

프랙탈 기법을 이용한 3차원 지형의 다중 추상화

박미정 · 이정재*

서울대학교 대학원 · *서울대학교 농공학과

A Fractal Based Approach for Multi Level Abstraction of Three Dimensional Terrain

Park, Meejeong · Lee, Jeong-Jae*

College of Agricultural and Life Science, Seoul National University

*Department of Agricultural Engineering, Seoul National University

ABSTRACT : Preservation of geometrical context of terrains in a digitized format is useful in handling and making modification to the data. Digitization of three-dimensional terrain still proves a great challenge due to heavy load of context required to retain details of topological and geometrical information. Methods of simplification, restoration and multi-level terrain generation are often employed to transform the original data into a compressed digital format. However, reduction of the stored data size comes at an expense of loss of details in the original data set. This article reports on an alternative scheme for simplification and restoration of terrain data. The algorithm utilizes the fact that the terrain formation and patterns can be predicted and modeled through the fractal algorithm. This method was used to generate multi-level terrain model based on NGIS digital maps with preserving geometrical context of terrains.

Key words : Fractal terrain, Map simplification, Multi-level abstraction

1. 서론

GIS 사용자는 사용목적에 따라 같은 지형자료라도 서로 다른 축척의 자료를 원하거나 지형자료의 상세도를 결정하여 효과적으로 자료를 가시화하길 원한다. 축척이 고정되어 있는 종이지도와 달리 수치지도는 고정된 축척을 가지고 있긴 하지만 일반화 과정이 자동화되면서 여러 가지 축척의 자료로 변환이 가능하다. 이와 같이 하나의 대축척 자료로부터 여러 가지 축척의 수치지형도를 생성할 목적으로 특정한 축척에서 사상의 중요한 패턴은 유지하되 필요 이상으로 상세한 사상은 단순화하거나 제거함으로써 정보량을 줄이거나 효과적으로 시각화하는 과정을 일반화라 한다.

일반화 알고리즘은 점사상과 선형사상의 일반화로 구분될 수 있으며 대개 점사상은 삭제되거나 면사상으로 통합되기도 하고 선형 사상은 단순화된다(유근배, 1998). 이처럼 일반화 알고리즘은 개개의 사상이 지니

는 의미 보다는 그래픽의 단순화에 집중되어 있어 디지털 환경 하에서 일반화된 지도는 수작업을 통해 제작된 지도와 상당부분 시각적인 표현의 차이 및 위상 구조의 상실 등의 문제점을 내포하게 된다(김감래와 이호남, 1994).

지형자료에서의 점사상과 선형사상의 패턴은 지형의 불규칙적인 기복을 만들어 낸다. 1970년대 중반 Mandelbrot는 아주 불규칙하게 보이는 자연현상 내에서도 그 속의 어떤 법칙과 규칙성이 있다는 프랙탈 이론을 주창하였다. 구름, 산, 나무, 해안선, 지형 등이 대표적인 예이다. 따라서 지형의 기복, 복잡성을 프랙탈 차원으로 정의하고 프랙탈 이론을 도입해 지형의 일반화 과정을 수행한다면 정보량을 줄이더라도 지형의 특성을 유지할 수 있게 된다.

본 연구에서는 프랙탈 이론에 근거해 3차원 지형의 일반화 기법을 제안하는 것을 궁극적인 목적으로 한다. 이를 위해서 벡터 기반 지형 모형의 3차원적 기복을 규정할 수 있는 프랙탈 차원을 측정하는 방법과 지형의 패턴을 유지할 수 있는 중요한 점을 추출하기 위한 방법을 제안하고자 한다. 또한 연속분할 알고리즘(Recur-

Corresponding author : Park, Meejeong

Tel : 02-880-4592

E-mail : pmj77@snu.ac.kr

sive Subdivision Algorithm)을 이용하여 지형의 상세도를 낮춰 단순화하거나 높은 상세도를 지닌 지형을 생성하는 기법을 개발하고 실제 지형에 적용해 봄으로써 타당성을 검증해 보고자 한다.

II. 프랙탈 이론

1. 프랙탈 차원 계산

프랙탈 차원은 유클리드 차원과 달리 기하학적 불규칙성을 규정하는 방법으로 임의의 형상을 $1/r$ 로 분할하여 생기는 부분의 총 개수를 $N(r)$ 이라고 할 때 r 을 점점 키워가면서 $N(r)$ 을 측정하게 되면 형상의 아주 미세한 부분까지 측정하게 됨으로써 r 의 증가 비율보다 $N(r)$ 이 증가하는 비율이 더 커지게 된다. 다시 말해 불규칙한 형상을 가질수록 증가비율이 커지게 되는데 이를 프랙탈 차원이라 한다.

프랙탈 차원을 구하는 여러 방법들은 대개 1, 2차원의 기하학적 불규칙성을 규정하기 방법이며 지형의 3차원적인 기복을 규정하는 방법으로는 Isarithm 방법(Lee 등, 2001), Variogram 방법(Nina siu-ngan lam과 lee de cola, 1993), 삼각기둥 표면적 방법(Clarke, 1986)이 대표적이다. 그 중에서도 삼각기둥 표면적 방법은 계산량이 적고 간단하여 널리 이용되고 있다. 이는 한 셀에서 4개의 포인트를 이용해 차원을 구하기 때문에 래스터 기반 격자형 수치고도 모형의 프랙탈 차원을 구하는 데는 적합하지만 벡터 기반의 불규칙 삼각망으로 구성된 지형에 그대로 이용할 수 없을 뿐만 아니라 사각 격자를 사용하기 때문에 보간에 의한 오차를 피할 수 없는 단점이 있다.

2. 프랙탈 지형 모델화 기법

이미지 압축방법 중에서 지형에 적합한 방법은 프랙탈이라는 자기 유사성을 전제로 한 압축방법이 있다. 이는 모 이미지를 추출하고 이를 반복 재생함으로써 원래의 이미지를 복원하는 기법이다. 따라서 지형정보의 가장 기본이 되는 지형의 경우 자기 유사성을 가지고 있으므로 확실적인 프랙탈모형을 적용하여 생성할 수 있음은 이미 알려져 있다.

프랙탈 지형(fractal terrain model)을 생성하는 방법은 Poisson faulting(Musgrave 등, 1989), Fourier filtering(Mandelbrot, 1982, Mastin 등, 1987), Midpoint displacement(노용덕, 1995, 1996, 1997), Successive random additions(Musgrave 등, 1989), Summing band-limited noises(Miller, 1986)로 구분된다. Poisson faulting 방법은 알고리즘의

복잡성($O(n^3)$)으로 인해 구현이 어려운 단점이 있는데 비해, 중간점 이동(Midpoint displacement)방법은 알고리즘이 쉽고 빠르면서(Musgrave 등, 1989) 자연 현상에 가까운 프랙탈 지형(fractal surface)을 만들어 내는 장점이 있어 널리 이용되는 방법이다.

그러나 이는 지형의 표고를 무작위로 생성하기 때문에 실제의 지형을 모사하기에는 부족하여 고정점을 강제로 추가하고 그 이후에 랜덤 모델링 하는 고정점 허용 중간점 이동 방법(Fixed-midpoint displacement method)(노용덕, 1995, 1996, 1997)이 제안되었다. 이는 프랙탈 상수와 고정점에 의해 모의 결과가 달라진다. 다시 말해 실제 지형의 프랙탈 상수와 실제 지형에서 중요한 고정점을 결정하는 것이 지형모델링에 중요한 변수라고 할 수 있다.

III. 지형의 프랙탈 차원

1. 불규칙삼각망을 이용한 프랙탈 차원 측정 알고리즘

지형의 3차원적인 불규칙성을 측정하기 위한 방법으로는 walking dividers 방법(김용일 등, 2000)의 삼차원화된 삼각기둥 표면적 계산법(Triangle Prism Surface Area Method)이 있다. 이는 먼저 영상의 화소값을 높이화한 사각형의 끝점을 평균하여 구한 중심값과 각 끝점으로 이루어지는 네 개의 삼각형의 넓이를 더한다. 여기에서 4개의 화소값들의 분포형태에 따라 표면 넓이의 합이 정해지는데, 화소간의 격차가 적으면 적을수록 그 넓이의 합이 적다고 할 수 있다. 이 계산은 사각형의 크기를 다르게 하면서 반복하게 된다(Jaggi 등, 1993). 이는 측정자를 줄이면서 표면적이 증가하는 정도를 이용해 형상의 불규칙성을 규정한다고 할 수 있다.

앞에서 설명한 바와 같이 삼각기둥 표면적 방법은 측정자의 크기에 따른 형상의 표면적 변화로 형상의 불규칙성을 측정하여 3차원 형상의 프랙탈 차원을 구하는 방법이다. 다시 말해 3차원 형상이 임의의 지형이라면 지형의 불규칙성을 지형의 표면적으로 설명할 수 있음을 내포하고 있다. 따라서 이러한 기본 개념을 도입하여 불규칙 삼각망(Triangle irregular network(TIN))으로 구현된 지형의 프랙탈 차원을 구하는 방법을 제안하고자 불규칙 삼각망을 생성할 때의 해상도(resolution)와 생성된 지형의 표면적으로 프랙탈 차원들 구하는 알고리즘을 도출하였다. 지형의 표면적은 각 삼각형 요소 표면적의 합이므로 측정자의 크기에 의한 삼각형 요소의 평균면적과 삼각형 요소의 개수를 곱한 식으로

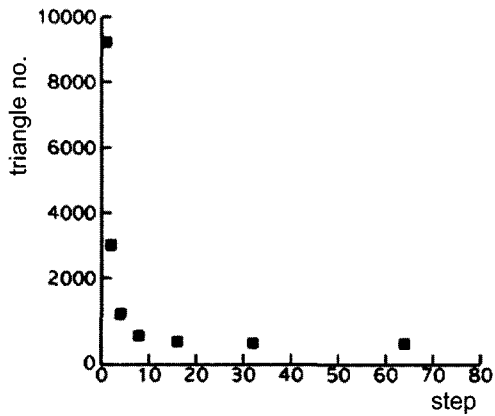


그림 1. Relation between step-size and the number of triangles

표현할 수 있다. 측정자의 크기(Step-size)에 따른 삼각형 요소의 개수의 관계를 구하기 위해 그림 1과 같이 도시해 본 결과 식 (2)와 같은 관계식을 설정할 수 있다. 따라서 식 (1)에 식 (2)를 대입하여 식 (3)을 얻었으며 이를 다시 선형 변환하면 식 (4)와 같이 삼각기둥 표면적 방법과 매우 유사한 식을 얻을 수 있다. 따라서 식 (6)으로 프랙탈 차원을 구할 수 있게 된다.

$$T_a = A \times S^2 \times T_n \quad (1)$$

$$T_n = B \times S^D \quad (2)$$

$$T_a = C \times S^2 \times S^D \quad (3)$$

$$\log T_a = \log C + (2-D) \times \log(S) \quad (4)$$

$$H = 2 - D \quad (5)$$

$$D = 2 - H \quad (6)$$

여기서, T_a : 표면적, T_n : 삼각형의 개수,
A, B, C : 비례상수

S : 측정자의 크기(resolution),
 H : 스케일 지수, D : 프랙탈 차원

2. 알고리즘의 적용 및 검증

본 연구에서 제안한 알고리즘으로 실제 지형의 프랙탈 차원을 구하기 위해 그림 2처럼 1:5000 축척의 NGIS 36707005 도엽의 지형레이어를 추출하여 25m 해상도로 불규칙 삼각망을 생성한 결과 그림 2의 표면적 1.74E+07의 첫번째 지형을 얻을 수 있다. 첫 번째 지형의 해상도를 50m로 낮춰 불규칙삼각망을 생성하고 표면적을 계산한 결과 1.63E+07의 표면적을 구할 수 있었다. 이러한 과정을 반복하여 얻은 각 수준별 표면적과 형상은 표 1, 그림2(a)에서 볼 수 있다. 또한 각 단계별 지형의 고도 분포를 도시한 결과 그림2(b)와 같이 유사한 패턴이 관찰되었다. 불규칙 삼각망의 해상도를 낮추더라도 다시말해 해상도를 낮추기며 지형 모형을 생성한 결과 대상 지역이 자기 유사성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 표 1은 상세도 수준별(해상도별) 표면적을 구한 결과이며 삼각기둥 표면적 계산법과 마찬가지로 상세수준(level)-표면적(log(surface area))의 관계로 그래프<그림 3>를 얻었다. 여기서 R^2 가 0.9973으로 -0.0213 스케일 지수를 통해 결론적으로 2.0213의 프랙탈 차원을 구했다.

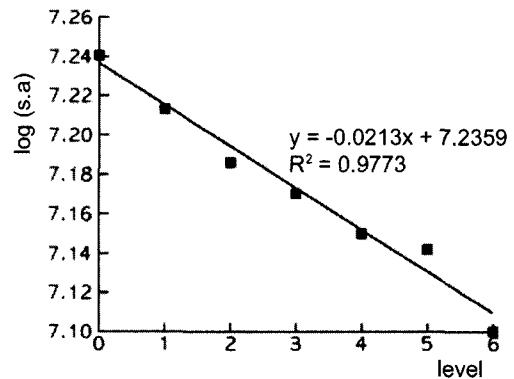


그림 3. The fractal dimension of the base map 36707005

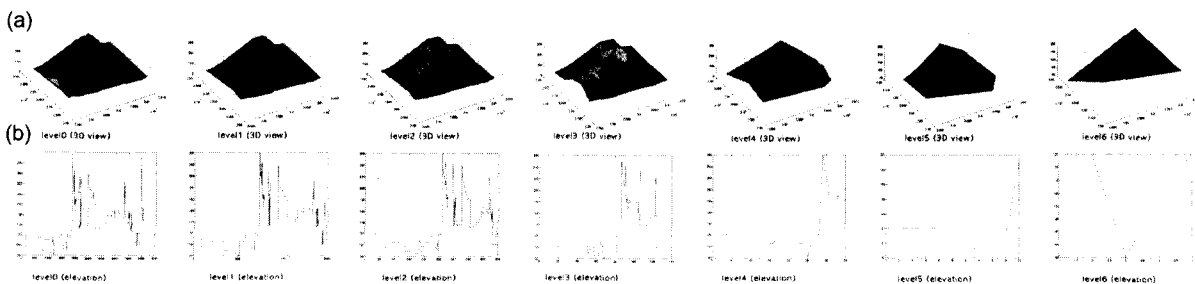


그림 2. TIN according to resolution, (a) upper : 3D view, (b) bottom : elevation

표 1. Surface area according to resolution

level	step	resolution	surface area	log(surface area)
0	1	25	1.74E+07	7.24052284
1	2	50	1.63E+07	7.21322175
2	4	200	1.54E+07	7.18613390
3	8	400	1.48E+07	7.17016766
4	16	800	1.42E+07	7.15092281
5	32	1600	1.39E+07	7.14215469
6	64	3200	1.26E+07	7.10070655

위와 같은 방법으로 제안된 프랙탈 차원 측정 방법이 삼각기둥 표면적 방법으로 구한 프랙탈 차원과 지형의 기복에 따라 비슷한 양상을 보이는지를 검증하고자 각기 다른 특성의 4개의 도엽을 선정하여 두가지 방법으로 프랙탈 차원을 측정해 보았다. 그림 4는 4가지 도엽의 25m 해상도로 구성된 지형이며 그림 5는 측정된 프랙탈 차원을 비교한 것이다. 그 결과 두 개의 방법이 지형의 기복에 따라 비슷한 증가·감소 추세를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법이 불규칙 삼각망으로 구성된 3차원 지형의 프랙탈 차원을 구하기에 타당하다고 판단된다.

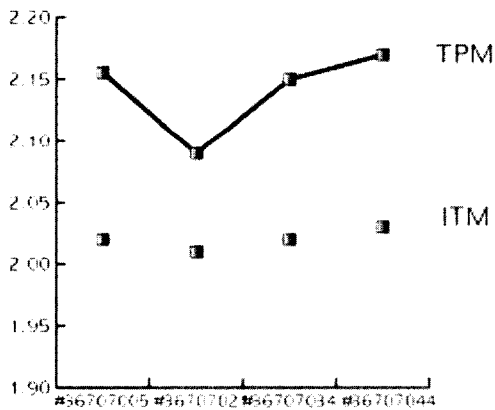


그림 5. The fractal dimension using triangular prism surface area method and irregular triangle method

IV. 프랙탈 지형의 다중 수준 추상화

1. 프랙탈 지형의 단순화

지형의 프랙탈 차원 스케일 지수가 결정된다면 이를 이용해 지형을 모델링할 수 있다. 노용덕(1995)의 연구는 지형은 스케일 지수와 중요한 일부분의 공간자료로 압축할 수 있음을 시사한다. 여기서 스케일 지수는 앞 절의 방법으로 구할 수 있으므로 지형모델링을 위한 고정점, 즉 지형의 형상을 모의하기 위해서는 패턴을 유지할 수 있는 최소한의 점을 결정하는 방안이 제시되어야 한다.

프랙탈 차원을 구하기 위해 해상도(resolution)를 달리 하면서 불규칙삼각망으로 지형 모델을 구축하는 과정에서 단계별 고도점들이 결정되었기 때문에 각 단계에서 추출된 고도점이 지형을 설명하는 점들이라고 할 수 있다. 즉 표 2에서 볼 수 있듯이 원 지형의 4540개의 고도점을 상세도를 낮춤으로 인해 1472, 447, 128, 35, 11, 5로 데이터가 압축된다. 그러나 압축된 데이터가 원 지형의 패턴을 설명하기에 충분한지 여부를 결정하여 적정 수준의 상세도 수준을 선택하여야 한다. 원 지형과 단순화된 지형의 분포 유사성을 확인해 상세도 수준을 결정하기 위해 두 분포의 t-검정을 수행했다. 그 결과 5% 유의수준에서 3단계 즉 0.125의 상세도

표 2. Data amount according to level of detail and accuracy of the simplified terrain

level	level of detail	total points	Pr > t
0	1/1	4540	
1	1/2	1472	0.528
2	1/4	447	0.371
3	1/8	128	0.066
4	1/16	35	<.001
5	1/32	11	<.001
6	1/64	5	<.001

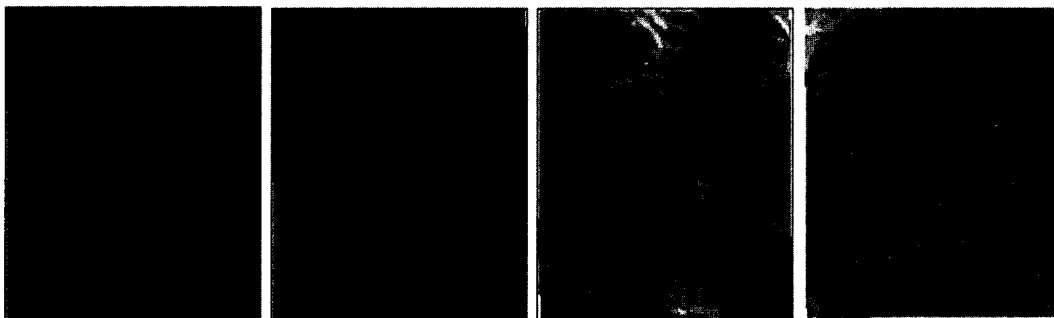


그림 4. TINs of 1:25000 base map (a) 36707005, (b) 36707021, (c) 36707034, (d) 36707035

를 지닌 수준까지의 단순화는 원 지형과 유사하다는 결론을 얻었다.

따라서 예제의 지형은 상세수준(level of detail)이 1/8 이 되어도 128개(2.8%)의 데이터를 가지고 원 지형을 묘사하고 있다고 할 수 있다. 그러므로 대상 지역은 3 단계의 단순화 과정을 거쳐 단계별로 지형을 단순화시킬 수 있게 된다. 따라서 지형의 프랙탈 특성을 지키면서 원하는 상세 수준에 따라 상세도를 단계별로 낮추면서 지형을 단순화하는 것이 가능하다.

2. 프랙탈 지형의 복원

지형이 자기 유사성이 있음이 밝혀지고 프랙탈 차원 측정 기법 개발됨으로 인해 자연세계의 지형과 유사한 지형을 생성하기 위한 연구가 수행되었다. 그 중 대표적인 Fournier가 제안한 방법론에 의하면 실제 지형의 모든 데이터를 필요로 하지 않기 때문에 매우 빠르고 구현이 손쉬운 장점이 있는 반면, 가우스 난수를 이용하기 때문에 구현된 지형이 대칭적이어서 실제 지형과 유사하지 않게 된다.

이를 보완하기 위해 중간점을 생성하는 과정에서 모의 과정 중 수정된 가우스 난수 분포를 이용하거나(Barnsly 등, 1988) 가우스 난수를 사용하지 않고 지형을 모델링하여 랜덤효과를 개선하려는 연구들이 진행되었다. 이외에도 지형을 생성할 때 단위 도형을 사각형이 아닌 삼각형, 육각형으로 함으로써 유사성을 높이려는 연구가 수행되기도 했다(Barnsly 등, 1988).

그러나 위의 연구들에서도 랜덤효과에 의해 반복횟수가 늘어날수록 원지형에서 예측할 수 없는 지형으로 변하게 된다. 이러한 이유로 중간점을 생성할 때 일반적으로는 랜덤하게 만들지만 대상 물체의 특성을 반영하는 점을 강제로 위치하게 제어함으로써 원하는 물체와 유사한 물체를 만들어내는 방법론이 노용덕(1996)의 연구에 의해 제안되었다.

앞 절에서 강제점을 결정할 수 있는 방법을 제안하여 사용자의 판단으로 강제점을 결정하던 방법을 보완

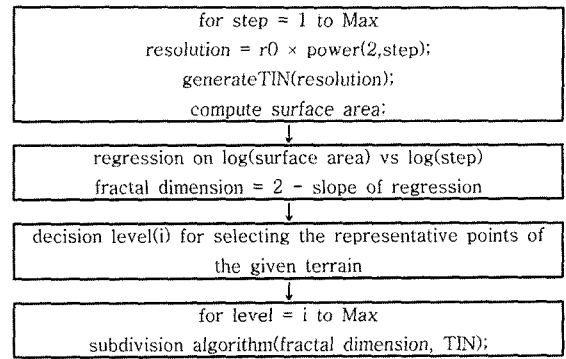


그림 6. Fractal terrain simulation algorithm

하였다. 따라서 이 절에서는 최소한의 고정점과 프랙탈 차원을 이용해 연속분할 알고리즘을 통해 지형을 모의하는 기법을 제안하였다. 그림 6과 같이 첫 번째 단계에서는 대상 지역이 주어지면 불규칙삼각망으로 지형 모형을 생성하여 표면적을 구한다. 그리고 두 번째로 표면적과 해상도와의 관계를 통해 프랙탈 차원을 구한 다음 원 지형과 프랙탈 차원 측정 과정에서 도출된 단순화된 지형의 분석을 통해 최소한의 고정점을 가지는 상세수준을 결정한다. 마지막 단계에서는 앞 단계에서 결정된 수준(i)의 지형 모형과 두 번째 단계에서 결정된 프랙탈 차원으로 연속분할 알고리즘에 적용해 실제와 유사한 프랙탈 지형을 모의하게 된다.

그림 6의 알고리즘을 이용하여 앞 절에서 프랙탈 차원 측정과 단순화 과정을 거쳐 얻어낸 지형을 가지고 보다 더 상세한 지형을 묘사해보았다. 그 결과 그림 2의 첫 번째 원지형을 단순화한 그림 2의 level 3 지형을 한 번 분할한 결과 3032개의 꼭지점으로 구성된 그림 7의 첫 번째 지형을 얻었다. 그림 7의 나머지 지형은 이와 마찬가지로 연속분할을 계속적으로 시행한 것이며 원래 1:5000 지형과의 유사성을 판단하기 위해 t-test를 시행해 본 결과 표 3에서 보이는 바와 같이 5%의 유의수준에서는 유효한 것으로 나타난다. 그러나 여기에서 두 개의 지형이 모두 유의하게는 나타나지만 원래 지형이 4540개의 점으로 구성되었기 때문에 데이

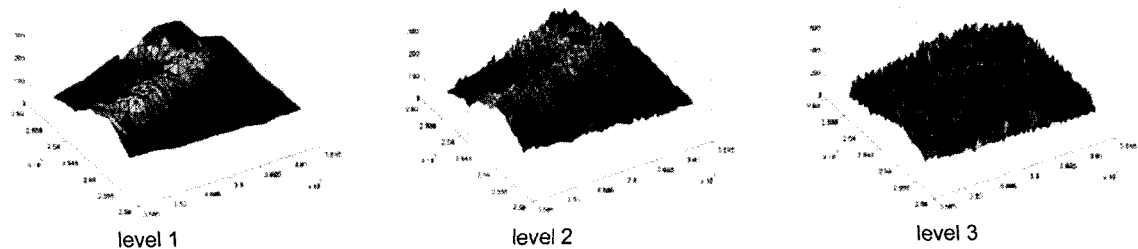


그림 7. Fractal terrain restoration process according to LOD

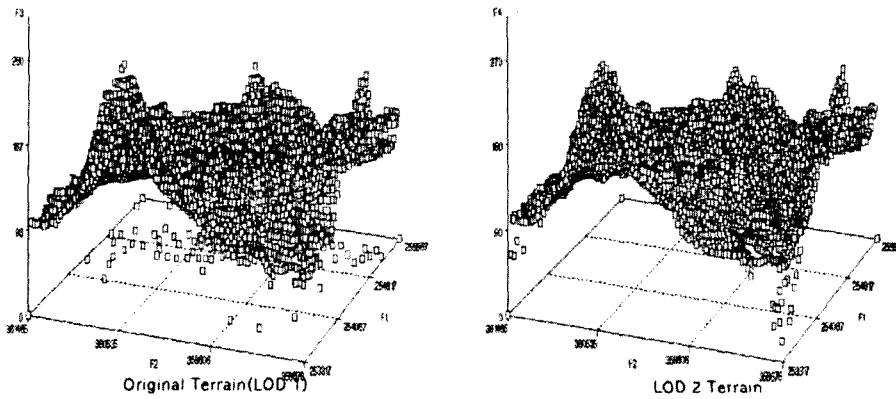


그림 8. terrain of 36707005 and simulated terrain

표 3. T-test results of the terrains through the restoration process

level	level of detail	total points	Pr > t
1	2	3032	0.066
2	4	14648	0.066
3	8	6112	0.066

표 4. T-test results of the simulated terrains using fractal terrain simulation algorithm

level	level of detail	total points	t-statistic	Pr > t	scale
0	1	7536			1 : 25000
1	2	10668	-1.498	0.1342	1 : 5000
2	4	421537	-1.498	0.1342	
3	8	676529	-1.498	0.1342	

터양을 고려한다면 3032개의 데이터로 지형을 모의하는 것이 보다 효율적이다.

V. 결론

1970년대 Mandelbrot에 의해 제안된 프랙탈 이론을 도입하여 간단한 수식에 의해 이미지를 압축하거나 재생하는 노력이 컴퓨터 그래픽스 분야에서 연구·활용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 프랙탈 이론을 도입하여 지형의 단순화, 정교한 지형의 생성 즉 지형의 상세도를 제어하는 기법을 제안하였다.

이를 위해서 우선 삼각기둥 표면적법(Triangular Prism Method)을 수정하여 불규칙 삼각망으로 구성되어 있는 3차원 지형의 프랙탈 차원을 계산하는 방법을 제안하였고 이 과정에서 지형을 단순화 하는 알고리즘을 도출하였다. 또한 삼각형을 기본으로 지형의 기록을 고려하여 중간점을 삽입하여 실제 지형을 모의하고자 연속 분할 알고리즘을 도입하여 프랙탈 지형을 생성하는 기

법을 개발함으로써 단순화된 지형과 지형의 프랙탈 차원으로 상세도를 조절하면서 실제와 유사한 지형을 생성할 수 있었다.

이를 실제 지형에 적용해 봄으로써 제안된 기법들의 타당성을 입증하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법을 이용하여 WebGIS분야에서 지형을 재생하기 위한 데이터양의 제어를 통해 재생 시간을 단축할 수 있을 것으로 기대하며 더 나아가 지형의 압축 재생을 통해 데이터의 전송 속도 제어 등에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

본고는 농림기술센터에서 시행한 ‘농업시설의 계획 설계를 위한 CAD와 GIS 자료구조 통합 시스템 개발(2003103-03-2)’ 결과의 일부임

참고문헌

1. 김감래, 이호남, 1994, 선형성 지형자료의 일반화에 대한 효율적인 알고리즘에 관한 연구, 한국측지학회지 14(1) : 27-38
2. 김용일, 서병준, 구본철, 2000, 위성영상의 해상력에 따른 지리정보의 판독, 대한지형공간정보학회논문집 8(2) : 61-69
3. 노용덕, 1995, 프랙탈 기법에 의한 울릉도 형상화 사례연구, 한국시뮬레이션학회지 4(1) : 113-119
4. 노용덕, 1996, 고정 중간점을 허용하는 프랙탈 기법에 관한 연구, 한국정보처리학회지 3(1) : 160-165
5. 노용덕, 1997, 지형형상화를 위한 객체 클래스 설계 및 구현, 한국시뮬레이션학회지 6(1) : 61-69
6. 유근배, 1998, 점패턴분석을 이용한 수치지형도의 점사상 일반화, 한국 GIS학회지 6(1) : 11-23

7. Musgrave, F. Kenton, Craig E. Kolb, and Roverte S. Mace, 1989, The Synthesis and Rendering of Erode Fractal Terrains, *Computer Graphics* 23(3) : 41-50
8. Jaggi, S., dale A. Quattrochi, and Nina Siu-Ngan Lam, 1993, Implementation on Operation of Three Fractal Measurement Algorithms for Analysis of Remote-sensing Data, *Computers and Geosciences* 19(6) : 745-767
9. Barnsley, M. F., R. L. Devaney, B. B. Mandelbrot, H. O. Peitgen, D. Saupe, and R. F. Voss, 1988, The science of Fractal Images, Springer-Verlag, appendix A.
10. Fournier, Alain, Don Fussell, and Loren Carpenter, Computer Rendering of Stochastic Models, *Graphics and Image Processing, Communications of the ACM* 25(6) : 371-384
11. Mandelbrot, Benoit B., 1982, *The fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Co., New York.
12. Mastin, Gray A., P. A. Watterberg and J. F. Mareda, 1987, Fourier Synthesis of Ocean wavers, *IEEE Computer graphics and application* 7(3) : 16-23
13. Miller, Gavin S. P., 1986, The Definition and Rendering of Terrain Maps *Computer Graphics*, 20(4) : 39-48
14. Nina siu-ngan lam, and Lee de cola, 1993, *Fractals in Geography*, PTR Prentice Hall.
15. Lee, Byong Kil, Yang dam Eo, Jae Joon Jeong, and Yong Il Kim, 2001, A cost effective reference data sampling algorithm using fractal analysis, *ETRI journal* 23(3) : 129-137
16. Clarke, Keith C., 1986, Computation of the Fractal Dimension of Topographic Surfaces using the Triangular Prism Surface Area Method, *Computers & Geosciences*, 12(5) : 73-722