韓國地形空間情報學會論文集 第11卷 第1號 2003年 3月 pp. 77-82

불규칙삼각망에 의한 지형체적 산정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Terrain Volume Using Triangulated Irregular Network

정인주* · 김상용**

Jeong, In-Ju · Kim, Sang-Yong

要 旨

GIS는 지금까지 여러 학계를 걸쳐서 응용단계에 접어들었으며, 특히 토목분야에서도 많은 응용을 하고 있다. GIS를 이용한 공간분석에서 지형을 정확하게 표현하는 것은 매우 중요하며 향후 3차원적 해석을 하기 위해서는 중요한 인자가 될 수도 있다. 이러한 지형을 표현하기 위해 주로 불규칙삼각망을 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 불규칙삼각망에 의한 지형의 체적을 개발된 식에 의하여 산정을 하였다.

Abstract

Geographic information system extends several learned circles so far and took in application step. Specially, GIS is applying much in civil engineering works field, and is trying to express terrain numerically and look for true value. It is very important that express terrain, can become important parameter to do three-dimensional analysis in later. We are using irregularity triangulation network mainly to express these terrain. In this study, calculated volume of topography by irregularity triangulation by developed formula.

1. 서 론

공간분석을 하기 위해 90년도에 들어 지리정보체계(geographic information system, GIS)를 많이 응용하였다. 이후 2000년대에 들어서는 Virtual GIS와 연계를 이루어 실세계와의 접근을 하기 위해 노력하고 있다.

최근 GIS에서 3차원적인 지형표현을 위해서는 주로 불규칙삼각망(triangulated irregular network, TIN)과 수치표고모형(digital elevation model, DEM)을 이용하여 지형을 표현하고 있다(Lee et al., 1994; Kim et al., 2001).

본 논문에서는 델로니 삼각망 알고리즘을 이용하여 TIN을 구축하였다. TIN에 의해서 구축된 지형은 삼각형들의 조합으로 구성되어 있다. 그래서 개개의 삼각형에 대한 체적을 계산하게 되면 지형전체의 체적을 산정할 수 있다.

체적을 계산하는 방법에는 단면법, 등고선법, 점고법 등이 있으나(Beak et al., 1995), 본 연구에서는 TIN에 의하여 생성된 각각의 삼각형을 이용하여 체적을 산정하였다.

본 시스템은 처음 점고법에 의하여 체적을 산정할 수 있도록 구축되었으나, 침수위에 따른 지형의 체적을 산정할 경우 오차를 포함하고 있었으므로 체적산정식을 개발할 수밖에 없었다.

따라서 본 연구에서는 TIN에 의한 체적 계산시에 오차를 감소시키기 위하여 새로운 체적산정식을 개발하였으며 침수심에 따른 침수체적, 침수면적, 침수량을 산정할 수 있었다.

2. TIN의 구성방법

2.1 TIN의 구조

TIN은 불규칙하게 분포된 점들의 3차원 좌표(x, y, z)를 추출한 후 각 점을 삼각형으로 연결하여 지형을 표현하는 방식이다. 이러한 삼각형을 이용하여 지형의 경사도와 경사방향 등 지형 특성을 알 수 있다.

* 부경대학교 대학원 토목공학과 박사수료
** 부경대학교 공과대학 건설공학부 교수

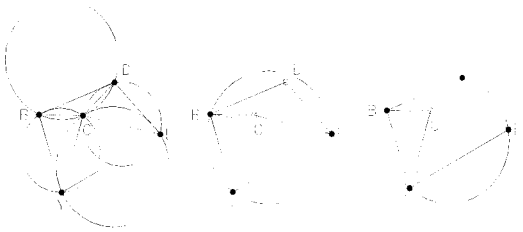

그림 1. 델로니 삼각망

경사의 크기와 방향에 대한 알고리즘은 고안되었으나, 수문분야에 적용 가능한 수학적 알고리즘은 더 많은 연구가 필요하다. 예를 들면 하천 유역경계를 결정하고 수문지형인자와 TIN과의 연관성 등의 결정이 이에 속한다고 말할 수 있다.

TIN은 위상모형의 하나로서 각각의 삼각형을 구성하는 세 점에 대한 평면좌표(x, y)와 표고를 갖고 있다. 여기서 표고는 TIN을 구축하는데 중요한 인자이다.

TIN 모형의 주요 이점은 적은 자료의 양으로 복잡한 지형을 상세히 나타낼 수 있으며, 복잡한 지형의 경우 작은 삼각형을 이용하여 자료의 밀도가 높은 TIN을 구성할 수 있다. 즉 계곡이나 골짜기 등의 특이 지형을 표현하기 위해서는 자료의 밀도를 높임으로써 지표면의 형태를 정확하게 나타낼 수 있다(Kim et al., 2001; Shin et al., 1999).

2.2 델로니 삼각망(Delaunay triangulation)

수치표고모델에서 TIN은 불규칙하게 위치하고 있는 절점들의 상호 기하학적 관계를 구축함으로써 지형의 3차원적인 표현을 가능하게 하기 위한 구조이다. 이러한 TIN 데이터 구조는 대부분 델로니 삼각망(Delaunay triangulation)에 그 바탕을 두고 있다. 델로니 삼각망은 세 개의 절점을 연결한 삼각형의 외접원안에 다른 점이 포함되어 있지 않도록 연결된 삼각망을 말한다(Shin et al., 1999; Rebay, S., 1993). 델로니 삼각망의 각 변의 이등분선으로 만들어지는 다각형을 보로노이 다각형(Voronoi diagram) 또는 티센 다각형(Thiessen's polygon)이라 한다. 이러한 보로노이 다각형의 꼭지점이 델로니 삼각망의 외접원의 중심이다.

본 연구에서는 한 개의 절점과 선분에서 반시계방향으로 각을 측정했을 경우 가장 큰 값을 가지는 선분을 찾고, 새로운 절점에서 같은 방법으로 선분을 찾아 중복되는 선분이 나왔을 때 삼각형을 형성하는 알고리즘에 의하여 TIN을 구축하였다(Shin et al., 1999).

3. 지형체적의 계산

3.1 체적 계산 방법

체적을 계산하는 방법으로는 단면법, 등고선법, 점고법 등이 있다. 단면의 형상이 불규칙한 경우에는 구적기를 이용하여 면적을 구하는 경우가 많지만, 비교적 규칙적인 경우에는 수치계산법을 활용하면 좋다(Beak et al., 1995).

3.2 점고법

넓은 지역 또는 택지조성공사 등에 필요한 토공량을 계산하는데 응용된다. 일반적으로 단면적이 평면이면 어떠한 형상이더라도 그 체적은 두 단면의 중심 사이에 연직거리에 단면의 수평면적을 곱한 것과 같다. 그림 2에서 사각형에 대한 밑면적을 A, 네 점의 높이를 h_1, h_2, h_3, h_4라고 하면 밑면이 사각형인 경우(그림 2.a) 체적 V는

$$V=\frac{1}{4}A(h_1+h_2+h_3+h_4) \tag{1}$$

이고, 삼각형인 경우(그림 2.b) 밑면적을 A′라 할 때

$$V=\frac{1}{3}A'(h_1+h_2+h_3) \tag{2}$$

로 구할 수 있다.

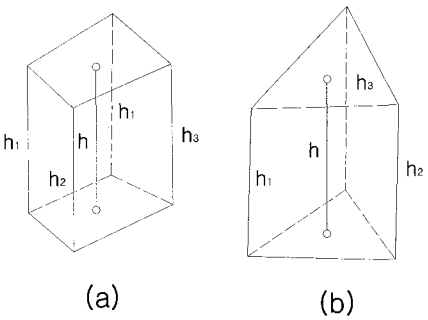

그림 2. 점고법

4. 지형체적 계산 방법 개발

4.1 TIN에 의한 삼각형의 구성

TIN에 의해 생성된 삼각형은 x, y, z의 좌표 정보가 있는 절점 3개를 가지고 있다(Kim et al., 2000). 여기에서 삼각형의 표고를 0으로 주어 삼각형의 투영단면적을

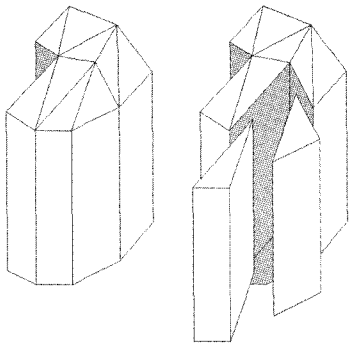

그림 3. 삼각망에 대한 삼각기둥 형성

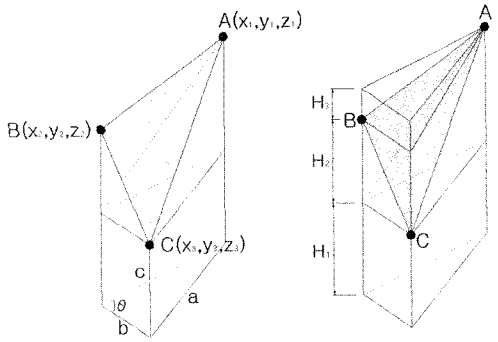

그림 5. 3점 표고가 다른 삼각기둥

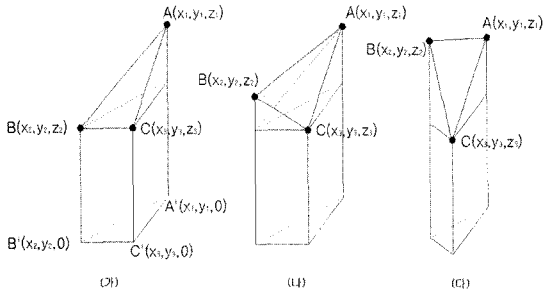

그림 4. 삼각형의 종류

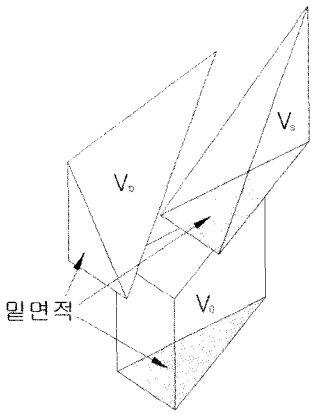

그림 6. 삼각형 체적의 분할

만든다. 이렇게 되면 투영된 삼각형의 면적을 밑면으로 한 삼각기둥이 생성이 되는데 이러한 삼각기둥의 체적을 각각에 대해서 계산하여 합산하게 되면 지형전체의 체적을 산정할 수 있다.

삼각기둥의 형태는 그림 4에서와 같이 세 가지의 경우로 구분할 수 있었다. 즉 각 절점의 표고가 모두 다른 경우(그림 4.나), 아래쪽 두 점(B, C)의 표고가 같은 경우(그림 4.가), 위쪽 두 점(A, B)의 표고가 같은 경우(그림 4.다)의 세 가지 이다. 이 중 (나)의 경우가 가장 일반적이므로 이것에 대하여 새로운 체적계산 방법을 개발하였다.

4.2 삼각기둥 형태의 체적계산

삼각기둥의 체적은 그림 5, 6과 같이 크게 3가지 부분으로 구분하여 산정하였다. 즉 삼각기둥의 형태(V_0), 삼각뿔의 형태(V_S, V_P)의 3가지 부분이다.

V_0는 삼각기둥으로써 밑면적(A_0)과 높이(H_1)를 곱하여 체적을 계산할 수 있으며, V_s는 삼각뿔의 형태로써 밑면적(A_0)과 높이(H_2+H_3)를 곱한 값에 1/3을 곱해주면 된다. 그리고 V_p의 계산은 그림에서 보이는 옆면의 직각삼각형을 밑면으로 보았을 때 구할 수 있는데 그 높이는 $c\cdot\sin\theta$가 된다.

그림 6에서는 삼각형에 대한 체적을 좀더 자세하게 세분화한 그림이다. 그림에서 보는바와 같이 삼각형의 체적은 세 가지 요소로 구분하여 산출할 수 있었다.

삼각형의 체적 중 가장 아래 삼각기둥의 체적 V_0는 식 (3)과 같다.

$$V_o = A_0 \cdot H_1 \tag{3}$$

여기서, 밑면적 $A_0 = \frac{1}{2} b \cdot c \cdot \sin\theta$이다.

밑면적을 A_0로 하는 삼각뿔의 체적 V_s는 을 산정하면 식 (4)와 같다.

$$V_S = \frac{1}{3} A_0 (H_2 + H_3) \tag{4}$$

끝으로 또 다른 삼각뿔의 체적은 옆면에 빗금친 부분(B)을 밑면적으로 하는 삼각뿔로 간주하면 식(5)과 같다.

$$V_P = \frac{1}{3}\left\{\left(\frac{1}{2} b \times H_2\right) \times c\sin\theta\right\} \quad (5)$$

따라서, 전체체적(V_t)은 (3), (4), (5)식으로부터 다음과 같이 된다.

$$\therefore \quad V_t = A\left\{H_1 + \frac{2}{3} H_2 + \frac{1}{3} H_3\right\} \quad (6)$$

4.3 체적의 검증

본 연구에서 개발한 체적 산정식을 검정하기 위해서 그림 7과 같은 원뿔모양을 만들어 TIN을 구축하여 식 (6)에 의해서 체적을 산정하고, 또 ArcView를 통하여 산정한 후 서로 값을 비교하여 검정하였다.

본 시스템에서 TIN은 델로니 삼각망에 의하여 구축하였으며, OpenGL를 이용하여 표시하였다.

원뿔의 체적을 이론계산, ArcView, 개발된 식에 의해서 계산을 수행하여 표 1에서와 같이 산정할 수 있었다. 그러나 이론계산에 의하여 구할 때는 밑면적 A_0를 완전한 원형으로 보지만, 본 연구에서는 원뿔을 TIN으로 구축하기 위하여 그림 10과 같이 원(circle)를 구성하는 선분 위에 절점을 추가하였다(Kim et al., 2001). 따라서 정확한 원형을 이루지 않기 때문에 단면적에 대한 오차는 존재하지만 절점이 많아진다면 오차를 줄일 수 있다. 그러나 수치지도의 데이터 용량이 커졌을 경우 절점이 많아지면 정확도는 높아지겠지만 TIN을 구축하는 작업 수행 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.

표 1에서 보는바와 같이 면적을 산정한 경우에는 ArcView보다 개발된 식이 오차율 0.7%로 더 적게 산정되었다. 그리고 체적의 경우에는 ArcView와 개발된 식에 의한 모든 경우에 대해서 오차율 0.9%로 같게 산정되

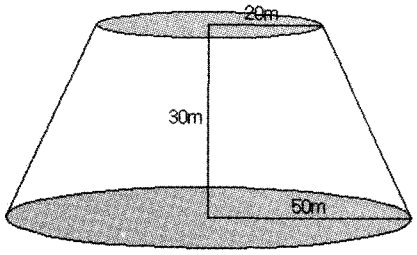

그림 7. 검정을 위한 원뿔

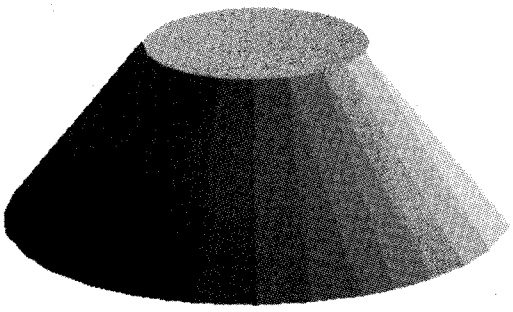

그림 9. 본 연구에서 구축한 TIN

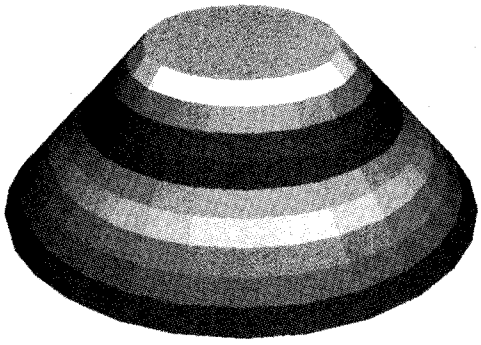

그림 8. ArcView에 의한 TIN 구축

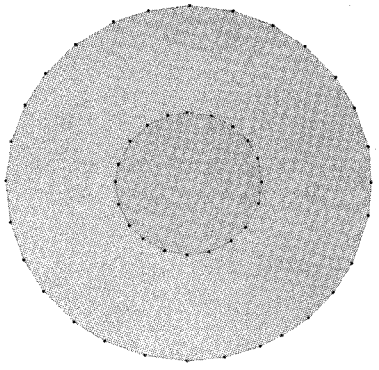

그림 10. 절점의 추가

표 1. 체적의 산정

구분	이론값	ArcView	개발된 식	편차		오차율(%)	
				ArcView	개발된 식	ArcView	개발된 식
밑면적(m^2)	7,854.0	7,789.9	7,802.6	64.1	51.4	0.8	0.7
체 적(m^3)	122,522.1	121,474.5	121,474.6	1,047.6	1,047.5	0.9	0.9

었다. 이에 따라 체적을 산정할 경우 ArcView 등의 외부 프로그램을 이용하지 않고 본 시스템(그림 14)을 이용하여 체적을 산정할 수 있으므로 향후 이와 같은 연구에 대한 발전성은 높다고 판단된다.

5. 대상지형에 적용

5.1 대상지형

실제 지형에 적용하기 위하여 부산광역시에 위치하고 있는 수영강 유역의 특정 지구를 지정하여 축척 1/1,000 수치지형도를 이용하여 체적을 산정하였다. 지형의 체적은 참값을 찾는 것은 매우 어렵다. 그래서 본 연구에서는 ESRI社의 ArcView를 이용하여 체적을 산정한 후 본 시스템에서 산정된 값과 비교 검토하였다.

그림 11은 부산광역시 수영강 유역내에 있는 반여지구이다. 수치지도의 중간 부분에는 수영강 본류가 흐르고 있다.

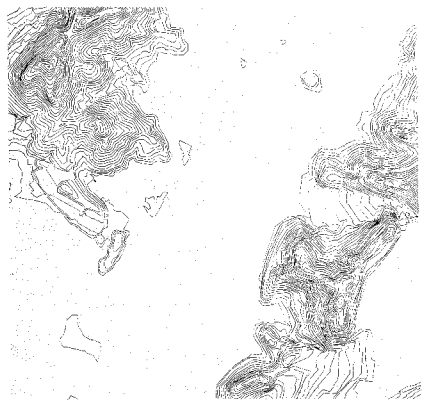

그림 11. 반여지구(1/1,000)

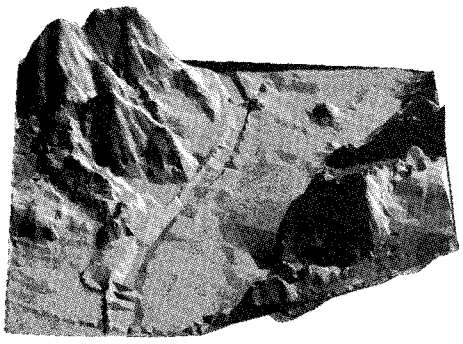

그림 12. 시스템에 의한 TIN 구축

5.2 대상지형에 적용

5.2.1 본 시스템에 의한 TIN 구축

본 시스템은 델로니 삼각망에 의해 TIN을 구축하였다. 그림 12는 본 시스템에 의해서 구축된 TIN을 보여주고 있다. 지형과 하천은 각각의 불규칙삼각형들이 모여서 OpenGL를 통하여 표시된다.

5.2.2 ArcView에 의한 TIN 구축

그림 13은 ArcView를 이용하여 TIN을 구축한 모습을 보여주고 있다.

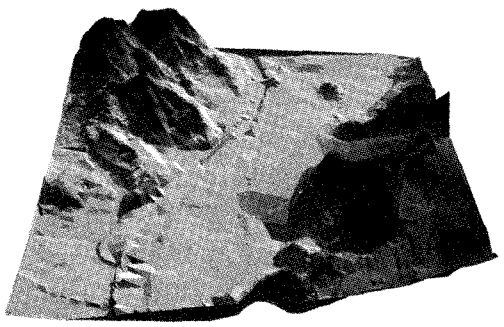

그림 13. ArcView에 의한 TIN 구축

5.3 지형체적의 계산 및 비교

델로니 삼각망의 알고리즘을 이용하여 TIN을 구축하고 삼각기둥에 의하여 산정한 체적과 ArcView를 이용하여 체적을 산정하여 비교해 보았다.

본 시스템과 ArcView에서 지형의 단면적과 체적을 산정한 결과는 아래 표 2와 같다. 4.5절에서 체적의 검정은 이루어졌으므로 본 연구에서는 개발된 식에 의하여 시스템을 구축하였으며, 점고법에서는 고려하지 못한 침수심에 따른 지형의 체적, 면적, 침수량을 산정할 수 있었다 (그림 14).

표 2. 지형체적산정의 결과

구분	개발된 식	ArcView
지형면적(m^2)	5,034,859.0	5,035,781.6
체 적(m^3)	215,474,552.9	215,241,075.4

5.4 본 시스템의 인터페이스

그림 14는 본 시스템의 인테페이스를 소개하였다. 본 시스템은 *.dxf 파일의 수치지도를 불러올 수 있으며 불러온 수치지도에 대해서 TIN을 구축하여 *.rms파일로

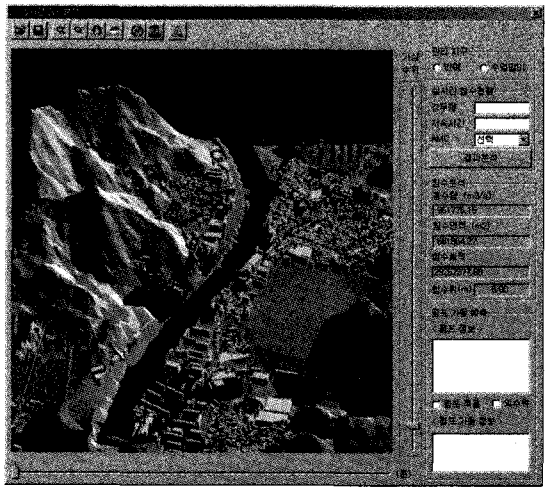

그림 14. 시스템의 인터페이스 소개

저장하게 되어 있다. 확장자 rms는 river management system의 약어로서 본 시스템에서 인식할 수 있는 파일이다. 이유는 확대 및 축소를 하게 될 경우 화면에 보여주는 지형은 또 다시 TIN을 그려 보여주게 되므로 속도가 매우 늦어진다. 이러한 단점을 보안하기 위하여 본 시스템에서는 구축된 TIN을 파일(*.rms)로 저장하였다.

본 시스템은 수영강 유역 중 반여지구와 수영망미지구의 상습침수 지역을 대상으로 관리할 수 있는 시스템으로 설계되어있다. 이렇게 유역에 대한 한계를 두는 것은 강우유출에 의한 홍수량을 산정해야 하기 때문이다. 그림 14는 TIN을 구축하여 침수심에 따른 침수면적과 침수체적을 산정할 수 있는 본 시스템의 초기화면으로써 소개한다.

6. 결 론

Virtual GIS을 이용한 침수를 분석을 위하여 체적 산정에 관한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 델로니 삼각망 알고리즘을 이용하여 TIN을 본 시스템에서 직접 구축함으로써 침수분석시 침수면적과 침수량을 침수심에 따라 값을 추출할 수 있었다.
2. 체적 산정법의 하나인 점고법에 의하여 침수심에 대한 체적을 산정할 경우 경사진 각각의 삼각형은 오차를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 따라서 침수심에 대한 체적을 개발된 식에 의하여 산정함으로써 경사진 삼각형에 대한 체적 오차를 소거할 수 있었다.
3. 강우에 의한 홍수량을 침수심에 따라 지형 위에 표현하는데 있어서 오차를 줄였으며, 침수범위를 좀더 정확도가 높은 값으로 표현할 수 있었다.

향후과제

지리정보체계를 활용하기 위해서는 향후 계속 해결해야할 문제점들이 많이 제시될 것이라고 생각된다. 지금까지 강우에 의한 홍수량을 지형에 표현하기 위해서는 정확도가 높은 지형체적을 계산해야 하였기 때문에 연구를 수행하였다. 이에 따라 최근 이상 기후에 의한 유역의 침수분석을 인터넷 서비스까지 확장하여 강우에 대한 침수범위를 신속히 예측하고 예방하여 자연재해의 피해를 줄이는데 도움을 주고자 한다.

참고문헌

1. 이석찬, 고영호, 이창경, 최병길, "비정규삼각망 데이터구조에 의한 지형의 수치화", 대한토목학회논문집, 제14권, 제2호, 1994, pp. 328-329.
2. 김상성, 장용구, 곽재하, 김윤수, "불규칙삼각망을 이용한 골프장의 지표면적 산출에 관한 연구", 한국지리정보학회지, 제4권, 제4호, 2001, pp. 61-71.
3. 신봉호, 양승룡, 송왕재, 김용태, 정성훈, "불규칙삼각망을 이용한 수치지형모델 구축", 충북대학교 건설기술연구소 논문집, 제18권, 제1호, 1999, pp. 51-60.
4. 김의명, 이석균, 김태균, "방사삼각망알고리즘을 이용한 불규칙삼각망의 생성과 경사분석", 대한토목학회논문집, 제20권, 6-D호, 2000, pp. 701-708.
5. 백은기, 육찬상, 김원익, 김감래, 강양진, 이영진, 측량학, 청문각, 제2판, 1995, pp. 205-210.
6. Rebay, S., "Efficient Unstructured Mesh Generation by Means of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm," Journal of Computational Physics, Vol. 106, 1993, pp. 125-138.

(접수일 2003. 1. 3, 심사 완료일 2002. 2. 15)