

DEM의 오차 평가 방법에 관한 연구

Alternative Methods for Assessments of DEMs' Errors

황 철 수 *

Hwang, Chul-Sue

要 旨

RMSE는 그 개념이 상대적으로 이해하기 쉽고 계산이 용이하다는 장점 때문에 DEM의 정확도를 나타내는 대표적 척도로 많은 국가에서 사용되고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 RMSE는 몇가지 측면에서 문제를 안고 있다. 즉 RMSE는 두 가지 자료집단 사이의 평균적인 편차에 대한 기술을 밝혀낼수 없기 때문에 DEM이 내포하고 있는 오차에 대한 분포나 패턴에 대한 해석이 불가능하다. 이것은 DEM의 품질을 기술하는데 RMSE 척도가 어느 정도 한계를 갖는다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 탐색적 공간자료분석 범주에 속하는 접근 방법을 통해 RMSE가 밝히지 못하는 DEM의 공간적·비공간적 오차 특성을 탐색하여 그 이용가능성을 평가하였다. 이를 통해 대표적 보간기법을 적용하여 개발된 DEM에서 돌출 현상이나 줄무늬 현상 또는 단구화 현상 등과 같은 새로운 정오차를 확인하였다.

ABSTRACT

The most widely used measure for indicating the accuracy of DEM is RMSE(Root Mean Square Error), which is used by many national mapping agencies such as the USGS and the Ordnance Survey. Its prevalent use can be followed by the relative ease of calculation and understanding the concepts. However, there are many problems with the measure and the way from which it is often derived. First of all, the index does not involve any description of the mean deviation between the two measures of elevation. This means that it cannot interpret the distributions or patterns of errors involved in DEMs. The distribution of errors in DEMs will show some forms of spatial patterning. In order to explore the real quality of DEMs as a useful database, alternative approaches are needed. In this paper, we examined so called ESDA(Exploratory Spatial Data Analysis) approaches, which were attributed by both aspatial and spatial exploration methods. Our experimental research shows that even simple ESDA methods reveal new aspects of errors, especially spikes, striation, and terracing effect in DEMs, which may be ignored by RMSE measure.

1. 서 론

공간상에 나타나는 지형기복(relief)의 변화를 2차원 평면상에 연속적으로 표현하는 모형을 수치고도모형(DEM)이라 하며 일반적으로 수치지형모형(Digital

Terrain Model: DTM)이라는 용어와 함께 사용된다. 그러나 DTM의 'terrain'이라는 용어가 '지표면의 고도'보다는 경관 속성까지 내포하기 때문에 단순히 표고만을 표현하는 경우에는 DEM이라는 용어가 보다 적합하다(Burrough, 1986; Weibel & Heller, 1991).

* 서울대학교 사회과학연구원 국토문제연구소 상근연구원

DEM은 일반적으로 규칙적인 격자 행렬(grid matrix)로 위치(x, y 좌표)와 고도값(z 값)을 수치적으로 표시하고 있기 때문에 지형면을 수치적으로 해석하기에 알맞은 자료구조를 갖는다.

우리 나라에서도 NGIS 사업이 구체화되고 관련 연구가 활발하게 진행되면서 DEM에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 그것은 DEM이 지형분석, 도시계획, 단지설계 등 폭넓은 분야에 이용할 수 있는 장점을 내포하고 있기 때문이다.

한편, 대부분의 DEM은 등고선 형식의 자료로부터 알맞은 보간 기법을 통해 생성된다. 이렇게 개발된 DEM은 그 정확도를 평가하여 자료의 품질을 분석하는 단계를 거치게 된다. 여기에서 DEM의 정확도를 평가하는데는 일반적으로 오차의 평균량을 대상으로 산출되는 RMSE가 대표적 지표로 이용되고 있다. 하지만 Wood & Fisher(1993)와 Monckton(1994)은 DEM에 내재된 오차가 공간적 자기상관 또는 자동상관(spatial autocorrelation)을 가진다는 것을 밝혀낸 바 있으며, Goodchild(1996)는 오차의 분석에 있어서 비공간적 오차요소와 공간적인 경향은 반드시 분리되어야 한다고 주장하였다. 따라서 DEM의 품질을 평가하기 위해서는 RMSE라는 비공간적 단일지표에 의한 평가기준과 함께 오차의 공간적·비공간적 분포특성을 반영하는 방안이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 DEM의 정확도를 평가하는데 오차의 분포특성을 밝혀낼 수 있는 방안을 도입하여 그 타당성을 분석하였다. 이러한 연구를 통해 DEM에 내재된 오차의 분포 특성이 밝혀진다면 결국 DEM의 개발과정에서 이를 감소시킬 수 있는 적절한 대안이 제시될 수 있을 것이다.

2. DEM 오차 유형 분류

DEM에서 발생하는 오차는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 과대오차는 자료입력상의 실수로 인하여 발생하는 오차이며, 정오차는 시스템이나 보간 과정에서 발생하는 오차이다. 그리고 부정오차는 순수한 의미에서 예측하기 어려운 오차를 말한다(USGS, 1998).

첫째, 과대오차(blunders)는 DEM에서 허용 가능한

최대오차수준을 초과하는 경우가 대부분을 차지하며, 그 존재가 쉽게 발견된다. 이것은 등고선 고도값의 입력 오류나 등고선의 교차입력 등 자료입력상의 실수에 기인하는 경우가 많으며 자료의 준비과정에서 반드시 제거되어야 할 오차이다.

둘째, 정오차 또는 계통오차(systematic error)는 일련의 고정된 패턴을 가지고 규칙적으로 발생하는 오차로서 시스템이나 보간 과정에서 발생한다. 이러한 종류의 오차는 최종 결과물에 일정한 경향이나 특징을 유발하게 된다. DEM자료에서 나타나는 체계적인 오차에는 특정고도지점들이 일정방향으로 이동한 경우나 실제로는 존재하지 않는 봉우리, 단구, 능선, 줄무늬(striation) 등이 생기는 경우 등이 포함된다.

셋째, 부정오차 혹은 우연오차(random error)는 과대오차나 정오차가 제거된 뒤에 남는 오차로, 쉽게 규명되지 않은 원인에 의해 발생하며 대체로 정규분포의 형태를 가진다.

DEM을 개발할 때는 위의 세 가지 오차 가운데 과대오차와 정오차를 가능한 수준까지 제거하여야 하며, 원인을 알 수 없는 부정오차의 경우에도 일정 수준(정해진 정확도 표준)까지 그 오차를 줄여야 한다. DEM을 구축하고 있는 국가들은 이러한 원칙에 따라 오차 표준을 규정하여 그 정확도를 평가하고 있다.

3. 연구대상 DEM 생성

수치지도에 포함된 등고선 자료로부터 grid 모형의 DEM을 개발하기 위해 필수적으로 요구되는 보간법은 크게 두 가지 유형으로 구분된다. 즉, 관측점의 자료가 갖는 영향권을 대표할 수 있는 이항 함수를 설정하고 그 함수의 변수를 이용하여 자료면을 추정하는 '적합함수접근법(fitted function interpolation)'과 어떤 범위에 속하는 관측점들의 영향치를 직접 계산하여 특정 지점의 자료값을 얻는 '가중평균법(weighted average interpolation)'으로 분류할 수 있다(Watson, 1992). 그리고 가중평균법은 거리에 기초한 가중평균법과 면적에 기초한 가중평균법으로 다시 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이렇게 분류되는 대표적 보간법 가운데 일반적으로 적용되는 IDWA(역거리가중평균,

Inverse Distance Weighting Averaging) 보간법, TIN (Triangulated Irregular Network) 보간법, 그리고 크리깅(Kriging) 보간법을 적용하여 DEM을 생성하였다.

한편 본 연구에서 사용한 수치지형도의 축척은 1/25,000 이며 연구의 대상지역은 공주 도엽 전체에 해당한다. 보간에 사용될 등고선 자료는 수치지형도에서 추출한 50m 간격의 계곡선(수치지형도 레이어 코드 7114)과 10m 간격의 주곡선(레이어 코드 7111)이다. 그리고 보간을 통해 생성할 DEM의 grid 공간 해상력은 지상 20m로 선정하였다. 참고로 미국 USGS에서는 1/24,000 지형도를 이용하여 해상력 30m DEM을 그리고 영국 Ordnance Survey는 1:50,000 지형도를 이용해 해상력 50m DEM을 개발하였다.

3.1 IDWA 보간법

IDWA 보간법은 서로 가까이 위치한 지점들은 멀리 떨어져 있는 지점보다 더 유사한 공간특성을 갖는다는 Tobler 법칙을 이용하여 관측점과 보간 지점 사이에 거리에 따라서 가중치를 주는 방법이다. 가중치로는 일반적으로 거리제곱의 역을 사용하며, 보간 지점 주위로 일정 기준에 따라 근린을 설정하고 근린에 포함된 관측점을 기초로 보간 과정을 거쳐 연속면을 작성한다. 그리고 작성된 연속면에서 일정간격 격자의 고도값을 추정하여 수치고도모형을 생성한다. 본 연구에서 산출한 보간 지점의 값은 다음 수식을 통해 추정되었다.

$$\hat{Z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) d_{ij}^{-2}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-2}} \quad \text{식 3.1}$$

x_j : 보간지점 x_i : 관측지점
 d_{ij} : 보간지점과 관측지점간의 거리

IDWA 보간법을 적용한 DEM을 생성하기 위해서 ARC/INFO와 고도모형 전문 패키지인 Surfer를 사용하였고 구체적 처리과정은 다음과 같다.

① Arc/Info

ARCPOINT : line feature인 등고선을 point feature로 변환 (weed tolerance:5)

UNGENERATE : 점형 사상의 좌표와 고도값을 ASCII 파일로 변환

② Surfer

GRID - Data : ASCII 형의 점 고도자료를 읽어들이

Resolution : 20m

Gridding Method : IDWA

Parameter Power : 2

Smoothing : 0

Data Duplicates : Ignore

Anisotropy Ratio : 1

Angle : 0

Search Type : Simple

3.2 TIN 보간

TIN을 이용한 보간은, TIN에서 삼각망의 각 변을 이등분하는 직교선을 연결하여 작성한 Thiessen 폴리곤을 이용하여 'polygon-in polygon 중첩'을 통해서 그 포함 정도에 따라 격자망의 고도를 추정하는 방식과 보간 지점이 포함되는 델로니 삼각형의 세 꼭지점과 보간 지점간의 거리를 이용하여 보간 지점 고도를 계산하는 방식으로 구분되는데 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 DEM을 생성하였다. 또 후자의 경우 델로니 삼각형이 표현하는 지형면(surface)을 선형(linear) 또는 5차 함수면(quintic)으로 가정하는데 여기에서는 선형을 선택하였고 그 계산식은 다음과 같다(Watson, 1992).

$$\hat{Z}_i = \sum_{j=1}^3 (w_j \times Z_j) \quad \text{식 3.2}$$

w_j : j 지점의 가중치 Z_j : j 지점의 고도

한편 TIN 보간법을 이용해 DEM을 생성하기 위해서 Arc/Info를 사용하였고 그 작업과정을 정리하면 다음과 같다.

① ARCTIN

line feature인 등고선을 이용하여 TIN 모형 작성

② TINLATTICE

TIN surface type: linear
resolution: 20m

Angle : 0

Data Duplicates : Ignore
Search Type : Simple

3.3 크리깅 보간

크리깅 보간에서는 지역화 변수이론에 기초하여 어떠한 변수의 공간적 변동(분산도)을 정치평균값, 무작위 공간적 상관, 노이즈 및 잔차항이라는 세 개의 성분합으로 구하여 그 분산도(semivariogram)를 이용하여 보간에 필요한 최적 가중치함수를 결정하고 IDWA 보간과 유사한 방식으로 격자의 고도를 추정한다(Burrough, 1986). 즉, 거리에 따른 보간 가중치가 구해지면 다음과 같은 공식을 이용하여 보간이 이루어진다.

$$\hat{Z}(x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{식 3.3}$$

x_i : 추정지점 x_j : 실측지점

λ_i : 지점간의 가중치 ($\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$)

크리깅을 통해 DEM을 생성하는데 필요한 자료를 추출하고 조작하기 위해 TIN 보간과 동일한 방법으로 Arc/Info를 그리고 이후의 보간에 Surfer를 활용하였다. 특히 크리깅 보간 과정에서는 보간 자료의 균등분포를 가정하여 변화경향(drift)을 설정하지 않았고, 1/25,000 도엽에 해당하는 넓은 지역을 대상으로 하고 있기 때문에 일정 방향의 경향을 고려할 수 없다는 판단 아래 비등방성(anisotropy)을 설정하지 않았다.

Surfer

GRID - Data : ASCII 형의 점 고도자료를 읽어들이
Resolution : 20m
Gridding Method : Kriging
Variogram Model : Spherical
Drift Type : No Drift(Ordinary Kriging)
Nugget Effect : 0
Anisotropy Radius1 : 35.2
Radius2 : 35.2

3.4 RMSE를 이용한 오차 평가

본 절에서는 IDWA, TIN, 크리깅 보간법을 적용해 생성한 3개의 DEM(그림 3.1, 3.2, 3.3)에 대해 기존의 오차 평가 방법인 RMSE를 구하여 각 DEM의 정확도를 평가하였다.

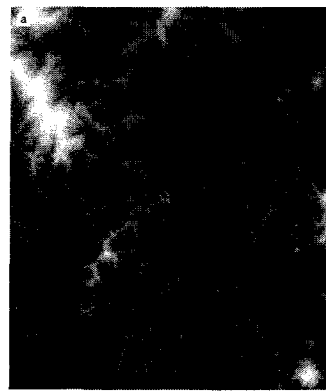


그림 3.1 IDWA 보간 DEM



그림 3.2 TIN 보간 DEM

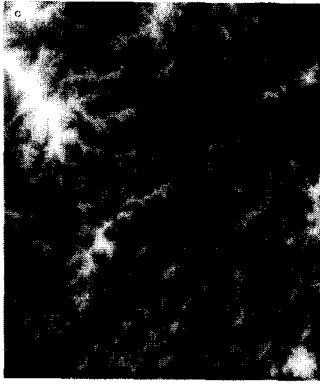


그림 3.3 크리깅 보간 DEM

RMSE(Root Mean Square Error)는 각각의 오차값들이 갖는 오차의 평균량을 평가하는 일반적 방법으로 수치지도와 같은 공간적 자료에 대해 적용할 경우 동일한 좌표계를 가지는 두 개의 자료 집단을 직접 비교하여 계산함으로써 해당 자료 집단의 정확도를 단일 척도로 계산할 수 있다(Maling, 1989). 계산된 RMSE 값이 크면 참조자료와 측정자료에서의 속성값의 차, 즉 오차가 더 크다는 것을 의미한다. RMSE는 관측점의 고도값과 보간 결과의 해당지점 고도값의 직접비교가 가능하고 계산과정이 간단하기 때문에 각국의 지도제작기관에서 정확도 평가지표로 많이 사용하고 있다(João, 1998).

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_n)^2}{(N-1)}} \quad \text{식 3.4}$$

Z_i : 측정자료의 i 번째 위치의 고도값

Z_n : 참조자료(보다 높은 정확도를 가진 자료)의 n 번째 위치의 고도값

N : 자료의 개수

보간 DEM의 정확도를 평가하기 위해서 우선 가장 보편적으로 사용되는 RMSE를 계산하였다. 참조자료로는 우리 나라 수치지형도에서 지형표현을 위한 표고점 레이어(코드 7217) 자료를 이용하였으며 그 점자료의 개수는 297개이다.

표 3.1 보간법에 따른 DEM의 RMSE 비교 (단위: m)

보간 방법	IDWA	TIN	크리깅
RMSE	9.057	9.139	7.637

표 3.1을 보면 세 개 DEM의 RMSE 모두가 USGS DEM의 정확도 표준 Level 1(목표정확도: $\pm 7m$, 최대 허용오차: $\pm 15m$)에서 허용하는 오차범위 안에 포함된다. 그러나 위 RMSE 비교를 통해 크리깅을 이용한 DEM의 정확도가 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 그것은 크리깅이 관측점 사이의 공분산 관계를 이용하여 공간적 상관관계를 가지는 지역적 범위를 산출하고, 공분산에서 확률함수가 갖는 분포특성에 따라 가중치가 결정됨에 따라 그만큼 지형적 특성에 유연하게 대처할 수 있기 때문인 것으로 추측된다.

4. 탐색적 공간자료 분석기법을 이용한 DEM 오차 분석

RMSE를 이용한 오차표준을 만족시키는 DEM이라고 할지라도 그 오차가 체계적인 분포특성을 가지고 있다면 그 DEM은 정확도가 높은 자료라고 할 수 없다. 특정 고도지점들이 일정한 방향으로 이동한 경우 혹은 실제로는 존재하지 않는 봉우리·단구·능선·줄무늬 등이 생기는 경우가 이에 해당한다. RMSE와 같은 단일척도(single measure)를 이용한 정확도 평가에서는 이러한 오차들의 존재여부를 확인할 수 있는 방법이 없다.

따라서 DEM의 품질(data quality)을 평가하기 위해서는 RMSE라는 단일 평가기준과 함께 오차의 공간적·비공간적 분포특성을 파악할 수 있는 또다른 방안이 필요하다. 본 연구에서는 '탐색적 공간자료 분석기법(Exploratory Spatial Data Analysis; ESDA)'의 범주에 속하는 몇 가지 방법들을 통해 그 가능성을 실험하고 DEM의 오차 혹은 정확도 지표로서 이용 가능성을 확인하였다. 공간자료 분석에 있어서 '탐색적' 방법은 자료에 대한 명확한 기술(description)과 그를 통

해 해당자료에 대한 적절한 가설 혹은 모델을 설정할 수 있도록 하는 방법을 포괄한 개념이다(Bailey & Gatrell, 1995). 다시 말해, 선형적인(a priori) 가설을 배제한 상태에서 자료를 관찰하는 것이다. 따라서, 자료의 표현과 관련된 가시화(visualization)와 탐색을 통해 정립된 가설에 기반한 모형화(modelling)의 중간 개념이라 할 수 있다.

4.1 비공간적 탐색기법을 이용한 오차 분석

비공간적 탐색기법(aspacial exploration methods)은 자료의 비공간적 분포를 분석하여 속성값 자체가 가지는 분포특성을 밝히는 방법이다.

4.1.1 도수분포도

도수분포도(histogram)는 탐색적 공간분석 기법의 정의에 따라 엄밀히 구분하자면 자료에 대한 조작(manipulation)이 없다는 측면에서는 탐색적 기법으로 구분할 수 없다. 그러나 자료의 분포특성을 표현하는 가장 단순한 기법이면서 다른 비공간적 탐색기법에서 그 원리를 이용하며 또한 이를 통해 발견할 수 있는 자료의 특징 역시 매우 유의한 항목들이 많다. 예컨대, 속성값에 대한 최대값-최소값 범위, 속성값의 계급분류 가능성, 속성값의 비대칭성 여부, 예외점(outlier)의 존재 여부 등이 그것이다.

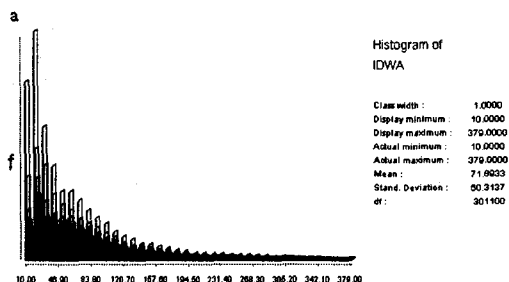


그림 4.1 IDWA 보간 DEM의 도수분포도

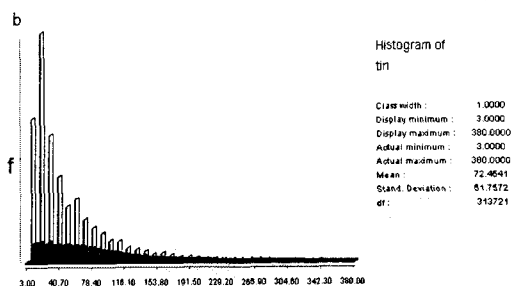


그림 4.2 TIN 보간 DEM의 도수분포도

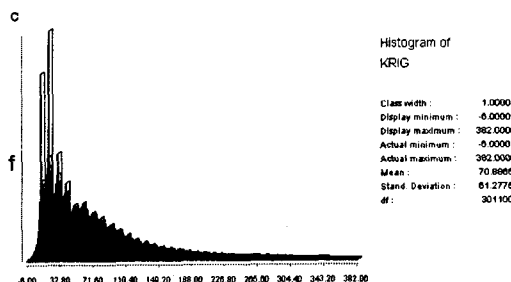


그림 4.3 크리깅 보간 DEM의 도수분포도

그림 4.1, 4.2, 4.3은 연구대상 지역에 대한 3가지 보간법을 이용해 생성한 3개 DEM에 대한 도수분포도를 작성한 것이다. 도수분포도에서 등고선 간격과 같은 10m간격의 돌출(spikes)이 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이것은 보간 과정 자체에서 발생하는 정오차의 가능성을 보여주는 것이다. 또한 이러한 현상이 크리깅보간에 비해 IDWA보간과 TIN보간을 사용한 DEM에서 두드러지게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

4.1.2 경사도의 도수분포도

DEM으로부터 계산된 경사도를 대상으로한 도수분포도(그림 4.4, 4.5, 4.6)는 해당 DEM 자료의 지형적 특성을 탐색하는데 이용될 수 있다. 3 개의 도수분포는 모두 2 개의 봉우리를 가진다(bi-modal). 0°에서 5°까지 범위에 걸쳐 분포하는 높은 봉우리는 그림 3.1, 3.2, 3.3에서 보는 것과 같이 공주지역에서 하천

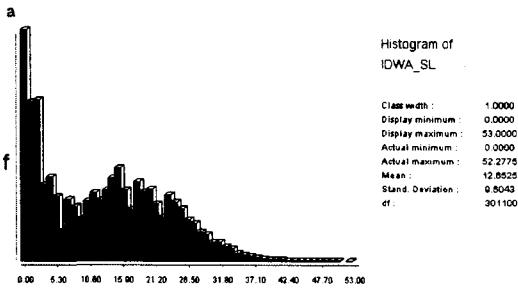


그림 44 IDWA 보간 DEM 경사도 도수분포도

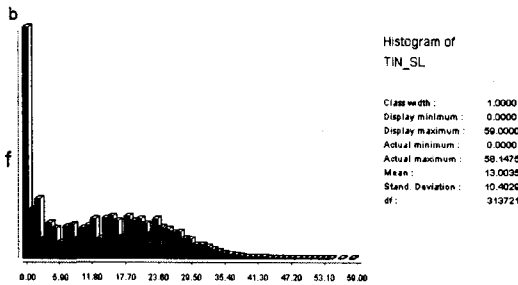


그림 45 TIN 보간 DEM 경사도 도수분포도

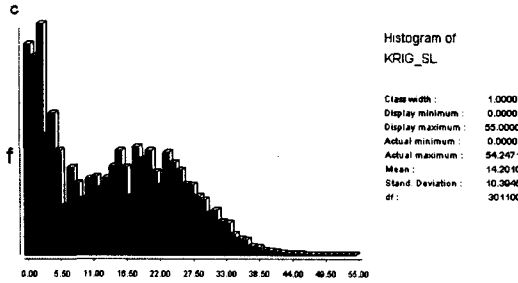


그림 46 크리깅 보간 DEM 경사도 도수분포도

하는 방법을 시도하였다. 그리고 경사도가 대략 20° 정도를 중심으로 두 번째 봉우리가 나타나는데 그 분포 패턴은 3개 보간법 모두에서 유사하였다.

4.1.3 해먹 플롯과 해먹 인덱스

해먹 플롯(hammock plot)은 도수분포도에서 나타나는 일정간격의 돌출(spike)을 효과적으로 표현할 수 있는 도구로서 각 자료값을 특징적인 주기로 나누어 그 나머지를 도수분포로 표현한 것이다.

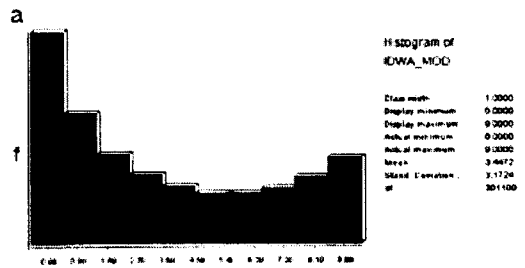


그림 47 IDWA 보간 DEM 해먹 플롯

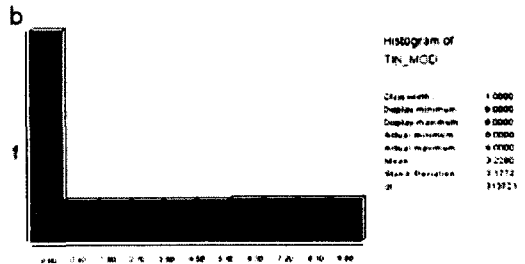


그림 48 TIN 보간 DEM 해먹 플롯

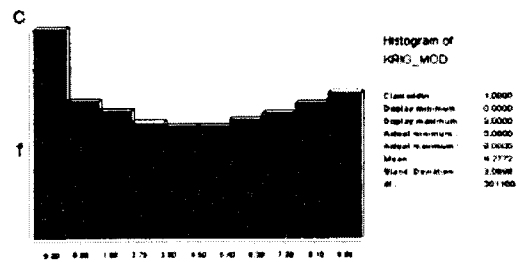


그림 49 크리깅 보간 DEM 해먹 플롯

과 그 주위의 평야지역이 넓게 분포하는 것을 반영하는 것이다. 그런데 여기에서 주목해야 할 현상으로 IDWA보간 DEM과 크리깅 보간 DEM에 비해 TIN보간 DEM에서 경사도 0°의 도수가 매우 크게 나타난 점이다. 조규진외(1998)의 연구에서는 이러한 현상이 최단거리의 이웃점을 서로 연결하는 TIN의 알고리즘에 따라서 이상적인 삼각망을 구성하지 못하고 동일 고도기준점을 서로 연결하는 삼각망을 구성하기 때문에 등고선을 추적하는데 문제가 발생하기 때문이라고 주장하면서 이를 개선하기 위하여 Break-Line을 삽입

3 개의 보간법으로 작성한 DEM에 대한 해먹 플롯

(그림 47, 48, 49)을 보면 공통적으로 등고선 간격 10m로 나누었을 때 나머지가 0인 고도값이 다른 것보다 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그것은 보간에 의해 생성된 DEM의 고도값이 보간에 사용되었던 원래의 등고선이 담고있는 고도값을 중심으로 산출되고 있음을 증명하며, 등고선과 같이 선자료를 이용하여 DEM을 작성할 때 나타나는 두드러진 특징이라고 판단된다. 따라서 이상적인 해먹 플롯이 구간별 누적 분포가 동일한 경우라면 크리깅 보간을 이용한 DEM이 전반적으로 다른 보간 기법에 비해 우수한 패턴을 보이고 있다. 반면에 TIN의 경우는 나머지 '0'의 도수가 압도적으로 크게 나타나 특히 등고선 간격에 절대적으로 의존하게 있음을 확인할 수 있다.

해먹 플롯이 누적분포의 시각화(visualization)를 통해 DEM의 오차를 정성적(qualitative)으로 확인하는 방법이라면 해먹 인덱스(hammock index)는 이를 정량화된 지표로 객관화시킨 것이다. 해먹 인덱스는 전체 격자가 갖는 속성값을 특성숫자(여기에서는 등고선 간격)로 나누었을 때 나머지가 0인 격자의 비율을 계산하여 구한다(Wood, 1996). 따라서, 해먹 인덱스가 크다는 것은 자료에서 등고선 고도와 같은 고도를 가지는 격자의 비율이 크다는 것을 의미한다.

$$H = \frac{(n \times f_0) - \sum_{i=1}^{i-1} f_i}{\sum_{i=1}^{i-1} f_i} \quad \text{식 4.1}$$

f_0 : 고도값을 n 으로 나눈 나머지가 0 인 격자의 개수
 f_i : 고도값을 n 으로 나눈 나머지가 i 인 격자의 개수
 n : 원자료의 등고선 간격 ($-1 \leq H \leq i-1$)

본 연구에서 생성한 3개의 DEM에 대해 구한 해먹 인덱스를 보면 TIN 보간을 사용한 DEM에서 해먹 인덱스가 가장 크게 계산되는 것을 알 수 있다(표 4.1).

표 4.1 생성된 DEM의 해먹 인덱스 비교

보간도구	IDWA	TIN	크리깅
해먹 인덱스	2.268790	4.577215	0.854277

이것은 앞서의 해먹 플롯을 통한 분석에서 지적된 바와 같이 등고선 간격인 10m로 나뉘었을 때 나머지 값이 0인 DEM 고도값이 그만큼 많이 분포하고 있다는 사실을 암시하고 있다. 즉, TIN 보간은 추정지점을 포함하고 있는 델로니 삼각형의 3개 꼭지점만을 이용하여 격자의 고도를 계산하기 때문이다. 결과적으로 TIN 보간에서는 델로니 삼각형의 3개 꼭지점이 같은 고도값을 가지면 그 내부의 추정지점은 꼭지점의 고도값을 그대로 할당받게 된다. 반면에 크리깅을 이용한 DEM은 해먹 인덱스가 가장 낮게 산출되어 해먹 플롯의 누적분포가 상대적으로 등고선 간격에 영향을 받지 않고 있다고 해석할 수 있다.

4.2 공간적 탐색기법을 이용한 오차분석

공간적 탐색기법(spatial exploration methods)이란 DEM의 지도화를 기초로 하는 탐색기법이다. 즉, 사용자의 의도에 따라 조각된 고도자료를 지도화하여 DEM의 공간적 분포특성을 분석하는 것이다.

4.2.1 경사도 지도와 음영기복도

경사도 지도(slope map)나 경사도를 음영화(hillshade)하여 지도화한 음영기복도(shaded relief map)를 이용하면 경사도의 변화가 국지적으로 혹은 일정방향으로 유사하게 나타나는 분포 특성을 쉽게 관찰할 수 있다.

3개 보간기법을 통해 생성한 DEM의 경사도 지도(그림 4.10-12)와 음영기복도(그림 4.13-15)를 살펴보면 보간기법에 따라 그래픽 패턴이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, IDWA 보간의 경우 평지에서 산지로 향하는 사면 방향에서 직각으로 줄무늬(striation)가 TIN 보간이나 크리깅 보간보다 선명하게 출력되고 있다. 이렇게 사면방향과 직각으로 나타나는 경사도의 주기적인 반복은 보간의 알고리즘에 따라 등고선 간격을 중심으로 단구화 현상(terracing effect)이 발생하였다는 것을 의미한다.

4.2.2 종단면도



그림 4.10 IDWA DEM 경사도 지도



그림 4.11 TIN DEM 경사도 지도

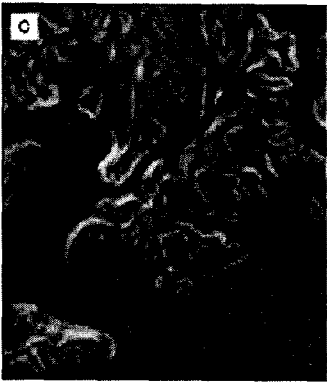


그림 4.12 크리깅 DEM 경사도 지도

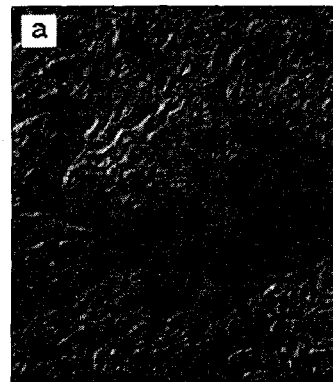


그림 4.13 IDWA DEM 음영기복도

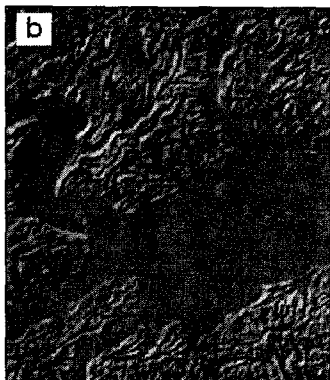


그림 4.14 TIN DEM 음영기복도

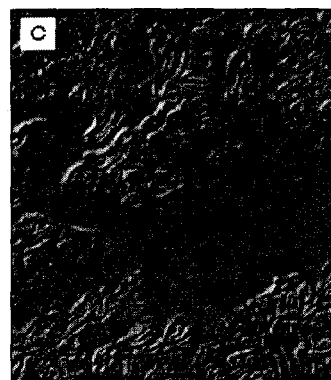


그림 4.15 크리깅 DEM 음영기복도

경사도 지도와 음영기복도가 DEM 전체에 걸친 단구화 현상을 확인할 수 있는 방법이라면 종단면도(profile)는 보간된 DEM 지형에서 특정한 사면방향에 따라 나타날 수 있는 단구화 현상을 상세하게 효과적

으로 분석할 수 있는 방법으로 이용할 수 있다. 그림 4.16에서 보는 바와 같이 IDWA 보간 DEM의 종단면도에서는 단구와 같은 형태의 지형기복상태가 규칙적으로 자주 나타났다. 특히 이러한 단구가 등고선 고도

와 같은 10m 단위 고도에서 반복되고 있는 것을 알 수 있다. TIN 보간과 크리깅 보간의 경우에는 이와 같은 단구화 현상이 상당히 곡선화되거나 제거되는 경향을 보인다.

4.2.3 필터 지도(Filtered Map)

고도자료의 오차는 전체 DEM 정확도 뿐 만 아니라 사면분석, 경사도 산출 등과 같은 인접 연산

(neighborhood operations)을 통한 2차 산물에 더 큰 영향을 준다(Wood & Fisher, 1993). 따라서 필터링(filtering)과 같은 연산을 통해 해당지점을 중심으로 한 공간적 분산(spatial variation)의 크기를 파악하는 것은 오차의 공간적 분포의 파악과 2차 산물의 정확도 재고에 매우 유용한 도구가 될 수 있다. 예컨대 high pass filter를 이용하면 해당 지점에서의 속성값 변화의 정도를 확대시켜 수치고도자료에서 지형기복

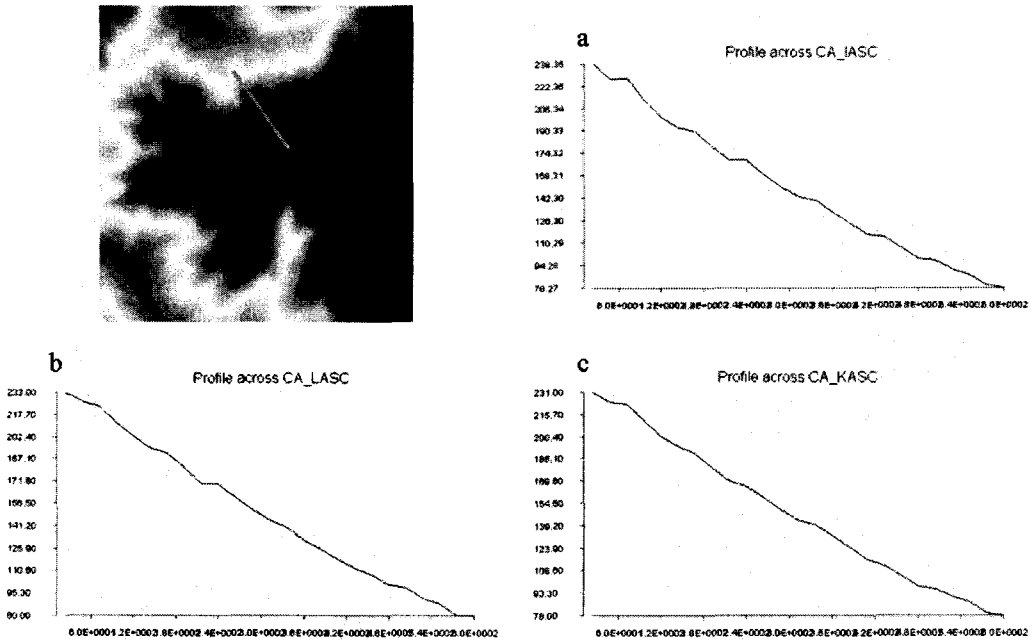


그림 4.16 보간 DEM의 종단면도 (a: IDWA 보간, b: TIN 보간, c: 크리깅 보간)

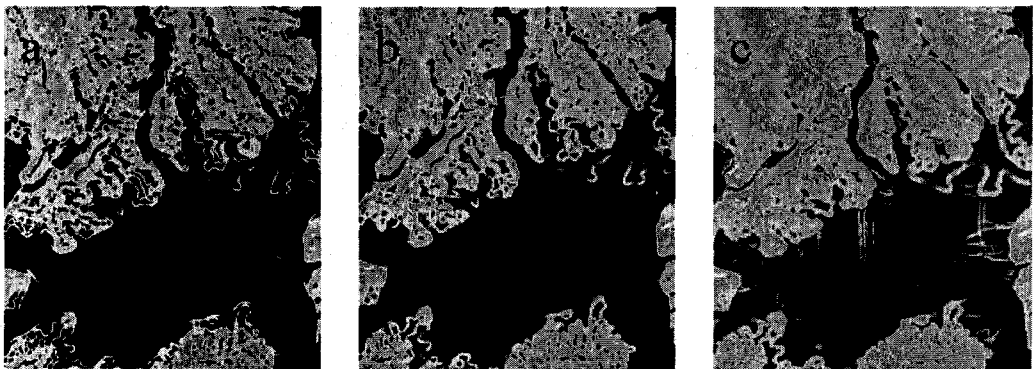


그림 4.17 Sobel Edge Detector로 처리한 DEM 필터 지도 (a: IDWA 보간, b: TIN 보간, c: 크리깅 보간)

-1	0	1	1	2	1
-2	0(X)	2	0	0(Y)	0
-1	0	1	-1	-2	-1

$$(P_t = \sqrt{X^2 + Y^2})$$

그림 4.18 Sobel Edge Detector Filter

의 급변점을 탐색할 수 있으며, low pass filter는 해당지점에서의 속성값 변화의 정도를 감소시켜 DEM을 평활화(smoothing)에 이용할 수 있다.

여기에서는 3*3 커널 윈도우 두 개를 이용하여 지역간의 급변점을 탐색하는 Sobel Edge Detector Filter(그림 4.18)를 이용하여 각각의 DEM에 적용하였다(그림 4.17).

Sobel 필터 지도는 경사도 지도와 비슷한 형태를 가지는데 이것은 경사도 계산과 필터링이 인접연산이라는 동일한 범주의 연산이기 때문이다. 경사도 지도에서와 마찬가지로 필터 지도에서도 사면방향과 직각인 선형 사상(line features)이 발견된다. 특히, IDWA 보간 DEM에서는 그 선형의 폭이 좁고 선명하게 나타나며, 크리깅 보간 DEM에서는 평지지역에서 수평 혹은 수직의 선형을 볼 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 수치지도의 등고선으로부터 생성된 DEM의 정확도를 평가하는데 있어서 지금까지 대표적인 척도로 사용되고 있는 RMSE를 보완할 수 있는 방안을 탐색적 공간자료분석기법을 통해 모색하였다. 이를 위해 3가지 대표적인 보간기법으로 실험 DEM을 작성하고 이를 대상으로 비교적 간단한 몇 가지 탐색적 공간자료분석기법을 통해서 RMSE와 같은 단일 정확도척도에서 발견할 수 없는 자료의 분포특성을 발견하였다.

1. 단순한 도수분포도에서 확인한 돌출현상(spikes)은 보간 과정 발생하는 정오차의 가능성을 보여주는

것으로 크리깅보간에 비해 IDWA 보간과 TIN 보간을 사용한 DEM에서 두드러지게 나타났다. 경사도 도수 분포도를 통해서 TIN 보간이 평탄한 기록을 갖는 지형에 대해 효과적으로 DEM을 생성하지 못하는 현상을 발견하였다. 그리고 해먹 플롯과 해먹 인덱스를 통해 비교한 결과 크리깅 보간을 이용한 DEM이 전반적으로 구간별 누적 분포가 유사하게 나타나 다른 보간 기법에 비해 우수한 패턴을 보였으며 TIN의 경우는 등고선 간격에 절대적으로 의존하게 있음이 극명하게 나타났다.

2. 공간적 탐색기법 가운데 경사도지도, 음영기복도, 필터지도, 종단면도 등을 이용하면 보간 DEM의 고도가 사면과 직각인 방향, 즉 등고선 방향으로 일정한 선형으로 표현되는 분포특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 특히 IDWA 보간의 경우 평지에서 산지로 향하는 사면 방향에서 줄무늬현상(striation)이 선명하게 나타났다. 이것은 보간 과정에서 등고선 간격을 중심으로 단구화 현상(terracing effect)이 심하게 발생하였다는 것을 의미한다. 단구화 현상은 벡터형식의 등고선을 이용하여 DEM을 생성하는 과정에서 등고선을 선사상이 아닌 '점들의 집합'으로 취급하는 보간기법들의 접근방법에서 원인을 찾을 수 있다.

3. RMSE는 체계적 분포패턴을 갖는 오차를 밝히기 어렵다는 한계를 갖지만 탐색적 공간자료 분석기법은 보간기법에 따라 발생하는 체계적 오차의 분포 특성을 분석함으로써 궁극적으로 DEM의 자료품질을 향상시킬 수 있도록 보간기법을 조정하는데 유용한 수단으로 이용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 윤철규, "TIN과 GRID 기반의 수치지형모델을 이용한 지형분석에 관한 연구", 한국측지학회지, 16 (1), pp.67-74, 1998.
2. 조규전·조영호·정의환, "정규격자 수치고도모델의 생성과 정확도 분석에 관한 연구", 한국측지학회지, 16 (1), pp.119-132, 1998.
3. Bailey, T. and Gatrell, A., Interactive Spatial Data Analysis, Essex: Longman, 1995.

4. Burrough, P.A., Principles of Geographical information systems for Land resources assessment, Clarendon: Oxford, 1986.
5. Gao, J., "Resolution and accuracy of terrain representation by grid DEMs at a micro-scale", I. J. of Geographical Information Science, 11 (2), pp.199-212, 1997.
6. Goodchild, M.F., "Generalization, uncertainty, and error modeling", Proceedings, GIS/LIS 96, Denver, November 19-21, pp. 765-774, 1996.
7. João, E.M., Causes and Consequences of Map Generalisation, Taylor & Francis: Bristol, 1998.
8. Maling, D.H., Measurements from Maps: Principles and Methods of Cartometry, Pergamon Press: Oxford, 1989.
9. Monckton, C., "An investigation into the spatial structure of error in digital elevation data", in Worboys, M.F. (ed.) Innovations in GIS 1, Taylor & Francis: London, pp.201-211, 1994.
10. U.S. Geological Survey, Standards for Digital Elevation Models: National Mapping Program Technical Instruction, Reston, VA, 1998.
11. Watson, D.F., Contouring: A Guide To The Analysis and Display of Spatial Data, Pergamon Press: Oxford, pp.101-161, 1992.
12. Weibel, R. and Heller, M., "Digital Terrain Modelling", in Maguire, D.J., Goodchild, M.F., & Rhind, D.W. (eds.) Geographical Information Systems: Principles and Applications, Longman: London, pp.269-297, 1991.
13. Wood, J.D., "Scale-based characterisation of Digital Elevation Models", in Parker, D. (ed.) Innovations in GIS 3, Taylor & Francis: London, pp.163-176, 1996.
14. Wood, J.D., "Modelling the continuity of surface form using Digital Elevation Models", Proceedings 8th International Symposium on Spatial Data Handling, pp.725-736, 1998.
15. Wood, J.D. and Fisher, P.F., "Assessing Interpolation Accuracy in Elevation Models", IEEE Computer Graphics and Applications, 13 (2), pp.48-56, 1993.