비정규삼각망 데이타구조에 의한 수치지형모델의 구성
The Construction of Digital Terrain Models by a Triangulated Irregular Network

이 석 찬* 조 규 전**
Lee, Suck-Chan Cho, Kyu-Jon
이 창 경*** 최 병 길***
Lee, Chang-Kyung Choi, Byoung-Gil

요 지

수치지형모델의 데이타구조로는 정규격자망 및 비정규삼각망 데이타구조가 널리 이용되고 있다. 정규격자망은 그 구조가 단순하고 간단한 반면에 지형 특성을 잘 반영하지 못하며 많은 데이타 용량을 요한다. 이와는 반대로 비정규삼각망 데이타구조는 그 구축 방법이 어렵지만 지형 특성을 잘 살릴 수 있으며 적은 양의 데이타로 그의 응용분야에 적합한 정확도를 얻을 수 있다.

본 연구는 Delaunay triangulation에 바탕을 두고, 비정규삼각망 데이타구조를 연구 개선시킴으로써 좀더 효율적인 수치지형모델을 구성하는데 목적을 두었다. 이를 위하여 기존의 지도로부터 정규 및 비정규 데이타가 추출되었으며 두 데이타구조에 대한 상호 비교가 이루어졌다.

ABSTRACT

A regular grid or a triangulated irregular network is generally used as the data structure of digital terrain models. A Regular grid is simple and easy to manipulate, but it can't describe well terrain surface features and requires vast volumes of data. In the meantime, a triangulated irregular network has complex data structure, but it can describe well terrain surface features and can achieve the accuracy suitable to its application with relatively little data.

This paper aims at the construction of efficient digital terrain models by the improvment of a triangulated irregular network based on Delaunay triangulation. Regular and irregular data set are sampled from existing contour maps, and the efficiency and the accuracy of the two data structures are compared.

1. 서론

현대는 고도의 정보화 시대로 모든 분야에 걸쳐 정보의 신속한 공급 및 이용을 필요로 하고 있으며 지형정보의 경우도 그 예외는 아니다. 특히 수치지형모델은 공간정보로서 정보시스템의 근간을 이루고 있기 때문에 국방 및 토지 이용, 행정망 구축 등 많은 응용분야에 널리 이용되고 있으며 이러한 분야에서는 좀더 광범위하고 좀더 세밀하며 정확한 모델의 구성을 요구하고 있다.

그러나 수치지형모델이 광범위하고 정확해지면 질수록 더 많은 데이타 용량을 필요로 하는 것은 자명한 사실이다. 기존의 지도나 사진측량으로부터 얻어진 공간좌표는 일반적으로 정규격자망의 형태로 구성되어져 왔다. 이는 정규격자망이 데이타구조가 간단하여 데이타의 획득 및 구축 방법이 용이하기 때문이다. 미국의 USGS (United States Geological Survey)와 DMA (Defence Mapping Agency)에 의하여 구축된 데이타베이스는 이러한 데이타구조를 이용한 대

* 한양대학교 토목공학과 교수
** 경기대학교 토목공학과 부교수
*** 한양대학교 대학원 박사과정

표적인 예로서 이 경우 정확도를 높이기 위하여 격자간격을 $1/n$로 줄일 경우 약 n^2배의 데이타가 추출되어 기하급수적인 기억용량의 증가를 가져온다. 또한 정규격자망은 지형의 형태에 관계없이 일정한 간격으로 표고점의 높이를 추출하기 때문에 지형의 특성을 잘 반영하지 못하는 단점을 가지게 된다.

이러한 정규격자망의 단점을 보완하기 위하여 고안된 데이타 구조가 비정규삼각망(Triangulated irregular network : TIN) 데이타 구조이다. 비정규삼각망 데이타 구조는 대부분 Delaunay triangulation에 그 바탕을 두고 있는데 정규격자망에 비하여 데이타 구조가 복잡하기 때문에 데이타 구축방법이 어려우나 지형 특성을 잘 반영할 수 있고 경사도라든가 경사의 방향 등을 구하는데 있어서 그 응용성이 뛰어나기 때문에 상업용 GIS 등에 널리 이용되고 있다.

본 연구는 Delaunay triangulation 기법을 이용 좀더 효율적인 비정규삼각망 데이타 구조를 개발함으로써 광범위하면서도 정확한 수치지형 모델을 구성하는데 그 목적을 두었다. 이를 위하여 기존의 지도로부터 비정규 랜덤데이타가 추출되어 이에 대한 Delaunay triangulation이 이루어졌으며 또한 정규격자망 형태의 데이타가 추출되어 그 효율성 및 정확도가 비교 분석되었다.

2. 기본이론

(1) 비정규삼각망의 구성

수치지형모델에서 비정규삼각망은 불규칙하게 위치해 있는 데이타들의 상호 기하학적 관계를 구축함으로써 지형의 3차원적인 표현을 가능케 하기 위한 데이타구조이다. 비정규삼각망 구조에서는 측정된 데이타가, 규칙적으로 일정한 간격을 가지고 배열해 있는 정규격자망형태의 데이타구조와는 달리 불규칙하게 위치해 있기 때문에 컴퓨터가 상호 점들간의 이웃성(Neighborhood)을 인식하기 어렵다. 따라서 그 데이타베이스의 구축이 쉽지 않다. 그러나 지형의 특성에 관계없이 균등하게 데이타를 추출하는 정규

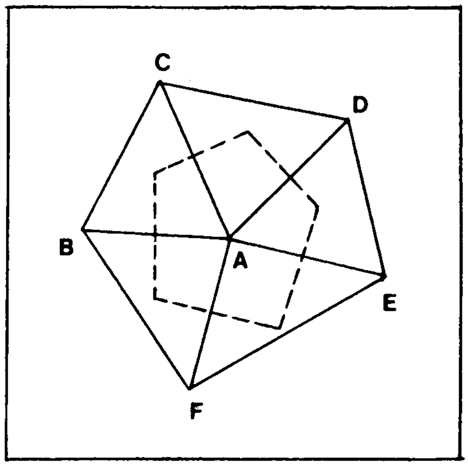


그림 1. Delaunay triangulation

격자망 형태의 데이타 구조에 비하여 지형의 특성에 따라 데이타를 추출함으로써 적은 양의 데이타에 의하여 지형의 특성을 정확하게 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 널리 이용되고 있다.

지금까지 개발 되어온 비정규삼각망 데이타구조는 대부분 Delaunay triangulation에 그 바탕을 두고 있다. 〈그림 1〉에서 A점을 둘러싸고 있는 다각형 안의 모든 점들이 B, C, D, E, F 점에서 보다 A점에 더 가까운 다각형을 생각할 수 있는데 이러한 조건을 만족하는 다각형을 Thiessen polygon이라고 하며 이는 선분 AB, AC, AD, AE, AF의 수직 이등분선에 의하여 만들어 진다. 이때 점 B, C, D, E, F를 점 A의 Thiessen neighbors 라고 하며 이와같이 Thiessen polygon이 형성될 수 있도록 구성된 삼각형 BAC, CAD, DAE, EAG, GAF가 Delaunay triangles이다. 이와같은 조건을 만족하는 Delaunay triangle 또는 Thiessen polygon의 집합은 유일하다.

Delaunay triangulation은 각각의 점에 대한 Thiessen neighbors 점을 구하여 비정규삼각망을 구성하는 기법으로 그 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 각각의 삼각형은 가능한한 정삼각형에 가까우며 또 각각의 삼각형의 가장 긴 변의 길이가 가능한한 가장 짧아야 한다라는 알고리즘에 의하여 비정규삼각망이 구성되었다.

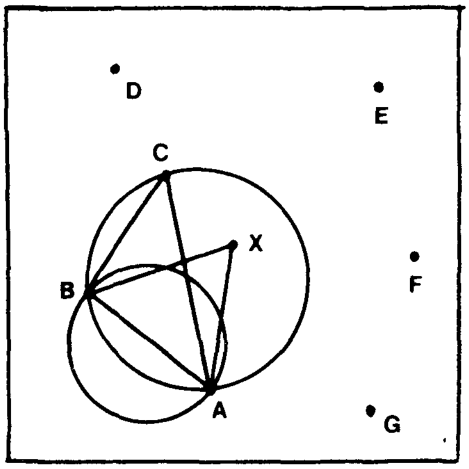


그림 2. *Thiessen neighbors* 점의 추적

〈그림 2〉에서 점 A를 Thiessen polygon의 중심이 되는 점으로 그 이웃점(Neighbor points)들을 구하려고 하는 점이라고 하면 우선 A점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 점 B가 A점의 첫번째 이웃점이 된다. A점의 다음 이웃점은 이 두 점 A, B을 바탕으로 구하여 지는데 이를 X점이라고 하면 A 및 B점과 X점에 의하여 이루어지는 각은 X 이외의 어떠한 다른 점이 A 및 B점과 이루는 각보다 큰 값을 가지는 특성이 있다.

이러한 특성을 이용하여 새로운 이웃점 X가 결정되면 이를 바탕으로 똑같은 방법에 의하여 그 다음 이웃점이 구하여진다. 즉 선분 AX에 대하여 가장 큰 각을 이루는 점이 새로운 이웃점이 될 것이다. 이러한 과정을 시계 방향에 따라 반복해 가면 마침내 그 첫번째 이웃점 B에 도달하게 되는데 이렇게 함으로써 A점의 모든 Thiessen neighbors가 구하여지고 이들 점들을 연결하면 Delaunay triangle networks가 구성되어진다.

이 알고리즘에 의하면 Delaunay triangles를 구성하는데 사용되어지는 불규칙 데이터의 수를 n개라고 할 때 첫번째 이웃점 즉 가장 짧은 거리에 있는 점을 찾는데는 컴퓨터가 시행착오에 의하여 이러한 점을 구한다고 할 때 $n*(n-1)$번의 거리 계산을 필요로 한다. 또 두번째 이상의 이웃점을 찾는데는 한점의 이웃점이 평균 m개라고 할 때 $m*n*(n-2)$번의 각 계산을 필요로 한다. 그러나 Thiessen neighbors을 구하는데 있어서 이와같이 모든 점에 대하여 거리를 계산하고 각을 계산한다는 것은 매우 비효율적이라 하겠다. 이러한 비효율성을 개선하기 위하여 전 대상지역을 일정한 블록으로 나눈 다음 데이타를 X, Y좌표의 순서에 따라 정렬시킴으로서 컴퓨터 처리 시간을 줄이는 연구가 McCullagh & Ross에 의하여 이루어졌다. 이들에 의하면 우선 대상 지역이 일정한 간격을 갖는 박스로 나누어진 다음 Y값의 크기에 의하여 박스의 순서가 정하여진다. 이때 Y값에 의하여 똑같은 순서를 갖는 박스는 다시 X값에 의하여 그 순서가 구하여진다. 이와 같이 Y값에 의하여 박스의 순서가 정하여지면 각각의 박스 안에 속하는 점들은 다시 X값에 의하여 그 순서가 정렬되어진다. 이렇게 하여 점들이 박스별로 정렬되면 Thiessen neighbors를 구할때 우선 기준점이 속해 있는 박스에서부터 이웃점을 찾기 시작하며 기준이 되는 선분의 반시계방향에 해당하는 박스내의 점들은 추적 대상에서 제외된다. 이 방법에 의하면 이웃점을 찾는데 있어서 우선 그 점으로부터 인접한 점들의 집단부터 추적함으로 불필요한 점들의 탐색 시간을 줄일 수 있지만 박스의 순서 및 각 점들의 순서를 일정한 배열 속으로 기억시켜야 되므로 더 많은 컴퓨터 용량을 필요로 한다. 본 연구에서는 박스 및 점들의 순서를 기억시키지 않고서도 먼 곳에 있는 점들을 추적 대상에서 제외할 수 있는 방법을 사용하였다. 즉 미리 박스를 구성하고 이들의 순서를 구하는 것이 아니라, 각점에 대한 이웃점을 찾을때 그 점을 기준으로 한 박스를 그때 그때마다 국부적으로 설정하는 방법을 사용하였다.

본 방법에서는 우선 모든 데이타가 X값에 의하여 순차적으로 정렬되어진다. 어떤 한점에 대하여 가장 가까운 거리에 있는 점을 찾고자 할 때 그 점을 기준으로 일정한 크기를 가지는 박스를 구성한 다음 X값의 크기에 따라 정하여진 순서에 의해 박스안에 있는 점들의 거리를 구하고 이로부터 첫번째 이웃점을 구한다. 이때 박스 안에 점이 존재할 때까지 박스의 크기를 증

가시킨다. 따라서 최초의 박스의 크기를 어떻게 정하느냐에 따라 그 효율성이 달라질 것이다.

두번째 이상의 이웃점을 찾는데 있어서도 첫번째 이웃점의 경우와 유사한 방법을 사용하였다. 즉 〈그림 2〉에서 선분 AB를 현으로 하는 하나의 원이 결정되면 이들의 중심점이 구하여지고 이들 중심점을 기준으로 일정한 크기의 박스를 형성한 다음 X값의 크기에 따라 정렬된 순서에 의하여 박스 안의 점들로부터 그들이 A 및 B점과 이루는 각을 구하여 이웃점을 찾는다. 이때 시계방향을 기준으로 반대방향의 점들은 우선 추적 대상에서 제외되며 최소거리점을 찾을 때와 마찬가지로 일정한 크기의 원내에 점이 존재하지 않을 경우 원의 크기를 증가시켜 적어도 하나의 점이 존재할 때까지 추적을 계속한다. 따라서 이 경우에도 원의 크기를 어떻게 설정하느냐가 컴퓨터 처리시간을 크게 좌우하게 될 것이다.

(2) 데이타구조

수치지형모델에서 점들 상호간의 지리학적 위치관계를 나타내는 방법에는 다음과 같이 나눌 수 있다.

첫번째 방법은 불연속적인 패치내의 점들의 표면을 다항식 및 삼각함수에 의하여 나타내는 방식이며 2차원 spline 함수 등이 이러한 부류이다. 두번째 방법은 초기 입력값의 코딩 구조를 나타내는 함수에 의하여, 점들의 상호 관계를 나타내는 방식이다. 즉 이 방식에 의하면 정규격자망의 형태로 나타내어진 수치지형에서 한 점 P_{ij}에 대한 4개의 이웃점은 $(i+1,j)$, $(i,j+1)$, $(i-1,j)$, $(i,j+1)$로 표현될 수 있을 것이다. 세번째 방법은 포인터에 의하여 점들 상호간의 이웃성을 나타내는 방식으로 U.S Census의 DIME 파일이 이러한 형태의 데이타 구조를 가지고 있는 대표적인 예이다. 본 연구에서 구성된 Delaunay triangles도 포인터에 의하여 데이타 상호간의 관계가 구축되었다. 이러한 포인터 방식에 의하여 비정규삼각망을 구성하는 방법은 다시 크게 두가지로 나눌 수 있다.

첫번째 데이타구조는 삼각형 그 자체를 1차적

Points

1	x	y	z
2	x	y	z
3	x	y	z
⋮			
n	·	·	·

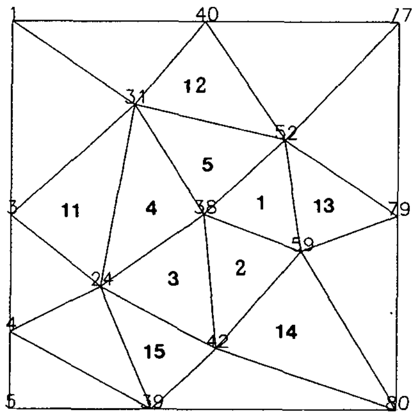
Triangles

1	38	52	59
2	42	38	59
3	24	38	42
⋮			
n	·	·	·

Adjacent Triangles

1	5	13	2
2	3	1	14
3	4	2	15
⋮			
n	·	·	·

(a) Triangles data structure



Connected points

1	·
2	·
3	·
⋮	
	0
i	59
	42
	24
	31
	52
	0
⋮	

Points

1	x	y	z	1
2	x	y	z	
⋮				
38	x	y	z	i
⋮				
n	·	·	·	·

(b) Connected points data structure

그림 3. 데이타 구조

인 입력값으로 취급하는 구조이다. 이 데이타구조에서 각각의 삼각형은, 하나의 기본요소이며 삼각형의 세 꼭지점에 대한 포인터에 의하여 정의되어진다. 이러한 구조에서는 또한 각각의 삼각형에 대한 세개의 인접삼각형이 포인터에 의하여 구축되어 지는데 〈그림 3(a)〉은 이러한 데이타 구조를 잘 나타내 주고 있다.

이와는 달리 두번째 데이타 구조에서는 각각

의 점에 연결되어지는 이웃점들을 차례로 나열한 다음 각점에서 첫번째 이웃점에 대한 포인터를 기억시키는 방식 〈그림 3(b)〉으로 첫번째 방식에서보다 약 절반정도의 기억용량을 줄일 수 있다.

이러한 데이타구조는 각각 그 장점 및 단점을 가지고 있으므로 각각의 응용분야에 따라 적절한 데이타구조를 사용해야 할 것이다. 본 연구에서는 일단 두번째 방식에 의하여 데이타베이스를 구축한 다음 각각의 삼각형에 대하여 그 꼭지점에 대한 리스트를 구성함으로써 두 방법의 혼합형태에 의한 데이타 구조를 사용하였다. 이렇게 함으로써 기억용량은 좀더 필요로하나 이는 앞으로의 응용분야에서의 더 효율적인 데이타베이스를 구축하기 위한 것이다.

3. 적용 및 고찰

(1) 시험데이타 및 삼각망의 구성

수치지형모델에서 데이타의 획득 방법은 직접측량에 의한 방법, 사진측량에 의한 방법, 기존의 지도를 이용하는 방법 등을 생각할 수 있다. 삼각측량이나 수준측량에 의하여 획득된 데이타는 정확한 값을 가지겠지만 그 비용이 많이 들기 때문에 본 연구에서는 기존의 지도 〈그림 4〉로부터 기본데이타를 추출하였다.

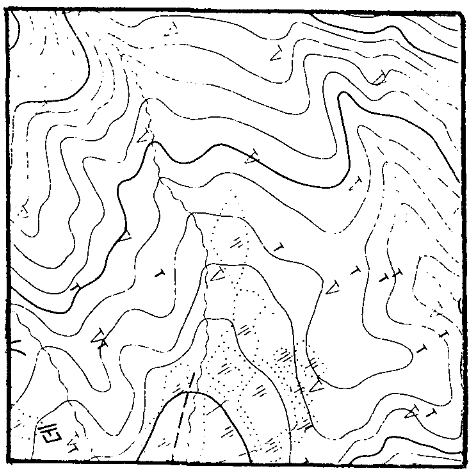


그림 4. 시험대상 지역

〈그림 4〉는 국립지리원에서 발생한 1/5,000의 지형도로부터 발췌된 것이며 그 넓이는 300×300 m^2이다. 우선 10 m 간격의 정규격자망에 따라 900개의 데이타가 추출되었으며 디지타이저에 의하여 82개의 비정규 랜덤데이타가 지형의 특성에 따라 추출되어 상호 비교하는데 사용되었다.

기존의 지도로부터 비정규적으로 추출된 데이타는 2장에서 설명한 알고리즘에 의하여 삼각망이 구성되었다. 최초의 박스의 크기를 결정하기 위하여 랜덤데이타가 등간격으로 배열되었다는 가정하에 점들 사이의 평균간격을 구하였다. 경계값 문제를 해결하기 위하여 네개의 코너 및 네변의 중앙점에 대한 데이타의 추출이 이루어졌으며 X값의 크기에 의하여 배열된 순서에 따

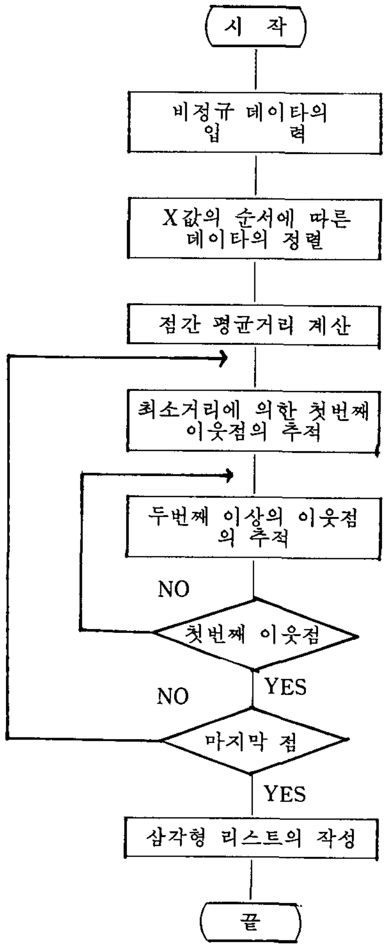


그림 5. 비정규삼각망의 구성 흐름도

라 즉 왼쪽 아래 코너점부터 그 이웃점이 추적되었다. 〈그림 5〉은 Delaunay Triangles 을 구성하기 위하여 작성된 컴퓨터 프로그램의 흐름도이다.

(2) 결과 및 분석

〈그림 6〉은 국부적인 박스 설정기법에 의하여 구성된 Delaunay triangles 로 그 작업은 성공적이었으며 모든 데이타가 비정규삼각망 데이타구조에 의하여 상호 연결됨을 알 수 있다.

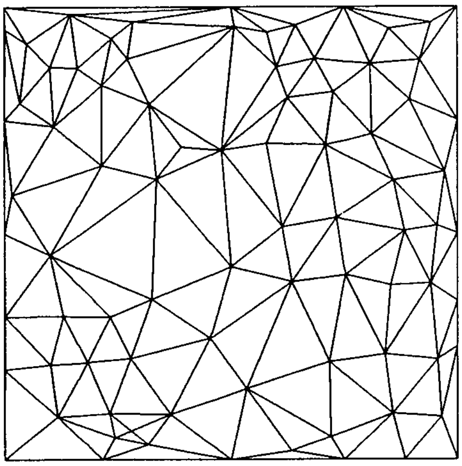


그림 6. Delaunay triangulation networks

〈표 1〉은 컴퓨터가 이웃점을 찾는데 사용한 점의 수를 나타내는 것으로 거리계산 횟수는 최초의 박스의 크기를 점들의 평균 간격으로 하고 점차 그 배수로 증가시켜 첫번째 이웃점을 찾는데 사용된 점의 수를, 각 계산 횟수는 최초의 박스의 크기를 이웃점 간의 최소거리로 하고 점차 그 배수로 증가시켜 두번째 이상의 이웃점을 찾는데 사용된 점들의 수를 나타낸 것이다.

〈표 1〉에서 알 수 있듯이 본 연구에서 사용한 국부적인 박스설정 방법에 의하면, 최소거리를 구하여 첫번째 이웃점을 찾는데는 총 347 번의 거리 계산이 이루짐을 알 수 있으며 이는 점당 평균 4 번으로써 박스 설정방법에 의하지 않을 경우의 점당 $n-1=81$ 번보다 약 1/ 19정도의 거리 계산만이 필요함을 알 수 있다. 또 두번째 이상의 이웃점을 구하는 데는 총 1384 번, 점당

표 1. 이웃점을 찾는데 사용된 점의 수

점 번호	이웃 점수	거리 계산 횟수	각 계산 횟수	점 번호	이웃 점수	거리 계산 횟수	각 계산 횟수
1	5	2	5	42	7	9	32
2	6	2	5	43	4	2	15
3	5	2	4	44	4	5	5
4	5	1	5	45	6	5	23
5	3	5	4	46	6	8	30
6	5	7	16	47	6	5	15
7	4	3	6	48	4	1	7
8	5	1	15	49	7	8	25
9	5	3	19	50	5	4	10
10	5	4	8	51	6	5	18
11	8	7	38	52	7	2	26
12	5	4	13	53	6	12	28
13	5	4	11	54	5	2	17
14	7	4	22	55	5	4	13
15	7	10	20	56	6	10	23
16	5	3	11	57	7	2	17
17	7	2	44	58	5	2	6
18	5	4	19	59	6	1	21
19	6	4	13	60	7	4	23
20	6	5	18	61	6	4	19
21	6	13	34	62	6	12	22
22	5	4	5	63	4	4	7
23	6	3	14	64	4	2	14
24	5	4	10	65	7	3	20
25	5	5	9	66	6	13	22
26	4	3	9	67	6	1	16
27	5	5	15	68	4	2	5
28	6	2	20	69	5	4	15
29	5	2	24	70	6	4	15
30	5	4	8	71	7	2	21
31	7	17	41	72	4	3	5
32	6	1	29	73	5	3	10
33	7	1	44	74	6	1	12
34	6	1	16	75	5	3	9
35	3	3	13	76	6	7	17
36	6	8	22	77	4	1	4
37	9	2	64	78	5	9	8
38	6	6	33	79	5	1	5
39	6	6	11	80	3	1	3
40	7	2	8	81	4	2	5
41	7	3	44	82	4	2	7
				계	452	347	1384

17번의 각 계산이 필요함을 알 수 있는데 이는 박스를 사용하지 않았을 경우의 점당 $m*(n-2)$ =275의 경우보다 약 1/16의 각 계산만이 필요함을 알 수 있다. 이는 박스를 국부적으로 설정함으로 불필요한 점에 대한 추적을 상당히 줄일 수 있음을 의미한다. 그러나 박스의 설정은 그에 대한 컴퓨터 처리시간의 증가를 요하므로 이에 대한 좀더 상세한 연구가 이루어져야 할 것이다.

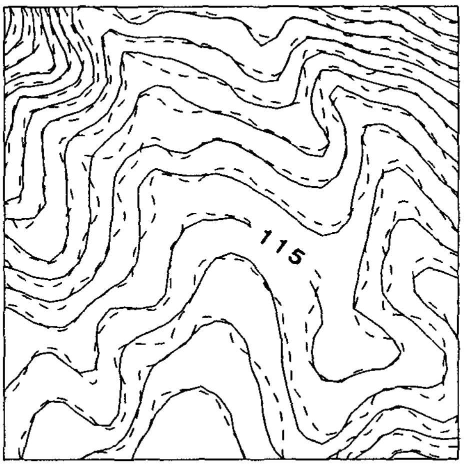


그림 7. 시험지역의 등고선도

이렇게 구성된 Delaunay triangulation networks은 Golden Software 사에서 개발한 Surfer 팩키치에 의하여 등고선이 작도되었으며 같은 방법으로 정규격자망의 형태로 추출된 데이타에 대하여도 등고선이 작도되었다. 〈그림 6〉은 두 데이타형태에 의하여 작도된 등고선을 겹쳐서 나타낸 것으로 실선은 비정규격자망 데이타에 의한 것이고 점선은 정규격자망의 데이타구조에 의한 것인데 그다지 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 정규격자망에 비하여 1/11의 데이타로 구성된 Delaunay triangulation networks은 적은양의 데이타로도 필요한 정도의 정확도를 얻을 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 기존의 지도로부터 랜덤데이타를 추출하는데 있어 적절한 방법을 찾는데 많은 시행착오를 거듭하였는데 점을 지형의 특성에 따라 추출함으로서 상대적으로 적은 수의 데이타를 가지고도 정확도의 손실없이 삼각망의 구축 및 등고선의 작도가 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비정규삼각망 데이타구조는 정규격자망 데이타구조에 비하여 적은 기억용량으로 필요한 정확도의 수치지형모델을 구성할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 각 점의 이웃점을 찾는데 있어 국부적인 박스 설정방법을 사용함으로써 각 데이타의 순서를 기억할 장소를 따로 사용하지 않고서도 효율적으로 비정규삼각망을 구성할 수 있었다.

(3) 지형의 특성을 이용한 랜덤데이타의 추출은 적은 양의 데이타에 의하여 필요한 정확도의 Delaunay triangles을 구성할 수 있었다.

참고 문헌

1. Borrough, P. A., Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Clarendor Press, 1986.
2. Davis, J. C., Statistics and Data Analysis in Geology, Wiley, 1988.
3. Devereux, B. J., The Construction of Digital Terrain Models on Small Computers, Computers & Geosciences, Vol. 11, No. 6, 1985.
4. McCullagh, M. J., & Ross, C. G., Delaunay Trianulation of a Random Data Set for Isarithmic Mapping, The Cartographic Journal, Vol. 17, No. 2, 1980.
5. Mckonna, D. G., The Inward Spiral Method an Improved TIN Generation Technique and Data Structure for Land Planning Applicatian, *Proceeding of Auto-Carto 8*, 1988.
6. Gold, C. M., The Practical Generation and Use of Geographic Triangular Element Data tructures, First International Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information System, Havard Papers on GIS, Vol. 5, 1978.
7. Gold, C. M., PAN Graphs : An Aid to Gis

Analysis, International Jounal of Geographical Information System, Vol. 2, No. 1, 1988.
8. Kennie, T. J. M. & Petrie, G., Engineering Surveying Technology, Blackie and Son, 1990.
9. Peucker, T. K., & Chrisman, N., Cartographic Data Structures, The American Cartographer, Vol. 2, No1, 1975.
10. Peuguet, D. T., A Conceptional Frametwork and Comparison of Special Data Models, Catographica, 21, 1984.
11. Scarlatos, L.L., A Compact Terrain Model Based on Critical Topgraphic Features, Proceddings of Auto-Carto 9, 1989.
12. Sibson, R., Locally Equianguial Triangulations, The Computer Journal, Vol. 21, No. 3, 1978.
13. 이석찬, 조규전, 수치지형모형에 관한 연구 대한토목학회논문집, 2권 1호, 1982.
14. 이석찬, 조규전, 최병길, 이동평균법과 선형예측법을 이용한 수치지형의 보간에 관한 연구, 한국측지학회지, 제 4권 1호, 1986.