

Digital Terrain Model 을 이용한 土工量算定

Earthwork Volume Computation by Digital Terrain Model

李	石	贊*
Lee,	Suk	Chan
申	鳳	浩**
Shin,	Bong	Hoo
李	在	晶***
Lee,	Jae	Hyo

Abstract

According to development of the areial photogrammetry, it is uneconomical to acquire the terrain information and compute the earthwork volume of each building site by a field surveying which is used recently because it is acquired much money and time.

The aim in the this thesis is to acquire the terrain information using the Digital Terrain Model (DTM) to gain in the aerial photograph and compute the rapid and economical earthwork carrying out digital test.

Because of being little difference between the digital test and field (site) surveying in the earthwork volume, that result is fitter in preliminary planning than in practical planning to the extent.

要 旨

航空寫眞測量이 發達함에 따라서 現在 使用되고 있는 方法인 現場測量으로서 各 宅地들에 대하여 地形情報를 蒐集하여 土工量을 算出한다는 것은 費用이나 時間이 많이 要求되기 때문에 非經濟的이다.

따라서 本 研究에서는 航空寫眞에서 얻은 數值地形모델 (DTM)을 利用하여 地形情報를 蒐集하고 이를 數值試驗하므로서 迅速하고 經濟的인 土工量을 算定하는데 그 目的이 있다. 數值試驗을 해서 土工量을 計算한 結果, 現場 測量으로부터 算出된 土工量과 差異가 微小하므로 精密度面으로 보아 計劃 및 豫備設計時에 適合할 것으로 여겨진다.

*正會員·漢陽大學校 工科大學 教授, 土木工學科

**正會員·忠北大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

***正會員·忠北大學校 工科大學 助教, 土木工學科

1. 序 論

航空寫眞測量을 利用하는데 最近의 傾向은 資料(data)處理를 위하여 컴퓨터의 使用이 많아진 結果, 數值寫眞測量이 發達해 왔다. 數值寫眞測量으로부터 얻은 結果인 數值地形모델 (Digital Terrain Model)은 1958年 美國의 M.I.T. 工科大學의 Miller, C.L. 과 Lafame, R.A.⁽¹⁾에 의해 DTM 理論 및 應用에 관한 研究가 처음으로 시작되었다. 그 당시 目的은 간단한 道路設計에 있어서 土工量을 計算하여 比較路線을 決定하는데 使用되었다.

그후, 1976年 花란에서 DTM의 發展을 土木工學, 地圖製作, 產業分野 等の 特別한 應用 쪽에 適用시켜 DTM 資料蒐集(data acquisition), 資料處理(data processing), 資料遂行(data application)으로 體系의인 研究가 Makarovic, B.⁽²⁾에 의해 發表되었다.

따라서 本 研究는 航空寫眞에서 地形을 數值化시키는 一般의인 DTM에 관한 理論을 解析하여, DTM의 活用度를 넓히고, DTM 資料와 現場測量에서 얻은 地形資料를 利用해서 DTM에 의한 標高 및 土工量算定方法을 考察하고, 각각의 差를 比較하여 精密度를 分析하므로써 DTM 利用에 대한 實驗資料를 提供하는데 그 目的이 있다.

2. Digital Terrain Model의 理論

2.1. DTM의 概論

數值地形모델 (Digital Terrain Model; DTM)은 地形의 數值化 또는 記號化된 地表面에 관한 測定資料로부터 標高, 傾斜, 傾斜方向 等の 地形情報를 얻을 수 있는 모델을 의미한다^(1,3). 즉, 地表面上에 있는 임의의 點들의 3次元 座標를 測定한 후, 測定된 座標값을 컴퓨터에 入力시켜 地表面의 한 區間을 幾何學的으로 再現하는 것을 말한다^(1,3).

그러므로 地形을 數值化하는 境遇에는 다음 事項을 考慮하여야 한다⁽⁶⁾.

1) 地形情報의 數值化

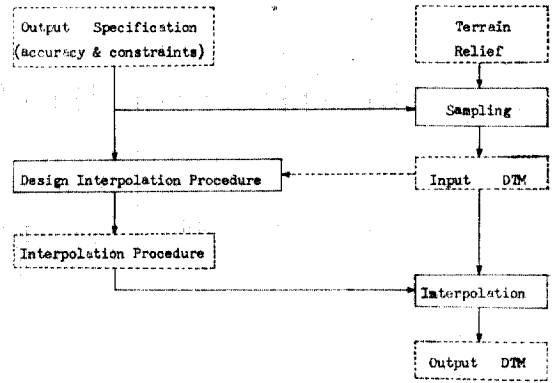


그림 2-1. Relation of sampling-interpolation

- 2) 必要한 精度
- 3) 地形情報의 蒐集方法
- 4) 補間法의 利用方法
- 5) 地形資料蒐集 機械의 選定

그리고, DTM은 다음과 같이 두 가지 重要한 基本役割로 區分한다.

- 一連의 標本點 資料(標本抽出法 問題)
- 地形表面(또는 線)의 幾何學的 再現方法(補間法 問題)

따라서, 標本抽出法과 補間法은 相互連關되어 있으며, 이들 連關性은 地形의 形態에 따라 큰 影響을 받는다^(1,2,7)(그림 2-1. 參照).

2.2. 數值資料 蒐集方法

DTM에 使用되는 資料는 現場測量成果, 航空機나 人工衛星에 탑재된 레이더와 레이저 高度計에 의해서 直接 蒐集할 수 있다. 또한 地形圖, 航空寫眞의 立體모델에 의해서도 間接 蒐集할 수 있으며 위 두 方法을 混合해서 蒐集하는 方法도 있다^(2,4)(그림 2-2. 參照).

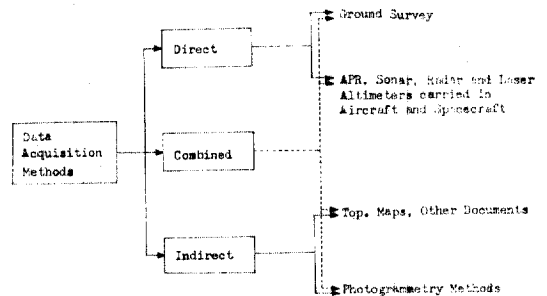


그림 2-2. Classification of data acquisition methods

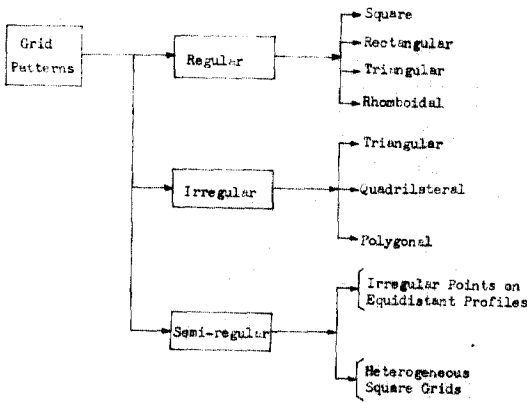


그림 2-3. Classification of grids

위에서蒐集한資料의結果는格子網을形成하게되는데,그格子網은正規格子網,不規則格子網,半正規格子網으로分類할수있다(2,8)(그림 2-3. 參照).

2.3. 數值資料處理

앞節에서蒐集한資料는즉시應用될수없기때문에適用이가능한形態로變換하기위해서는다음과같은處理가要求된다(4).

- 1) 資料壓縮(data editing)
- 2) 形態變換(format conversion)
- 3) 座標變換(coordinate transformation)
- 4) 補間法(interpolation)

2.4. DTM의 應用

DTM의 應用은 다음과 같이 分類할 수 있다(6).

- 1) 等高線 決定
- 2) 地形豫測
- 3) 道路設計 및 宅地造成設計에 있어서 土工量 算定
- 4) 土木計劃 및 設計에 必要한 地形情報의 分析 및 合成
- 5) 最適宅地計劃을 위한 地形資料 記錄 및 崩壞되기 쉬운 地帶에 있어서 危險度 豫測
- 6) 統計分析, 土地利用統計, 農村計劃, 自動車 및 船舶의 물체 構造, 水理, 水文, 海洋, 氣象, 醫學分野 等에도 應用될 수 있다.

2.5. 地形의 分類

地形은 많은 起伏을 가지며, 千差萬別의 曲面을 組合시킨 것이다. 그러므로 DTM과 關連하여 地形을 分類할 때에는 一般的으로 定量的 分類, 定性的 分類, 또는 定量·定性的 分類方法으로 크게 나눌 수 있다(2,3).

따라서 가장 普遍的으로 使用되는 地形分類法은 定量·定性的 分類法인 Silar 方法으로서 다음 表 2-1과 같다(9).

表 2-1. Terrain classification by Silar method

區分	地形의 性格	斷線의 數	標本點의 數
部類 I	單純, 平坦, 規則的인 地形	$t < 10/ha$	20~40/ha
部類 II	規則的이나 複雜한 地形	$t = 10 \sim 20/ha$	40~100/ha
部類 III	不規則的이며, 매우 複雜한 地形	$t > 20/ha$	100~400/ha
部類 IV	많은 土工量과 斷線을 포함한 人工的 地形		

t : 局部的 起伏의 數量과 地形破壞線의 數量을 合하여 算한다.

2.6. 補間法

補間法이란 未知點을 推定하여 算定하는 것으로 定義되어진다. 즉, DTM 속에서 주어진 平面座標(X, Y)의 1點 높이(Z)를 計算하기 위하여 많은 補間法이 使用된다. 地形의 形態에 따라 適當한 補間法을 選擇한다(10).

1) Uniform Grid System

그림 2-4에서 각 基準點의 3次元 絕對座標는 圖化機 및 精密座標圖化機를 利用하여 寫眞 모델로부터 求하여지며, 모델座標((X_M, Y_M, Z_M))를 絕對座標(X_G, Y_G, Z_G)로 變換하는 式은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} = L \cdot R \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (2-1)$$

여기서,

L; scale factor

R; 3×3 orthogonal rotation matrix

이들 絕對座標에 의하여 P點의 높이를 구하려면, Z_B, Z₀로부터 直線으로 補間된 Z_A를 計算하고, Z_A, Z₀로부터 直線으로 補間된 Z_B를 計算해서, Z_A, Z_B로부터 直線으로 補間되는 Z_P를 求한다.

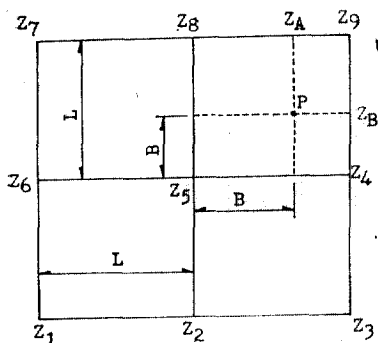


그림 2-4. Uniform grid DTM

$$Z_p = Z_5 \left(1 - \frac{B}{L}\right) \left(1 - \frac{A}{L}\right) + Z_4 \left(\frac{B}{L}\right) \left(1 - \frac{A}{L}\right) + Z_8 \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{A}{L}\right) + Z_9 \left(\frac{A}{L}\right) \left(1 - \frac{B}{L}\right) \quad (2-2)$$

2) Triangula Facet Method

그림 2-5에서測定된 絶對座標(X, Y, Z)는 點 1, m, n 을 통해서 보여준다. 여기서 X_p, Y_p 가 주어진 P 點의 높이 Z_p 를 알기 위한 平面方程式은 $Z = Ax + By + C$ 이고, A, B, C는 常數이다. 이들 常數값을 求하기 위해서는 다음과 같은 形態로 할 수 있다.

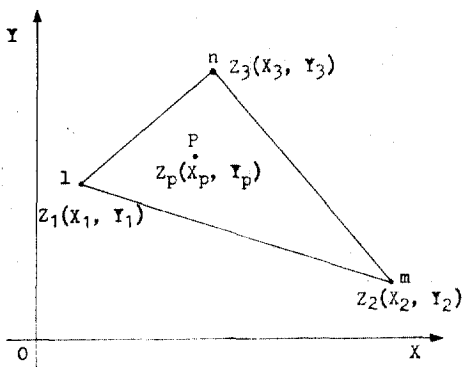


그림 2-5. Triangular facet DTM

$$\text{즉, } \left. \begin{aligned} Z_1 &= Ax + By + C \\ Z_2 &= Ax + By + C \\ Z_3 &= Ax + By + C \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式 (2-3)으로부터

$$A = \frac{(Z_1 - Z_2)(Y_1 - Y_3) - (Z_1 - Z_3)Y_1 - Y_2}{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_3) - (X_1 - X_3)(Y_1 - Y_2)}$$

$$B = \frac{(Z_1 - Z_2) - A(X_1 - X_2)}{(Y_1 - Y_2)}$$

$$C = Z_1 - Ax_1 - By_1$$

(2-4)

그러므로,

$$Z_p = Ax_p + By_p + C \quad (2-5)$$

3) Random Points

이 方法은 未知點의 標高를 求하기 위하여 主위의 既知點들로부터 解析的으로 求하며 最小自乘法的의 原理에 의해 最適化할 수 있다.

만일, 알고 있는 (X, Y, Z) 座標의 $Z = Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F$ 와 n 點들을 알지 못하는 點높이 主위에서 選擇한다면, 여기서 $n > 6$ 므로, 그때 n 觀測方程式은 6개의 미지수 A, B, C, D, E, F를 求하기 위해 誘導된다. 보통 加重係數(weighting system)는 알지 못하는 높이에서 가장 가까운 點들의 높이가 멀리있는 點들보다 加重值(weight)가 더 높기 때문에 應用된다. 만일 d가 높이를 알지 못하는 點에서 알고 있는 點까지의 距離라면, 그때 加重值는 $(1/d^2)$ 에 比例함으로써 얻을 수 있고 다음의 數式이 假定될 수 있다.

$$AK = Z \quad (2-7)$$

W는 $(1/d^2)$ 항이 대각선으로 되는 加重值매트릭스이다.

$$W = \begin{pmatrix} \omega_1 & & \\ & \omega_2 & \\ & & \dots \\ & & & \omega_i \end{pmatrix} \quad (2-8)$$

여기서, ω_i 는 基準點까지의 距離에 대한 函數로 表現된다.

最小自乘法에 의해

$$A^T W A (K) = A^T W Z \quad (2-9)$$

$$(K) = (A^T W A)^{-1} A^T W Z \quad (2-10)$$

基準點에 對한 A_0 값을 대입하면, 求하고자 하는 點의 높이 Z_p 는

$$Z_p = A_0 (A^T W A)^{-1} A^T W Z \quad (2-11)$$

4) 等高線(contours)方法

地形情報源을 航空寫眞을 利用하면 格子狀으로도 되고, Random 狀으로도 되는 地形點의 配置로 對應된다. 그러나 地形情報源을 等高線地圖를 利用하는 경우에는 그림 2-6과 같이 等高線狀으로 地形點을 抽出할 수 있다^(6,13). 圖化機 및 座標測定機로 求한 (X, Y)座標를 自動的으로 記錄하는 electronic digitising 裝置로 等高線을

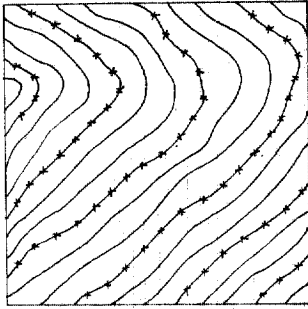


그림 2-6. Method of contour

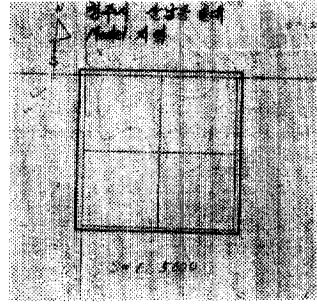


그림 3-1. Topographic of model site

따라計劃한 座標를 測定함에 의해 DTM 算定이 可能하다.

3. 數值試驗

3.1. 數值試驗에 使用된 地形모델

- 1) 地形의 種類; 普通山岳地域
- 2) 位 置; 忠北 淸州市 山南洞 一帶
(그림 3-1 參照)
- 3) 모 델 面 積; 40,000m²(200×200m)
- 4) 航空寫眞縮尺; 1:20,000
- 5) 圖 化 縮 尺; 1:3,000(그림 3-2 參照)
- 6) 使用 카메라; ① 種類; Wild RC 10(廣角 카메라)
② $f=153.35\text{ mm}$
- 7) 撮 影 高 度; 3,190 m
- 8) 撮 影 年 度; 1984.4.
- 9) 圖 化 機; Wild A₈
- 10) 格 子 間 隔; 10 m
- 11) 座標 및 距離 測定; ① E.D.M(良好한 測定거리 3 km; Sokkisha Co.)
② Theodolite(6" 毒; Topcon Co.)
- 12) 補 間 法; Uniform Grid System
- 13) 使用 Computer; VAX 11,

3.2. 數值試驗方法

2.에서 考察된 理論들을 基本으로 다음과 같이 數值試驗을 施行하였다.

試驗 1; DTM 資料와 實際地形資料를 가지고

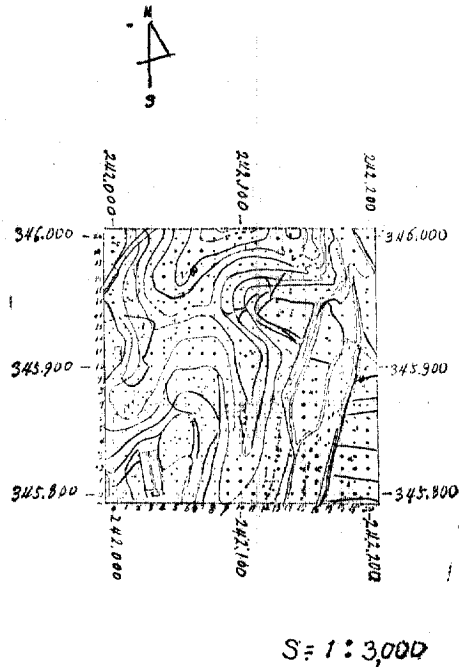


그림 3-2. DTM graphic by photographs

標高 및 土工量을 計算하여 比較分析
試驗 2; DTM 圖를 作成하여 航空寫眞에서
얻은 正射寫眞圖와 比較分析

이 試驗은 實際地形모델에서 E.D.M 과 테오
돌라이트로 地形資料를 얻고 航空寫眞으로부터
얻어진 DTM에서 正方形 10 m 間隔으로 200 m
內的 DTM 資料를 가지고 標高(elevation) 및 土
工量(earthwork volume)을 각각 比較檢討하였다.
土工量計算은 忠北大學校 工科大學內 附屬 電

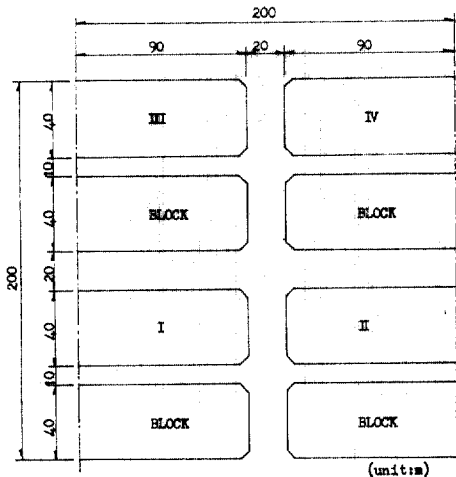


그림 3-3. Site plan of project

算所に 비치되어 있는 VAX 11의 컴퓨터를 사용하여, 모델地域の 計劃高를 宅地部分은 69.5m, 道路部分은 69.3m로 定하고, 座標法에 의해 橫斷面積을 求해서 兩端面平均法으로 切土量 및 盛土量を 算出하였다. DTM圖 作成은 韓國科學技術院에 있는 HP 3,000 컴퓨터로 作成하였다.

그림 3-3은 地形모델 地域의 宅地造成 計劃圖이다.

3.3. 斷面積, 土工量の 計算

1) 斷面積의 計算

이 數值試驗에서 使用된 斷面積計算은 座標法에 의해 求하였다. 그림 3-4는 n 개 點들에 의해 決定된 橫斷面積이다. 각 點들의 위치는 中心線으로부터 n 點의 수평거리(X_i)와 높이(Z_i)에 의해 決定된다.

式 (3-1)은 座標法으로 橫斷面積을 求하는 一般의인 式이다^(14,15).

$$A = \frac{1}{2} \{ Z_1(x_2 - x_n) + Z_2(x_3 - x_1) + Z_3(x_4 - x_2) + \dots + Z_n(x_1 - x_{n-1}) \} \quad (3-1)$$

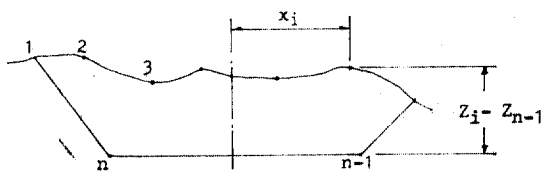


그림 3-4. Cross section geometry

2) 土工量の 計算

土工量の 計算을 가장 一般的으로 實務에 많이 使用되는 兩端面平均法을 使用했다⁽¹⁴⁾.

$$v = \frac{l}{2} (A_1 + A_2) \quad (3-2)$$

여기서,

v ; 두 斷面(그림 3-5) 사이에 土工量

l ; 두 斷面사이의 中心線에 따른 距離

A_1, A_2 ; 두 斷面의 橫斷面積

그러므로 全體의 土工量은 개개 斷面의 土工量 v_i 의 代수의 和에 따라 計算된다.

$$V = \sum_{i=1}^n v_i \quad (3-3)$$

여기서, n ; 土工量 斷面의 總數

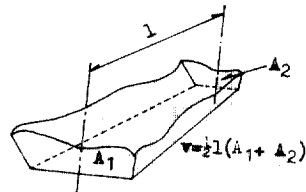


그림 3-5. Average end area method

4. 數值試驗結果에 대한 比較分析 및 考察

4.1. 縱斷面의 數值結果에 대한 比較分析 및 考察

DTM에 대한 橫斷面의 數值結果는 表 4-1과 같다.

表 4-1. Numerical comparison of logitudinal section (unit : m)

측 점	경 거 (Y좌표)	위 거 (X좌표)	높이(Z좌표)		DTM- 현장측량
			DTM	현장측량	
No. 0	345,800	242,100	70.6	71.042	-0.442
No. 1	345,810	242,100	70.5	70.837	-0.337
No. 2	345,820	242,100	70.3	70.585	-0.285
No. 3	345,830	242,100	70.0	69.978	0.022
No. 4	345,840	242,100	69.4	69.623	-0.223
No. 5	345,850	242,100	69.4	69.636	-0.236
No. 6	345,860	242,100	69.6	69.751	-0.151
No. 7	345,870	242,100	69.8	70.514	-0.714
No. 8	345,880	242,100	70.0	70.469	-0.469
No. 9	345,890	242,100	70.5	71.142	-0.642
No. 10	345,900	242,100	71.2	71.531	-0.331

No. 11	345,910	242,100	71.9	72.053	-0.153
No. 12	345,920	242,100	72.7	72.627	0.073
No. 13	345,930	242,100	73.7	73.145	0.555
No. 14	345,940	242,100	74.1	73.978	0.122
No. 15	345,950	242,100	74.3	74.454	-0.154
No. 16	345,960	242,100	74.8	74.691	0.109
No. 17	345,970	242,100	76.0	76.114	-0.114
No. 18	345,980	242,100	78.7	78.793	-0.093
No. 19	345,990	242,100	82.2	81.985	0.215
No. 20	346,000	242,100	83.4	83.506	-0.106

여기서,

平均誤差=

$$\{\sum(-v) + \sum(+v)\} / N = -0.160 \text{ m}$$

$$\text{平均제곱근誤差} = \pm \sqrt{\sum(vv) / N} = \pm 0.326 \text{ m}$$

$$\text{精 度} = \text{平均誤差} / \text{攝影高度} = 1 / 19,937.5$$

위에서算出된結果로 보아 DTM 標高는 現場測量으로부터 얻은 地上標高와 약간의 差異를 가져왔으나 攝影高度에 대한 平均誤差 즉, 精度는 1/19,937.5 로 양호한 結果를 가져왔다.

4-2. 全體土工量의 比較分析 및 考察

모델地域의 全體 土工量은 表 4-2 와 같다.

表 4.2. Comparison of whole amount of earthwork (unit : m³)

區分 土量	DTM	現場測量	DTM-現場 測 量	備 考 (%)
盛土量	76954.05	78983.035	-2028.985	-2.64
切土量	89753.65	90411.440	-657.790	-0.73
合 計	166707.70	169394.475	-2686.775	-1.61

表 4-2 의 結果처럼 DTM 에서 算出된 土工量은 現場測量으로부터 算出된 土工量보다 盛土量이 2.64 %, 切土量이 0.73 % 적게 算出되었다. 이 정도의 差異는 넓은 宅地를 造成하기 위한 全體 土工量 計算에서는 무시할 수 있으므로 土工量計劃에 DTM 의 利用이 가능한 것으로 思料된다.

4.3. DTM 圖와 正射寫眞圖와 比較

그림 4-1 과 같이 DTM 圖와 正射寫眞圖는 유사한 形態를 이루고 있음을 알 수 있었다.

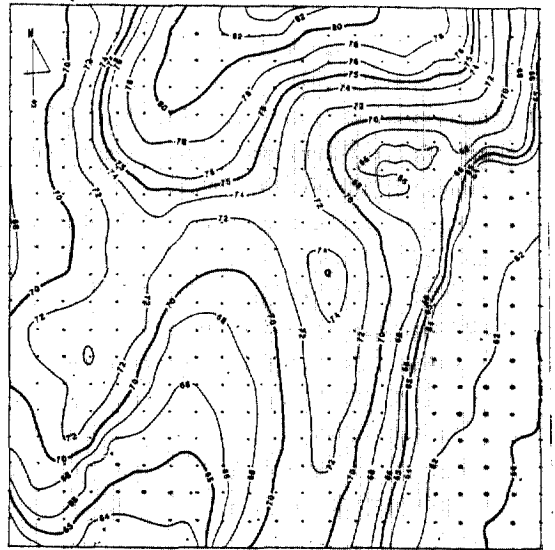


그림 4-1. Digital Terrain Model Graphic

以上과 같이 DTM 을 利用하여 結果를 얻는데는 약 5時間 30分 정도가 소요되었으나, 現場測量에 의해 結果値를 얻는 데는 약 24時間 정도가 소요되었으므로 DTM 利用이 廣範圍한 土工計劃에 時間적으로 유리하다.

5. 結 論

航空寫眞에서 얻은 DTM 資料와 現場測量에서 測定한 地上資料와 數値試驗을 한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. DTM 의 標高와 現場測量으로부터 얻은 地上標高와는 平均제곱근誤차가 $\pm 0.326 \text{ m}$ 이고, 計算된 精密度가 1/19,937.5 이므로 양호한 結果를 가져왔다.
2. DTM 에 의해 算出된 土工量은 現場測量으로부터 求한 土工量보다 盛土量이 2.64 %, 切土量이 0.73 % 적게 算出되었음을 알 수가 있었으며, 精密度面으로 보아 計劃 및 豫備設計에 合理的이므로 經濟的이라고 본다.
3. 地形모델의 現場實測 DTM 圖는 航空寫眞에 의해 圖化한 正射寫眞의 DTM 과 유사한 形態를 이루고 있음을 알 수가 있었다.

參考文獻

1. Miller, C.L., Laffame, R.A. "The Digital Terrain Models-Theory and Application", Photogrammetric Engineering, 1958. 6.
2. Makarovic, B. "A Digital Terrain Model System", *ITC Journal*, 1976. 1, p. 57.
3. Nakamura, H. "On Digital Terrain Models", ISP Commission V, Lausanne, 1968.
4. Frederick J. Doyle, "Digital Terrain Models: An Overview", *PE & RS, Vol. 44, No. 12*, 1978. 12, pp. 1481~1485.
5. 李石贊, 曹圭田, "數值地形模型에 관한 研究" 大韓土木學會論文集 Vol. 2, No. 3, 1982, pp. 93~104.
6. 村井俊治, "地形の數量化", 日本土木學會誌, 1973, pp. 93~99.
7. Makarovic, B. "Progressive Sampling for Digital terrain Models", *ITC Journal* 1973. 3, p. 397.
8. Makarovic, B. "From Digital Terrain Components to Intergrated System in Photogrammetry", *ITC Journal*, 1974. 5, p. 581.
9. 趙英鎬, "數值地形模型을 利用한 豫備路線의 土工量算定에 관한 研究", 漢陽大學校 大學院, 1981.
10. Murchison, D.E. "Surveying Photogrammetry", Senior Lecturer, University of Surrey, 1977. pp. 91~108.
11. Allan, M.M. "DTM Application in Topographic Mapping", *PE & RS, Vol. 44, No. 12*, 1978. 12. pp. 1513~1520.
12. 白殷基, 李榮鎮, "等高線圖의 自動作成에 관한 實驗的 研究", 韓國測地學會誌, 第 2 卷, 第 1 號, 1984, pp. 46~53.
13. 柳福模, "寫真測定學概論", 塔出版社, 1983, pp. 255~276.
14. Kam W. Wong, "Accuracy of Earthwork Calculations from Digital Terrain Elevation Data", *PE & RS, Vol. 49, No. 1*, 1983. 1, pp. 103~109.
15. Marsha Jo Hamlah, "Error Detection and Correction in Digital Terrain Models", *PE & RS, Vol. 47, No. 1*, 1981. 1, pp. 63~69.

(接受: 1984. 12. 26)