

국가 수치지형도를 이용한 DEM 생성

황철수* · 구자용**

Effective Procedures of DEM Generation from National Digital Topographic Maps

Chul-sue Hwang* · Cha-Yong Ku**

요약 : 본 연구는 우리나라의 수치지형도에서 수치고도모형(DEM)을 개발하고자 할 때 고려해야 할 요인들을 분석하였다. 특히 DEM의 정확도에 결정적으로 영향을 미치는 내삽법의 과정을 지형적 유형(평지·계곡·산지)과 공간적 표본추출법(체계적추출법·군집형무작위추출법·복합점진적표본추출법)에 따라 구분하여 살펴 보았다. RMSE의 측정을 통해 크리깅 내삽법이 지형의 기록에 상관없이 정확도를 유지하면서 DEM을 생성할 수 있는 방법으로 평가되었다. 그리고 표본추출법에 따라 공간적 표본 밀도를 달리한 실험을 통해 밀도가 높은 표본을 대상으로 개발된 DEM의 정확도가 오히려 어느 한계 내에서 그보다 밀도가 낮은 표본을 대상으로 한 경우에 비해 낮게 나타났다 또한 본 연구에서 제안한 복합 점진적 표본추출법을 적용한 DEM의 정확도는 다른 표본추출법을 적용한 경우보다 그 정확도가 향상됨을 확인하였고, 반면에 계산상의 효율성이 다른 방법에 비해 떨어지는 단점을 보였다

주요어 : 수치고도모형, 내삽법, 공간적 표본추출법, 수치지형도, 지리정보과학, 평균자승근오차

Abstract · This paper discussed effective procedures of DEM generation from national digital topographic maps, which mainly focused on interpolation methodologies. The interpolation procedures, which considerably influenced the accuracy or quality of DEMs, were analyzed in terms of topographic types and spatial sampling schemes. The topographic types were subdivided into flat area, V-shaped valley area, and mountainous area, and the spatial sampling schemes into systematic sampling, cluster random sampling, and hybrid progressive sampling. In addition, the most widely used interpolation algorithms including IDW, Kriging,

TIN-based, and spline were compared on the basis of RMSE. The results showed that Kriging was more accurate than others regardless of terrain complexity. Surprisingly enough, DEMs generated from more coarse samples were found to be more accurate than DEMs from dense samples in an threshold sample size. Also, the serious decrease in accuracy related to the sampling density were not detected in experimental DEMs. Finally, the hybrid progressive sampling scheme designed in this paper had most excellent accuracy but with relatively poor computational efficiency.

Key Words : DEM(Digital Elevation Model), interpolation, spatial sampling, digital topographic map, GIS(Geographic Information Sciences), RMSE

1. 서 론

1) 연구목적

수치고도모형(DEM, Digital Elevation Model)은 일반적으로 규칙적인 격자 행렬(grided matrix)을 통해 공간상에 나타나는 지형기록의 변화를 연속적으로 표현하는 모형이라고 정의된다(Burrough,

1986). 2차원 평면으로 표현되는 단위 격자는 위치(x, y 좌표)와 고도값(z 값)을 수치적으로 표시하고 있기 때문에 지형면을 수치적으로 해석하기에 적합한 구조를 가지고 있다. 이와 같은 특성으로 인해 DEM은 컴퓨터로 처리하기에 알맞은 자료구조이고 특히 GIS 데이터베이스에서 중요한 요소로 인식되고 있으며 3차원의 지형면(surface)을 나타내는 대표적 모형으로 평가되고 있다(Gao,

* 서울대학교 국토문제연구소 상근연구원(Research Fellow, The Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University)

** 서울대학교 대학원 박사과정(Graduate Student, Dept of Geography, Seoul National University)

1995). DEM은 지리학 연구에도 유용하게 활용된다. 예컨대 경사도, 사면방향, 지형단면 등과 같이 한 지역의 기본적 지형 특성을 분석하거나(Lee et al. 1992; Wood, 1996), 유역 구분과 하계망의 위상구조 등을 파악하여 하계망 특성을 고찰하며(Mark, 1984; Band, 1986), 혹은 지형과 관련된 통계적 분석 등에 자주 이용된다(Fisher, 1993). 이밖에 군사적 목적이나 도시계획·단지설계, 그리고 폐기물처리 등과 같은 분야에서 광범위하게 이용되고 있다(유근배, 1991; Weibel et al, 1991). 최근 우리나라에서도 지리정보과학(Geographic Information Sciences)과 컴퓨터 지도학 분야의 연구가 활성화되고 국가적으로 지리정보를 구축하면서 이에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 1995년 이후 국가지리정보체계(NGIS)구축사업이 본격적으로 진행되면서 국가기본지리정보 가운데 하나로 DEM을 구축하여야 한다는 논의가 제시되고 있다. 국내에서는 지리학보다 측지학 분야에서 DEM의 연구가 활성화되었는데, DEM의 생성기법에 대한 논의가 대부분을 차지하고 있다(이석찬·조규전, 1982; 이석찬 등, 1990; 최병길, 1996; 조규전 등, 1998).

한편 DEM을 구축하는데는 현지측량조사자료, 수치지도 혹은 종이지도의 등고선 자료, 항공사진측량자료, 인공위성이미지 등과 같은 자료원(source)을 이용할 수 있다. 현지측량조사자료나 인공위성이미지를 이용하는 방법은 특수한 지역에 한해서 시도되고 있어서 대규모 지역이나 대량의 DEM 개발에는 적합하지 않다. 항공사진측량에 의해 작성되는 DEM은 매우 정확하다는 장점이 있는 반면에 매우 정교하고 고가의 해석입체도화기(analytical stereoplotters)와 숙련된 기술인력이 요구되기 때문에 실용적이지 못한 측면이 있다. 이에 비해 수치지도나 종이지도에 표시된 등고선을 자료원으로 DEM을 개발할 경우는 항공사진측량방법에 비해 비용과 인력이란 측면에서 제한을 받지 않는다. 특히 등고선이 근본적으로 항공사진측량에 의해 제작되기 때문에 두가지 자료의 기본적 특성이 유사하다. 이러한 배경에서 국가적 규모로 DEM을 개발하고자 할 경우에는 대부분 국가에서 수치지도나 종이지도에 표시된 등고선을 활용하고 있다.” 이렇게 DEM을 개발하

는데 등고선 자료를 원자료로 활용하면 상대적으로 다른 자료들에 비해 비용을 줄이면서 높은 정확도를 유지할 수 있다.

한편, 등고선에서 DEM을 개발하기 위한 과정에는 내삽 과정(interpolation processes)이 일반적으로 포함된다. 그런데 여기에서 주목해야 할 점이 등고선으로부터 DEM을 개발하는 과정에 적용되는 내삽법에 따라 개발된 DEM의 정확도와 효율성이 결정적으로 영향을 받는다는 사실이다. 특히 DEM의 정확도는 정보의 가치란 측면에서 매우 중요한 지표가 되며 대부분 관련 연구가 정확도의 향상에 집중되고 있다.

본 연구는 우리나라에서 현재 구축이 진행되고 있는 수치지형도의 등고선 자료를 활용하여 DEM을 개발할 때 고려하여야 할 요인을 다음의 세가지 측면에서 분석하였다. 특히 DEM을 개발하는데 기존의 연구와 달리 지형적 특성을 기본적 요소로 고려하기 위해 연구대상 지역을 구분하여 그 차이를 살펴보았다. 구체적으로 첫째 내삽법간의 정확도를 비교·평가하고, 둘째 지형적 특성에 따라 DEM의 정확도에 영향을 미치는 내삽법이 존재하는가를 밝히고, 셋째 공간적 표본추출방법에 기초를 두고 내삽법을 적용하여 그 정확도를 분석함으로써 내삽 과정의 효율성을 향상시킬 수 있는 대안을 모색하였다.

2) 연구지역과 방법

본 연구에 사용한 수치지형도의 축척은 1:25,000이며, 연구의 대상지역은 1:25,000 지형도에서 도엽명 공주에 해당하는 지역으로 산지와 계곡, 그리고 평지가 함께 분포하는 지형적 특성을 갖고 있다. 우리나라 수치지형도는 지도 象畵들을 주제별로 분류하고 코드를 부여하여 레이어(layer)라는 단위로 관리하고 있다. 국가 수치지형도 표준안에 의하면 등고선에 해당하는 코드는 711로 시작하는 레이어이다. 본 연구지역의 수치지형도에서 이 범주에 속하는 레이어는 7111(주곡선)과 7114(계곡선)이며, 두 가지 등고선 레이어를 추출하여 수치고도모형의 개발을 위한 기본자료로 이용하였다.

표본지역은 지형특성을 고려하여 2km×2km 크

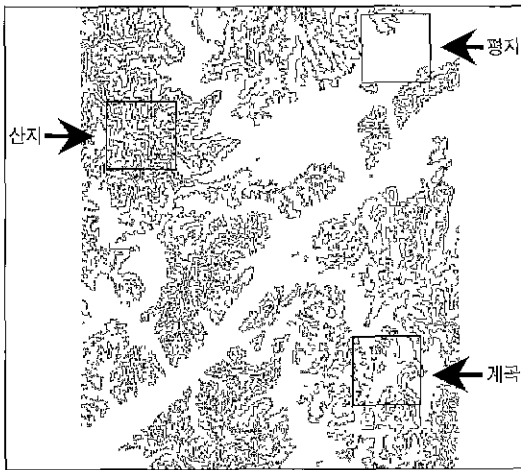


그림 1 연구 표본 지역

기로 선정하였다. 전체 대상지역에서 지형특성에 따라 평지, 계곡, 산지의 세가지 지역을 선정하였다. 즉 지형의 기복이 거의 없는 지역을 평지 표본으로, 경사면과 계곡을 가지고 있는 지역을 계곡 표본으로, 산봉우리와 능선으로 이루어진 지역을 산지 표본으로 선정하였다. 공주 도엽 중에서 선정된 표본지역의 위치는 그림 1과 같다. 표 1은 표본지역으로 선택한 3개 지역의 기본적 지형 특성을 분석한 것이다. 평지 표본지역은 평균고도가 41.2m이고 최저 20m에서 최고 140m까지 고도가 분포하고 있으며 고도의 표준편차가 18.65m인 지역이다. 계곡 표본지역은 평균고도가 91.27m, 표준편차가 45.66m, 최저고도가 30m, 최고고도가 290m인 지역이며, 산지 표본지역은 평균고도 215.65m, 표준편차 66.83m, 최저고도 70m, 최고고도 380m인 지역이다. 평지-계곡-산지의 순으로 평균과 표준편차가 증가함을 알 수 있다.

한편 DEM의 정확도는 원자료의 공간적 밀도와 패턴, 지형의 복잡성, 적용되는 내삽법 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다.²⁾ 본 연구

표 1 표본지역의 기본적 지형 특성

구분	평지	계곡	산지
평균(m)	41.20	91.27	215.65
표준편차(m)	18.65	45.66	66.83
최소값(m)	20	30	70
최대값(m)	140	290	380

에서는 이와 같은 요인들의 영향을 평가하기 위해 내삽법을 통해 개발되는 DEM의 정확도를 계산하였고 그 척도로 RMSE(root mean square error)를 사용하였다. RMSE는 각각의 오차값들이 갖는 오차의 평균량을 평가하는 일반적 방법으로, 지도와 같은 공간적 자료에 대해 적용할 경우 동일한 좌표계를 가지는 두 개의 자료 집단을 직접 비교하여 계산함으로써 해당 자료 집단의 정확도를 단일 척도로 계산한다(Maling, 1989). 계산된 RMSE 값이 크면 참조자료(reference dataset)와 비교자료(test dataset)에서의 속성값의 차, 즉 오차가 더 크다는 것을 의미한다. RMSE는 관측점의 고도값과 내삽 결과의 해당지점 고도값의 직접비교가 가능하고 계산과정이 간단하여 각국의 지도제작기관에서 보편적인 정확도 평가지표로 사용하고 있다(João, 1998). RMSE의 계산식은 다음과 같다(FGDC, 1998).

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_i - Z_n)^2}{N}}$$

Z_i : 측정 자료의 i 번째 위치의 고도값

Z_n : 정확도가 높은 참조자료의 i 번째 위치의 고도값

N : 자료의 개수

본 연구에서 RMSE를 구하는데 사용한 참조값은 우리나라 국가기본도를 제작할 때 적용하는 국가기준점(수치지형도 코드 731)과 항측기준점(수치지형도 코드 732)을 이용하였다. 평지·계곡·산지에 해당하는 표본지역 내에 포함된 참조고도값의 수는 각각 24개, 9개, 32개이다.

2. DEM 생성과 내삽법 평가

자료점이 분포하는 지역 내에서 조사되지 않은 지점의 변수값을 추정하는 내삽법(interpolation)은 크게 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, 1994).³⁾ 그리고 가중평균법은 거리에 기초한 가중평균법과 면적에 기초한 가중평균법으로 다시 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 범주로 분류되는 내삽법 가운데 가장 일반적으로 적용되는 역거리가중법(inverse distance weighting method), 크리깅법(Kriging method), TIN 방법, 운형법(spline method)을 적용하여 DEM을 개발하였다. 평지, 계곡, 산지로 구분하여 선정된 표본지역에 대해 4가지 내삽법을 적용하여 개발된 DEM은 실제 지상 해상력을 기준으로 20 미터의 격자 크기를 갖는다.

1) 내삽법

(1) 역거리가중 내삽법(IDW, inverse distance weighting)

서로 가까이 위치한 점들이 멀리 떨어져 있는 지점보다 더 유사한 경향이 있다는 톨블러의 법칙(Tobler's law of geography)을 이용하여 관측점과 내삽지점 사이에 가중치를 주는 방법이다. 가중치로는 일반적으로 역거리제곱을 사용하며, 평균을 위해 윈도우를 사용하게 된다. 내삽지점 주위의 약 10여개의 서로 이웃하고 있는 관측점을 기초로 내삽과정을 거쳐 연속면을 작성한다. 작성된 연속면에서 일정간격의 격자의 고도값을 추정하여 수치고도모형을 생성한다.

본 연구에서는 Surfer Ver 5.0 프로그램을 이용하여 역거리 가중내삽법을 적용하였다.⁴⁾ WinSurf 프로그램의 입력 데이터는 점사상으로 구성되어야 한다. 따라서 선사상인 등고선 데이터로부터 각 등고선의 꼭지점(vertex) 좌표를 추출하고, 각 꼭지점마다 등고선의 고도값을 부여함으로써 점사상 데이터로 변환하였다. 변환된 데이터를 Surfer에 입력하고, 내삽법을 Inversed Distance to a Power로 선택하고, 역거리 승수는 2로 주었다. 역거리 변환은 내삽될 지점에서 일정 거리 이내의 점들을 참조하는데, 여기서는 내삽크기만큼 섹터로 나누어 하나의 섹터 내에 최소 5개점이 포함된 최대 6개의 섹터를 검색하였다. 선택된 점들을 참조로 내삽하여 지형면을 생성하였다. Surfer에서 생성된 내삽면을 다시 IDRISI의 래스터 파일로 변

환하였다. 산지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 화일을 SANIIMG, 계곡 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 GOKIIMG, 평지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 FLATIIMG로 각각 저장하고 향후 비교분석에 이용하였다.

(2) 크리깅 내삽법(Kriging)

적합함수에 의한 내삽법 가운데 대표적 방법인 크리깅은 지역화 변수이론에 기초하여 어떠한 변수의 공간적 변동을 전체 경향의 구조적 성분, 무작위 공간적 자기상관, 노이즈 및 잔차항이라는 세 개의 주요한 성분 합으로 표현한 후, 분산도(semivariogram or variogram)를 이용하여 내삽에 필요한 최적 가중치를 결정한다. 결정된 최적 가중치를 이용하여 내삽과정을 거쳐 연속면을 작성하고, 작성된 연속면에서 일정간격의 고도값을 추정하여 수치고도모형을 생성한다. 크리깅은 임의의 규칙에 근거하여 가중치를 선택하는 것이 아니라 확률함수가 공간상에서 어떻게 변화하는가에 따라 선택하기 때문에 다른 방법들에 비해 유연하게 적용할 수 있다는 장점을 갖는다.

크리깅 내삽법 역시 WinSurf 프로그램을 이용하였다. WinSurf에 필요한 입력데이터는 역거리가중 내삽 결과를 구하기 위해 사용되었던 데이터와 동일하다. 다만 내삽법을 Kriging으로 선택하고, Variogram 모형은 선형식을 선택하였다.⁵⁾ 내삽지점의 고도값을 계산하기 위한 주위의 참조점은 역거리 가중내삽법에서 참조점을 검색하였던 방법을 그대로 이용하였다. 생성된 내삽면은 향후의 GIS 분석을 위하여 IDRISI 래스터 파일로 변환되었다. 산지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 화일을 SANKIIMG, 계곡 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 GOKKIMG, 평지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 FLATKIMG로 각각 저장하였다.

(3) TIN 내삽법(triangulated irregular network based)

TIN 내삽법은 면적에 기초한 가중내삽법의 일종으로 임의의 꼭지점(vertex)에서 시작하여 주변에 있는 두 개의 꼭지점을 이용하여 델로니 삼각

형(Delaunay triangle)을 구성하고 삼각형 내부의 값은 평면상의 상대적인 위치로 결정하는 방법이다. 구성된 삼각형 망에 일정한격의 격자(grid)를 찍우고 삼각형과 중첩되는 격자의 고도값을 삼각형 평면상의 고도로 추정하여 수치고도모형을 생성한다.

본 연구에서는 TIN 내삽법을 적용하기 위해 Arc/Info 소프트웨어를 이용하였다. TIN 내삽법으로 자료를 내삽하기 위해서는 먼저 TIN 구조를 작성하여야 한다. Arc/Info의 ARCTIN 명령어는 등고선 형태의 커버리지(coverage)를 읽어들이고 TIN 구조를 생성하는 기능을 수행한다. 이 모듈은 각 등고선의 꼭지점을 이용하여 불규칙삼각망(Triangulated Irregular Network; TIN)을 생성한다.⁷⁾ 생성된 TIN 구조는 TINLATTICE 명령어를 통해 격자구조의 DEM 파일로 생성된다. 생성된 DEM 파일은 Arc/Info의 GRID 포맷으로 저장되어 있다. 이 파일을 IDRISI에서 사용가능한 파일로 변환하여 비교분석에 이용하였다. 산지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 화일을 SANTIMG, 계곡 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 GOKTIMG, 평지 표본지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 FLATTIMG로 각각 저장하였다.

(4) 운형 내삽법(spline)

직사각형의 패치에 기초한 가중내삽법으로 분류되는 스피라인 내삽은 자료점 사이에 가중치를 설정하여 구해진 연속적인 구간별 다항함수(piecewise polynomial function)를 통해 자료면을 구한다. 일반적으로 운형 내삽법에 의해 생성되는

자료는 평활화(smoothing)되는 효과가 있으며, 최대값과 최소값이 반드시 자료점과 일치하지 않는 결과가 생길 수도 있다.

운형내삽법을 이용한 내삽을 수행하는 데는 ArcView(version 3.1)의 공간분석모듈(Spatial Analysis Extentions)을 이용하였다.⁷⁾ 이 모듈에는 점사상을 내삽하여 DEM을 생성하는 기능이 포함되어 있다. 여기에서는 역거리 가중내삽법에 사용되었던 고도 데이터를 ArcView에서 읽은 후 Surface 명령을 이용하여 DEM을 생성하였다. 내삽 옵션 중에 Spline을 선택하고, Weight는 0.1로, 참조점의 수는 12개로 설정하였다. 내삽된 DEM 파일은 IDRISI 파일로 변환되어 비교, 분석에 이용하였다. 산지지역의 데이터로부터 생성된 DEM 화일을 SANSIMG, 계곡지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 GOKSIMG, 평지지역의 데이터로부터 생성된 DEM 파일을 FLATSIMG로 각각 저장하였다.

2) 내삽법의 정확도 평가

내삽법의 정확도를 비교하기 위하여 3 개 표본지역을 대상으로 역거리가중법, 크리깅법, TIN 방법, 운형법 등 4가지 내삽법을 적용하여 총 12 개의 DEM을 작성하였다. DEM은 모두 20 미터의 지상 해상력을 갖도록 개발되었고 그 레이어(커버리지)는 100 x 100 행렬의 격자로 구성되었다. 그림 2, 3, 4는 평지 표본지역, 계곡 표본지역, 산지 표본지역에 대해 각각 4가지 내삽법을 적용하여 개발된 DEM을 나타낸 것이다.

한편, 12 개의 DEM이 갖는 정확도를 비교하기

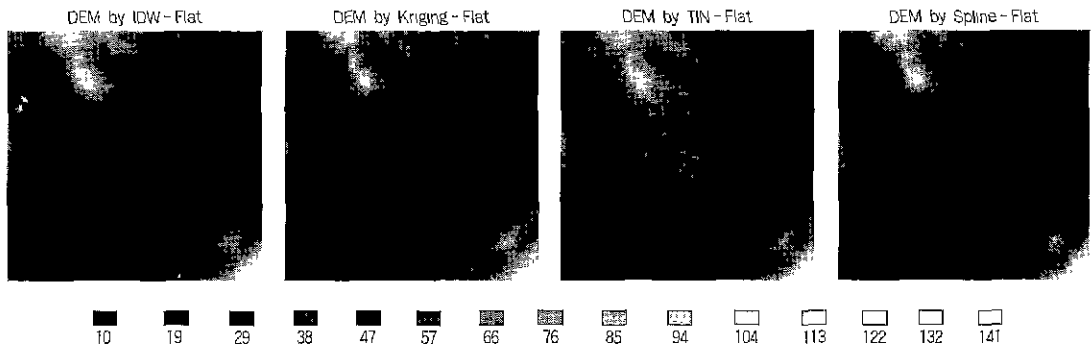


그림 2. 평지 표본지역에 대한 4개 내삽법 적용 DEM

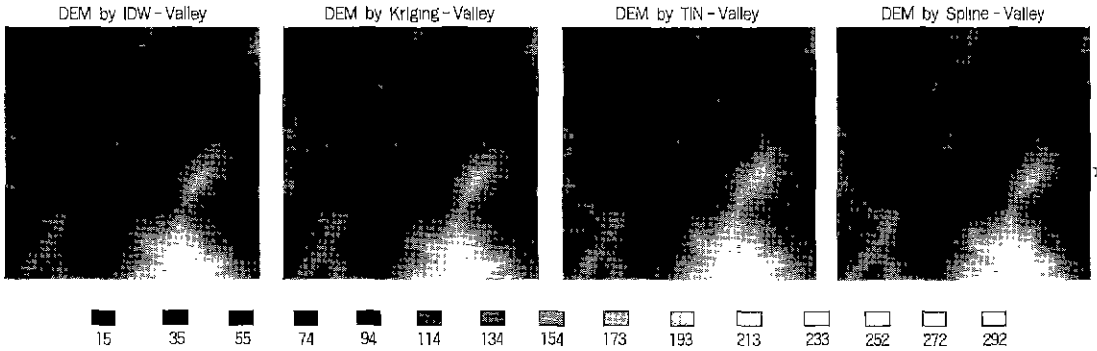


그림 3. 계곡 표본지역에 대한 4개 내삽법 적용 DEM

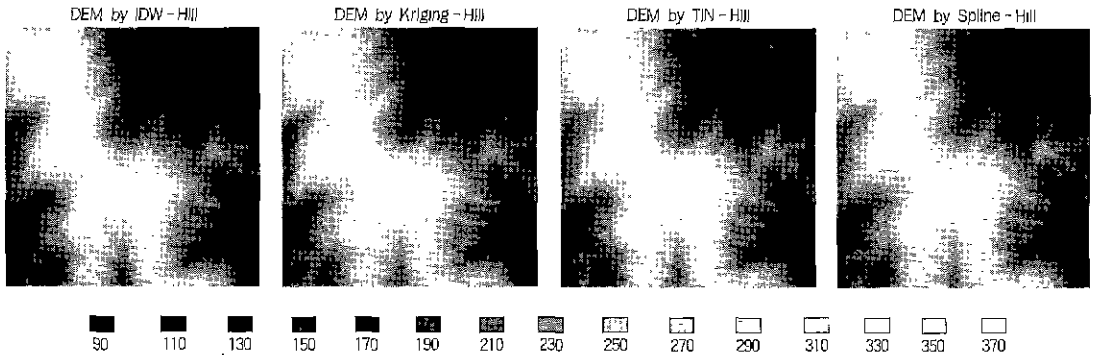


그림 4. 산지 표본지역에 대한 4개 내삽법 적용 DEM

위해 각각의 표본지역에 속해 있는 표고점과 삼각점을 기준 참조자료로 하여 RMSE를 계산하였다(표 2). 표본 지역별로 내삽법의 정확도를 살펴 보면, 고도자료값의 분산도가 낮은 평지에 비해서 분산도가 상대적으로 높아짐에 따라 내삽법의 유형에 관계없이 공통적으로 RMSE가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 즉 내삽을 통해 고도값을 추정할 때 평지가 기복이 심한 지형에 비해 정확하게 계산된다. 평지 표본지역에서는 TIN 방법을 적용한 DEM의 정확도가 RMSE 3.617로 가장 우수하고 크리깅과 운영법이 각각 4.112와 4.148 그리고 상대적으로 거리가중법이 5.293으로 가장 낮

게 나타났다. 계곡 표본지역에서는 크리깅의 정확도가 6.077로 가장 높게 나타났고 TIN과 거리가중법이 각각 6.583과 7.063 그리고 운영법을 적용한 결과는 다른 방법에 비해 RMSE가 9.827로 계산되어 정확도가 매우 낮게 나타났다. 산지 표본지역에서도 크리깅 방법이 6.009로 가장 정확도가 높게 나타났고 다음에 운영법이 6.186 그리고 TIN과 거리가중법이 각각 7.444와 8.041으로 상대적으로 정확도가 낮게 나타났다.

지금까지의 분석을 종합하면 크리깅 방법이 평지 표본지역의 경우에도 TIN 방법과 비교하여 정확도에 큰 차이가 없으며 계곡과 산지의 경우에는 가장 우수하게 정확도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그것은 앞서 밝힌 바와 같이 크리깅의 특성상 공간상에서 확률함수가 갖는 분포 특성에 따라 가중치가 결정됨에 따라 그만큼 지형적 특성에 유연하게 대처한 결과로 추측할 수 있다.

표 2. 표본지역별 내삽법의 정확도 비교

표본지역	기준 참조 표본수	역거리가중법	크리깅	TIN	운영법
평 지	24	5.293	4.112	3.617	4.148
계 곡	9	7.063	6.077	6.583	9.827
산 지	32	8.041	6.009	7.444	6.186

3. 공간적 표본추출에 기초한 내삽법을 적용한 DEM

DEM에서 필요한 모든 지점의 고도를 원자료에서 모두 측정하는 방법은 비용이나 시간적인 측면에서 비효율적 요소가 있다. 이러한 문제는 항공사진측량조사에 따라 DEM을 개발하는 과정에서 먼저 제기되었다. 즉, 항공사진 원자료로부터 해당 지역을 대표할 수 있는 표본지점들을 선정하여 그 고도를 측정하고 그밖의 고도는 이들 표본 고도점들로부터 내삽에 의해 구하는 방법이 일반적으로 활용된다. 물론, 표본지점의 선정은 고도의 숙련자에 해석에 의존하기 때문에 주관적이라는 측면이 존재한다. 그런데 지금까지 이와 같은 표본추출에 의한 내삽법을 항공사진측량에 적용하기 위한 연구는 많이 진행되고 있지만, 자료의 성격이 유사한 수치지도의 등고선 자료에 대해 적용하는 연구가 상대적으로 이루어지지 않았다. 그것은 표본추출과정이 항공사진측량을 활용한 방법에서는 고도자료를 측정하는 순간부터 고려되는데 비해 수치지도의 등고선 자료를 활용한 방법은 이미 측정된 고도자료를 대상으로 표본추출과정이 삽입된다는 차이에서 비롯된다고 할 수 있다. 그러나 표본추출을 적용한 자료에 대해 내삽을 수행하여 DEM을 개발하는 연구는 Makarovic(1973, 1977, 1984)에 의해 시도된 이후에 크게 활성화되지 않았다. 특히 표본추출과 DEM의 정확도 사이에 상호 관련성을 심도있게 분석한 연구는 거의 찾기 힘들다(Gao, 1995).

본 연구에서 사용한 수치지형도에서 하나의 등고선 자료는 실제 동일한 고도값을 갖는 점(vertex)들의 집합으로 표현된다. 우리나라의 수치지도에 포함된 등고선 자료는 대개의 경우 숙련 기술자에 의해 수작업 디지털타이핑 혹은 해석도화 방식으로 취득된다. 앞장에서는 등고선을 구성하는 전체 점들에 대해 내삽을 수행하는 방법으로 DEM을 개발하였고, 본 장에서는 공간적 표본추출법을 적용해 추출한 점들을 기준으로 대표적 내삽법을 동원하여 DEM을 개발하였다. 이러한 두가지 방식에 따라 개발된 여러 가지 DEM을 상호비교하여 효과적인 DEM 구축 방안을 검토하기 위한 기초적 실험을 수행하였다.

1) 공간적 표본추출에 의한 내삽

표본추출을 적용하여 DEM을 개발하기 위한 연구는 한마디로 내삽 과정에서 고려하여야 할 자료의 수를 최소화시키면서 가능한한 전체 자료수를 대상으로 내삽을 하는 경우와 유사하도록 정확도를 유지하는데 초점을 맞춘다. 따라서 지형적 특성, 대표적으로 기복의 특성을 최대한 반영하도록 공간적 표본을 추출할 수 있다면 DEM의 정확도를 유지하면서 개발 과정의 효율성을 높일 수 있는 개연성이 그만큼 높아진다고 말할 수 있다. 이와 같이 지표 공간상의 특정한 위치와 관련된 공간적 표본추출(Spatial Sampling)은 일반적으로 점사상(Point Feature)에 대해 '단순 무작위 표본추출(simple or unrestricted random sampling)', '체계적 표본추출(systematic sampling)', '층화 표본추출(stratified sampling)', '군집형 표본추출(cluster sampling)' 등과 같은 기본적 유형으로 분류되는데(유근배, 1990; 이희연, 1989; Malin, 1989; McGrew and Monroe, 1993), 본 연구에서는 이러한 기본적 추출 방법들을 이용하거나 변형시켜 3가지 표본추출방법을 제안하여 이용하였다. '체계적 표본추출법(systematic sampling)'과 '군집형 무작위 표본추출법(cluster random sampling)' 그리고 '복합 점진적 표본추출법(hybrid progressive sampling)'이 그것이다.

우선 이를 위해 본 연구에서 사용한 벡터형(vector type)의 수치지형도의 등고선 자료를 우선 1m 격자 크기로 래스터화(rasterization)한 다음 이를 기초로 x, y 양방향에서 1m 간격의 벡터형 자료로 재구성하였다. 재구성된 자료는 각각의 공간적 표본추출법에서 모집단 성격을 갖고 이로부터 공간적 해상력을 달리한 표본에 따라 내삽이 이루어진다. 한편, 이와 같은 공간적 표본추출에 의해 생성된 DEM의 정확도 평가를 위해서는 내삽법 평가에서 정확도가 가장 우수한 크리깅을 이용하였다.

(1) 체계적 표본추출을 적용한 DEM

'체계적 표본추출'은 가장 간편한 방법으로서 균등하게 표본이 추출되는 특성을 갖는다. 여기에서는 등고선의 꼭지점을 점사상으로 변환하여 이

를 표본추출하는 방법을 선택하였다. 등고선은 선의 모양에 따라 직선부분은 꼭지점의 수가 적고, 곡선부분은 꼭지점의 수가 상대적으로 많다. 따라서 등고선의 꼭지점을 그대로 점사상으로 이용할 경우 등고선의 모양에 따라 점의 분포가 일정하지 않게 된다. 모집단의 분포를 균등하게 하기 위하여 등고선 사상을 1m 간격의 래스터 파일로 변환하였다. 변환된 래스터 파일에서 다시 점사상을 추출하여 1m 간격의 균등한 벡터형의 점사상을 생성하였다.

생성된 점사상을 모집단으로 설정하고 표본 간격을 변화해가며 체계적 표본추출을 행하였다. 먼저 전체지역을 일정크기의 격자로 분할하였다. 분할된 격자에서 중심점을 계산하고, 중심점에서 가장 가까운 위치에 있는 점을 표본점으로 선정하였다. 격자의 크기는 5m, 10m, 20m, 30m, 40m, 50m로 각각 설정하였다.

그림 5는 30m 간격에서 체계적 표본추출법으로 점사상을 추출할 때 나타나는 분포를 표시한 것이다. 이와 같은 방식으로 3개 표본지역(평지·계곡·산지)에서 각 표본간격에 따라 모두 18개의 표본화일을 생성하였다. 이렇게 생성된 표본화일을 기초로 크리깅 내삽법을 이용하여 18개의 DEM을 개발하였다(그림 8, 9, 10).

(2) 군집형 무작위 표본추출을 적용한 DEM

체계적 표본추출법은 일정간격의 점을 추출하므로 공간적으로 균등한 분포로 표본추출되기 때문에 공간적 분포특성을 충분히 반영하지 못한다는 단점이 있다. 이에 반해 무작위 표본추출법에서는 공간적으로 균등한 분포가 보장되지 않지만 임의의 점을 선정하므로 점의 분포 특성을 고려하지 않아도 점의 임의성(randomness)이 보장된다. 여기에서 이용한 '군집형 무작위 추출법'은



그림 5 체계적추출법을 적용한 표본지역별 표본점 분포 패턴 (표본간격 30m)



그림 6 군집형무작위추출법을 적용한 표본지역별 표본점 분포 패턴 (군집크기 30m)

무작위 표본추출법을 약간 변형한 방법으로, 일정한 군집(cluster) 지역을 설정하여 그 영역내에서 표본을 무작위로 추출하는 방법이다. 이것은 점의 분포특성에서 임의성과 균등성을 상호 보완하도록 조정하기 위한 목적에서 시도하였다. 본 연구에서는 군집 지역의 크기를 체계적 표본추출에서와 같은 5m, 10m, 20m, 30m, 40m, 50m로 각각 설정하고 그 군집 지역내에서 임의의 점을 선정하

였다. 따라서 그 표본수는 체계적 표본추출에서의 동일하게 추출된다.

그림 6은 30m 간격에서 군집형 무작위 표본추출법으로 점사상을 추출한 결과이다. 그 다음 체계적 추출에서의 같이 3개 표본지역에 대하여 모두 18개의 표본화일을 생성하여 이를 기초로 크리깅 내삽법을 통하여 18개의 DEM을 구축하였다(그림 11, 12, 13).



그림 7. 복합점진적추출법을 적용한 표본지역별 표본점 분포 패턴

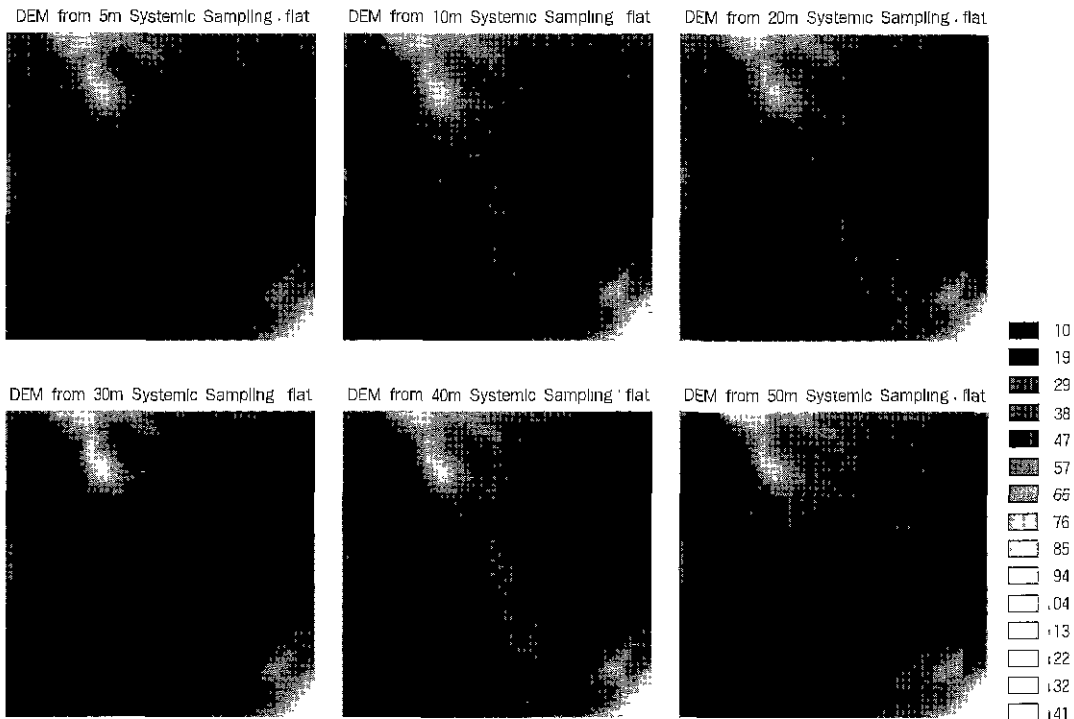


그림 8. 체계적추출법에 의한 평지 DEM (표본간격 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

(3) 복합 점진적 표본추출을 적용한 DEM

체계적 추출과 군집형 무작위 추출은 정도의 차이는 있지만 규칙적인 표본격자를 이용한 표본추출이라고 할 수 있다. 이런 방식은 일반적으로 기복량이 적은 지역에서 필요 이상으로 많은 자료점들이 추출될 수 있고 기복의 변화가 큰 지역에서는 표본수가 너무 적을 수도 있기 때문에 지표기복의 변화를 충분히 반영하는 데에는 비효율적이라는 지적을 받는다. 점진적 표본추출법은 지표기복의 특성을 최대한 반영하기 위한 방법으로 Makarovic(1973)의 연구 이후 이를 변형한 방법들이 소개되고 있다. 본 연구에서도 변형된 점진적 추출법을 제시하고 이를 이용해 내삽한 DEM을 개발하였다.

본 연구에서 제안한 '복합 점진적 추출법'은 표본을 일정크기의 격자로 나누고 각 격자의 범위(최대값-최소값)나 분산도를 검사하여 표본을 추출하는 원리를 이용하였다. 분산도가 일정 한도 내에 위치하면, 그 격자의 중심에 가까이 위치한 점을 표본으로 설정하고, 분산도가 기준값보다 크면

그 격자를 다시 하위 격자로 나누고 분산도를 검사하게 된다. 이 과정은 모든 격자들의 분산도가 기준값을 만족할 때까지 반복된다. 지표의 기복이 심한 지역은 많은 양의 표본이 추출되고 기복이 적은 지역은 상대적으로 적은 양의 표본이 추출된다. 이 표본추출법은 고도값의 공간적 분포를 고려하여 표본양을 조절하므로 지형의 특성을 반영하는 효과적인 방식이라 할 수 있다. 여기에서 고안한 복합 점진적 표본추출법은 다음과 같다.

먼저 전체지역을 5×5 크기의 격자로 나누고, 각 격자의 분산도를 검사하는 함수를 작성하였다. 함수의 호출결과 분산도가 0 보다 크면 다시 자신의 함수를 재귀호출한다. 그리고 분산도가 0이면 각 격자의 중심점에서 가장 가까운 점을 표본점으로 추출한다.

표본의 추출을 위한 모집단으로 1m 간격의 균등분포를 가진 고도 점사상 자료를 이용하여 3개 표본지역별로 위에서 설명한 알고리즘을 통해 복합 점진적 표본추출법을 적용하였다. 그림 7은 복합 점진적 표본추출법으로 점사상을 추출한 결과이다.

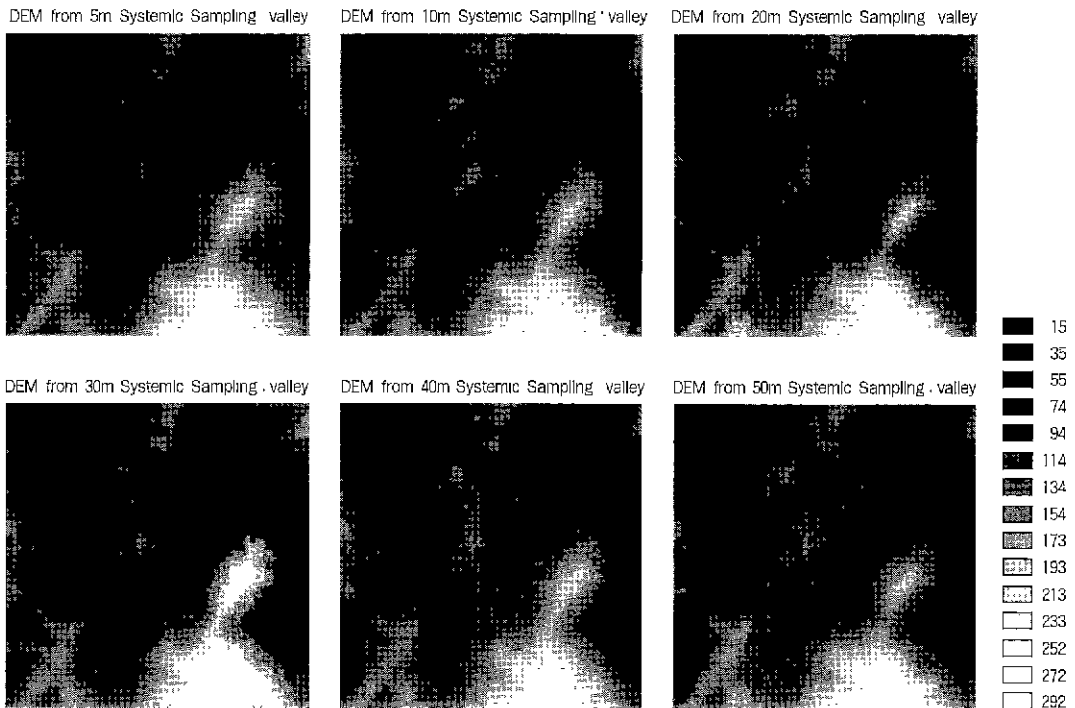


그림 9. 체계적추출법에 의한 계곡 DEM (표본간격 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

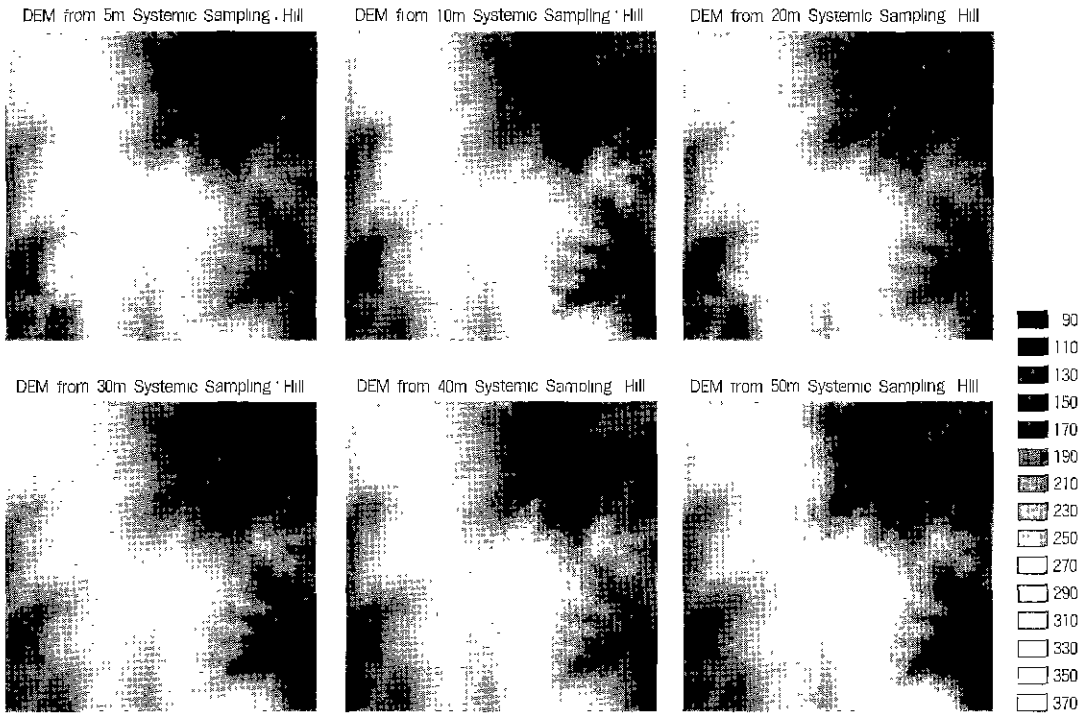


그림 10. 체계적추출법에 의한 산지 DEM (표본간격 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

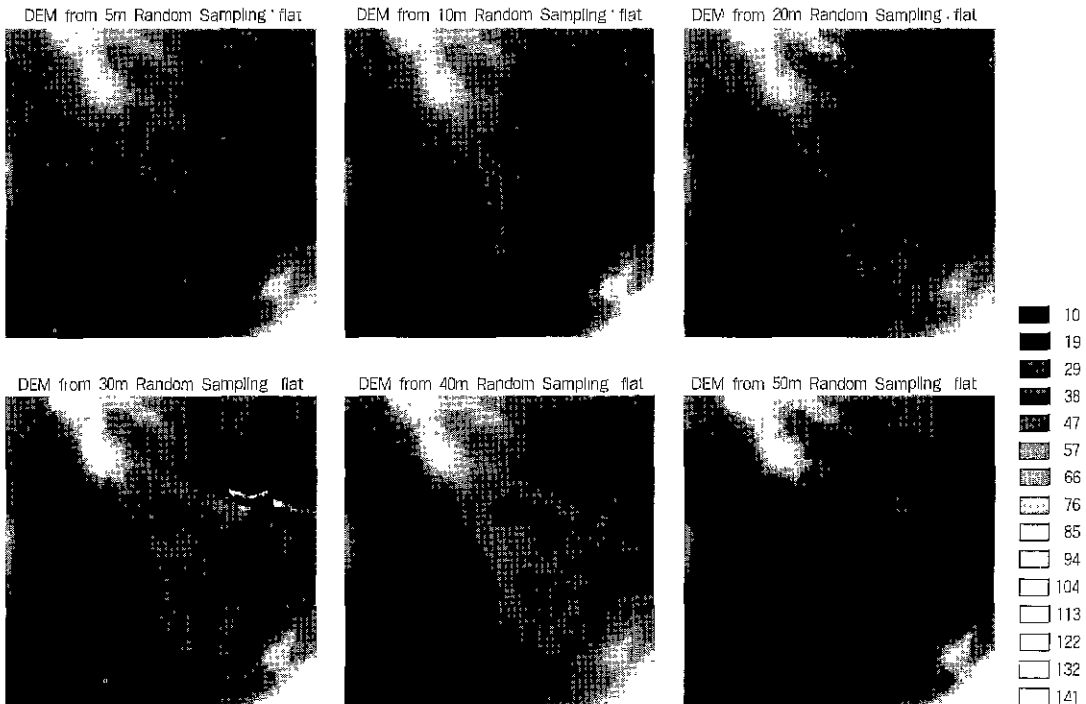


그림 11. 균집형무작위추출법에 의한 평지 DEM (균집크기 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

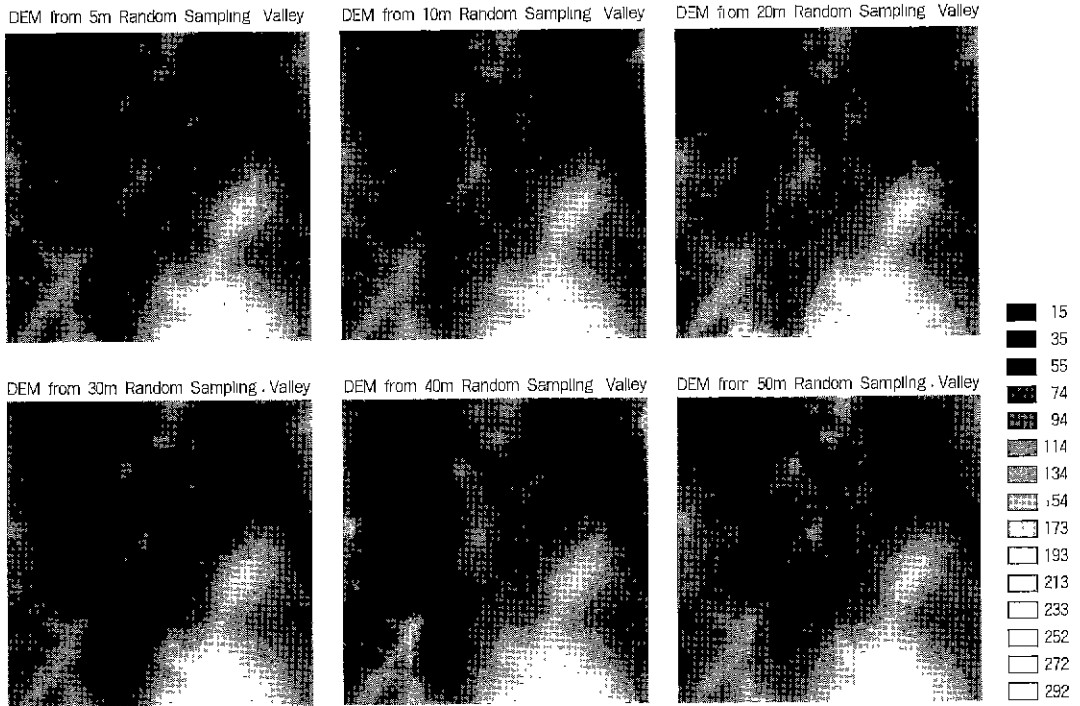


그림 12 균집형무작위추출법에 의한 계곡 DEM (균집크기 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

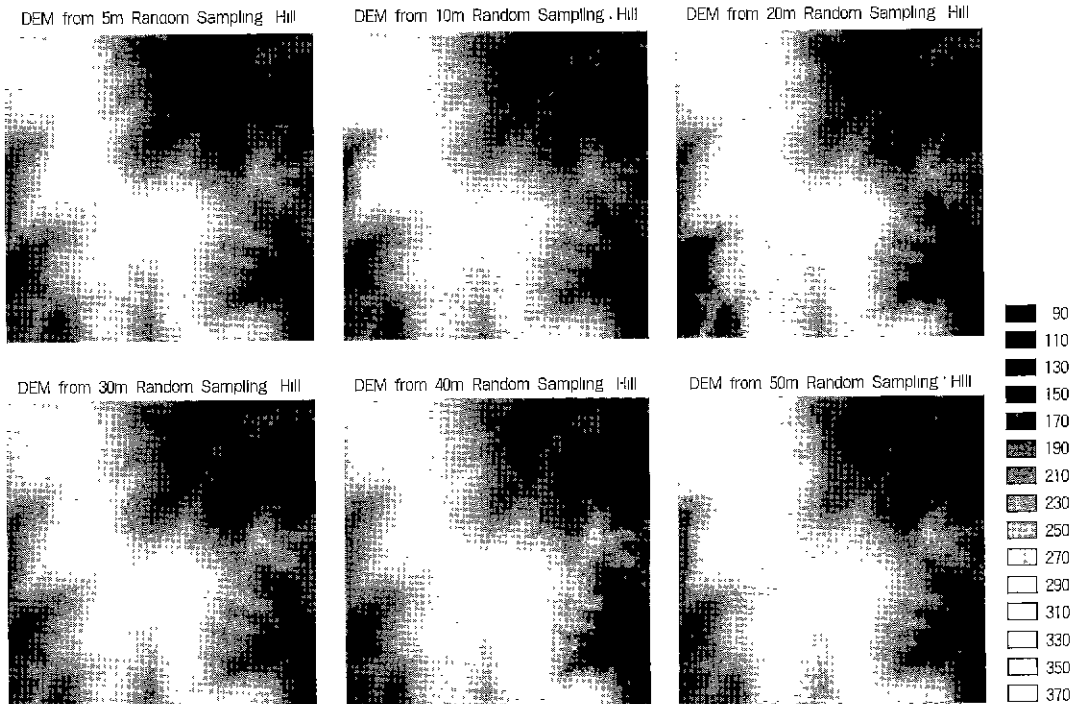


그림 13 균집형무작위추출법에 의한 산지 DEM (균집크기 5m-10m-20m-30m-40m-50m)

이렇게 생성한 3개의 표본파일을 기초로 크리깅 내삽법을 통하여 3개의 DEM을 개발하였다(그림 14).

2) 실험 결과의 비교와 평가

‘체계적 표본추출법’이나 ‘군집형 무작위 표본추출법’을 적용해 개발한 DEM의 정확도를 평가

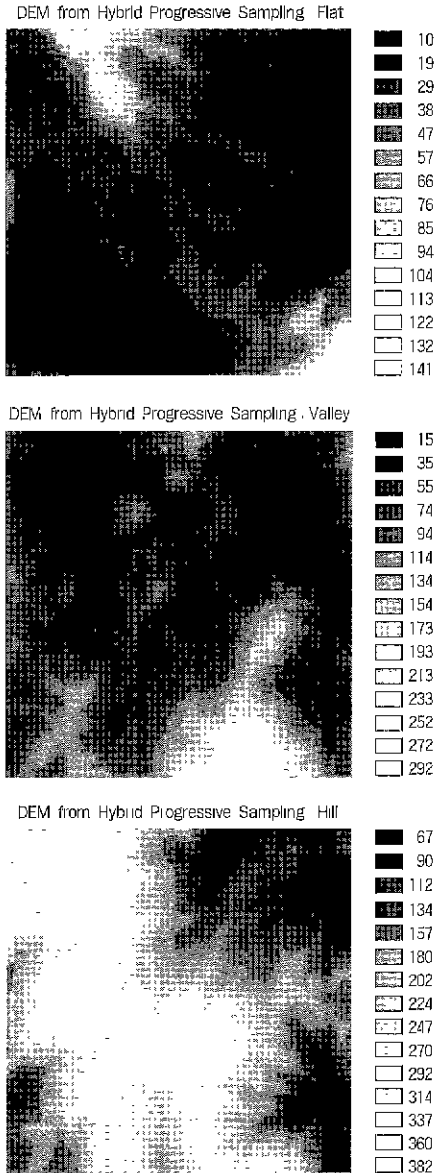


그림 14. 복합점진적추출법에 의한 표본지역별 DEM (평지-계곡-산지)

한 결과 매우 특이한 경향과 현상을 공통적으로 발견할 수 있었다. 그것은 일반적 예상과 달리 표본의 밀도가 가장 높은 경우보다 오히려 명확하게 기준을 설정하기 힘들지만 어느 한계 거리 내에서 표본의 밀도가 낮아질수록 개발한 DEM의 정확도가 오히려 높아진다는 점이다.

우선 체계적추출법의 실험 결과를 분석하면 다음과 같다(표 3, 그림 15). 평지 표본에서 표본간격이 30m인 경우에 정확도가 가장 우수하게 나타나고 있는데 (RMSE=3,879) 그 표본수는 표본간격이 5m인 경우에 비해 약 1/7 감소한 것이다. 계곡 표본에서는 정확도가 표본간격 10m(5,862)에서 가장 우수하지만 20m(6,219)와 30m(6,246)의 정확도 역시 크게 떨어지지 않고 있다. 산지 표본지역은 20m에서 정확도(5,865)가 가장 높고 표본수는 5m에 비해 1/5 정도 감소한 것이다. 체계적추출법의 경우는 대체적으로 표본간격이 30m 혹은 40m를 기준으로 정확도가 감소하는 양상을 보이고 있다.

다음으로 군집형무작위추출법의 실험 결과를 살펴보면 다음과 같다(표 4, 그림 16). 평지 표본에서 군집크기가 30m에서 정확도(3,912)가 가장 높게 나타났고, 계곡 표본에서는 군집크기가 20m에서 그리고 산지 표본에서는 10m에서 RMSE가 5,728과 6,167로 계산되어 정확도가 가장 높았다. 그리고 체계적추출에서의 마찬가지로 군집크기가 확대되면서 표본수가 급격하게 감소하는 반면에 정확도는 매우 완만하게 떨어지는 현상을 확인할 수 있다.

지금까지의 실험 결과는 수치지형도를 이용하여 DEM을 개발하는데 등고선을 구성하고 있는 점(vertex)들을 전부 사용할 필요성이 없다는 가능성을 제시하고 있다. 이것은 RMSE라는 절대치를 기준으로 비교할 경우 앞장에서 전체 모집단 규모를 적용하여 내삽한 여러 결과가 표본의 공간적 밀도가 낮은 30, 40, 50m를 적용한 두 가지 표본추출법에 의한 내삽 결과와 유사하다는 점에서 확인할 수 있다.

한편 표본지역별로 나타난 결과를 분석해 보면, 평지에서는 두 가지 표본추출법의 정확도가 거의 차이가 없게 계산되었고 공통적으로 표본의 밀도가 감소(즉 표본의 공간적 단위거리가 증가)하며

표 3. 체계적 표본추출법을 적용한 DEM의 RMSE

표본 간격	1 미터		5 미터		10 미터		20 미터		30 미터		40 미터		50 미터	
	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE
평지	35,604	4,709	9,667	4,632	4,977	4,492	2,458	4,083	1,496	3,879	1,061	4,276	784	4,311
계곡	105,582	6,445	28,193	6,181	14,362	5,862	6,349	6,219	3,372	6,246	2,093	7,697	1,405	9,580
산지	155,804	6,549	40,580	6,419	20,568	6,079	8,686	5,865	4,215	6,376	2,481	6,948	1,597	7,261

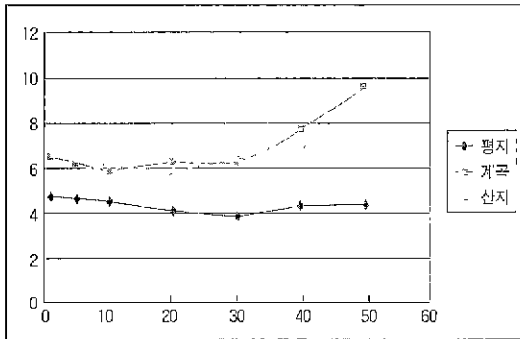


그림 15. 표본지역별 체계적추출 DEM 정확도 변화

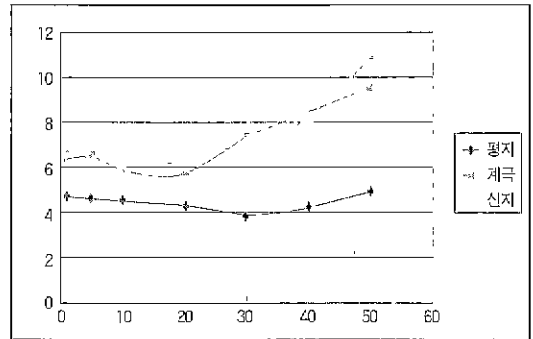


그림 16. 표본지역별 균집형무작위추출 DEM 정확도 변화

표 4. 균집형 무작위 표본추출법을 적용한 DEM의 RMSE

표본 간격	1 미터		5 미터		10 미터		20 미터		30 미터		40 미터		50 미터	
	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE	표본 개수	RM SE
평지	35,604	4,709	9,667	4,609	4,977	4,538	2,458	4,321	1,496	3,912	1,061	4,217	784	4,922
계곡	105,582	6,445	28,193	6,559	14,362	5,885	6,349	5,728	3,372	7,402	2,093	8,436	1,405	9,560
산지	155,804	6,549	40,580	6,414	20,568	6,167	8,686	6,337	4,215	7,162	2,481	8,200	1,597	10,906

라도 뚜렷하게 정확도가 손실되지 않았다. 특히 평지에 체계적추출법을 적용한 사례에서는 균집의 크기가 5m일 때 정확도가 4,632인데 반해 50m일 때 4,311로 정확도는 향상되었고 그 표본의 수는 약 1/13 정도로 감소하였다. 계곡의 경우 체계적 추출법과 균집형 무작위 추출법 모두에서 40m를 기준으로 정확도의 변화가 나타나고 있다. 이 기준에 따라 표본수를 표본간격이나 균집크기가 5m일 때와 비교하면 각각 1/10 내지 1/20 정도 줄어든 것을 확인할 수 있다. 산지의 경우는 전반적으로 체계적 추출법이 균집형 무작위 추출법에 비해 정확도가 약간씩 높은 특성을 보였다. 전반적으로 체계적 표본추출과 균집형 무작위 표본추출을 비교한 결과 공간상에 균등한 분포 패턴을 갖는 체계적 표본추출을 적용하여 내삽을 실시하

는 방법이 DEM의 정확도란 측면에서 다소 우수하다고 평가할 수 있다.

마지막으로 지표기복의 변화를 충실하게 반영하기 위해 제안한 '복합 점진적 표본추출법'을 적용한 DEM의 경우는 그 정확도가 다른 두 가지 추출법뿐만 아니라 원래의 등고선 자료보다 오히려 정확한 결과를 보이고 있다. 우선 표본추출방법들 사이의 정확도를 비교하면 다음과 같다 (표 5).

표 5. 복합 점진적 표본추출법을 적용한 DEM의 정확도

표본 지역 구분	RMSE	표본 개수
평지	3,579	1,866
계곡	5,978	10,847
산지	6,027	17,834

평지 표본지역의 경우 복합 점진적 추출법에 의한 DEM의 RMSE가 3,579(표본수 1,866개)로 30m 지역 크기의 유사한 표본수를 갖는 체계적 추출법과 균집형 무작위 추출법에 의한 정확도(3,879와 3,912) 보다 우수하게 나타나고 있다. 산지 표본지역 역시 복합 점진적 추출법에 의한 정확도(6,027, 표본수 17,834개)가 표본지역크기 10m를 갖는 표본수 20,568개의 체계적 추출법과 균집형 무작위 추출법의 정확도(6,079와 6,167)보다 표본수가 3,000 여개 부족하지만 오히려 높게 나타났다. 다만, 계곡 표본지역에서 복합 점진적 추출법에 의한 정확도(5,978, 표본수 10,847)가 체계적 추출법과 균집형 무작위 추출법이 나타내고 있는 정확도인 5,862와 5,885 보다 근소하게 낮게 나타났다. 그러나 표본수가 3,500개 정도 차이가 발생한다는 것을 감안하고 RMSE를 구하기 위한 기준값 개수가 9개로 상대적으로 빈약하다는 측면을 고려한다면 정확도의 차이를 유의성있게 받아 들일 필요는 없다고 판단된다.

다음으로 이러한 복합 점진적 추출법에 의해 생성된 DEM은 원래의 등고선 자료를 대상으로 한 DEM과 비교하여도 정확도 측면에서 상당히 우수하게 나타났다(표 6).

즉 평지와 계곡에서는 복합점진적추출에 의한 DEM의 정확도(평지: 3,579, 계곡: 5,978)가 원래 등고선을 이용하여 4개 내삽법을 적용한 가운데 가장 우수하게 나타났던 정확도(3,617과 6,077) 보다 약간 높게 나타났다. 또한 산지의 경우에는 근소한 차이로 정확도가 낮게 계산되었지만, 그 차이가 유의한 수준이라 볼 수 없을 정도로 미미하기 때문에 정확도 측면에서 거의 유사한 결과라고 판단하여도 무리가 없다. 따라서 복합점진적추출에 의한 DEM의 정확도가 그 만큼 높다고 결론 지을 수 있다. 다만 이 방법은 다른 추출방법에 비해 표본추출에 필요한 분산도의 측정과 이를 기준으로 반복(iteration) 계산이 필요하기 때문에

표 6. 복합점진적추출 DEM과 원등고선 DEM의 RMSE 비교

표본지역	복합 점진적 추출	원래 등고선 이용
평 지	3,579	3,617(TIN)
계 곡	5,978	6,077(크리깅)
산 지	6,027	6,009(크리깅)

상대적으로 복잡한 측면이 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 DEM 개발과정에서 핵심적 요소로 평가되는 내삽법을 평가하기 위해 대표적인 4개의 방법을 대상으로 DEM을 개발하여 이를 정확도를 기준으로 비교 분석하였다. 모든 DEM을 개발하는데는 지역의 특성을 고려하고자 표본지역을 평지, 계곡, 산지로 분류하여 적용하였다. 그리고 표본추출에 의한 DEM 개발의 가능성을 확인하기 위해 3가지 표본추출방법을 제시하여 이를 기준으로 각각 공간적 거리를 기준으로 6개씩 DEM을 개발하였다. 따라서 내삽법을 평가하기 위해 12개 그리고 표본추출에 의한 방법을 평가하는데 39개, 총 51개의 DEM을 개발하였다.

한편 본 연구가 우리 나라 수치지형도의 등고선 자료를 대상으로 하고 있지만 실제 고도값 자료의 유형이 점(vertex) 형태로 분포하는 경우에는 모두 적용할 수 있다. 본 연구를 통해 밝혀낸 연구결과와 시사점을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

첫째, 지형의 기록을 달리하여 구분한 표본지역에 대한 4가지 DEM 생성 내삽법의 정확도를 비교한 결과 크리깅 내삽법을 제외한 나머지 내삽법들은 표본지역들 사이에서 RMSE의 차이가 상대적으로 크게 나타나는 특징을 보였다. 이를 통해 크리깅 내삽법을 지형기록의 변화에 상관없이 정확도를 유지하면서 안정적으로 DEM을 생성할 수 있는 방법으로 평가할 수 있다.

둘째, DEM 개발에 내삽법을 적용할 때 공간적 표본 밀도를 달리한 실험을 통해서 내삽에 동원되는 원자료의 규모에 관한 흥미로운 사실을 발견하였다. 즉 과도한 밀도를 갖는 표본을 적용한 내삽보다 어느 한계영역 내에서는 오히려 공간적 표본 밀도를 낮게 적용할 때 DEM의 정확도가 높게 나타났다. 또한 본 연구에서 실험한 공간적 표본 거리, 즉 5m에서 50m까지의 표본자료에서는 한계영역을 벗어난 경우에도 지나치게 정확도가 떨어지는 현상은 전반적으로 발견할 수 없었다. 이러한 실험적 연구는 DEM의 개발을 위한 내삽과정에서

표본의 크기를 원자료 전체보다는 추출된 표본으로 이용하는 방안이 정확도와 계산상의 효율성 측면에서 효과적일 가능성을 시사하고 있다.

셋째, 공간적 표본추출에 의한 내삽의 정확성을 비교한 결과 지표기복의 변화를 충실히 반영하는 '복합 점진적 표본추출법'이 계산의 단계가 복잡하지만 가장 우수한 결과를 나타냈다. 그러나 이 방법은 점진적 단계(progressive steps)를 어느 기준에 따라 설정하여야 하는가에 대한 지표를 찾아 내기가 쉽지 않다.

한편, 본 연구의 한계와 함께 향후 보완되어야 할 항목을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 지형적 기복을 요소로 구분한 표본지역을 선정할 때 좀 더 객관적 지표를 찾아야 하며 더 많은 표본지역을 선정하여 결과를 비교 검토할 필요가 있다. 둘째, 수치지도의 축척에 따라 등고선의 간격이 다르기 때문에 이에 대한 영향을 조사하여야 한다. 셋째, DEM의 정확도를 측정하는데 사용되는 참조값의 공간적 분포패턴이 정확도를 평가하는데 어떤 상관관계가 있는가를 알아 볼 필요가 있다.

註

- 1) 미국의 USGS는 『DEM 작성 표준』(USGS, 1998)을 통해 향후 개발될 DEM의 자료원으로 미국의 표준 수치지형도인 DLG(Digital Line Graph)만을 사용할 것이라고 밝히고 있다. 영국의 Ordnance Survey에서 구축하고 있는 DTM 역시 수치지도나 종이지도의 등고선을 활용하여 DEM을 작성하고 있다(<http://www.ordsvy.gov.uk>).
- 2) 수치지형도를 개발할 때 발생하는 기본적으로 내게된 오차(errors)는 본 연구의 논의에서 제외하였다. 그것은 DEM을 개발하기 위해 살펴본 여러 요인들(4개 내삽법, 3개의 지형 유형, 3개 표본추출방법)과 관계없이 공통적으로 존재하기 때문이다.
- 3) 내삽법을 크게 '적합함수점근법(fitted function interpolation)'과 '가중평균법(weighted average interpolation)'으로 분류할 때 두 가지 접근 방법으로 얻어진 자료면(representative surface)을 Crain(1970)은 '수학적 자료면'과 '수치적 자료면'으로 분류하였고, Alfeld와 Barnhill(1984)은 두

방법을 알고리즘 특성에 따라 각각 '패치 방법(patch methods)'과 '점 방법(point methods)'으로 구분하였다.

- 4) Surfer Ver 5.0 프로그램은 Golden Software社가 개발한 3차원의 공간자료분석을 위한 전문 윈도우 전용 소프트웨어이다. 한편 내삽 지점의 값을 추정하는데 사용한 계산식은 다음과 같다.

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

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

- 5) 크리깅 내삽법을 적용하기 위한 계산식은 아래와 같고, 보간 자료의 균등분포를 가정하여 변화경향(drift)을 설정하지 않았고 1/25,000 한 도엽의 넓은 지역을 대상으로 하고 있기 때문에 일정 방향의 경향을 고려할 수 없다는 판단 아래 비등방성(anisotropy)을 설정하지 않았다.

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

x_j : 실측지점, x_i : 추정지점, λ_i : 지점간의 가중치 ($\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$)

- 6) TIN 내삽법을 적용할 때 본 연구에서는 델로니 삼각형이 표현하는 지형면을 선형(linear)으로 가정하였고 구체적 계산식은 다음과 같다.

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^3 (w_i \times Z_j)$$

w_i : i 지점의 가중치, Z_j : 추정지점 j 지점의 고도

- 7) ArcView는 미국 ESRI가 개발한 데스크탑용 GIS 소프트웨어이다. 공간분석모듈(Spatial Analysis Extentions)은 격자형 데이터를 이용하여 지표면 분석(Surface Analysis), 공간범위분석(Context Analysis), 지도대수(Map Algebra) 등과 같은 기본적인 GIS 공간분석기능이 ArcView 환경에서 이루어지도록 고안된 확장모듈(Extention Modules)이다.

文 獻

- 이석찬·조규전, 1982, "수치지형모형에 관한 연

- 구,” 대한토목학회논문집, 2(1), 93-104.
- 이석찬 · 조규전 · 이창경 · 최병길, 1990, “비정규삼각망 데이터구조에 의한 수치지형모델의 구성,” 한국측지학회지, 8(2), 1-8.
- 유근배, 1990, 地理情報論, 상조사, 서울.
- 이희연, 1989, 地理統計學: 地理資料分析技法, 165-173.
- 최병길, 1996, “수치표고모델의 임계점 추적에 관한 연구,” 한국측지학회지, 14(1), 111-118.
- 조규전 · 조영호 · 정의환, 1998, “정규격자 수치고도모델의 생성과 정확도 분석에 관한 연구,” 한국측지학회지, 16(1), 119-132.
- Anselin, L. and Bao, S., 1997, Exploratory spatial data analysis linking SpaceStat and ArcView, in Fisher, M. M. and Getis, A. (eds.), *Recent Developments in Spatial Analysis*, Springer-Verlag, Berlin, 35-59.
- Band, L. E., 1986, Topographic partition of watersheds with digital elevation models, *Water Resources Research*, 22(1), 15-24.
- Bolstad, P. V. and Stowe, T., 1994, An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope, and aspect, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(11), 1327-1332.
- Burrough, P.A., 1986, *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon, Oxford.
- Carter, J., 1988, Digital representations of topographic surfaces, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1577-1580.
- ESRI, 1998, *Arc/Info 7.12 Reference Manual (CD-ROM Version)*, ESRI.
- Federal Geographic Data Committee, 1998, *Geospatial Positioning Accuracy Standards: Part3: National Standard for Spatial Data Accuracy*, Subcommittee for Base Cartographic Data.
- Fisher, P. F., 1993, Algorithm and implementation Uncertainty in viewshed analysis, *International Journal of Geographical Information Systems*, 7(4), 331-347.
- Gao, J., 1995, Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps, *ITC Journal*, 1995-1, 18-22.
- Getis, A. and Ord, J.K., 1996, Local spatial statistics: an overview, in Longley, P. and Batty, M. (eds.), *Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment*, GeoInformation International, Cambridge, 261-278.
- Golden Software, 1995, *Reference Manual: Sufer 5*, Golden Software Inc.
- João, E. M., 1998, *Causes and Consequences of Map Generalisation*, Taylor & Francis, Bristol.
- Lee, J., Snyder, P.K. and Fisher, P.F., 1992, Modeling the effect of data errors on feature extraction from digital elevation models, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(10), 1461-1467.
- Makarovic, B., 1973, Progressive sampling for DTMs, *ITC Journal*, 3, 397-416.
- , 1977, Composite sampling for digital terrain models, *ITC Journal*, 3, 406-433.
- , 1984, Automatic production of DTM data using digital pff-line technique, *ITC Journal*, 12, 135-141.
- Maling, D. H., 1989, *Measurements from Maps: Principles and Methods of Cartometry*, Pergamon Press, Oxford.
- Mark, D. M., 1984, Automatic detection of drainage networks from digital elevation models, *Cartographica*, 21, 168-178.
- McGrew, J.C. and Monroe, C.B., 1993, *An Introduction to Statistical Problem Solving in Geography*, WCB, Dubuque, 101-110.
- U.S. Geological Survey, 1998, *Standards for Digital Elevation Models: National Mapping Program Technical Instruction*, Reston, VA.
- Watson, D. F., 1992, *Contouring: A Guide To The Analysis and Display of Spatial Data*, Pergamon Press, Oxford, 101-161.
- Weibel, R. and Heller, M., 1991, Digital terrain modelling, in Maguire, D. J., Goodchild,

- M.F., and Rhind, D.W. (eds.), *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, 269-297, Longman, London.
- Wood, J. D., 1998, Modelling the continuity of surface form using digital elevation models, *Proceedings 8th International Symposium on Spatial Data Handling*, 725-736.
- Wood, J. D. and Fisher, P. F., 1993, Assessing interpolation accuracy in elevation models, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13(2), 48-56.