고해상도 주제 정보 생성을 위한 저해상도 원격탐사 자료의 지구통계학 기반 상세화 및 정밀 관측 자료와의 통합

박 노 옥[†]

인하대학교 지리정보공학과

Geostatistical Downscaling of Coarse Scale Remote Sensing Data and Integration with Precise Observation Data for Generation of Fine Scale Thematic Information

No-Wook Park[†]

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

Abstract : This paper presents a two-stage geostatistical integration approach that aims at downscaling of coarse scale remote sensing data. First, downscaling of the coarse scale secondary data is implemented using area-to-point kriging, and this result will be used as trend components on the next integration stage. Then simple kriging with local varying means that integrates sparse precise observation data with the downscaled data is applied to generate thematic information at a finer scale. The presented approach can not only account for the statistical relationships between precise observation and secondary data acquired at the different scales, but also to calibrate the errors in the secondary data through the integration with precise observation data. An experiment for precipitation mapping with weather station data and TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) data acquired at a coarse scale is carried out to illustrate the applicability of the presented approach. From the experiment, the geostatistical downscaling approach applied in this paper could generate detailed thematic information at various finer target scales that reproduced the original TRMM precipitation values when upscaled. And the integration of the downscaled secondary information with precise observation data showed better prediction capability than that of a conventional univariate kriging algorithm. Thus, it is expected that the presented approach would be effectively used for downscaling of coarse scale data with various data acquired at different scales.

Key Words : scale, downscaling, kriging, integration

요약 : 이 논문에서는 저해상도 원격탐사 자료 기반 주제도의 상세화를 목적으로 2단계로 구성된 지구통계학적 통합 기법을 제안하였다. 우선 영역-점 변환 크리깅을 이용하여 저해상도 부가 자료의 상세화를 수행하고, 이 정보는 이후 통합 과정에서 경향 성분으로 이용된다. 그리고 상세화된 부가 자료와 소수의 정밀 관측 자료와의 통합에 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅을 적용한다. 제안 기법은 저해상도 부가 자료의 상세화를 통해 해상도 차이에 따른 정밀 관측 자료와 부가 자료와의 통계적 연관성을 반영할 수 있으며, 정밀 조사

접수일(2013년 1월 4일), 수정일(1차 : 2013년 1월 31일), 게재확정일(2013년 2월 9일).

[†] 교신저자: 박노옥(nwpark@inha.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자료와의 통합을 통해 부가 자료의 오류를 보정할 수 있는 장점이 있다. 제안 기법의 적용성 평가를 위해, 지상 관측 강수 자료와 TRMM 자료와의 통합을 이용한 고해상도 강수 주제도 제작 연구를 수행하였다. 실험 결과, 영역-점 변환 크리깅을 통해 원 자료 스케일의 TRMM 강수값을 재생산할 수 있는 다양한 목표 고해상도에서의 상세 정보 추출이 가능하였다. 그리고 이 자료를 정밀 관측 자료와 통합함으로써 정밀 관측 자료만을 이용하는 단변량 공간 예측 기법에 비해 향상된 예측 정확도를 보였다. 따라서 제안 기법은 서로 다른 해상도를 가지는 자료를 대상으로 저해상도 부가 자료의 상세화에 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

공간 자료를 이용하는 많은 응용 분야들은 대부분 다양한 해상도에서 얻어진 공간 자료를 분석에 사용한다. 예를 들어 기온, 강수 등을 포함한 다양한 기후 요소들은 MODIS와 같은 저해상도 원격탐사 자료로부터 간접적으로 유추된 정보를 이용한다. 그리고 유인/무인 기상관측소 등으로부터 얻어진 정밀 관측 자료는 고해상도 혹은 일종의 포인트 정보를 제공한다. 이러한 서로 다른 해상도에서 얻어진 자료들은 자료 이용 측면과 제공 정보의 질적 측면에서 상호보완적인 성격을 내포한다. 저해상도 원격탐사 자료는 시계열적으로 관심 있는 지역의 모든 지점에서 광역 정보를 제공하지만, 상세 분석에 직접적으로 이용하기에는 해상도가 낮은 단점이 있다. 반면, 정밀 관측 자료는 상세 정보를 제공하지만, 자료 획득 비용 차원에서 다량의 정보 획득이 제한적이어서 소수의 지점에서만 정보 획득이 가능하다.

이렇게 소수의 지점에서 획득된 정밀 관측 자료는 일반적으로 공간 예측 혹은 공간 보간의 과정을 통해 일단 격자형 주제 정보를 생성한 이후에 분석에 이용된다. 이러한 공간 예측 과정에서 대상 지역의 모든 지점에서 값을 제공하는 원격탐사 자료는 유용한 정보 제공원으로 이용가능하다. 이러한 정밀 관측 자료의 공간 예측 과정에 부가 자료를 이용하는데 있어서, 지구통계학은 전통적인 결정론적 공간 예측 방법론과 달리 다양한 형태의 부가 자료를 통합할 수 있는 확률론적 틀을 제공한다(Goovaerts, 1997). 대표적인 다변량 크리깅 기법들로는 공동 크리깅(cokriging), 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅(simple kriging with local means), 외부 추세 크리깅(kriging with an external drift) 등이 있으며(Deutsch and Journel, 1998), 이러한 방법론을 이용한

다양한 분야에서의 주제도 작성 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Chung and Lee, 1995; Goovaerts, 1999; Simbahan *et al.*, 2006; Sales *et al.*, 2007; Park *et al.*, 2009; Oh, 2009).

이러한 다변량 크리깅 기법들의 실제 응용과 관련하여 여러 기술적인 이슈들이 해결되어야 하는데, 대표적인 것이 정밀 관측 자료와 부가 자료 등과의 해상도 차이를 적절하게 고려해야 한다는 점이다. 전술한 다변량 크리깅 기법들은 부가 자료의 해상도에서 공간 통합이 이루어지기 때문에, 저해상도 원격탐사 자료를 부가 자료로 이용할 경우 최종 공간 예측 결과는 저해상도 수준에서 제공된다. 또한 정밀 관측 자료와 부가 자료와의 상관 정보를 추출하는 과정에서 부가 자료의 해상도가 너무 낮은 경우, 저해상도 격자 위치에 다량의 정밀 관측 자료가 포함되면 상관 정보가 저추정될 가능성이 있다. 따라서 부가 자료의 해상도보다 더 높은 해상도에서의 주제 정보를 추출하는 과정인 상세화(downscaling)를 위해서는 사용 자료의 해상도 차이를 적절히 고려할 필요가 있다. 가장 간단한 방법은 저해상도 부가 자료를 일종의 포인트 자료로 간주하여 목표 해상도에서의 고해상도 부가 정보를 미리 생성한 이후에 부가 자료와 목표 해상도에서 통합하는 것이다. 이 방법론은 저해상도 격자 내에서의 속성 변화가 매우 작다는 내재적인 가정을 포함하는데, 이 가정이 항상 유효하다고 간주할 수는 없는데 일반적으로 정밀 관측 자료와 저해상도 부가 자료의 통계적 연관성은 해상도에 따라 차이가 날 수 있기 때문이다(Park, 2011). 다변량 크리깅 기법들은 공간 예측을 위해 정밀 및 부가 자료 사이의 통계적 상관정보를 필요로 하기 때문에 저해상도 부가 자료를 포인트 자료로 단순화 시키는 방법론은 이러한 차이를 제대로 설명할 수 없다.

이러한 사용 자료의 해상도 차이를 고려하면서 고해상도에서의 주제 정보를 생성하는 상세화와 관련하여

Fig. 1. Two-stage geostatistical approach presented in this paper.

최근 지구통계학 기반 방법론들이 개발되어 왔다. Liu and Journel (2009)과 Park (2010)은 소수의 지점에서 획득된 고해상도 포인트 자료와 저해상도 부가 자료의 통합을 위해 블록 크리깅 및 시뮬레이션 기법을 이용하였다. 그리고 Goovaerts (2010)은 마찬가지로 기법을 area-and-point 크리깅으로 명명하여 중금속 자료 오염 분포도 작성과 질병 위험도 분포도 작성에 적용하였다. 이러한 방법론들은 부가 자료들은 상세화된 자료의 선형 결합이라는 전제를 내포하고 있는데, 상세화된 결과를 원 저해상도로 업스케일링하면 원 저해상도 부가 자료의 값을 재생산하는 특성을 가진다. 그러나 자료 통합에 일반적으로 사용되는 부가 자료는 정밀 관측 자료보다 정확도가 떨어지고 오류를 포함하기 때문에, 최종 통합 결과에서 오류를 포함하는 저해상도 자료의 재생산이 항상 필요한 것은 아니다. 오히려 이러한 재생산 특성으로 인해 최종 결과에 오류가 포함될 위험성이 존재하기 때문에, 해상도 차이를 설명하는 과정에서 부가 자료에 포함된 오류를 수정할 필요성이 있다.

이 논문에서는 다변량 크리깅 기법의 분석틀 안에서 전술한 이용 자료들의 해상도 차이를 적절하게 설명할 수 있는 2단계로 구성된 상세화 방법론을 제안하였다 (Fig. 1). 우선 첫 번째 단계에서는 영역-점 변환 크리깅

(area-to-point kriging)을 이용하여 자료 통합의 목표 해상도에서의 상세화를 수행한다. 이 단계를 통해 상세화된 부가 자료와 정밀 관측 자료와의 통계적 연관성 분석이 목표 해상도에서 수행될 수 있다. 이후 두 번째 단계에서는 상세화된 부가 자료와 소수의 정밀 관측 자료를 통합하는 다변량 크리깅을 적용한다. 오류를 포함할 수 있는 부가 자료의 속성값 자체를 직접 이용하지 않고, 전반적인 평균 성분 추출에 이용하기 위해 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅 기법을 다변량 크리깅 기법으로 적용한다. 이 과정을 통해 부가 자료에 포함될 수 있는 오류를 정밀 관측 자료를 이용하여 보정(calibration)할 수 있다. 최근 Kaheil *et al.* (2008)은 토양 수분 분포도 작성을 위해 우선 저해상도 원격탐사 자료를 목표 해상도에서 상세화를 수행한 이후에 이 결과와 현장 조사 자료를 대상으로 support vector machine regression을 적용하여 보정하는 상세화 방법론을 제안하였다. 이 방법론도 이 연구에서 제안하는 2단계 방법론을 적용하였지만 다음 측면에서 큰 차이점을 보인다. 우선 Kaheil *et al.* (2008)에서는 저해상도 원격탐사 자료의 상세화 과정에서 저해상도 자료의 베리오그램을 기반으로 목표 해상도에서 확률 필드를 생성한 이후 재배치와 정규화를 수행하였다. 그러나 저해상도에서의 공간 패턴과 상대적으로 고해상도인 목표 해상도

에서의 공간 자기 상관성 정보가 달라질 수 있다. 또한 두 번째 단계에서 현장 조사 자료와의 회귀분석을 적용하였으나, 회귀분석을 통해 설명할 수 없는 잔차(residual) 성분에 대한 고려가 없었다. 반면 이 연구에서 제안하는 방법론은 저해상도 자료로부터 목표 해상도에서의 공간 자기 상관성 정보를 추정함으로써 해상도 차이를 상세화 과정에서 고려할 수 있으며, 잔차 성분의 공간 상관성 정보를 공간 예측 과정에서 반영하여 예측 정확도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 제안 기법의 성능 검증을 위해 고해상도 강수 주제도 작성을 목적으로 저해상도 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 자료와 정밀 기상 관측 자료를 이용한 사례 연구를 수행하였다.

2. 방법론

1) 지구통계학 기반 상세화

이 논문에서 첫 단계에서 적용한 저해상도 부가 자료의 지구통계학 기반 상세화 기법은 영역-점 변환 크리깅이다. 영역-점 변환 크리깅은 저해상도 자료로부터 고해상도 격자 위치에서 값을 예측하는 블록 크리깅의 변형 기법에 해당한다(Kyriakidis, 2004).

연구 지역에 중심 좌표가 v_k 인 K 개의 블록으로 구성된 저해상도 자료 $\{y(v_k), k=1, \dots, K\}$ 가 있다고 했을 때 (여기서 블록 자료는 형태가 격자형이거나 행정구역과 같은 불규칙한 형태여도 상관없음), 영역-점 변환 정규 크리깅은 식 (1)과 같이 이웃한 주변 블록 자료의 선형 결합을 통해 상대적으로 고해상도인 위치 u 에서의 속성값 $y^*(u)$ 를 예측한다.

$$y^*(u) = \sum_{k=1}^K \lambda_k(u) y(v_k) \quad (1)$$

여기서 $\lambda_k(u)$ 는 이웃한 저해상도 블록 자료에 할당되는 정규 크리깅 가중치를 나타낸다.

식 (1)의 정규 크리깅 가중치는 식 (2)의 정규 크리깅 시스템을 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \lambda_k(u) \bar{C}(v_k, v_k') + \mu(u) &= \bar{C}(v_k, u) \quad k=1, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k(u) &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\mu(u)$ 는 라그랑지안 상수를 나타내며, $\bar{C}(v_k, v_k')$ 와 $\bar{C}(v_k, u)$ 는 2개의 블록 v_k 와 v_k' 사이의 블록-블록 평균 공분산과 블록 v_k 와 예측 위치 u 사이의 블록-점 평균 공분산을 각각 나타낸다.

식 (2)에서 정규 크리깅 가중치를 계산하기 위해서는 블록-블록 평균 공분산과 블록-점 평균 공분산을 필요로 한다. 이 연구에서 블록-블록 평균 공분산은 개별 블록을 이산화시킨 블록 내 점들 사이의 점 기반 공분산값들의 평균을 통해 계산하고, 블록-점 평균 공분산은 전통적인 블록 크리깅과 마찬가지로 블록을 이산화시킨 점들과 예측 위치 u 사이의 점 기반 공분산값들의 평균을 통해 계산하였다.

일반적으로 지구통계학에서는 고려하는 변수의 베리오그램을 모델링한 이후에, 2차 정상성 가정을 이용하여 베리오그램 모델을 공분산으로 변환하여 이용한다. 따라서 블록-블록 평균 공분산과 블록-점 평균 공분산의 계산을 위해서는 점 기반 베리오그램 모델을 필요로 한다. 그러나 블록 형식의 저해상도 자료만 존재하므로, 점 기반 베리오그램 모델을 직접적으로 구할 수는 없다. 점 기반 베리오그램 모델을 구하는 가장 간단한 방법은 해상도와 상관없이 동일 속성 정보를 나타내므로 고해상도에서의 베리오그램 모델과 블록 자료의 베리오그램 모델이 같다고 전제하여 고해상도 현장 자료의 베리오그램 모델을 직접적으로 이용하는 것이다. 그러나 Park(2011)에서 논의한 것처럼, 동일 속성이더라도 해상도에 따라 통계적 특성은 달라질 수 있기 때문에 고해상도 현장 자료의 점 기반 베리오그램 모델을 직접적으로 이용할 수는 없다. 대신 이 연구에서는 베리오그램 디컨볼루션(variogram deconvolution) 기법을 이용하여 식 (2)의 공분산 계산에 필요한 점 기반 베리오그램 모델을 블록 자료로부터 유추하였다. Journel and Huijbregts (1978)에 의해 제안되고, Goovaerts (2008)에 의해 구체화된 베리오그램 디컨볼루션 기법은 반복 연산을 통해 초기 추정된 점 기반 베리오그램 모델로부터 계산되는 정규 베리오그램(regularized variogram)과 블록 자료의 영역 기반 베리오그램 사이의 차이를 줄여가면서 최적의 점 기반 베리오그램 모델을 찾는 일종의 역산(inversion) 기법에 해당한다.

Journel and Huijbregts (1978, p.77)과 정상성의 가정에 따른 간략화에 의해 점 기반 베리오그램과 블록 기반

정규 베리오그램은 식 (3)의 관계가 성립한다.

$$\gamma_v(h) = \gamma_p(h) - \bar{\gamma}(v, v) \quad (3)$$

여기서 γ_v 와 γ_p 는 블록 및 점 기반 베리오그램을 각각 나타내며, $\bar{\gamma}(v, v)$ 는 블록을 이산화시킨 점들 사이의 평균 베리오그램을 나타낸다.

우선 특정 베리오그램 모델의 형태와 파라미터를 초기화시킨 후에, 식 (3)을 이용하여 초기 점 기반 베리오그램을 영역 기반 베리오그램으로 정규화시킨다. 그리고 이 정규화된 베리오그램 모델과 원 블록 자료의 베리오그램 모델을 비교하여, 그 차이가 특정 임계값보다 작을 때까지 초기 베리오그램 모델의 형태 및 파라미터들을 바꾸어가면서 반복 연산을 수행하여 차이를 최소화하는 점 기반 베리오그램 모델을 찾게 된다. 이러한 베리오그램 디컨볼루션을 통해 유추된 점 기반 베리오그램 모델을 식 (2)에 적용하여 영역-점 기반 정규 크리깅의 가중치를 계산하여 저해상도 부가 자료의 상세화를 수행한다.

영역-점 기반 정규 크리깅의 결과는 식 (4)와 같이 상세화된 결과를 원 자료의 해상도로 업스케일링 할 경우 그대로 값이 재생산되는 coherency 특성을 가진다 (Goovaerts, 2008).

$$y(v_k) = \frac{1}{n(v_k)} \sum_{i=1}^{n(v_k)} y(u_i) \quad (4)$$

여기서 $n(v_k)$ 는 k 번째 블록 자료를 이산화시키는 점들의 개수를 나타낸다.

이 조건은 동일한 개수의 블록 자료를 이산화하는데 점 위치에서의 공간 예측에 사용할 경우 만족하므로, 별도의 정규화 과정을 수행할 필요가 없는 장점이 있다.

2) 자료 통합

일단 저해상도 부가 자료를 목표 해상도로의 상세화를 수행한 이후, 목표 해상도에서 정밀 관측 자료와 상세화된 부가 자료를 통합하여 공간 예측을 수행한다. 이 논문에서는 이러한 지상 및 부가 자료의 통합에 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅 기법을 적용하였다.

연구 지역에 n 개의 정밀 관측 자료 $\{z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$ 가 있다고 했을 때, 연구 지역의 목표 해상도의 모든 위치 u 에서의 속성값 $z^*(u)$ 은 상세화된 부가 자료 $y^*(u)$ 를 통합하여 얻어진다. 가변적 지역 평균 기반 단순 크

리깅 기법은 단순 크리깅에서 가정하는 일정한 평균값을 예측 위치별로 변하는 지역 평균 $m^*(u)$ 으로 대체하여 부가 자료를 통합한다. 이를 수식적으로 표현하면 식 (5)와 같다.

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

여기서 $n(u)$ 는 탐색창내에 포함되는 정밀 관측 자료의 수를 나타낸다.

연구 지역의 모든 예측 위치에서의 지역 평균 $m^*(u)$ 을 구하기 위해 우선 정밀 관측 자료 위치에서의 속성값과 상세화된 부가 자료를 대상으로 회귀분석을 적용하였다. 부가 자료는 이미 연구 지역의 모든 위치에서 알고 있으므로, 이 회귀 관계식을 적용하여 연구 지역의 모든 위치에서 지역 평균을 구하게 된다. 회귀분석으로 설명되지 않는 부분인 잔차 성분은 지상 관측 자료의 위치에서만 얻을 수 있으므로, 이 자료들을 대상으로 평균 0인 단순 크리깅을 적용하여 연구 지역의 모든 위치에서의 잔차 성분을 유추한다. 최종적으로 지역 평균값과 잔차 성분을 더함으로써 연구 지역의 모든 위치에서의 속성 예측값을 얻게 된다. 자료 통합을 위한 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅은 확률 변수를 평균과 잔차 성분으로 분해하여 개별적으로 처리를 하게 되는데(Goovaerts, 1997), 공간 예측을 위한 크리깅 기법의 적용은 잔차 성분에 한정된다. 따라서 실제 이 기법을 적용하기 위해서는 원 속성값의 베리오그램 모델을 필요로 하지 않고, 잔차 성분의 베리오그램 모델을 필요로 한다.

3. 실험

1) 자료

제안 기법의 적용성 평가를 위해 강수 주제도 작성을 목적으로, 지상 관측 자료와 저해상도 부가 자료로 유인 기상관측소 자료와 TRMM 자료를 각각 이용하였다(Fig. 2). 시범적으로 2005년 4월의 69 지점의 유인 기상관측소 누적 강수 자료를 지상 관측 자료로 이용하였다. 그리고 부가 자료로 동일한 시기의 TRMM 3B43 자료를 이용하였다. 이 자료는 0.25° 간격의 공간 해상

Fig. 2. Data sets used for precipitation mapping, (a) ground observation stations, (b) TRMM 3B43 data (unit: mm).

도에서 mm/h 단위의 정보를 제공한다. 이 자료를 TM 좌표계의 공간 해상도 25 km 자료로 변환을 하였으며, 지상 관측 자료의 속성값인 누적 강수량으로 변환하여 통합에 사용하였다.

지상 관측 자료와 비교하였을 때, TRMM 자료는 남부 지방의 높은 누적 강수량 패턴을 나타내고 있지만, 지상 관측 자료에서는 상대적으로 낮은 강수량을 보이는 충청도 지역 근방에서는 높은 값을 나타내고 있다. 이러한 차이는 저해상도 TRMM 자료의 처리 과정에 포함되는 오차에 기인한 것으로 판단된다. 이렇게 오차를 포함하는 저해상도 자료가 소수의 지상 관측 자료의 공간 예측 정확도 향상에 기여할 수 있는지를 실험을 통해 살펴보았는데, 상세화를 위한 목표 해상도는 실험적으로 5 km와 1 km의 2가지로 설정하였다.

2) 지구통계학 기반 상세화 결과

영역-점 변환 정규 크리깅의 적용에 필요한 점 기반 베리오그램은 원시 TRMM 자료로부터 베리오그램 디컨볼루션을 이용하여 추정하였다. 가장 고해상도인 목표 해상도 1 km를 고려하여, 25 km 블록 TRMM 자료는 25×25 개로 이산화시켜 추정에 이용하였다.

Fig. 3은 TRMM 블록 자료의 베리오그램 모델과 베

Fig. 3. Variogram deconvolution results.

리오그램 디컨볼루션에 의해 추정된 점 기반 베리오그램 모델을 나타내고 있다. TRMM 자료의 실험적 베리오그램에 나타나는 근거리에서 서서히 증가하는 양상과 원거리에서의 선형 증가 양상의 모델링을 위해 서로 다른 상관거리를 가지는 가우시안 모델과 구형 모델을 각각 이용하였다. 베리오그램 디컨볼루션에 의해 추정된 점 기반 베리오그램 모델은 블록 자료의 스케일로 식 (3)을 이용하여 정규화시켰을 경우 원 블록 기반 베리오그램 모델과 유사하게 나타난다. 그러나 원 블록 자료의 베리오그램 모델과 달리 근거리에서는 지수 모델로, 원거리에서는 가우시안 모델로 구성되며

Fig. 4. Downscaling results of TRMM data at the target resolution of (a) 5 km, (b) 1 km.

Fig. 5. Coherency property check results; (a) 5 km downscaled result and (b) 1 km downscaled result.

각 모델별 상관거리가 모두 다르게 나타났다. 또한 점 기반 자료의 일반적인 특성으로 블록 기반 베리오그램 모델보다 상대적으로 큰 문턱값을 나타내었다. 이러한 결과는 해상도에 따라 동일 속성이더라도 공간 자기 상관 구조가 바뀔 수 있음을 의미하므로, 실제 적용시 목표 해상도에서의 분석이 필요함을 지시한다.

Fig. 3에 제시한 점 기반 베리오그램 모델을 이용하여 식 (1)과 (2)의 영역-점 변환 정규 크리깅을 수행하였

으며, 그 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 두 목표 해상도에서의 상세화 결과는 모두 Fig. 2(b)의 원시 블록 TRMM 자료의 전반적인 패턴을 유지하면서, 국소적인 변이를 나타내고 있다. 이렇게 상세화된 결과를 원래 TRMM 자료의 해상도인 25 km로 업스케일링하였을 때의 값을 비교해보면(Fig. 5), 모두 원 블록 자료의 값을 그대로 재생산하여 coherency 특성을 잘 만족하는 것을 확인할 수 있다. 즉 Fig. 4의 상세화 결과는 원 블록 자료의

해상도 값을 그대로 유지하면서 최소 자승의 관점에서 블록 내부적으로 상세한 변화 양상을 나타내는 결과임을 의미한다.

3) 자료 통합 결과

일단 저해상도 블록 TRMM 자료를 목표 해상도에 상제화시킨 이후에, 가변적 지역 평균 기반 단순 크리깅을 적용하여 지상 관측 자료와 통합을 수행하였다. 우선 가변적 지역 평균을 계산하기 위해 정밀 관측 자료 위치에서의 상세화된 TRMM 자료를 이용하여 선형 회귀분석을 수행하였다. 선형 회귀분석 결과, 목표 해상도와 상관없이 TRMM 자료는 정밀 관측 강수 자료의 약 33.3%를 설명하는 것으로 나타났다. 선형 회귀식에서 기울기 계수는 목표 해상도에 따른 차이가 없이 거의 유사하게 나타났으며, 절편 계수는 1 km 목표 해상도에서 절대값이 더 크게 나타나서 해상도가 증가할수록 속성값의 변이가 커지는 일반적인 현상을 보였다. 이러한 해상도별 선형 회귀분석 관계식을 연구 지역의 모든 위치에서의 상세화된 TRMM 자료에 적용하여 지역 평균값을 계산하였다. 이후 정밀 관측 자료 위치에서 선형 회귀분석으로 설명되지 않는 잔차 성분을 대상으로 베리오그램 모델링을 수행하였다. 5 km와 1

km 해상도에서의 선형 회귀분석 관계식의 차이가 절편에서만 차이가 나기 때문에 이 두 해상도에서의 잔차 성분의 베리오그램 모델은 문턱값과 상관거리에서 차이가 두드러지지 않았으며, 가중 최소 자승법을 이용한 모델링 결과를 잔차 성분의 단순 크리깅에 이용하였다. 이후 연구 지역의 모든 위치별 지역 평균값에 단순 크리깅에 의해 예측된 잔차 성분을 더하여 연구 지역의 최종 강수 분포도를 제작하였다.

Fig. 6은 목표 해상도 5 km와 1 km에서의 최종 강수 분포도를 나타내고 있다. 정밀 관측 자료와 저해상도 TRMM의 통합 결과에서는 Fig. 2(a)의 정밀 관측 자료의 패턴과 유사한 양상을 보이고 있다. 즉 자료값이 존재하는 지역 근방에서는 남부 지방에서의 높은 강수값과 충청북도, 경상북도, 강원도 연안 지역의 낮은 강수값을 잘 반영하고 있다. 반면 예측 위치가 정밀 관측 자료로부터 멀어지거나 존재하지 않는 해양 지역에서는 Fig. 4의 상세화된 TRMM 자료의 영향이 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

제안 기법의 예측 능력을 정량적으로 평가하기 위해 leave-one-out 기반의 교차 검증을 수행하였다. 69개 기상 관측소 지점 자료를 한 개씩 고의로 제거한 이후, 나머지 68개 자료를 이용하여 제거된 지점의 값을 예측

Fig. 6. Geostatistical integration results at the target resolution of (a) 5 km, (b) 1 km.

Table 1. Cross validation results

	5 km resolution		1 km resolution	
	MAE	RI (%)	MAE	RI (%)
Ordinary kriging(without TRMM data)	12.19	-	13.03	-
Proposed method(with TRMM data)	8.32	31.70	8.84	32.16

하는 과정을 69번 반복하였다. 관측소별로 참값을 가지고 있으므로 이 값과 추정값의 비교를 통해 오차를 계산하였다. 오차를 포함하는 저해상도 TRMM 자료의 이용 효과를 살펴보기 위해 기상 관측소 자료만을 이용하는 단변량 정규 크리깅을 비교를 목적으로 적용하였다. 교차 검증 결과의 오차 통계치로 평균 절대 오차(mean absolute error, MAE)를 계산하였으며, 단변량 정규 크리깅에 대한 상대적인 평균 절대 오차의 향상 지수(relative improvement index, RI)를 함께 계산하였다. Table 1은 이러한 교차 검증 결과를 나타는데, 상세화된 TRMM 자료를 제안 기법에 의해 이용할 경우 모든 목표 해상도에서 TRMM 자료를 이용하지 않는 정규 크리깅에 비해 상대적으로 낮은 평균 절대 오차를 보였으며, 정량적인 향상도는 31.7%에서 32.1% 정도를 보였다. 이러한 정량적 검증 결과로부터, 오차를 포함하는 저해상도 부가 자료를 제안 기법에 의해 지상 자료와 통합할 경우 공간적으로 소수의 지점에서 획득된 정밀 관측 자료의 공간 예측 정확도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 토의 및 결론

공간 예측을 목적으로 다양한 해상도에서 얻어진 자료를 효과적으로 통합하기 위해서는 자료간의 해상도 차이를 적절하게 고려할 수 있는 통합 방법론을 필요로 한다. 이 논문에서는 저해상도 부가 자료를 상대적으로 고해상도에서 정밀 관측 자료와 통합하기 위해 자료 상세화 및 통합의 2단계로 구성된 다변량 크리깅 기법을 제안하였다. 제안 기법의 주안점은 첫 번째 단계에서 적용한 저해상도 부가 자료의 지구통계학 기반 상세화 과정이다. 저해상도 부가 자료는 고려하고 있는 속성 혹은 변수값과 연관성이 높으나 유추 혹은 모델링 과정에서 오차를 포함할 수 있으며, 목표 변수와의 해

상도 차이로 자료 변이가 일반적으로 낮게 나타난다. 따라서 해상도 차이를 고려하지 않고 직접적으로 정밀 관측 자료와의 보정을 수행하거나 통합할 경우, 해상도 차이에 따른 변수간 통계적 연관성의 차이를 제대로 설명할 수 없다. 이러한 배경에서 이 연구에서는 저해상도 자료를 우선 목표 해상도로의 상세화를 먼저 수행한 이후에 지상 자료와의 통합을 수행하였다.

강수 분포도 작성을 목적으로 저해상도 TRMM 자료와 정밀 관측 기상 자료와의 통합 사례 연구를 통해 제안 기법은 효율적으로 서로 다른 해상도의 자료를 통합할 수 있음을 확인하였다. 또한 오차를 포함하는 저해상도 부가 자료라도 제안 기법을 통해 통합할 경우, 정밀 관측 자료만을 이용하여 생성된 주제도에 비해 향상된 예측 정확도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 우리나라 강수 특성상 고도, 사면 방향, 해안선으로부터의 거리 등과 같은 다양한 지형 효과가 영향을 미칠 수 있다. 따라서 상세화된 TRMM 자료와 정밀 관측 자료와 더불어 이러한 지형 자료를 함께 통합할 필요가 있다.

이 연구에서 적용한 최소 자승 기반 크리깅을 이용한 저해상도 공간 자료의 상세화는 기본적으로 자료의 저해상도 자료의 공간 분포에 의존한 해상도 향상에 해당한다. 그러나 근원 부근에서 멀어질수록 급격하게 변하는 지화학 자료나 기타 불연속성이 강한 공간 자료에의 적용시에는 최소 자승 기반 오차 분산의 최소화 방식은 적합하지 않을 수 있다. 저해상도 공간 자료의 상세화는 일종의 *under-determined* 역산 과정으로 간주할 수 있기 때문에 다양한 해가 존재한다. 따라서 평활화 효과보다는 공간 상관성 정보를 보다 잘 반영할 수 있는 시뮬레이션의 적용을 통해 다양한 상세화 결과를 생성할 필요가 있다. 이렇게 시뮬레이션을 이용하여 얻어진 상세화 결과들에 대해 이 연구에서 제안한 정밀 관측 자료를 이용한 보정 및 통합을 수행할 경우, 보다 현실적인 상세화된 주제도 생성이 가능할 것

으로 판단되며 추가 연구를 수행할 예정이다.

이 연구에서는 정밀 관측 자료가 존재한다는 전제하에 저해상도 부가 자료를 함께 이용하는 방법론을 제안하였다. 그러나 때로는 동일 시기의 정밀 관측 자료가 존재하지 않고, 저해상도 부가 자료만 존재하는 경우도 있을 수 있다. 이러한 경우, 저해상도 부가 자료의 직접적인 상세화만으로는 원하는 수준의 예측 정확도를 얻지 못할 수도 있다. 이렇게 대상 속성에 대한 저해상도 주제 정보만 존재하지만 대상 속성과 연관성이 높은 부가 자료가 존재할 경우, 이를 효과적으로 통합할 필요가 있다. 예를 들어 강수 주제 정보를 제공하는 저해상도 TRMM 자료이외에 강수와 연관성이 높은 전술한 지형 자료(고해상도 수치표고모델 등)의 이용이 가능할 경우, 저해상도 TRMM 자료의 상세화에 이러한 고해상도 주제 정보를 이용할 수 있다. 이 연구에서는 저해상도 TRMM 자료의 상세화에 영역-점 변환 정규 크리깅을 적용하였으나, 이러한 상세화 과정에서 해상도 차이를 고려한 다변량 크리깅 기법으로의 확장이 가능하다. 앞으로 이렇게 정밀 관측 자료가 존재하지 않고, 전역적인 고해상도 부가 정보가 존재할 경우를 대상으로 저해상도 자료의 상세화 연구를 수행할 예정이다.

사 사

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었습니다(2012R1A1A1005024). 부분적으로 이 연구는 인하대학교의 지원을 받았습니다.

참고문헌

Chung, S.-Y. and K.-K. Lee, 1995. Application of cokriging for the estimation of groundwater level distribution at the Najido waste landfill area, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 2(2): 58-63 (in Korean with English abstract).

Deutsch, C.V. and A.G. Journel, 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2nd Edition, Oxford University Press.

Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.

Goovaerts, P., 1999. Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity, *Catena*, 34(3-4): 227-243.

Goovaerts, P., 2008. Kriging and semivariogram deconvolution in the presence of irregular geographical units, *Mathematical Geosciences*, 40(1): 101-128.

Goovaerts, P., 2010. Combining areal and point data in geostatistical interpolation: application to soil science and medical geography, *Mathematical Geosciences*, 42(5): 535-554.

Journel, A.G. and C.J. Huijbregts, 1978. *Mining Geostatistics*, Academic Press.

Kaheil, Y.H., M.K. Gill, M. McKee, L.A. Bastida, and E. Rosero, 2008. Downscaling and assimilation of surface soil moisture using ground truth measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(5): 1375-1384.

Kyriakidis, P.C., 2004. A geostatistical framework for area-to-point spatial interpolation, *Geographical Analysis*, 36(3): 259-289.

Liu, Y. and A.G. Journel, 2009. A package for geostatistical integration of coarse and fine scale data, *Computers and Geosciences*, 35(3): 527-547.

Oh, S., 2009. Geostatistical integration of multi-geophysical data measured at different ranges, *Geophysics and Geophysical Exploration*, 12(4): 309-315 (in Korean with English abstract).

Park, N.-W., 2010. Downscaling of thematic maps based on remote sensing data using multi-scale geostatistics, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(1): 29-38 (in Korean with English abstract).

Park, N.-W., 2011. The effects of spatial patterns in

- low resolution thematic maps on geostatistical downscaling, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(6): 625-635.
- Park, N.-W., D.-H. Jang, and K.-H. Chi, 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.
- Sales, M.H., C.M. Souza Jr., P.C. Kyriakidis, D.A. Roberts, and E. Vidal, 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondonia, Brazil, *Ecological Modeling*, 205(1-2): 221-230.
- Simbahan, G.C., A. Dobermann, P. Goovaerts, J. Ping, and M.L. Haddix, 2006. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data, *Geoderma*, 132(3-4): 471-489.