저해상도 비율 자료로부터 고해상도 범주형 주제도 생성을 위한 지구통계학적 블록 시뮬레이션

박노욱^{1,*} · 이기원²

¹인하대학교 지리정보공학과, 402-751, 인천광역시 남구 용현동 253

²한성대학교 정보시스템공학과, 136-792, 서울특별시 성북구 삼선동2가 383

A Geostatistical Block Simulation Approach for Generating Fine-scale Categorical Thematic Maps from Coarse-scale Fraction Data

No-Wook Park^{1,*} and Kiwon Lee²

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²Department of Software System Engineering, Hansung University, Seoul 136-792, Korea

Abstract: In any applications using various types of spatial data, it is very important to account for the scale differences among available data sets and to change the scale to the target one as well. In this paper, we propose to use a geostatistical downscaling approach based on variogram deconvolution and block simulation to generate fine-scale categorical thematic maps from coarse-scale fraction data. First, an iterative variogram deconvolution method is applied to estimate a point-support variogram model from a block-support variogram model. Then, both a direct sequential simulation based on area-to-point kriging and the estimated point-support variogram are applied to produce alternative fine-scale fraction realizations. Finally, a maximum a posteriori decision rule is applied to generate the fine-scale categorical thematic maps. These analytical steps are illustrated through a case study of land-cover mapping only using the block fraction data of thematic classes without point data. Alternative fine-scale fraction maps by the downscaling method presented in this study reproduce the coarse-scale block fraction values. The final fine-scale land-cover realizations can reflect overall spatial patterns of the reference land-cover map, thus providing reasonable inputs for the impact assessment in change of support problems.

Keywords: change of support, variogram, simulation, land-cover map

요 약: 다양한 형태의 공간 자료를 이용하는 응용 분야에서 이용가능한 자료간 해상도 차이를 반영하고, 원하는 타겟 해상도로의 변환은 매우 중요하다. 이 논문에서는 저해상도 비율 자료로부터 고해상도 범주형 주제도를 제작하기 위해 베리오그램 디컨볼루션과 블록 시뮬레이션을 이용하는 지구통계학적 다운스케일링 방법론을 제시하였다. 우선 블록 기반 베리오그램으로부터 점 기반 베리오그램 모델의 추정을 위해 반복 연산 기반 베리오그램 디컨볼루션 방법을 적용하였다. 그리고 영역-점 변환 크리깅과 추정된 점 기반 베리오그램 모델을 이용하는 직접 순차적 시뮬레이션을 적용하여 고해상도 비율 정보를 제작하였다. 최종적으로 최대 사후 확률 결정 규칙을 적용하여 대안적 고해상도 범주형 주제도를 제작하였다. 점 기반 자료 없이 저해상도 블록 비율자료만을 이용한 토지피복도 제작 사례 연구를 통해 제안 분석 과정을 예시하였다. 제안한 다운스케일링 기법의 적용을 통해 원 저해상도 블록 비율 자료값을 재생산하는 고해상도 비율 자료를 생성하였으며, 이로부터 기준 토지피복도의 전반적인 패턴을 반영하는 대안적 고해상도 토지피복도 제작이 가능함을 확인할 수 있었다. 이렇게 생성된 고해상도 자료들은 해상도 변환의 영향 분석에 유용한 입력 자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어: 해상도 변환, 베리오그램, 시뮬레이션, 토지피복도

*Corresponding author: nwpark@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7607

Fax: +82-32-863-1506

서론

지구과학 자료를 포함한 공간 자료는 자료 획득 방식과 영향이 미치는 영역에 따라 다양한 스케일로 획득되고, 스케일에 따라 제공 정보의 양과 질이 달라진다. 현장에서 획득되는 지화학 탐사 자료는 점(point) 기반 자료에 해당되며, 전기비저항 탐사 자료의 3차원 블록 역산 결과는 블록 자료에 해당된다. 또한 최근 이용이 급증하고 있는 인공위성 원격탐사 기술은 수백 km 저해상도 기상 자료에서 1m 미만의 고해상도 자료를 제공할 수 있다.

특정 응용 분야에서는 자료의 가용 상황과 목적에 따라 자료의 해상도를 변환하는 영역 변환(change of support)을 수행해야 한다. 실제 공간에서 연속적으로 변화하는 자료를 획득 방식에 따라 일정 공간 단위 혹은 해상도로 합산(aggregation) 할 경우 실질적인 공간 분석 수행과정에서 정보의 손실과 해석상의 문제를 야기할 수 있으며, 이는 지리학에서 가변적 공간 단위 문제(modifiable areal unit problem)로 알려져 있다(Openshaw and Taylor, 1979; Young and Gotway, 2007). 이러한 문제로 원래 해상도에서의 자료간 통계적 연관성은 다른 해상도의 자료로 변환시 변하게 된다. 또한 저해상도 자료에서 고해상도 자료를 생성하는 다운스케일링(downscaling)은 일종의 역산 과정으로, 원 저해상도 자료값과 동일한 조합값을 나타내는 다양한 해가 존재한다(박노옥, 2010a). 이 과정에서 다운스케일링된 고해상도 자료를 원래 저해상도 자료로 업스케일링했을 때 원 블록 자료와 일치해야 한다.

시공간 자료의 효율적인 분석 방법론으로 간주되는 지구통계학은 광상학에서 출발한 기원에 따라 포인트 자료로부터 블록 자료를 예측하는 방법론으로 블록 크리깅 방법을 포함한다(Goovaerts, 1997; Deutsch and Journel, 1998). 그러나 이론적으로 크리깅은 자료와 예측 타겟 해상도에서의 차이를 반영할 수 있다(Journel and Huijbregts, 1978). 이와 관련하여 Kyriakidis(2004)는 영역 혹은 블록 자료로부터 점 기반 자료를 생성하는 지구통계학적 분석 방법론으로 영역-점 변환 크리깅(area-to-point kriging)을 제시하였다. 만약 저해상도 자료로부터 고해상도 자료를 생성하는 다운스케일링 과정에 지구통계학적 모델링에 사용되는 공간적 자기상관성을 반영할 수 있다면, 역산 과정에서 가능한 해의 범위를 좁힐 수 있다. 이러

한 다운스케일링 이슈와 관련하여 Kyriakidis and Yoo(2005)는 인위적 생성 자료에 대해 크리깅과 시뮬레이션을 적용하였으며, Liu and Journel(2009)는 블록 크리깅과 블록 시뮬레이션을 제안함과 동시에 SGeMS(Remy et al., 2009)에서 실행 가능한 패키지를 제공하였다. 또한 Goovaerts(2010)는 점 기반 자료와 블록 자료가 동시에 존재하는 중금속 오염도 작성과 질병자료 분석 사례연구를 수행하였다. 국내에서 박노옥(2010a)과 오석훈과 한성미(2010)는 각각 원격탐사 자료 기반 저해상도 주제도의 다운스케일링과 물리탐사 자료의 해상도 향상에 시뮬레이션을 적용하였다. 그러나 국내에서는 해상도 변환에 지구통계학을 적용한 연구보다는 크리깅이나 시뮬레이션을 이용한 주제도 생성 연구가 주로 수행되었다(오석훈, 2005; 박노옥, 2010b). 전술한 해상도 변환과 관련된 기존 연구들에서 Kyriakidis and Yoo(2005)를 제외한 나머지 연구들은 점 기반 자료가 이미 존재한 상태에서 블록 자료를 함께 이용하여 다운스케일링을 수행하였다.

그러나 만약 현장 조사 자료와 같은 점 기반 자료가 없이 저해상도 블록 자료만 있을 경우, 분석 타겟 해상도 즉 고해상도를 대상으로 한 점 기반 베리오그램의 이용이 불가능하다. 이러한 상황을 고려한 기존 연구 중 Kyriakidis and Yoo(2005)는 인위적으로 포인트 자료로부터 생성한 블록 자료를 대상으로 하였기 때문에 포인트 기반 베리오그램을 추정하지 않고, 원 자료의 베리오그램을 그대로 사용하였다. 따라서 점 기반 자료가 존재하지 않는 실제 사례 연구에서는 적용의 제약이 따른다. 대안적으로 저해상도 자료의 베리오그램 모델을 이용하여 고해상도에서 크리깅이나 시뮬레이션을 수행할 수는 있으나, 전술한 가변적 공간 단위 문제에서 야기되는 고해상도 자료와 이를 업스케일링한 저해상도 자료에서의 베리오그램 모델의 형태 및 파라미터들의 유사성을 장담할 수 없다. 또한 이러한 방식으로는 다운스케일링에서 중요한 제한조건인 고해상도 자료를 다시 저해상도로 변환하였을 때 원 저해상도 자료값을 그대로 재생산한다는 것을 보장할 수 없다. 따라서 지구통계학적 분석 결과가 베리오그램 모델 파라미터에 의존적임을 고려할 때, 실제 응용 연구에서 흔히 발생할 수 있는 블록 자료만 있는 경우를 위해 이 블록 자료로부터 점 기반 베리오그램 추정 방법론의 개발이 필요하다. 점 기반 베리오그램 추정 방법론과 관련하여 Journel

and Huijbregts(1978)은 이러한 과정을 디컨볼루션(deconvolution)으로 명명하면서 관계식을 제안하였다. 최근 Goovaerts(2008)는 이 관계식을 실제 적용하는 최적화 과정을 제안하면서 다양한 블록 형태의 질병 자료에 대한 사례연구를 통해 적용 가능성을 제시하였다.

이러한 기존 지구통계학 기반 다운스케일링 연구는 대부분 연속형 자료를 대상으로 하였는데, 토지피복, 지질 암상, 토양 속성 등과 같은 범주형 자료에 대한 연구는 상대적으로 많이 수행되지 못하였다. Boucher and Kyriakidis(2006)은 저해상도 범주별 비율(fraction) 자료로부터 고해상도 토지피복 분류도 작성을 위해 점 기반 자료가 있을 경우와 없을 경우 모두에 적용 가능한 지시자 공동 크리깅과 시뮬레이션을 제안하였다. 그러나 이 연구 역시 추정 과정에 필요한 점 기반 베리오그램을 이미 알고 있다는 전제하에 연구가 수행된 한계가 있다.

이 연구에서는 현장 조사 기반 점 자료가 없이 저해상도 블록 형태의 범주형 비율 자료만 이용가능한 경우에 고해상도 범주형 주제도 제작을 목적으로 베리오그램 디컨볼루션과 결합된 블록 시뮬레이션의 적용 절차를 제안하고자 한다. 기존 연구 동향에서 분석한 것처럼 현장 조사 자료 없이 블록 자료만 있을 경우에 이 두 가지 방법론을 결합한 연구는 그동안 수행되지 못하였다. 여러 범주에 대한 비율 자료들의 동시 블록 시뮬레이션의 번거로움을 완화하기 위해 자료간 상관성을 줄여주는 주성분 변환(principal component transform)을 수행한 후에, 이 주성분 변환된 자료에 대해 개별적으로 베리오그램 디컨볼루션을 적용하여 점 기반 베리오그램을 추정하였다. 그리고 추정된 점 기반 베리오그램을 이용하여 상대적으로 고해상도에서 시뮬레이션을 독립적으로 수행한 후에, 역 주성분 변환을 이용하여 고해상도 비율 자료를 생성하였다. 최종적으로 고해상도 비율 자료에 결정 규칙을 적용하여 고해상도 범주형 주제도를 제작하였다. 이러한 과정의 예시를 위해 토지피복도 작성 사례 연구를 수행하였다.

다중 스케일 블록 시뮬레이션

영역-점 변환 크리깅

영역-점 변환 크리깅은 저해상도 자료로부터 상대적으로 고해상도의 그리드에서 속성값을 예측하는 크

리깅으로 Kyriakidis(2004)에 의해 명명되었다. 이 방식은 샘플링되지 않은 지점에서 샘플 자료를 이용하여 값을 예측하는 기존 크리깅과는 달리 블록 단위에서 이미 값을 가지고 있는 상태에서 블록을 이산화시킨 지점에서의 값 예측을 목적으로 한다.

연구지역에서 N 개의 블록으로 구성된 저해상도 주제도의 속성값 $\{Z(v_i), i=1,2,\dots,N\}$ 이 있을 경우, 블록을 이산화시키는 그리드 u_s 에서의 정규 크리깅 기반 영역-점 변환 크리깅 추정치 $\hat{z}(u_s)$ 는 K 개의 주변 자료로부터 식 (1)을 이용하여 구하게 된다(Goovaerts, 2008).

$$\hat{z}(u_s) = \sum_{i=1}^K \lambda_i(u_s) z(v_i) \quad (1)$$

여기서 $\lambda_i(u_s)$ 는 주변 자료에 부여되는 크리깅 가중치를 나타낸다.

크리깅 가중치 $\lambda_i(u_s)$ 와 라그랑지안 상수 $\mu(u_s)$ 는 식 (2)의 크리깅 방정식을 이용하여 계산된다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^K \lambda_j(u_s) \bar{C}(v_i, v_j) + \mu(u_s) &= \bar{C}(v_i, u_s), \quad i=1, \dots, K \\ \sum_{j=1}^K \lambda_j(u_s) &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\bar{C}(v_i, v_j)$ 와 $\bar{C}(v_i, u_s)$ 는 각각 블록 자료와 블록 자료간의 공분산과 블록 자료와 이산화된 그리드 사이의 블록-점 공분산을 나타낸다.

부가적으로 크리깅 분산 $\hat{\sigma}^2(u_s)$ 은 식 (3)으로부터 계산된다.

$$\hat{\sigma}^2(u_s) = C(0) - \sum_{i=1}^K \lambda_i(u_s) \bar{C}(v_i, u_s) - \mu(u_s) \quad (3)$$

여기서 $C(0)$ 는 문턱값(sill)을 나타낸다.

영역-점 변환 크리깅의 제한조건으로 크리깅 추정치를 원 자료의 블록 단위로 업스케일링시켰을 때 원 블록 자료의 값을 재생산해야 한다. 이러한 제한 조건은 만약 크리깅에 사용된 K 개의 블록 자료가 P_β 개의 이산화 포인트 u_s 의 추정에 동일하게 사용된다면 재생산 조건을 만족하게 된다(Kyriakidis, 2004; Goovaerts, 2008).

점 기반 베리오그램 추정

영역-점 변환 크리깅을 실제로 수행하기 위해서는

식 (2)에 제시된 것처럼 점 기반의 베리오그램 혹은 공분산을 계산해야 한다. 그러나 실제 가지고 있는 자료는 블록 기반 자료이기 때문에 직접적으로 계산할 수 없다. 따라서 블록 자료로부터 포인트 기반의 베리오그램 추정을 위해 최적화 기법을 적용해야 하는데, 이 연구에서는 Journal and Huijbregts(1978)에 의해 제안된 베리오그램 디컨볼루션 기법을 기반으로 순차적 갱신을 통해 추정하는 Goovaerts(2008)의 방법을 적용하였다. 이 논문에서는 기본 개념만을 제시하며, 자세한 방법론은 Goovaerts(2008)를 참조할 수 있다. 이 방법은 우선 블록 자료로부터 계산된 베리오그램 모델로부터 초기 점 기반 베리오그램을 정의하면서 시작된다. 이러한 초기 점 기반 베리오그램을 블록 기반으로 정규화 시킨 후에, 원 블록 자료의 베리오그램 모델과 비교하여 오차를 계산한다. 이 때 오차를 최소화하도록 순차적으로 점 기반 베리오그램 모델의 파라미터들을 조절하여 최종적으로 점 기반의 베리오그램을 유추하게 된다.

블록 시뮬레이션

다운스케일링과 같은 역산 문제는 고해상도 그리드에서 다양한 해를 가질 수 있다. 전술한 영역-점 변환 크리깅은 최소자승 관점에서 최적의 해를 제공하지만, 크리깅의 특성상 평활화 효과를 나타낸다. 그러나 실제로 다양한 해들이 존재할 수 있으며, 다운스케일링된 고해상도 주제도는 이를 입력으로 사용하는 모델의 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 영역-점 변환 크리깅의 제한조건을 만족하는 다양한 해를 제공하는 것이 추후 오차 혹은 불확실성 분석에 직접적으로 적용이 가능하다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 영역-점 기반 크리깅만을 적용하지 않고, 블록 시뮬레이션을 적용하였다.

일반적인 점 기반 시뮬레이션과 마찬가지로, 블록 시뮬레이션 역시 영역-점 기반 크리깅을 기반으로 시뮬레이션을 수행한다. 이 때 일반적으로 많이 사용되어온 순차적 가우시안 시뮬레이션(sequential Gaussian simulation)의 적용을 고려할 수 있다. 이 방법론은 정규 점수 변환을 통해 원 자료를 정규분포를 따르게 한 후에 시뮬레이션을 수행하고, 최종적으로 역정규 점수 변환을 적용하여 원 자료에 대한 시뮬레이션 결과를 얻게 된다(Deutsch and Journel, 1998). 그러나 이 논문에서 고려하고 있는 블록 자료는 점 기반 자료가 선형적으로 평균된 값을 나타낸다는 기

본 전제를 가지고 있기 때문에, 정규 점수 변환과 같은 비선형 변환을 적용할 경우 원 블록 자료 값의 재생산을 보장할 수 없다.

이러한 가우시안 시뮬레이션의 적용상 한계점을 극복하기 위해 Hansen and Mosegaard(2008)과 Liu and Journel(2009)는 원 자료의 공간에서 시뮬레이션을 수행하는 직접 순차적 시뮬레이션(direct sequential simulation: 이하 DSS)을 적용하였는데, 이 연구에서도 DSS를 시뮬레이션 방법으로 적용하였다. 실제 적용 과정은 순차적 시뮬레이션과 유사하나, DSS가 원 자료의 히스토그램을 재생산할 수 없으므로 영역-점 변환 크리깅 추정치와 분산값을 이용하여 원 블록 자료의 히스토그램으로부터 ccdf(conditional cumulative distribution function)를 구성하는 과정이 포함된다. DSS에 대한 이론적 배경은 Soares(2001)를 참조할 수 있다.

이 시뮬레이션 방법론은 연속형 자료에 대해 적용이 가능한데, 이 연구에서 고려하고 있는 범주별 비율 자료는 0에서 1 사이의 연속형 자료값을 나타내므로 적용이 가능하다. 그러나 모든 범주별 비율 자료의 합은 1이 되어야 하는 제한 조건이 있으며, 모든 그리드 위치에서 동일 과정으로부터 생성된 자료이므로 서로 상관성을 나타내게 된다. 따라서 엄밀한 의미에서 고려하고 있는 범주별 비율 자료를 동시에 분석에 사용하는 공동 크리깅과 공동 시뮬레이션을 수행해야 하며, 이를 위해 다수의 교차 베리오그램 모델링을 수행해야 하는 계산상 번거로움이 따른다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 공동 시뮬레이션 대신 원 자료들을 서로 상관성이 없는 자료로 변환하는 주성분 변환을 적용한 자료들을 대상으로 개별적으로 블록 시뮬레이션을 수행한 후에 역 주성분 변환을 수행하는 방식을 적용하였다. 주성분 변환은 고려하고 있는 변수들 사이의 상관관계를 이용하여 고유치와 고유벡터를 계산하여 서로 상관성이 없는 새로운 좌표축의 자료로 변환하는 기법으로, 다변량 자료의 차원 축소에 주로 이용되어 왔다(Davis, 1986). 여기서 주의할 것은 이 연구에서 주성분 변환의 적용 목적은 전술한 것처럼 차원 축소에 있는 것이 아니라 다수의 교차 베리오그램 모델링을 수행하지 않고, 고려하는 변수 개수만큼만 베리오그램 모델링을 수행하는 계산상의 편의성에 있다.

N 개의 블록으로 구성된 M 개의 변수를 고려할 때, 주성분 변환된 M 개의 성분들의 1번째 블록 시뮬레이

선 결과인 $x_m^{(l)}(\mathbf{u}_s)$ 으로부터 고유벡터, 원 자료의 평균 및 표준편차를 이용한 역 주성분 변환을 적용하여 1번째 시물레이션 결과 $z_m^{(l)}(\mathbf{u}_s)$ 를 얻게 된다(식 4).

$$z_m^{(l)}(\mathbf{u}_s) = \left[\sum_{m'=1}^M e_{mm'} \cdot x_m^{(l)}(\mathbf{u}_s) \right] \cdot s_m + \mu_m \quad (4)$$

여기서 $e_{mm'}$ 는 고유벡터로 구성된 행렬이며, μ_m 과 s_m 은 m 번째 성분의 평균과 표준편차를 각각 나타낸다.

주성분 변환 성분들에 대해 각각 블록 시물레이션을 적용한 후에 다시 블록 단위로 업스케일링을 수행하면 블록 주성분 변환 성분을 재생산할 수 있다. 그러나 주성분 변환된 성분들로부터 원 변수들을 얻기 위해 식 (4)의 역 주성분 변환을 수행할 경우, 블록 단위에서 계산된 고유벡터, 평균과 표준편차가 점 단위의 고유벡터, 평균 및 표준편차와 다를 수 있기 때문에 원 블록 자료를 재생산하지 않을 수 있다. 블록 자료의 재생산 조건을 최대한 만족하기 위해 이 연구에서는 점 단위의 고유벡터와 평균은 블록 단위와 같다고 가정하였으며, 점 단위 블록 내 표준편차는 원 성분의 베리오그램 디컨볼루션으로 얻어지는 점 기반 베리오그램의 문턱값의 제곱근으로 가정하여 식 (4)에 적용하였다. 따라서 이 연구에서는 베리오그램 디컨볼루션을 원 블록 자료와 주성분 변환된 블록 자료에 대해 2번 수행해야 한다.

또한 개별적인 연속형 자료로 간주하여 시물레이션을 수행하지만, 범주형 주제도의 비율 자료를 이용하였기 때문에 모든 위치에서의 다운스케일링된 비율값들의 합은 1이 되어야 하며, 0보다 작거나 1보다 큰 값은 물리적으로 의미가 없다. 따라서 이러한 값들은 모두 0과 1로 바꾸어 준 이후에, 비율값들의 합이 1이 되는 정규화 과정을 후처리로 수행하였다. 후처리를 거친 각 범주별 비율값에 최대 사후 확률 결정 규칙(maximum a posteriori decision rule)을 적용하고, 가장 큰 비율값을 가지는 범주를 그 위치에서의 범주로 분류하여 최종적으로 범주형 주제도를 작성하게 된다.

사례 연구

사용 자료

제안 기법의 적용 절차를 예시하기 위해 비율 자료만 있는 블록 형태의 저해상도 범주형 자료를 대

Fig. 1. Reference land-cover map with pixel size 30 m by 30 m.

상으로 사례 연구를 수행하였다. Park and Chi(2008)의 사례연구에서 다중 시기 SAR 자료를 이용하여 제작한 30 m 공간해상도 토지피복도의 일부 지역을 추출하여 기준 토지피복도로 간주하였다(Fig. 1). 실제 이 자료는 이용이 불가능하며 적용 결과의 상호 비교 및 검증 목적으로 사용하였다. 100×100 화소로 구성된 연구 지역에는 논, 밭, 산림, 도심지 등 4개의 토지피복 범주가 존재한다.

토지피복별 블록 비율 자료의 생성을 위해, Fig. 1의 기준 토지피복도로부터 5×5 탐색창에 포함되는 토지피복 항목별 비율을 계산하였다. 이러한 과정을 거쳐 150 m 공간해상도의 블록 자료를 생성하였다(Fig. 2). 이 사례 연구의 목표는 Fig. 2의 블록 비율 자료만을 이용하여 Fig. 1의 해상도에서의 토지피복도 생성에 있다.

적용 결과

Fig. 2의 블록 비율 자료에 대해 주성분 변환을 수행한 결과는 Fig. 3에 제시되어 있다. 주성분 변환시 상관행렬을 이용하였으며, 두 번째 주성분까지에서 전체 변이의 76%를 설명하였으며 마지막 4번째 주성분은 정보가 거의 없는 매우 작은 값을 나타내었다. 상관행렬에 기반을 둔 고유벡터를 살펴보면(Table 1), 첫 번째 주성분에는 논, 밭의 비율 정보가 양수로, 밭과 도심지의 비율 정보가 음수로 나타남을 확인할 수 있다. 반면 두 번째 주성분에는 산림의 비율 정보가 음수로 나타나고 있으며, 세 번째 주성분에는 주로 도심지의 비율 정보가 반영되어 있다.

베리오그램 디컨볼루션의 적용을 위해, 우선 블록 단위 자료에 대한 실험적 베리오그램을 작성한 후 지수, 구형, 가우시안 모델 등의 조합으로 모델링을

Fig. 2. Coarse-resolution class fraction maps generated by 5 by 5 upscaling of the reference map in Fig. 1. The pixel size is 50 m by 150 m.

Fig. 3. Coarse-resolution principal components of class fraction maps. In each figure, PC stands for principal component.

Table 1. Eigenvector of the correlation matrix. PC stands for principal component

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
Fraction 1	0.614	0.527	0.041	0.586
Fraction 2	-0.662	0.235	-0.490	0.516
Fraction 3	0.157	-0.811	-0.006	0.565
Fraction 4	-0.400	0.102	0.871	0.267

수행하였다. 그 결과 4개 주성분 모두 2개의 기본 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다(Fig. 4). 베리오그램 디컨볼루션을 이용하여 4개 주성분에 대한 점 기반 베리오그램을 추정한 결과, 디컨볼루션을 통해 얻은 모델을 블록 단위로 정규화시킨 결과와 블록 기반의 베리오그램 값과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또한 블록 기반 베리오그램에 비해 점 기반 베리오그램의 문턱값이 높게 나타났는데, 이는 자료 변이가 상대적으로 큰 고해상도 자료에서 나타나는 일반적인 현상을 반영한다.

이 연구에서는 4개 비율 자료의 동시 시뮬레이션 대신 주성분 변환 성분에 대해 독립적으로 블록 시뮬레이션을 적용하게 된다. 식 (5)의 역 주성분 변환을

적용하기 위해서는 고해상도에서의 원 블록 자료의 표준편차를 필요로 하기 때문에, 원 블록 비율 자료에 대한 베리오그램 디컨볼루션을 역시 수행하였으며 그 결과는 Fig. 5에 제시하였다. Fig. 4와 마찬가지로 점 기반 베리오그램의 문턱값이 블록 자료의 문턱값에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있으며, 이 값에 제곱근을 취하여 식 (5)의 표준편차로 이용하였다.

Fig. 3의 4개 주성분의 개별적인 블록 시뮬레이션에 Fig. 4의 점 기반 베리오그램을 이용하였다. 이 과정에서 최대 16개의 블록 자료를 이용하였으며, 시범적으로 20번의 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 블록-블록 공분산과 블록-점 공분산의 계산에는 블록 단위를 이산화시킨 두 지점 사이의 점 기반 공분산의 평균값을 이용하였다. 개별적인 시뮬레이션 결과에 대해 식 (5)을 적용하여 역 주성분 변환을 수행하였으며, 후처리로 0 미만 혹은 1 이상의 값은 각각 0과 1로 조정하였으며, 최종적으로 4개 피복별 비율값의 합이 1이 되도록 정규화를 수행하였다. 이러한 과정을 거쳐서 원 비율 자료 스케일의 시뮬레이션 결과를 얻었으며, Fig. 6은 일부 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

Fig. 4. Experimental variograms with fitted model of principal components and the results of its deconvolution.

Fig. 5. Experimental variograms with fitted model of fraction maps and the results of its deconvolution.

정규화의 후처리를 거치고, 역 주성분 변환을 수행하여 얻어진 시뮬레이션 결과를 원 블록 자료의 해상도로 업스케일링하였을 때, 원 블록 자료의 값을 재생산하는지를 살펴보았다. Fig. 7은 Fig. 6의 첫 번째 시뮬레이션 결과에 대한 원 블록 값과 업스케일링된 블록 값의 산점도를 나타내고 있다. 모든 피복에서 0과 1 주변에서 값이 퍼져 나오고 있는데, 이는 0과 1 사이의 범위에 포함되도록 하는 정규화의 결과에 기인한 것이다. 그러나 전반적으로 선형상관계수가 0.99 이상으로 나타나서 재생산 제한 조건을 잘 만족하고 있으며, 역 주성분 변환 과정에서 이 논문에서 제안한 점 기반 베리오그램의 문턱값을 이용하는 것이 유효함을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 20개 시뮬레이션 결과에 최대 사후 확률 결정 규칙을 적용하여 제작된 연구지역의 다운스케일링된 토지피복도들의 일부를 나타내고 있다. 각 자료의 전반적인 패턴은 유사하게 나타나고 있으며, Fig. 1의 기준 토지피복도의 패턴도 유사하게 반영하고 있다. 시뮬레이션이 정확성보다는 개별적인 패턴의 재생산을 목적으로 하므로 일대일 비교에 의한 정확도 비교보다는 전반적인 패턴을 유지하면서 불확실성을

포함하고 있는 토지피복도로 간주하여 2차 분석에 사용되어야 한다.

결론

해상도의 차이는 항상 발생하며, 분석의 목적에 맞게 이용 자료의 해상도를 변환해야 하는 경우가 발생할 수 있다. 저해상도 자료에서 고해상도 자료로의 다운스케일링 변환은 다양한 해가 존재하는 역산과정에 해당하므로 고급 변환 기법을 필요로 한다.

이 연구에서는 현장 조사 자료와 같은 점 기반 자료가 없는 상태에서 블록 자료와 같은 저해상도 자료만 존재하는 경우를 대상으로 고해상도 범주형 주제도 제작을 목적으로 다중 스케일 블록 시뮬레이션 모델링 과정을 제시하였다. 블록 시뮬레이션에 필수적인 점 기반 베리오그램 추정을 위해 블록 자료의 베리오그램의 디컨볼루션을 적용하였으며, 범주형 블록 비율 자료의 상호 연관성을 고려한 주성분 변환 기반 시뮬레이션 과정을 제안하였다. 첫 번째 분석 과정은 점 기반 베리오그램의 이용이 가능하다는 전제하에 수행된 기존 지구통계학적 다운스케일링 연구

Fig. 6. Simulated fine-resolution class fraction maps with pixel size 30 m by 30 m.

와 차별화되며, 동시 시뮬레이션의 모델링 과정의 번거로움을 완화하기 위한 두 번째 분석 과정인 주성

분 변환 기반 시뮬레이션 과정 역시 차별화된다. 제안 방법론을 적용한 토지피복도 제작 사례 연구를

Fig. 7. Scatterplot of coarse fraction versus aggregated fraction for realization #1.

Fig. 8. Simulated fine-resolution land-cover maps with pixel size 30 m by 30 m.

통해 원 기준 피복도의 공간 패턴을 잘 반영하면서, 블록 자료의 비율값을 재생산하는 고해상도 토지피복도 제작이 가능함을 확인하였다.

저해상도 자료로부터 고해상도 자료를 생성하는 가장 일반적인 방법으로 저해상도 블록 자료의 크기가 일정하다는 전제하에 블록 자료의 중심점을 이용하여 고해상도 그리드에 내삽하는 방법을 고려할 수 있다. 그러나 이 방법론은 블록 자료의 크기가 불규칙한 지질 경계와 같은 자료에는 적용이 불가능하며, 고해상도 그리드 값을 저해상도 블록 자료로 합산할 경우 원 블록 자료의 값을 재생산하지 않을 수 있다. 따라서 제안 기법은 균일한 크기의 블록 자료인 원격탐사 자료뿐만 아니라 다양한 형태를 가지는 블록 자료에 적용이 가능한 일반적인 방법에 해당하며, 재생산성을 제한 조건으로 만족하는 역산 과정으로 일반화가 가능한 장점이 있다.

시뮬레이션 대신 영역-점 변환 크리깅을 적용하여 다운스케일링이 가능하지만, 이 경우 크리깅의 특성상 단일 주제도 생성만이 가능하여 불확실성 분석이 용이하지 않다. 또한 다운스케일링 과정을 다양한 해가 존재할 수 있는 역산 과정으로 간주한다면, 최소자승 기반 크리깅은 과도하게 평활화된 양상을 나타내므로 현실을 반영하는 고해상도 주제도 생성에 어려움이 있다. 일반적인 지구통계학적 시뮬레이션의 목적과 마찬가지로, 시뮬레이션 기반 다운스케일링은 제한 조건을 만족하면서 평활화 양상이 감소된 대안적 주제도 생성이 가능하다. 이 논문의 사례연구에서 제작한 대안적 토지피복도들은 토지피복도를 입력 자료로 사용하는 다양한 응용 분야의 분석 모델의 오차 전파 해석을 위한 기본 정보로 이용이 가능하다. 이 연구에서는 블록 기반의 저해상도 비율 자료를 기준 토지피복도로부터 제작하였지만, 실제 MODIS와 같은 저해상도 위성자료의 토지피복 분류시 수행하는 분광혼합분석(spectral mixture analysis)의 결과물을 입력 블록 자료로 이용할 수 있다. 따라서 고비용의 고해상도 위성자료에 비해 시간해상도가 높지만 공간해상도가 떨어지는 중저해상도 위성자료를 이용한 토지피복도 제작에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 분석에 추가할 수 있는 부가 자료가 존재할 경우, 시뮬레이션 과정에 다변량 크리깅을 적용하여 부가 자료를 통합하여 보다 현실성 높은 고해상도 주제도 생성이 가능할 것으로 판단된다.

이 연구에서 적용한 시뮬레이션을 포함한 전통적인

지구통계학적 시뮬레이션은 베리오그램에 기반을 두고 수행된다. 베리오그램은 두 지점 사이의 변동성을 나타내는 통계치에 해당하는데, 실제 토지피복과 같이 불규칙한 형태의 패턴을 완벽히 반영하지 못 할 수 있다. 전통적인 베리오그램 모델의 대안으로 훈련 자료를 이용하는 다중점 지구통계학(multiple-point geostatistics, Remy et al., 2009)의 적용을 고려해 볼 수 있으나, 불규칙한 공간 패턴을 반영하는 훈련 자료의 생성과 이용이 간단한 것은 아니다. 이 연구에서 고려하는 이용 자료의 대상은 저해상도 블록 자료뿐이므로 훈련 자료를 필요로 하는 다중점 지구통계학적 시뮬레이션의 적용은 무리가 있다. 따라서 베리오그램 대신 범주형 주제도의 범주 간 전이 확률(Carle and Fogg, 1996)을 변형하여 이용하는 것이 대안이 될 수 있을 것으로 판단되며, 앞으로 전이 확률 기반 지시자 시뮬레이션 모델 개발 및 적용 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업과제의 연구비지원(06국토정보B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 박노옥, 2010a, 다중 스케일 지구통계학을 이용한 원격탐사 자료 기반 주제도의 다운스케일링. 대한원격탐사학회지, 26, 29-38.
- 박노옥, 2010b, 지화학 자료의 확률론적 불확실성 및 위험성 분석을 위한 지시자 지구통계학의 응용. 한국지구과학회지, 31, 301-312.
- 오석훈, 2005, 암반등급 해석을 위한 비선형 지시자 변환과 3차원 크리깅 기술의 물리탐사 및 시추자료에 대한 적용. 한국지구과학회지, 26, 429-435.
- 오석훈, 한성미, 2010, 물리탐사 자료의 해상도 향상을 위한 지구통계학적 다운스케일링. 한국지구과학회지, 31, 681-690.
- Boucher, A. and Kyriakidis, P.C., 2006, Super-resolution land cover mapping with indicator geostatistics. Remote Sensing of Environment, 104, 264-282.
- Carle, S.F. and Fogg, G.E., 1996, Transition probability-based indicator geostatistics. Mathematical Geology, 28, 453-476.
- Davis, J.C., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley, NY, USA, 646 p.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G., 1998, GSLIB: Geostatistical

- cal Software Library and User's Guide. Oxford University Press, NY, USA, 369 p.
- Goovaerts, P., 1997, Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, NY, USA, 483 p.
- Goovaerts, P., 2008, Kriging and semivariogram deconvolution in the presence of irregular geographical units. *Mathematical Geosciences*, 40, 101-128.
- Goovaerts, P., 2010, Combining areal and point data in geostatistical interpolation: Applications to soil science and medical geography. *Mathematical Geosciences*, 42, 535-554.
- Hansen, T.M. and Mosegaard, K., 2008, VISIM: Sequential simulation for linear inverse problems. *Computers & Geosciences*, 34, 53-76.
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978, Mining Geostatistics. Academic Press, London, UK, 600 p.
- Kyriakidis, P.C., 2004, A geostatistical framework for area-to-point spatial interpolation. *Geographical Analysis*, 36, 259-289.
- Kyriakidis, P.C. and Yoo, E.-H., 2005, Geostatistical prediction and simulation of point values from areal data. *Geographical Analysis*, 37, 124-151.
- Liu, Y. and Journel, A.G., 2009, A package for geostatistical integration of coarse and fine scale data. *Computers & Geosciences*, 35, 527-547.
- Openshaw, S. and Taylor, P., 1979, A million or so correlation coefficients. In Wrigley, N. (ed.), *Statistical Methods in the Spatial Sciences*. Pion, London, UK, 127-144.
- Park, N.-W. and Chi, K.-H., 2008, Integration of multi-temporal/polarization C-band SAR data sets for land-cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 4667-4688.
- Remy, N., Boucher, A., and Wu, J., 2009, *Applied Geostatistics with SGeMS: A User's Guide*. Cambridge University Press, NY, USA, 264 p.
- Soares, A., 2001, Direct sequential simulation and cosimulation. *Mathematical Geology*, 33, 911-926.
- Yoo, E.-H. and Kyriakidis, P.C., 2006, Area-to-point kriging with inequality-type data. *Journal of Geographical Systems*, 8, 357-390.
- Young, L.J. and Gotway, C.A., 2007, Linking spatial data from different sources: The effects of change of support. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21, 589-600.

2011년 6월 22일 접수
 2011년 7월 25일 수정원고 접수
 2011년 7월 25일 채택