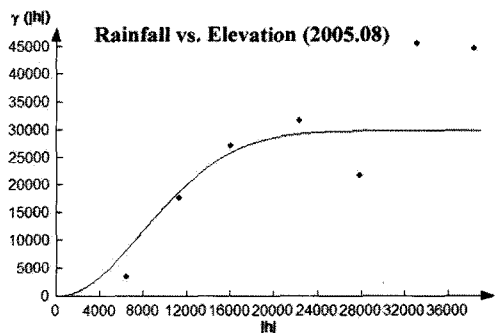
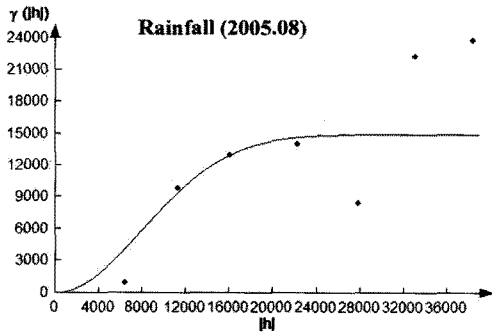
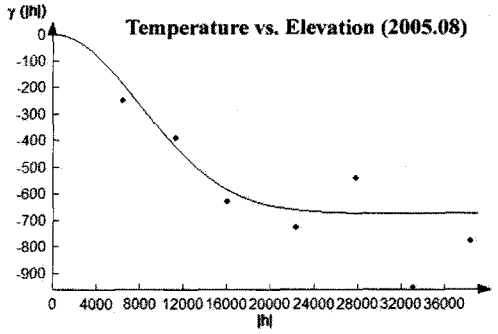
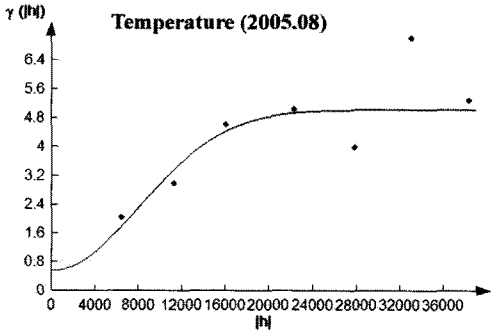
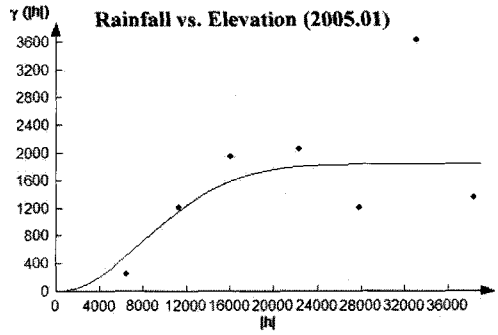
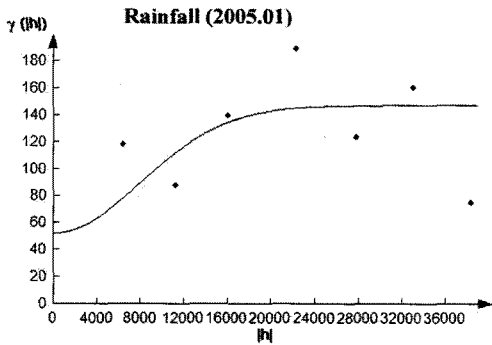
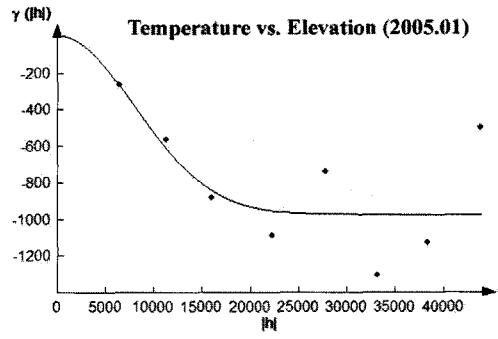
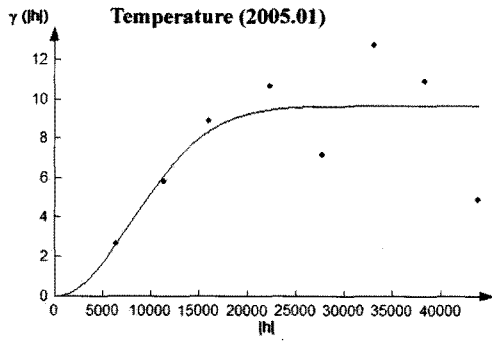


그림 2. 1월과 8월 기온 및 강수 자료의 배리로그래프와 고도자료와의 교차 배리로그래프(x축 |h|의 단위: m)

관성이 크거나 연속성이 강할 경우 이용하는데(최종근, 2002), 모델식은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = c[1 - \exp(-\frac{(3h)^2}{a^2})] \quad (7)$$

여기서 c , a 는 문턱값과 유효 상관거리를 각각 나타낸다.

교차 배리오그램에서 표 2에서 나타난 기온과 고도는 음의 상관관계를, 강수와 고도는 양의 상관관계를 반영하고 있다. 모든 계절의 배리오그램은 동일한 가우시안 모델과 상관거리를 가지지만, 너겟 효과와 문턱값은 서로 다르게 나타났는데, 특히 문턱값에 대한 너겟 효과의 비율인 상대적 너겟 효과의 다른 양상은 실제 크리깅을 수행하는데 있어서 영향을 미치게 된다.

2) 크리깅 적용 결과

19개 지상관측소에서 관측된 월평균기온 및 월강수량 분포도 작성에는 단변량 지구통계 기법인 정규 크리깅을, 관측자료와 해발고도 자료와의 통합에는 공동 크리깅을 각각 적용하였다. 그림 3은 정규 크리깅과 공동 크리깅에 의한 월평균기온 분포도를 나타내고 있다.

정규 크리깅 결과에서는 공간적으로 평활화된 양상을 보이고 있는데, 이는 크리깅이 최소오차회귀분석 방법론의 일종이기 때문에 미관측 지점에서 분산을 최소로 하는 방향으로 값을 추정하기 때문이다. 또한 이 연구에서 기온 및 강수 자료의 공간적 상호관계를 나타내는 배리오그램 모델에 가우시안 모델을 사용함으로써 다른 배리오그램 모델에 비해 공간적으로 연속성이 증가된 결과를 나타내게 된 것이다.

계절별 월평균기온 분포를 정규 크리깅 결과로 분석하여 보면, 한라산을 중심으로 4방위 사면 간의 월평균기온 차이는 겨울철에 1.7℃ 내외로 가장 크게 나타난다. 즉, 1월 평균기온은 한라산 동사면의 성산포(해발고도 19m)가 4.1℃로 가장 낮고, 제주도 남쪽의 서귀포가 5.8℃(해발고도 49m)로 가장 높게 나타났다. 또한 4월 평균기온은 서쪽의 고산(해발고도 71m)이 13.9℃로 가장 낮고, 북쪽의 제주(해발고도 19m)가 15.4℃

로 가장 높게 나타났다. 이밖에 8월과 10월의 월평균기온 차는 1℃ 내외로 한라산 사면 간에 상대적으로 큰 차이를 보이지는 않았다. 이상의 정규 크리깅 결과는 관측지점에서의 월평균기온 분포도 작성에는 큰 문제가 없지만, 관측지점에서 멀어질수록 상대적으로 월평균기온 추정 값이 정확하지 않음을 확인할 수 있었다.

반면 고도자료를 함께 이용한 공동 크리깅의 결과에서는 그림 1에 제시된 고도 분포의 양상이 두드러지게 월평균기온 분포도에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 즉 해안선으로부터 한라산으로 올라갈수록 월평균기온이 지형효과를 반영하면서 낮아지고 있다. 특히 한라산 주변에서는 정규 크리깅에 비해 월평균기온이 낮은 지역의 분포가 넓게 나타나고 있는데, 이는 고도의 영향이 두드러져서 높은 고산 지역의 월평균기온 값이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

공동 크리깅 결과를 정규 크리깅 결과와 비교 분석하면, 1월 평균기온은 정규 크리깅에서 5℃ 이하의 낮은 지역이 관측지점(어리목)을 중심으로 협소하게 분포하는데, 공동 크리깅에서는 지형효과를 반영하여 한라산을 중심으로 고산지역에 넓게 분포하고 있다. 4월 평균기온은 정규 크리깅에서 10℃ 이하의 지역이 나타나지 않는데, 공동 크리깅에서는 한라산 고산지역을 중심으로 넓게 분포하고 있다. 이밖에 8월 및 10월 역시 정규 크리깅에서는 추정할 수 없었던 한라산 고산지역의 각각 21℃와 11℃의 월평균기온 분포도를 공동 크리깅에서는 추정할 수 있었다. 따라서 월평균기온 분포도 작성 시 정규 크리깅을 사용하는 것보다 공동 크리깅을 사용하는 것이 지형효과를 반영 할 수 있어서 보다 효과적이다.

정규 크리깅과 공동 크리깅에 의한 월강수량 분포도는 그림 4에 제시되어 있다. 정규 크리깅 결과는 월평균기온 분포도와 마찬가지로 공간적으로 평활화된 양상을 보이고 있지만, 작은 값과 높은 값이 관측된 지상 관측소 주변으로 평활화된 양상이 두드러짐을 확인할 수 있다.

계절별 월강수량 분포를 분석하여 보면, 한라산을 중심으로 4방위 사면 간의 월강수량 차이는 여름철에 120mm 내외로 가장 크게 나타난다. 즉, 8월 강수량은 한라산 동사면의 성산포가 256mm로 가장 많고, 제주

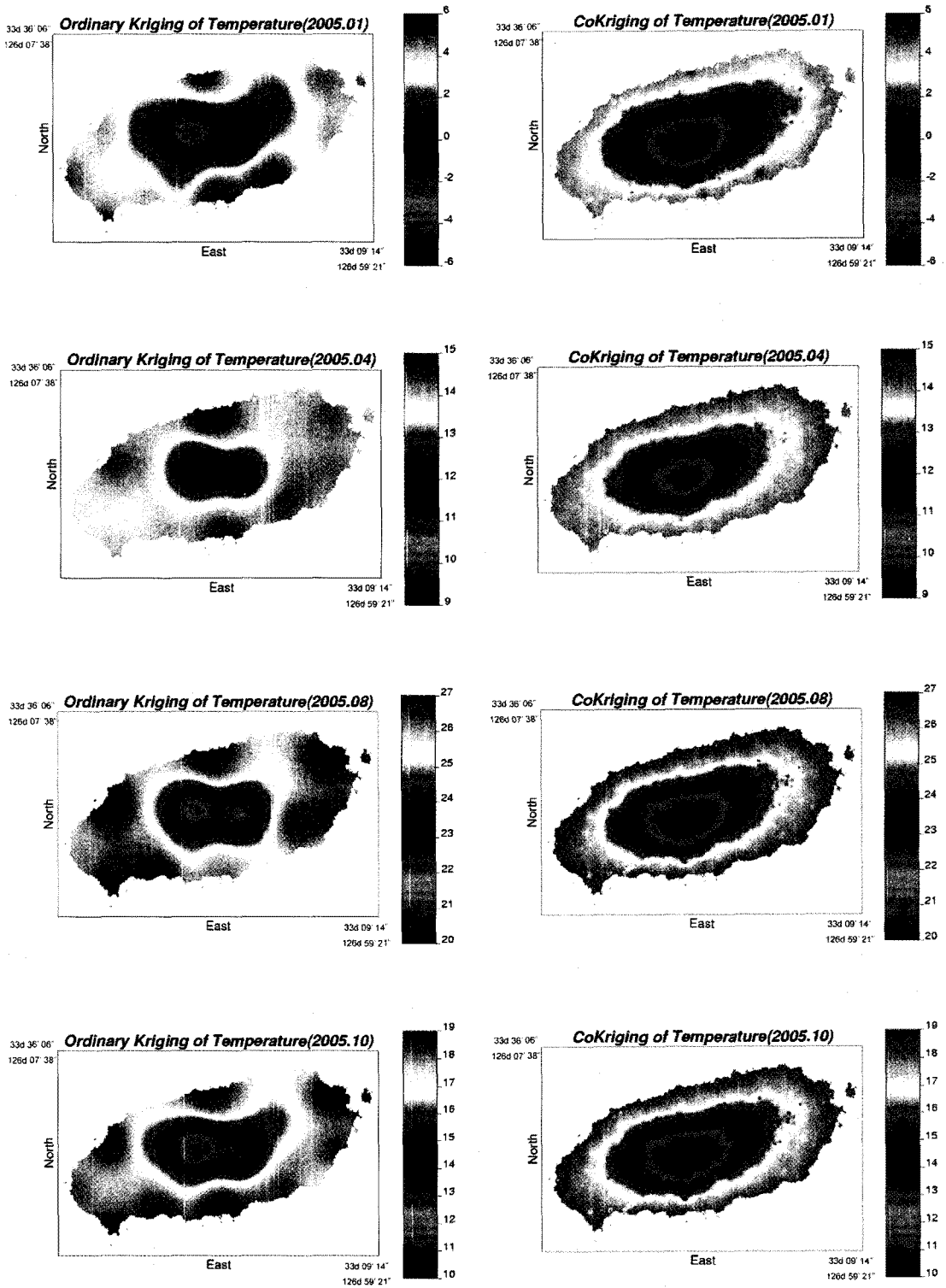


그림 3. 크리깅에 의해 작성된 계절별 월평균기온 분포도

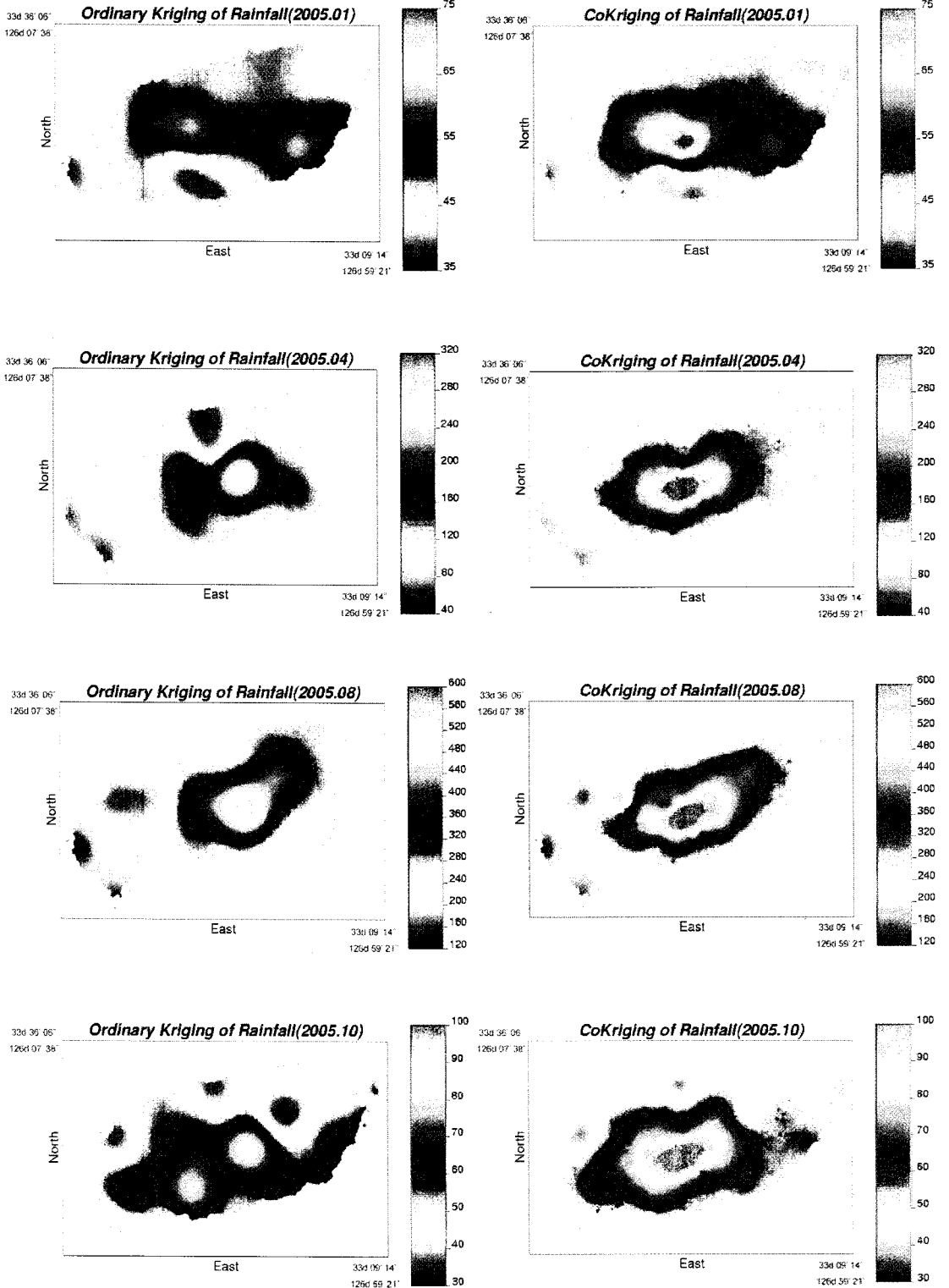


그림 4. 크리깅에 의해 작성된 계절별 월강수량 분포도

도 서사면의 고산이 130mm로 가장 적게 내렸다. 또한 봄철에 해당하는 4월 강수량은 북쪽사면의 제주가 33mm 내외로 가장 적고, 남쪽의 서귀포가 135mm 내외로 가장 많이 내렸다. 이밖에 1월과 10월의 월강수량의 차이는 30mm 내외로 한라산 사면 간의 큰 차이를 보이지는 않았다. 이상의 정규 크리깅 결과는 관측 지점에서의 월강수량 분포도 작성에는 큰 문제가 없지만, 관측지점에서 멀어질수록 상대적으로 월강수량의 추정 값이 정확하지 않음을 분석할 수 있었다.

반면 공동 크리깅 결과에서는 강수 분포도에 비해 고도 효과가 약해지면서, 국소적인 관측소 주변에서의 값이 분포 특성이 반영되어 나타내고 있다. 이러한 기온 분포도와 다른 양상은 강수 자료가 표 2에 제시된 상관계수로부터 확인할 수 있듯이 고도와 상관성이 떨어져서 고도의 효과와 더불어 국소적인 관측치 자료의 영향이 기온보다는 상대적으로 크게 반영된 것으로 판단된다. 이러한 양상은 4월, 8월과 10월 한라산 부근 관측소에서 높은 강수값이 정규 크리깅 결과에는 두드러지지만, 공동 크리깅 결과에서는 해발고도 자료와 결부되어 한라산 주변으로 높은 강수값이 다소 넓게 분포하고 있다는 것에서 확인할 수 있다. 따라서 월평균기온 분포도 작성과 마찬가지로 월강수량 분포도 작성 시 고도자료를 함께 사용할 수 있는 공동 크리깅을 사용하는 것이 상대적으로 지형효과를 반영 할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3) 예측 능력 비교 결과

해발고도 자료에 의한 영향을 정량적으로 평가하기 위해 교차 검증을 수행하였고, 식 6에 제시된 정량적 지수를 산출하였다(표 3). 모든 계절별로 지형 효과를 고려할 수 있는 공동 크리깅의 예측 능력이 좋은 것으로 나타났다. 기온과 강수 자료를 비교하였을 때에 고도 자료와 상관성이 높은 기온 자료에 대해 공동 크리깅을 적용하였을 때에 강수 자료에 비해 항상 효과가 두드러지게 나타났다. 본 사례 연구를 통해 공간 분포도를 작성하고자 하는 변수의 샘플 자료의 개수가 적을 경우에, 변수와 적절한 수준의 상관관계를 나타내는 부가 자료를 이용할 경우 보다 향상된 예측 능력을 얻을 수 있다는 다변량 지구통계 기법의 장점을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 해발고도 자료와의 상관관계와 예측 능력의 비교를 위해 네 시기의 고도 자료와 정규 크리깅에 대한 공동 크리깅의 상대적 향상 지수와 상관성을 비교하였다(그림 5). 그 결과, 비록 네 시기의 자료만을 분석하였지만, 상관계수의 크기와 상대적 향상 지수 사이에 기온과 강수 모든 경우에 강한 상관성을 나타내었다. 예측능력은 이러한 해발고도 자료와의 상관관계 이외에도 배리오그램 모델을 통해 나타나는 변수별 공간적 연속성에도 영향을 받게 된다. 이러한 관계를 규명하기 위해 상대적 너겟 효과와 상대적 향상

표 3. 교차 검증 결과

		1월		4월		8월		10월	
		OK	CK	OK	CK	OK	CK	OK	CK
기온	MAE	1.79	0.88	0.65	0.41	1.26	0.72	3.59	1.57
	RI _{MAE} (%)	-	50.60	-	37.33	-	42.73	-	56.38
	RMSE	2.28	1.07	1.02	0.54	1.77	0.83	4.86	2.06
	RI _{RMSE} (%)	-	53.30	-	47.19	-	53.24	-	57.61
강수	MAE	9.71	8.17	49.38	39.18	65.96	42.32	17.38	14.31
	RI _{MAE} (%)	-	15.92	-	20.70	-	35.84	-	17.65
	RMSE	11.78	9.88	70.96	50.94	88.51	50.50	21.44	17.38
	RI _{RMSE} (%)	-	16.17	-	28.21	-	42.95	-	18.97

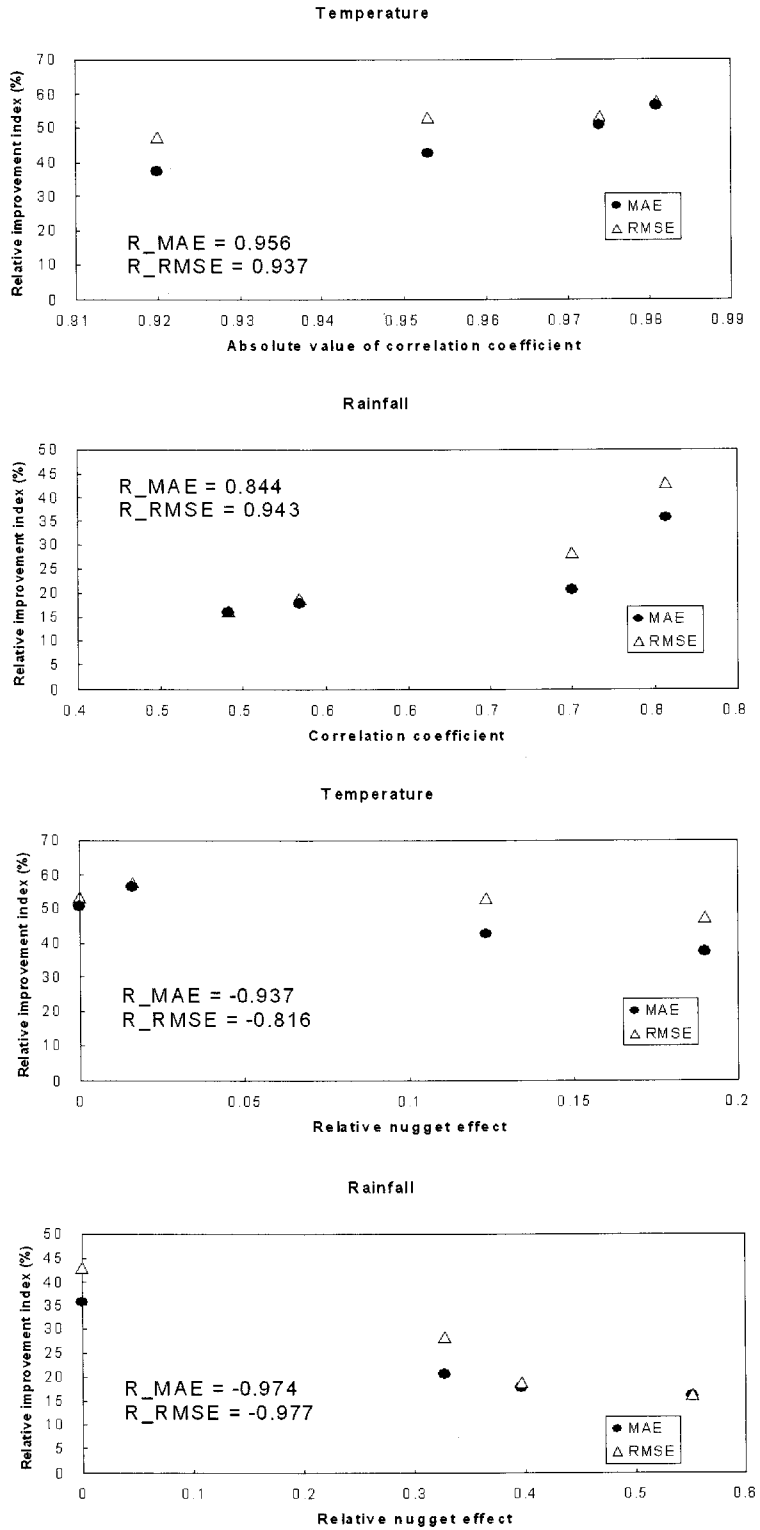


그림 5. 고지자료와의 상관성 및 상대적 너겟 효과와 상대적 향상 지수와의 관계

지수 사이의 상관성을 살펴보았다(그림 5).

해발고도 자료와 교차 배리오그램에서는 모든 시기에 걸쳐 상대적 너겟 효과가 작게 나타나서 기온 및 강수 자료에서의 상대적 너겟 효과만을 비교하였다. 분석결과, 기온 및 강수 자료 모두 상대적 너겟 효과와 상대적 향상 지수 사이에는 강한 음의 상관관계가 나타났다. 상대적 너겟 효과가 크다는 것은 기온 혹은 강수 자료 자체의 공간적 상관성의 연속성이 떨어지고 잡음 효과가 큼을 의미하므로, 기온 혹은 강수 자료가 공간 예측의 과정에서 많은 정보를 제공하지 못하고, 대신 부가 자료인 고도 자료가 상대적으로 큰 가중치를 가짐을 의미한다. 따라서 그림 5의 분석 결과를 종합하여 보면, 기온 및 강수 자료와 고도 자료의 상관성이 커질수록, 또한 상대적 너겟 효과가 작을수록 고도 자료의 영향이 커져서 정규 크리깅에 비해 공동 크리깅이 보다 향상된 예측 결과를 내는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이 연구에서는 기존 관측치만을 이용하여 기온 및 강수 분포도를 작성할 때와 해발고도 자료와 공동 크리깅을 이용하여 분포도 작성에 이용하였을 때의 분포 양상의 변화와 예측 능력을 비교하였다. 제주도의 계절별 네 시기 자료를 이용한 사례 연구를 통해 월평균 기온 및 월강수량 자료와 비교적 높은 상관성을 나타낸 고도 자료를 공동 크리깅을 이용하여 통합하였을 때, 적은 관측 지점의 수로 인한 정규 크리깅의 특징인 공간적 평활화 효과를 완화하면서 지형 효과를 잘 반영하는 분포도 작성이 가능함을 확인할 수 있었다.

또한 예측 능력을 정량적으로 비교분석한 결과, 단변량 정규 크리깅 기법에 비해 공동 크리깅을 적용하였을 경우에, 기온 분포도에서는 최소 37%에서 최대 57%, 강수 분포도에서는 최소 16%에서 최대 42%까지의 향상된 예측 능력을 나타내었다. 이러한 결과는 관측 지점의 수의 이용이 제한적일 경우, 이 변수와 적절한 상관성을 나타내면서 공간적으로 많은 지점에서 정

보의 이용이 가능한 부가 자료를 지구통계학을 이용하여 효과적으로 통합할 수 있음을 시사한다. 또한 추가적인 분석을 통해, 고도 자료의 효과는 기온 및 강수 자료와의 상관성에 정비례하는 것으로 나타났으며, 기온 및 강수 자료의 잡음 효과가 적을 때 높게 반영됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 정량적으로 어느 정도의 상관관계를 나타내었을 때, 다변량 지구통계 기법의 적용이 효율적인지에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단되며, 부가 자료와의 상관성과 더불어 원 자료의 공간적 연속성 혹은 잡음 효과를 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

앞으로 지구통계학 기법의 적용가능성을 확대하기 위해 다양한 다변량 지구통계기법의 비교 연구를 수행할 예정이며, Kyriakidis and Journel(1999)에 의해 제시된 것처럼 공간적 상관성과 더불어 시간적 상관성을 고려한 시공간 다변량 지구통계 기법의 적용도 수행할 예정이다.

謝辭

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(08국토정보CO3)에 의해 수행되었습니다. 장동호의 참여는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-4504)의 지원으로 수행되었습니다.

文獻

- 기상연구소, 2004, 한국의 기후, 기상청 기상연구소.
 김성수 · 장승민 · 백희정 · 최홍연 · 권원태, 2006, "제주지역 기온과 강수량의 기후 변동 특성," 한국지구과학회지, 27(2), 188-197.
 신성철 · 김맹기 · 서명석 · 나득균 · 장동호 · 김찬수 · 이우섭 · 김연희, 2008, "GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 강수량 추정," 대기, 18(1), 71-81.
 오석훈, 2005, "암반등급 해석을 위한 비선형 지시자 변환과 3차원 크리깅 기술의 물리탐사 및 시추자료에 대한 적용," 한국지구과학회지, 26(5), 429-435.

- 이승호, 1999, "제주도 지역의 강수분포 특성," *대한지리학회지*, 34(2), 123-136.
- 이승호, 2007, *기후학*, 푸른길, 서울.
- 정상용 · 이강근, 1995, "난지도 매립지 일대의 지하수위 분포 추정을 위한 복합 크리깅의 응용," *지하수환경*, 2(2), 58-63.
- 최종근, 2002, *공간정보 모델링: 크리깅과 최적화 기법*, 구미서관, 서울.
- 홍기욱 · 서명석 · 나득균 · 장동호 · 김찬수 · 김맹기, 2007, "GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 기온자료 추정," *대기*, 17(3), 255-268.
- Creutin, J. D., Delrieu, G., and Lebel, T., 1988, Rain measurement by raingage-radar combination: a geostatistical approach, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 5, 102-115.
- Daly, C., Helmer, E. H., and Maya, Q., 2003, Mapping the Climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra, *International Journal of Climatology*, 23, 1359-1381.
- Deutsch, C. V. and Journel, A. G., 1998, *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Oxford University Press, Oxford.
- Glenn, N. F. and Carr, J. R., 2003, The use of geostatistics in relating soil moisture to RADARSAT-1 SAR data obtained over the Gread Basin, Nevada, USA, *Computers & Geosciences*, 29, 577-586.
- Goovaerts, P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, Oxford.
- Goovaerts, P., AvRuskin, G., Meliker, J., Slotnick, M., Jacquez, G., and Nriagu, J., 2005, Geostatistical modeling of the spatial variability of arsenic in groundwater of southeast Michigan, *Water Resources Research*, 41, W07013, doi:10.1029/2004WR003705.
- Hevesi, J. A., Flint, A. L., and Istok, J. D., 1992, Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: structural analysis, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 661-676.
- Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M., 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, Oxford.
- Kyriakidis, P. C. and Journel, A. G., 1999, Geostatistical space-time models, *Mathematical Geology*, 31(6), 651-684.
- Ma, X. and Journel, A. G., 1999, An expanded GSLIB cokriging program allowing for two Markov models, *Computers & Geosciences*, 25, 627-639.
- Ninyerola, M., Pons, X., and Roure, J. M., 2000, A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques, *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841.
- Pannatier, Y., 1996, *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*, Springer-Verlag, New York.
- Park, N.-W., Jang, D.-H., and Chi, K. H., 2008, Integration of IKONOS imagery for geostatistical mapping of sediment grain size at Baramarae beach, Korea, *International Journal of Remote Sensing*, in press.
- Patriarche, D., Castro, M. C., and Goovaerts, P., 2005, Estimating regional hydraulic conductivity fields - a comparative study of geostatistical methods, *Mathematical Geology*, 37(6), 587-613.
- Perry, L. B. and Konrad, C. E., 2006, Relationships between NW flow snowfall and topography in the southern appalachians, USA, *Climatology Research*, 32, 35-47.
- Simbahan, G. C., Dobemann, A., Goovaerts, P., Ping, J., and Haddix, M. L., 2006, Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data, *Geoderma*, 132, 471-489.
- 교신 : 장동호, 314-701, 충남 공주시 신관동 182, 공주대학교 인문사회과학대학 지리학과(이메일: gisrs@kongju.ac.kr, 전화: 041-850-8421)
- Correspondence: Dong-Ho, Jang, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, Kongju National University, 182, Shinkwandong, Gongju, Chungnam, 314-701, Korea(e-mail: gisrs@kongju.ac.kr, phone: +82-41-850-8421)
- 최초투고일 08. 11. 24
최종접수일 08. 12. 10