

## 비정규삼각망 데이터구조에 의한 지형의 수치화

A Study on the Digitizing of Terrain by  
Triangulated Irregular Networks

이석찬\* · 고영호\*\* · 이창경\*\*\* · 최병길\*\*\*\*

Lee, Suck Chan · Kho, Young Ho · Lee, Chang Kyung · Choi, Byoung Gil

## Abstract

Modern society is the age of a high state of information and demands more effective land information. Moreover, because the use of land in Korea is intensive, Korea requires more synthetic and systematic geographical information for which the digitizing of terrain is prerequisite. This study aims at development of the data structure which is suitable to the digitizing of terrain for Geographical Information System(GIS). Regular grid has been used generally in Digital Terrain Model(DTM), for it is easy to manipulate. But regular grid cannot reflect well the terrain surface features. In the meantime, Triangulated Irregular Network(TIN) has complex data structure, but it can describe well terrain surface features and is useful in various applications. In this paper the method which constructs effective DTM by improving TIN has been researched.

## 요 지

현대는 고도의 정보화시대로 좀더 효과적인 지형정보를 요구한다. 특히 토지이용이 집약적으로 이루어지고 있는 우리나라에서는 좀더 종합적이고 체계적인 지형정보시스템을 필요로 하는데 이를 위하여는 지형의 수치화가 선결조건이다. 본 연구는 이러한 지형정보시스템의 근간을 이루는, 지형의 수치화에 적합한 데이터 구조를 개발하는데 그 목적을 두었다. 지형을 수치화하는데는 일반적으로 정규격자망 형태의 데이터 구조가 널리 이용되었다. 그러나 정규격자망은 그 구조가 단순하고 간단한 반면에 지형특성을 잘 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 데이터 구조는 복잡하지만 지형특성을 잘 살릴 수 있고 여러 응용분야에 있어서 유용한 비정규삼각망 데이터 구조를 연구, 개선함으로써 좀더 효율적인 수치지형모델을 구축하고자 하였다.

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 명예교수

\*\* 정회원 · 경남대학교 공과대학 교수

\*\*\* 정회원 · 군산대학교 공과대학 조교수

\*\*\*\* 정회원 · 인천대학교 공과대학 조교수

## 1. 서론

지형정보는 지구상의 위치에 관련된 제 정보라고 간단히 정의할 수 있다. 그러나 이는 지구자원의 분포를 포함하여, 환경오염문제, 빌딩과 같은 반영구적인 시설의 묘사, 유통 및 교통문제, 토지이용의 형태 및 변화, 사람들의 건강, 부, 고용, 주택, 투표 성향 등과 같은 다양한 정보와 관련되어 있다. 지형정보는 이와같이 인간생활과 밀접한 관련을 맺고 있지만 이를 획득하는데는 많은 비용을 필요로 하며 또한 지형정보를 획득하였다 하더라도 이를 체계적으로 분석하고 이용하는 데는 많은 어려움이 따른다.<sup>(3)</sup>

지형정보는 주제, 시간, 공간의 주요 세가지 요소로 구성되어 있는데 다른 정보시스템과는 달리 모든 정보가 정확하게 지표상의 위치로 인식할 수 있도록 구축되어져야만 한다. 즉, 다른 정보시스템과는 달리 수치지형모델의 구축은 국토정보시스템의 구성에 있어서 선결조건이며 많은 비용이 이 부분에 소요된다.<sup>(6)</sup>

지형의 수치화 모델은 항해학, 수문학, 교통공학, 노선계획, 토공량 산정, 지형도 작성 등의 응용분야에 널리 이용되고 있다. 고도로 정보화된 오늘날, 이러한 분야에 있어서의 좀더 광범위하면서도 정확하고 세밀한 지형정보의 요구는 필연적이며 이는 더 많은 데이터 기억장소 및 처리시간을 요한다. 본 연구는 이러한 지형의 수치모델화에 있어서 그 정확성을 손실하지 않으면서도 기억용량을 절약하고 응용분야에서의 처리가 용이한 데이터 구조를 연구 개발하는데 그 목적을 두었다.

기존의 지도나 사진측량으로부터 얻어진 공간좌표는 일반적으로 정규격자망의 형태로 구성되어져 왔다. 이는 정규격자형의 데이터 구조가 간단하여 데이터의 획득 및 구축방법이 용이하기 때문이다. 그러나 정규격자망은 지형의 형태에 관계없이 일정한 간격으로 지형의 높이를 추출하기 때문에 많은 기억장소를 필요로 하며 이는 3차원화면출력 등과 같은 지형정보시스템의 응용에서 병목현상을 일으킨다.<sup>(16)</sup>

이러한 정규격자망의 단점을 보완하기 위하여 고안된 데이터 구조가 비정규삼각망(Triangulated Irregular Network : TIN)이다. 비정규삼각망 데이터

구조는 삼각형 요소에 의하여 지형의 형상에 따라 추출되어진, 기하학적으로 랜덤한 데이터들의 상관관계를 구축하는 것으로 데이터 구조가 복잡하나 지형 특성을 잘 반영할 수 있고 기억장소를 절약할 수 있는 장점을 가지고 있다.<sup>(14)</sup>

본 연구는 이러한 비정규삼각망 데이터 구조를 연구 개선하여 효율적인 지형정보시스템의 수치표고모델을 구축하고자 하였다. 비정규삼각망을 구성하고 있는 랜덤데이터로부터 보간된 표고와 사진측량에 의하여 구하여진 표고의 비교에 의하여 그 정확성을 구하였다. 또한 티센 이웃점들(Thiessen neighbors)을 기준점으로 한 보간의 정확도가 분석되어졌다. 국지적인 박스의 설정에 의한 티센 이웃점의 추적방법에 의하여 비정규삼각망 구성의 효율성이 개선되어졌으며 정규격자형 수치표고모델 및 비정규삼각망 수치표고모델에 의한 토공량이 비교 분석되었다.

## 2. 비정규삼각망모델에 의한 지형의 수치화

### 2.1 지형의 수치정보화

오늘날 환경학자 또는 자원관리자와 같은 공간데이터의 사용자는 매우 크고 급속하게 증가된 공간데이터를 필요로 한다. 이러한 데이터의 효과적인 사용을 위하여는 여러가지 다양한 데이터를 획득, 수정할 수 있고 획득된 데이터를 여러가지 다양한 형식으로 변환하고 저장할 수 있으며 분석을 위한 검색 및 조작과 분석된 데이터를 사용자의 요구대로 출력할 수 있는 능력을 갖춘 강력한 시스템의 존재가 필요하다.<sup>(12)</sup>

지형정보시스템은 다른 컴퓨터 시스템과는 달리 지구자원 및 자연을 대상으로 하기 때문에 그 구축이 쉽지 않다. 일반적으로 인공적인 대상을 다루는 CAD 등과는 달리 자연적이며 무작위적인 대상을 상대로 한 정보시스템이기 때문에 데이터 베이스의 구축이나 분석이 어렵다.<sup>(4,15)</sup>

지형정보는 주제, 시간, 공간의 주요 세가지 요소로 구성되어 있는데 다른 정보관리시스템과는 달리 모든 정보가 정확하게 지표상의 위치로 인식할 수 있도록 구축되어져야만 한다. 따라서 지형정보시스템의 구축에 필요한 하드웨어 및 소프트웨어는 선진국에서 최고의 기술을 도입하여 사용하면 빠른

시일 내에 이용할 수도 있지만 그 근간이 되는 공간 자료 및 속성 자료는 지역에 따라 다를 뿐만 아니라 국가마다 측지좌표계가 상이하고 또한 토지이용이 서로 다른 특성을 가지고 있기 때문에 자국 지형의 수치모델화를 독자적으로 수행하지 않으면 안된다. 즉, 다른 정보시스템과는 달리 수치지형모델의 구축은 국토정보시스템의 구성에 있어서 선결조건이며 많은 비용이 이 부분에 소요된다.<sup>(6)</sup>

수치표고모델의 형태로는 일반적으로 정규격자망이 널리 이용되어져 왔다. 이는 정규격자망이 그 구조가 단순하고 간단하여 조작이 용이하기 때문이다. 정규격자망은 데이터 분석시 컴퓨터 내에서의 액세스의 문제를 쉽게하는 장점이 있다. 그러나 지표면이 배열로 나타내어진 경우, 정상이나 웅덩이와 같은 부분은 소모적인 추적의 노력을 기울여야만 접근 할 수 있는 단점이 있다. 따라서 배열에 의한 지표면의 표현은 일정한 격자 간격으로 인하여 평탄한 지역에서는 필요이상의 자료를 추출하고 복잡한 지역에서는 정확한 지형을 표현하지 못하는 단점을 가지게 된다.

이러한 정규격자망의 단점을 보완하기 위한 방법으로 비정규삼각망에 의한 지표면의 표현 방법이 있다. 비정규삼각망은 불규칙하게 놓여 있는 점들의 상호 인접관계를 삼각형 분할에 의하여 구축한 것으로 대상지역의 어떠한 점도 포함될 수 있다. 즉 지형의 형태에 따라 지표면의 값을 저장하고 이의 관계를 구축함으로써 저장 장소 및 액세스의 문제를 향상시킨 방법이다.<sup>(16)</sup>

## 2.2 표고모델의 데이터 구조

지표면에 관한 대부분의 수치적 계산은 인접성에 대한 정보를 요구한다. 즉 어떤 지표면의 형태라든가, 지형의 기울기, 국부적인 기복의 변동사항, 등고선이나 종단 곡선을 작도하는데 있어서 다음 연결점의 추적과 같은 일을 처리하는데는 이웃성에 대한 정보가 절대적이라 할 수 있다.

따라서 수치표고모델에서 지형의 상호위치 관계를 나타내는 관계적 데이터 구조를 구축하는 것은 매우 유용하다. 관계적 데이터 구조는 크게 외형적 함수에 의한 방법 및 내재적 함수에 의한 방법 그리고 테이블에 의한 방법으로 나눌 수 있다.<sup>(13)</sup>

외형적 함수는 불연속적인 패치 안에서 각각의

점에 대한 지표면의 형태를 나타내기 위한 다항식 또는 삼각함수등과 같은 함수들을 말한다. 이웃성을 결정하는데 있어서 가장 흔히 사용되는 방법은 가장 인접한 이웃점들을 찾는 분류 루우틴(sort routine) 형식의 외형적 함수에 의한 방법이다. 이러한 방식은 정규격자점을 형성하기 위한 여러가지 보간이론에서 수행되어 진다. 이 경우 컴퓨터의 계산량은 점의 수의 제곱에 비례하여 증가하게 된다. 왜냐하면 이런 방식에서의 추적은 모든 점에 대하여 이루어져야 하며 적어도 그들중 가장 큰 번호는 매번 처리되어야 하기 때문이다.

내재적 함수는 지형 엔티티의 코딩구조를 나타내는 함수에 의하여 상호 이웃관계를 나타낸다. 내재적 함수에 의한 지형 데이터의 상호 이웃성의 표현은 정규격자망의 데이터 형태에서 가장 잘 보여준다. 즉 정규격자망의 데이터 형태에서 한점  $P_{ij}$ 의 4개의 이웃점은  $(i, j+1)$ ,  $(i-1, j)$ ,  $(i, j-1)$ ,  $(i+1, j)$ 이다. 정규격자망은 내재적인 관계 구조를 갖기 때문에 이웃점을 추적할 필요가 없지만 그 데이터 구조의 확실성으로 인하여 불필요한 잉여 데이터를 포함하게 된다.

테이블에 의한 관계적 데이터 구조는 포인터(pointer)에 의하여 지형 엔티티의 인접성을 나타내는 방식이다. 비정규삼각망에 의한 수치지형모델의 데이터 구조도 이러한 포인터 방식에 의한 것이며 가장 널리 알려진 이러한 방식의 데이터 구조로는 미국 통계청의 DIME 파일이 있다.

일반적으로 데이터 구조는 그것을 사용하는 프로그램의 응용 목적에 맞도록 구축된다. 지형 데이터의 양은 엄청나며 응용 프로그램은 다양 각색이기 때문에 데이터의 변환에 대한 추가적인 노력이 요구된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 데이터 베이스를 응용 프로그램에서 독립시켜 작성한 다음 연결하는 방법이 있다. 그러나 이는 어떤 응용이 실제 수행되기 전에 데이터를 처리하기 위하여 많은 컴퓨터 시간을 요구한다. 효율적인 데이터 베이스는 계산 시간을 단축할 뿐만 아니라 응용 프로그램의 작성을 단순화시킬 수 있어야 한다.

비정규적으로 분포된 점들에 대하여 그들을 매우 간단한 데이터 구조로 나타낼 수 있다면 불필요한 점의 추출을 방지할 수 있으며 점들 사이의 이웃성은 가까운 몇개의 점을 추적함으로써 수행되어질 수

있다. 비정규삼각망 데이터 구조는 이러한 조건을 만족하는 데이터 구조라 말할 수 있겠다.

### 2.3 비정규삼각망모델

수치표고모델에서 비정규삼각망은 불규칙하게 위치해 있는 데이터들의 상호 기하학적 관계를 구축함으로써 지형의 3차원적인 표현을 가능케 하기 위한 데이터 구조이다. 비정규삼각망 구조에서는 측정된 데이터가, 규칙적으로 일정한 간격을 가지고 배열해 있는 정규격자망 형태의 데이터 구조와는 달리 불규칙하게 위치해 있기 때문에 컴퓨터가 상호 점들간의 이웃성을 인식하기 어렵다. 따라서 그 데이터 베이스의 구축이 쉽지 않다. 그러나 지형의 특성에 관계없이 일정한 간격으로 데이터를 추출하는 정규격자망 형태의 데이터 구조에 비하여 지형의 특성에 따라 데이터를 추출함으로써 적은 양의 데이터에 의하여 지형의 특성을 정확하게 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 널리 이용되고 있다.<sup>(2,8,10)</sup>

#### 2.3.1 델로니 삼각구분법

지금까지 개발되어온 비정규삼각망 데이터 구조는 대부분 델로니 삼각구분법(Delaunay triangulation)에 그 바탕을 두고 있다. 어떤 임의의 한점을 둘러싸고 있는 다각형안의 모든 점들이 다른 어떠한 점에서보다 그점에 더 가까운 다각형을 생각할 수 있는데 이러한 조건을 만족하는 다각형을 티센 다각형(Thiessen polygon)이라고 하며 이는 임의의 한점과 그 이웃점들이 이루는 선분의 수직 이등분선에 의하여 만들어 진다. 이때 그 이웃점들을 티센 이웃점이라고 하며 이와같이 티센 다각형이 형성될 수 있도록 임의의 한점과 티센 이웃점들에 의하여 구성된 삼각형을 델로니 삼각형이라 한다. 이와같은 조건을 만족하는 델로니 삼각형 또는 티센 다각형의 집합은 유일하다.<sup>(1,5)</sup>

델로니 삼각구분법은 각각의 점에 대한 티센 이웃점을 구하여 비정규삼각망을 구성하는 기법으로 그 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 “각각의 삼각형은 가능한한 정삼각형에 가까우며, 각각의 삼각형의 가장 긴 변의 길이가 가능한한 가장 짧아야 한다”라는 알고리즘에 의하여 비정규삼각망

이 구성되었다.<sup>(17,19)</sup>

점 A를 티센 다각형의 중심이 되는 점으로 그 이웃점들을 구하려고 하는 점이라고 하면 우선 A 점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 점 B가 A점의 첫번째 이웃점이 된다. A점의 다음 이웃점은 이 두점 A, B를 바탕으로 구하여 지는데 이를 X점이라고 하면 A 및 B점과 X점에 의하여 이루어지는 작은 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 시계방향에 따라 반복해 가면 마침내 그 첫번째 이웃점 B에 도달하게 되는데 이렇게 함으로써 A점의 모든 티센 이웃점이 구하여지고 이들 점들을 연결하면 델로니 삼각망이 구성되어진다.

#### 2.3.2 국지적인 박스설정 기법

델로니 삼각형을 구성하는데 사용되어지는 불규칙 데이터의 수를  $n$ 개라고 할 때 첫번째 이웃점을 찾는 데는 컴퓨터가 맹목적인 방법에 의하여 이러한 점을 구한다고 할 때 점당  $(n-1)$ 번의 거리계산을 필요로 한다. 또 두번째 이후의 이웃점을 찾는 데는 점당  $(n-2)$ 번의 각 계산을 필요로 한다. 그러나 티센 이웃점을 구하는데 있어서 이와같이 모든 점에 대하여 거리를 계산하고 각을 계산한다는 것은 매우 비효율적이라 하겠다. 이러한 비효율성을 개선하기 위하여 전 대상 지역을 일정한 블록으로 나눈 다음 데이터를 X, Y좌표의 순서에 따라 정렬시킴으로서 컴퓨터 처리시간을 줄이는 연구가 McCullagh and Ross에 의하여 이루어졌다.<sup>(11)</sup>

이 방법에 의하면 이웃점을 찾는데 있어서 우선 그 점으로부터 인접한 점들의 집단부터 추적함으로써 불필요한 점들의 탐색 시간을 줄일 수 있지만 박스의 순서 및 각 점들의 순서를 일정한 배열 속도로 기억시켜야 되므로 이에 대한 컴퓨터 용량을 필요로 한다. 본 연구에서는 박스 및 점들의 순서를 기억시키지 않고서도 면간에 있는 점들을 추적 대상에서 제외할 수 있는 방법을 사용하였다. 즉 미리 박스를 구성하고 이들의 순서를 구하는 것이 아니라, 각점에

대한 이웃점을 찾을 때 그점을 기준으로 한 박스를 그때 그때마다 국지적으로 정하는 방법을 사용하였다.<sup>(19)</sup>

본 방법에서는 우선 모든 데이터가 X값의 크기에 의하여 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 박스 안에 있는 점들의 거리를 구하고 이로부터 첫번째 이웃점을 구한다. 이때 박스 안에 점이 존재할 때까지 박스의 크기를 증가시킨다. 따라서 최초의 박스의 크기를 어떻게 정하느냐에 따라 그 효율성이 달라질 것이다.

두번째 이후의 이웃점을 찾는데 있어서도 첫번째 이웃점의 경우와 유사한 방법을 사용하였다. 즉 티센다각형의 중심점과 바로 앞 이웃점을 연결하는 선분을 현으로 하는 하나의 원이 결정되면 이들의 중심점이 구하여지고 이들 중심점을 기준으로 일정한 크기의 박스를 형성한 다음 X값의 크기에 따라 정렬된 순서에 의하여 박스안의 점들로부터 그들이 티센다각형의 중심점 및 바로 앞 이웃점과 이루는 각을 구하여 그 다음 이웃점을 찾는다. 이때 시계 방향을 기준으로 반대방향의 점들은 추적 대상에서 제외되며 최소 거리점을 찾을 때와 마찬가지로 일정한 크기의 원내에 점이 존재하지 않을 경우 원의 크기를 증가시켜 적어도 하나의 점이 존재할 때까지 추적을 계속한다. 따라서 이 경우에도 최초의 원의

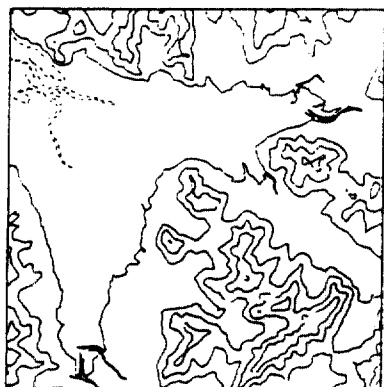
크기를 어떻게 설정하느냐가 컴퓨터 처리시간을 크게 좌우하게 될 것이다.

### 3. 비정규삼각망의 구성 및 수치시험

본 연구의 수치시험을 위하여 평탄지형 및 산악지형(그림 1)을 선정한 다음 사진측량에 의하여 정규격자점의 표고를 추출하여 이를 참값으로 하고 등고선도를 작성하였다. 사용된 항공사진의 축척은 1/20,000이며 도화기는 Wild사의 BC<sub>2</sub> 해석도화기를 이용하였다. 연구대상지역의 크기는 2 km×2 km이며 격자점의 간격은 20 m이다. 작성된 등고선도로부터 수작업에 의하여 비정규 랜덤 데이터가 지성선과 같은 절선을 중심으로 평탄지형에서는 617점(정규격자점의 6.0%), 산악지형에서는 582점(정규격자점의 5.7%)이 추출되었으며 또한 라플라스 연산자를 이용한 하이-패스 필터링에 의하여 정규격자형의 수치표고모델로부터 지형의 중심점이 자동 추출되었다.

#### 3.1 비정규삼각망의 구성

수작업 및 하이-패스 필터링에 의하여 추출된 중심점들의 상호관계는 앞에서 설명한 방법에 의하여 비정규삼각망이 구성된다. 본 연구에서는 첫번째 이웃점을 찾는 경우, 최초의 박스의 크기를 점들간의 평균간격으로 하였으며 두번째 이후의 이웃점을 찾는 경우, 최초의 박스의 크기를 전 이웃점과의 거



(a) 평탄지형



(b) 산악지형

그림 1. 연구대상지역.

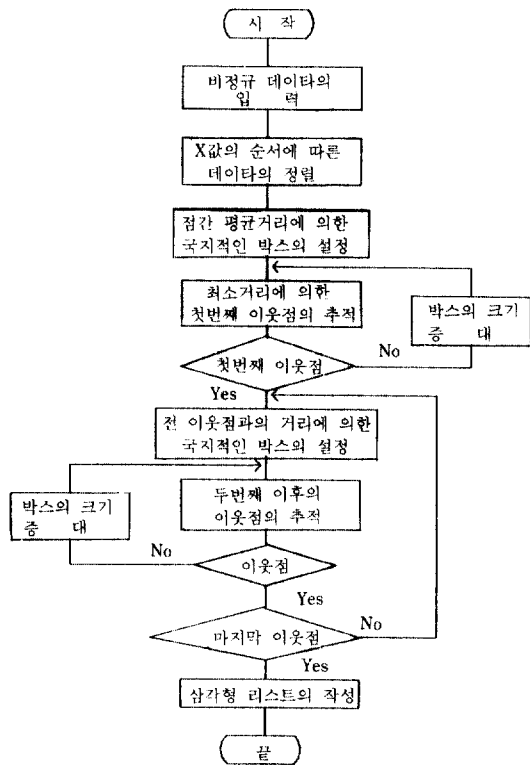


그림 2. 비정규삼각망의 구성 흐름도.

리로 한 다음 최소한 한점의 이웃점이 추적될 때까지 박스의 크기를 그 배수로 증가시켜 나갔다. X값의 크기에 의하여 배열된 순서에 따라, 즉 왼쪽 아래 코너점부터 그 이웃점이 추적되었다. 그림 2는 델로니 삼각망을 구성하기 위하여 작성된 컴퓨터 프로그램의 흐름도이다.

국지적인 박스설정에 의한 티센 이웃점의 추적 방법의 효율성은 이 방법에서 추적 대상이 된 점의 수와 맹목적인 방법에서의 추적 대상이 되는 점의 수를 비교함으로써 조사된다.

### 3.2 보간 및 정확도 계산

삼각형내의 격자점의 위치는 지역적인 면적좌표계를 사용함으로써 쉽게 구할 수 있다. 원래의 삼각형의 면적을  $D$ , 각각의 꼭지점에 대응하는 소삼각형의 면적을  $D_1, D_2, D_3$ 라 하면 높이가 선형으로 보간되어진다고 할 때 삼각형내의 임의의 점  $P$ 의 높이

$$Z_p = \sum_{i=1}^3 R_i Z_i \quad (1)$$

가 된다. 여기서  $Z_i$ 는 세 꼭지점의 높이이며  $R_i = D_i/D$ 이다.<sup>(7)</sup>

또한 델로니 삼각구분법에 의하여 각각의 격자점의 티센 이웃점을 구한 다음 이 점들의 표고로부터 격자점의 높이를 구하였다. 델로니 삼각구분법은 원래 티센 이웃점이 정육각형을 지향하도록 고안된 것이므로 이 방식은 거리 및 방향성이 함께 고려된 보간 방식이라 할 수 있다.

보간은 이동평균법에 의하여 수행되었으며 이때 함수모델은 수평면

$$Z = a \quad (2)$$

와 2차 평면식

$$Z = ax + by + c \quad (3)$$

가 사용되었으며 확률모델로는

$$W(d) = 1/d^k, \quad k=0, 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

가 수치시험 되었다. 여기서  $a, b, c$ 는 미지의 모수(parameter)이며  $d$ 는 점간 거리를 나타낸다.<sup>(8)</sup>

정규격자형 수치표고모델의 정확도를 계산하기 위하여 임의의 격자점의 높이를 주위 8점으로부터 보간하였다. 이때 보간점  $X$ 의 높이는 다음과 같이 계산되었다.

$$Z_x = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 W_i Z_i \quad (5)$$

여기서  $Z_x$ 는 보간점의 높이,  $Z_i$ 는 기준점의 높이이며  $W_i$ 는 중량으로써 보간점과 기준점간의 거리의 제곱의 역수가 사용되었다.

이와같이 구하여진 격자점의 높이와 사진측량에 의하여 구하여진 높이와의 차이에 의하여 수치표고 모델의 정확도가 구하여진다.<sup>(9)</sup>

### 3.3 토공량의 산정

비정규삼각망 수치표고모델로부터 다음과 같이 토공량이 계산되었다.

$$V_1 = \frac{1}{3} A_1 \sum_{i=1}^{n_1} (T_1 + T_2 + T_3), \quad (6)$$

여기서  $V_1$ 은 삼각망에 의한 토공량을 나타내며  $A_1$ 은 삼각형의 면적을,  $T_1, T_2, T_3$ 는 각각 꼭지점의 높이를,  $n_1$ 은 삼각형의 수를 나타낸다. 이는 삼각형이 평면을 이룬다는 가정하에 구하여진 식이다. 또한 정규격자형 수치표고모델로부터 다음과 같이 토공량이 계산되었다.

$$V_2 = \frac{1}{4} A_2 \sum_{i=1}^{n_2} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4), \quad (7)$$

여기서  $V_2$ 는 격자망에 의한 토공량을 나타내며,  $A_2$ 는 사각형의 면적을,  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 는 각각 사각형의 꼭지점의 높이를,  $n_2$ 는 사각형의 수를 나타낸다. 이렇게 구한  $V_1$ 은  $V_2$ 와 비교 조사되어 그 응용성이 검토되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 비정규삼각망의 구성결과 및 분석

정규격자형 수치표고모델의 경우 식 (5)에 의하여 보간된 높이와 사진측량에 의하여 측정된 높이의 차이의 RMS를 구한 결과, 평탄지형에서 0.81 m, 산악지형에서 2.50 m이었다. 수작업에 의하여 추출된 중심점에 의한 비정규삼각망의 RMS는 평탄지형에서 2.27 m, 산악지형에서 6.27 m로 정규격자형 수치표고모델보다 평탄지형에서 약 180% 정도, 산

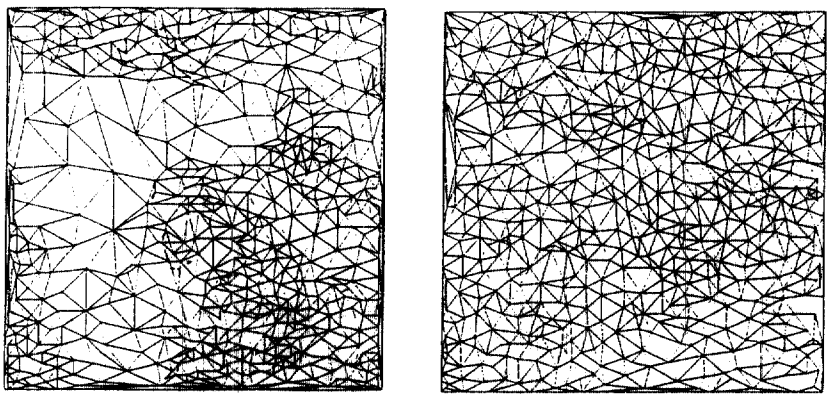
악지형에서 약 151% 정도 정확도(RMS)가 떨어짐을 알 수 있었다.

이러한 비정규삼각망의 정확도는 그 계산방법의 차이로 인하여 정규격자망과 정확한 비교를 할 수 없으나 수작업에 의한 점추출 비율이 정규격자망 수치표고모델의 약 6% 정도임을 감안하면 상당히 정확한 결과로 생각된다.

가장 정확도가 좋은 라플라스 연산자에 의하여 자동 추출된 중심점의 경우도 수작업에 의하여 추출된 중심점보다 평탄지형에서 약 114%, 산악지형에서 약 55% 정도 정확도(RMS)가 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 하이-패스 필터링에 의하여 자동 추출된 중심점의 정확도가 수작업에 의한 경우보다 상당히 떨어짐을 나타낸다. 그러나 하이-패스 필터에 의하여 추출된 중심점은 그다지 큰 정확도를 요하지 않는 3차원 화면 출력 등과 같은 지형정보시스템의 수치표고모델을 구축하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

그림 3은 수작업에 의하여 추출된 중심점에 대하여 델로니 삼각분할법을 적용하여 구성한 삼각망이다. 그림은 불규칙하게 놓여 있는 랜덤 데이터들의 상호위상관계가 비정규삼각망 데이터 구조에 의하여 성공적으로 구축되어짐을 보여준다. 즉 높이의 변동이 작은 평탄지역에서는 적은 양의 점을, 높이의 변동이 큰 복잡한 지역에서는 많은 양의 점을 추출함으로써 효율적인 수치표고모델을 구성하고 있음을 보여준다.

수작업에 의하여 추출된 랜덤 데이터들에 의하여



(a) 평탄지형 (b) 산악지형

그림 3. 랜덤데이터에 의하여 구성된 비정규삼각망.

구성된 비정규삼각망의 경우 산악지형의 경우가 평탄지형보다 그 정확도(RMS)가 약 176% 정도 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 비정규삼각형의 정확도가 지형의 형태에 상당히 영향받음을 알 수 있다.

#### 4.2 티센 이웃점에 의한 보간결과 및 분석

표 1은 티센 이웃점에 의한 보간의 정확도를 나타낸 것으로 수작업에 의하여 추출된 비정규 랜덤 데이터에 대하여 수치시험한 것이다. 즉 각각의 격자점의 티센 이웃점을 추적한 다음 이들 점들에 의하여 격자점의 높이를 3.2절에서 설명한 방법에 의하여 보간하고, 사진측량에 의하여 측정된 높이와의 차의 RMS를 구한 것이다.

표 1에서 티센 이웃점에 의한 보간의 정확도는 비정규삼각망에 의한 보간의 정확도(평탄지형의 경우  $RMS=2.27\text{ m}$ , 산악지형의 경우  $RMS=6.27\text{ m}$ )보다 오히려 떨어짐을 알 수 있다. 이는 좀 더 정확한 보간 방법을 사용하면 향상될 수 있을 것으로 생각되나 비정규삼각망에 의한 보간 방법도 선형이었음을 고려할 때 델로니 삼각분할법에 의하여 구축된 데이터 모델이 상당히 정확함을 알 수 있다.

#### 4.3 국지적인 박스설정의 효율성

수작업에 의하여 추출된 비정규 랜덤 데이터에 대하여 수치시험한 결과 국지적인 박스설정에 의하여 티센이웃점을 추적하는 경우 첫번째 이웃점을 찾는 데는 점당 평균 5.40번의 거리 계산만이, 두번째 이상의 이웃점을 찾는 데는 점당 평균 3.7번의 각 계산만이 필요함을 알 수 있었다. 수작업에 의하여 추출된 기준점의 수는 약 600번으로 맹목적인 방법에 의하여 티센이웃점을 추적하는 경우 첫번째 이웃점을 찾는 데는 점당 599번의 거리계산이 두번째 이후의 이웃점을 찾는 데는 점당 598번의 각 계산이 필요하다. 따라서 박스설정방법에 의할 경우 맹목적인 방법에 의한 경우보다 첫번째 이웃점의 추적시 약 1/101, 두번째 이후의 이웃점 추적시 약 1/162의 점 검색만이 필요함을 알 수 있다. 또한 맹목적인 추적 방법은 기준점의 수가 증가하면 할수록 점점 추적 대상이 되는 점의 수가 증가하게 된다. 따라서 국지적인 박스설정방법은 티센 이웃점을 추적하는데 있어서 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다.

본 연구결과 각 점의 평균 이웃점 수는 5.65임을

알 수 있었다. 델로니 삼각분할법은 원래 정삼각형에 가깝도록 삼각망을 구성하는 것으로 이 경우 점당 이웃점의 수는 이론적으로 6점이 되어야 하는데 본 연구에서 6점보다 적게 나온 것은 경계선상에 놓여있는 점들의 이론적인 이웃점이 4점이기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 본 연구 결과는 비정규삼각형이 정삼각형을 지향하도록 구성되어졌음을 알 수 있다.

#### 4.4 토공량 산정 결과 및 분석

표 2는 정규격자 및 비정규삼각망에 의한 토공량의 산정 결과를 나타낸다. 표 2의 토공량은 3.3절에서 설명한 방법에 의하여 계산된 것이며 비정규삼각망을 구성하고 있는 랜덤 데이터는 수작업에 의하여 추출된 것이고 정규격자망의 데이터는 사진측량에 의하여 20 m 간격으로 추출된 것이다. 평균 높이에 의한 면적은 지형의 평균 높이를 구한 다음

표 1. 티센 이웃점에 의한 보간의 정확도(RMS)

보간법	지형		
	총량(k)	산악지형 (m)	
수평면	0	3.219	12.358
	1	3.011	8.726
	2	2.819	7.078
	3	2.797	7.246
	4	2.823	7.792
	5	2.869	8.328
2차평면식	0	3.027	9.923
	1	2.756	8.026
	2	2.583	7.002
	3	2.492	6.607
	4	2.440	6.471
	5	2.425	6.474

표 2. 정규격자 및 비정규삼각망에 의한 토공량(km<sup>3</sup>)

토공량 지형	평균 높이에 의한 토공량	정규격자망에 의한 토공량	비정규삼각망에 의한 토공량
평탄지형	0.13997	0.11161	0.10376
산악지형	0.69548	0.66721	0.58648



여기에 대상지역의 면적을 곱한 값이다.

표에서 토공량은 평균 높이, 정규격자망, 비정규삼각망의 순으로 작아짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 정규격자망이나 비정규삼각망의 경우 표고가 선형에 의하여 보간된 결과로 생각된다.

표고의 기준을 지형의 평균 높이로 한 경우 평탄지형에서 정규격자 및 비정규격자망에 의한 토공량은 각각  $0.02835 \text{ km}^3$  및  $0.02247 \text{ km}^3$ 이었으며 산악지형에서는 각각  $0.02820 \text{ km}^3$  및  $0.02194 \text{ km}^3$ 이었다. 이를 기준으로 할 때 비정규삼각망의 정규격자망에 대한 상대적인 편차는 평탄지형의 경우 20.7% 산악지형의 경우 22.2%로 약 20% 정도이며 산악지형의 경우가 평탄지형의 경우보다 그 차이가 약간 큼을 알 수 있다. 이러한 결과는 지형의 평균 높이를 기준면으로 삼은 경우로 표 2의 수치를 사용할 경우 토공량의 편차는 약 10% 정도가 된다. 즉 실제적인 토공량의 편차는 위에서 계산된 값보다 작을 것이다.

비정규삼각망을 구성하고 있는 점의 밀도가 정규격자망의 6% 정도임을 감안할 때 이는 상당히 정확한 결과라고 생각되며 실제 응용에 충분히 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 단 이때 비정규삼각망에 의한 토공량이 적게 계산된다는 사실을 고려해야 할 것이다. 또한 높이의 보간을 선형식에 의하지 않고 좀더 지형의 형태에 적합한 고차식을 사용할 경우 이러한 토공량의 편차는 적어질 것으로 생각되며 앞으로 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구의 수행 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 비정규삼각망 데이터구조는 불규칙하게 놓여 있는 데이터 상호간의 관계를 효율적으로 구축함으로써, 적은 기억용량으로 필요한 정확도의 수치표고모델을 구성하는데 효과적인 데이터 구조임을 알 수 있었다. 국지적인 박스선택에 의한 티센 이웃점의 추적은 비정규삼각망 구성의 효율성을 상당히 향상시킴을 알 수 있었으며 이러한 효과는 대상지형이 넓으면 넓을수록 증가할 것이다.

하이-패스 필터링에 의하여 자동 추출된 지형 중심점에 의한 비정규삼각망의 경우 수작업에 의하여 추출된 중심점에 의한 비정규삼각망의 경우보다 상

당히 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나 이들 점은 높은 정확도를 요하지 않는 지형정보시스템의 수치표고모델을 구축하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

비정규삼각망으로부터 계산된 토공량은 정규격자형 수치표고모델에 의한 것보다 적었으며 그 차이는 22% 이내였다. 이는 지형의 보간을 선형에 의한 결과로 고차식에 의한 경우 좀 더 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한 티센 이웃점에 의한 보간의 정확도는 비정규삼각망 수치표고모델에 의한 보간의 정확도보다 낮음을 알 수 있었다. 이는 비정규삼각망이 지형을 재현하는데 상당히 정확한 수치표고모델임을 나타낸다.

본 연구에서 수행된 비정규삼각망 모델에 의한 비정규 랜덤 표고의 상호관계 구축방법은 표고정보가 아닌 다른 지형정보에도 확대 적용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 1991년도 한국과학재단의 연구비지원(과제번호 911-1308-006-1)에 의하여 이루어진 결과로 이에 깊은 감사를 드리는 바입니다.

## 참고문헌

1. Bras-Mehlman, E.L., Schmitt, M., Faugeras, O.D., and Boissonnat, J.D., "How the Delaunay Triangulation can be used for Representing Stereo Data", *Second International Conference on Computer Vision*, IEEE Computer Society, 1988, pp. 54-63.
2. Carter, J.R., "Digital Representations of Topographic Surfaces", *PE&RS*, Vol. 54, No. 11, 1988, pp. 1577-1580.
3. Chorley, R. et al., "Handling Geographic Information", Report to the Secretary of State for the Environment of the Committee of Enquiry into the Handling of Geographic Information, Department of the Environment, London, 1987.
4. Cowen, D.J., "GIS versus CAD versus DBMS: What are the Differences?", *PE&RS*, Vol. 54, No. 11, 1988, pp. 1551-1555.
5. Davis, J.C., *Statistics and Data Analysis in Geology*.

- John Wiley & Sons, 1988.
6. Faust, N.L., "Automated Data Capture for Geographic Information Systems: A Commentary", *PE&RS*, Vol. 53, No. 10, 1987, pp. 1389-1390.
  7. Gold, C.M., "The Practical Generation and Use of Geographic Triangular Element Data Structures", *First International Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems*, Harvard Papers on Geographic Information Systems, Vol. 5, 1978, pp. Gold/1-18.
  8. Gold, C.M., "Problems With Handling Spatial Data-The Voronoi Approach", *CISM Journal AC-SGC*, Vol. 45, No. 1, 1991, pp. 65-80.
  9. Kunnler, M.P., "A Quantitative Comparison of Regular and Irregular Digital Terrain Models", *Proceedings, GIS/LIS '90*, Vol. 1, 1990, pp. 255-263.
  10. Mckenna, D.G., "The Inwird Spiral Method an Improved TIN Generation Technique and Data Structure for Land Planning Application", *Proceedings of Auto-Carto 8*, 1988, pp. 670-679.
  11. McCullagh, M.J., and Ross, C.G., "Delaunay Triangulation of a Random Data Set for Isarithmic Mapping", *The Cartographic Journal*, Vol. 17, No. 2, 1980, pp. 93-99.
  12. Parent, P., and Church, R., "Evolution of Geographic Information Systems as Decision Making Tools", *Proceeding of GIS '87*, Vol. 1, 1987, pp. 63-70.
  13. Peucker, T.K., and Chrisman, N., "Cartographic Data Structure", *The American Cartographer*, Vol. 2, No. 1, 1975, pp. 55-69.
  14. Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little J.J., and Mark D.D., "The Triangulated Irregular Network", *Proceedings, DTM Symposium*, 1978, pp. 516-540.
  15. Ramirez, J.R., "Computer-Aided Mapping Systems: The Next Generation", *PE&RS*, Vol. 53, No. 10, 1991, pp. 85-88.
  16. Scarlatos, L.L., "A Compact Terrain Model Based on Critical Topographic Features", *Proceedings of Auto-Carto 9*, 1989, pp. 146-155.
  17. Sibson, R., "Locally Equiangular Triangulations", *The Computer Journal*, Vol. 21, No. 3, 1978, pp. 243-245.
  18. 이석찬, 조규전, 최병길, "이동평균법과 선형예측법을 이용한 수치지형의 보간에 관한연구", *한국측지학회지*, 제 4권 1호, 1986, pp. 58-71.
  19. 이석찬, 조규전, 이창경, 최병길, "비정규삼각망 데이터구조에 의한 수치지형모델의 구성", *한국측지학회지*, 제 8권 2호, 1990, pp. 1-8.

(接受 : 1994. 1. 8)