

수치근접사진측량에 의한 조경석의 표면 거칠기 정밀측정

The Precision Measurement of Stone's Surface  
Roughness by Digital Close-Range Photogrammetry

이 효 성\* , 안 기 원\*\*

Lee, Hyo-Sung , Ahn, Ki-Won

요 지

본 연구에서는 Rolleiflex 6006 측정용 카메라로 촬영된 사진과 DCS 420 디지털 카메라로부터 촬영된 화상을 이용, 수치근접사진측량을 실시한 후, 조경석의 표면 거칠기 측정 정확도 향상을 위하여 최소제곱법으로 기준평면 또는 기준곡면을 찾아 사용하는 방법을 연구하였으며, 조경석 표면의 연마 이전과 연마 이후의 표면 거칠기를 측정, 비교하여 연마후의 거칠기 감소크기를 산출하고, 측정 정확도를 알아보기 위하여 거칠기가 거의 없는 평면인 돌과 곡면인 돌의 표면 거칠기를 측정한 결과, 그 거칠기를 기대정확도 이상인 각각  $\pm 0.1\text{mm}$  및  $\pm 0.2\text{mm}$ 의 정확도로 측정할 수 있었다.

또한 측정용 카메라인 경우 렌즈왜곡 보정에 있어서 검정자료를 토대로 기준점을 사용하지 않는 직접보정방법인 Newton-Raphson법을 적용하여 기하학적 정확도가 향상된 수치사진화상을 얻을 수 있었으며, DCS 420 디지털 카메라와 윈도우 운영체제인 Visual basic 6.0을 이용하여, 표면 거칠기 측정시스템을 구축함으로써 연마이전 조경석과 연마이후 조경석에 대한 표면 거칠기 및 형상을 정밀 측정할 수 있는 수치근접사진측량기법을 제시할 수 있었다.

1. 서 론

현재 국내의 경우 가공된 조경석은 비중(2.6 내외), 흡수율(0.4 % 내외) 및 압축강(1,400  $\text{kg/cm}^2$  내외)를 요구하는 특별한 경우를 제외하곤 대부분 암석의 종류, 크기와 모양 등만 만족되면 납품가능하고 시공품으로서 사용될 수 있다. 국외에 있어서는 비중, 흡수율 및 압축강도 이외에 열팽창계수(0.0000066/ $^{\circ}\text{C}$  내외), 극한인장강도(580 $\text{kg/cm}^3$  내외), 마찰계수(0.37 내외)등도 가공석의 품질로 제시되기도 한다. 또한 분수대, 화단 및 산책로 주변 등에 사용되는 조경석은 유아의 안전과 좌대 역할을 고려한다면 표면의 연마상태 즉, 표면 거칠기가 작아야 하는 것이 중요하다. 그러나 연마된 조경석의 표면 거칠기는 그 크기가 매우 작기 때문에 품질의 한 가지로서 표면 거칠기를 제시하기 위하여는 정밀측정방법에 의한 표면 거칠기 측정이 이루어져야만 한다.

\* 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사후과정

\*\* 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수(경상대학교 부속 생산기술연구소 연구원)

표면 거칠기의 정밀측정방법으로는 실험실 측정법과 현장 측정법으로 나눌 수 있다. 실험실에서 측정하는 방법으로는 표준편과의 비교측정법, 촉침식 표면 거칠기 측정법 및 현미 간섭식 표면 거칠기 측정법 등이 있는데 이 방법들은 주로 크기가 작은 금속 시편이나 기계 가공품들을 측정대상으로 하기 때문에 큰 크기의 조정석 표면 거칠기 측정에는 적합하지 않은 방법이다. 따라서 조정석의 표면 거칠기는 현장에서 직접 측정할 수 있는 방법으로 수행하여야 하는데 그 방법으로는 근접사진측량방법이 효율적인 방법이 될 것이다.

또한 근접사진측량방법에 의한 조정석의 표면 거칠기 측정에 있어서는 mm 이하 단위의 높은 정밀도를 얻을 수 있고 각종 분석을 손쉽게 할 수 있는 수치사진측량기법의 적용이 바람직하다. 수치사진측량에 있어서 수치사진의 획득을 위하여는 측정용 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하는 방법과 디지털 카메라로 촬영하는 방법을 들 수 있는데 디지털 카메라는 해상도가 떨어지고 카메라의 검정자료가 부족하여 정밀도가 낮을 수 있다. 측정용 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하여 사용하는 방법도 기준점 위치측량시의 오차, 카메라의 렌즈왜곡으로 인한 오차, 스캐너의 기하학적 왜곡을 포함한 여러 가지 오차가 생길 수 있기 때문에 높은 정밀도를 얻기 위한 수치사진측량기법의 개발과 적용이 필요하다.

국내외적으로 촬영거리 수 m 이하에서 소형 구조물의 표면을 측정하거나 근접수치사진측량을 행하는 기법과 관련된 연구가 여러번 수행된 바 있다. 국외의 연구로는 El-Hakim(1985)은 2.5m의 거리에서 P31카메라로 직경 1.5~2.7m 크기의 마이크로웨이브 안테나표면의 변형을 0.1mm 이하의 오차로 측정하였다. 특히 표면 변형의 기준면 즉, 이상적인 안테나 표면의 가정을 위하여 2차 곡면중 비교적 단순한 모양인 회전타원적 포물면(elliptical paraboloid) 식을 최소제곱법으로 결정하여 사용하였다. Zhou 등(1996)은 약 0.9m의 거리에서 Panasonic WV-CD20 CCD 카메라에 의한 근접사진측량을 행하여 물에 적셔 붙여진 인화지 표면을 약 0.1~0.3mm의 정확도로 측정하였다. Butler 등(1998)은 약 2.2m의 높이에서 Hasselblad ELS 500 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하여 흙 표면의 근접수치사진측량을 행하여 10mm 이하의 표고오차를 얻었다. Merel 등(1998)은 약 2.4m의 높이에서 P32 카메라로 촬영된 필름과 DSR14 해석도화기를 사용하여 흙 표면의 근접사진측량을 행하여 약 0.5mm 이하의 표고오차를 얻었다.

국내에 있어서, 한승희 등(1995)은 평균거리 약 1.5m에서 CCD 카메라에 의한 근접수치사진측량을 행하여 2~4.5mm의 평균표준오차를 얻었으며 수치화상에 의한 신속하고 효율적인 모델링 기법과 3차원 측정 방법을 제시한 바 있다. 유복모 등(1998)은 Hitachi사의 VK-C370 CCD 카메라의 자체검정과 근접사진측량의 실시간 처리를 통하여 5~19mm의 정확도를 얻은 바 있다. 이진덕(1998)은 5~8m에서 Kodak사의 DCS200 디지털 카메라에 의한 근접수치사진측량을 행하여 0.1mm 이하의 표준오차와 1/60,000의 높은 정확도를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 측정용 카메라 및 디지털 카메라를 이용한 수치근접사진측량으로 조정석의 표면 거칠기를 정밀측정하기 위하여 수치화상의 렌즈왜곡 보정방법을 개발하고 표면 거칠기 측정에 있어서 기준면 적용 방법을 개발한 후 이상적인 평면과 곡면인 돌의 표면 거칠기를 측정하여 정확도를 제시하고, DCS 420 디지털 카메라에 의한 표면 거칠기 측정에 있어서의 활용가능성을 검토한 후 윈도우 환경의 비주얼 베이직(Visual basic 6.0)을 이용하여 기초적 통합 시스템(조정석 표면 거칠기 측정 시스템)을 구축하는데 그 목적을 두고 있다.

## 2. 수치화상의 획득 및 기하학적 왜곡의 보정

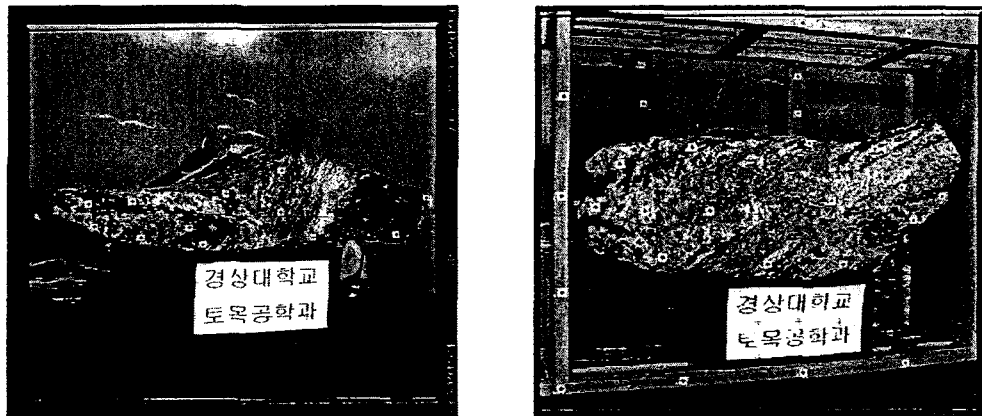
촬영대상물로는 연마 이전과 연마 이후의 조정석(폭 75cm, 높이 30cm 및 깊이 30cm) 및 표면

거칠기의 측정정확도 평가용인 평가석을 사용하였으며, 대상물 각각에 중앙 원형의 직경이 0.1mm인 별표모양의 타겟을 부착하여 기준점 및 검사점으로 활용하였다. 촬영카메라로는 측정용 카메라인 Rolleiflex 6006(초점거리: 80.30mm)을 사용하였다. 특히 이 카메라에는 필름 전면 5mm 간격마다 모두 121개의 십자선이 그려져 있는 레조플레이트(reseau plate)가 내장되어 있다.

촬영에 있어서는 2개의 서치라이트(각 500W)를 조명하였으며, 촬영거리는 대상물에서 약 1.2m로 하였다. 촬영기선은 1.0m로 하였으며, 수평 촬영하여 입체화상을 얻었다. 기준점과 검사점 및 카메라 중심의 3차원좌표는 1초 읽기 T2 테오돌라이트 2대를 이용한 삼각측량 원리에 의하여 구하였다.

촬영대상물의 수치화상데이터를 만들기 위하여 필름을 현상한 후 필름전용 스캐너(MICROTEK 스캐너)로 스캐닝 하였다. 스캐닝 후의 화상은 약 6000×6000 화소크기(1화소는 사진상 약 0.01×0.01mm크기)가 되도록 하였으며, 데이터 값은 0에서 255사이가 되도록 하였다. Fig. 1은 스캐닝하여 얻어진 수치화상을 나타낸 것이다.

현상 과정의 필름변형과 스캐너의 기하학적 왜곡을 보정하기 위하여 레조플레이트상의 25개 십자선의 사진좌표(한 화소의 사진상 크기: 0.01mm)로 기하보정을 행하였다.



(a) Rough surface.

(b) Manufactured surface.

Fig. 1. The test field.

또한 Rolleiflex 6006의 검정자료(calibration data)를 토대로 카메라의 주점 이동량 및 렌즈방사 왜곡을 Newton-Raphson기법으로 기준점을 사용하지 않고 직접보정하였다. 본 기법은  $f(x)=0$ 의 근을 구하기 위하여 근의 초기가정을  $x_i$ 로 하면 점  $[x_i, f(x_i)]$  에서 그은 접선이  $x$  축과 만나는  $x_{i+1}$  를 제 1 근사해로 취한다. 따라서 미계수(微係數)의 정의로부터 아래의 식(1)으로 표현할 수 있으며,  $x_i - x_{i+1} = \delta x_j$ 로 간단히 표현하면 식(2)과 같이 선형식으로 표현할 수 있다. 식(2)에서와 같은 방법으로  $x_{i+n}$  까지 되풀이하여  $f(x)=0$ 의 근에 해당하는 허용오차 범위 안에 들어올 때까지 구하면 된다.

$$f'(x_i) = \tan \theta = \frac{f(x_i) - 0}{x_i - x_{i+1}} \tag{1}$$

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + f'(x_i)\delta x_j \tag{2}$$

### 3. 수치표고모델의 작성

#### 3.1 외부표정요소의 결정

한 쌍의 중복사진으로부터 3차원위치를 구하기 위하여는 사진상의 점과 지상의 점들간의 관계를 결정할 수 있는 카메라의 위치 및 자세, 즉 외부표정요소를 결정하여야 한다. 이를 위하여 번들조정기법을 적용하였다. 번들조정이란 다수의 번들에 대하여 투영중심과 사진상의 점, 지상의 물체가 일직선상에 있다는 공선조건식을 기본으로 최소제곱법에 의하여 각 사진의 외부표정요소 회전인자( $\kappa, \varphi, \omega$ ) 및 카메라 노출점 중심의 3차원위치( $X_0, Y_0, Z_0$ )를 결정하는 것이다. 이렇게 하여 구한 외부표정요소의 신뢰성을 평가하기 위하여 각각의 대상물에 대한 검사점의 3차원 위치를 계산하였다. 계산되어진 3차원 위치 정확도를 알아보기 위하여 실측값과의 잔차로부터 X, Y, Z의 평균제곱근오차를 구하였으며, 그 결과는 Table 1에서 보는바와 같다.

Table 1. RMSE of 3D coordinates of the check points in digital image acquired by Rollieflex 6006 camera(unit : mm)

RMSE Stones	X	Y	Z
Rough	0.195	0.075	0.285
Manufactured	0.104	0.097	0.210
Reference	0.058	0.060	0.132

#### 3.2 매칭사이즈 및 유효밴드의 결정

자동매칭기법으로는 여러 가지 기법이 개발되어 있으나 수치표고모델 생성을 위한 자동매칭에는 표준상관기법이 많이 사용되고 있으며 본 연구에서도 이 방법을 택하였다. 또한 매칭사이즈를 결정하기 위하여 윈도우 영역을 11×11부터 43×43화소 크기까지 매칭사이즈별로 돌 영역내에 존재하는 200화소 간격마다의 화소들의 자동매칭을 행하고 지상좌표를 구한 후, 각 매칭사이즈별 3차원위치와 평균3차원위치를 비교한 결과, Table 2에서 보는바와 같이 윈도우 영역은 35×35, 서어치 영역은 윈도우 영역의 좌·우 또는 상·하 방향으로 10화소 정도 여유있게 55×55로 결정하였다.

Table 2. Distance error of a point from the average position for each window size (unit : mm)

Size	11	15	19	23	27	31	35	39	43
Average distance error	1.421	0.952	0.802	0.689	0.513	0.468	<b>0.463</b>	0.530	0.583

대부분의 칼라스캐너들은 칼라필름을 스캐닝하면 R, G, B의 3개 밴드화상을 생성해낸다. 3개 밴드화상중 자동매칭에 유효한 밴드를 결정하기 위하여 위에서 결정된 매칭사이즈로 매칭을 실시한 결과, 평균상관계수가 가장 높은 밴드 1(Red 밴드)가 유효밴드로 결정되었다.

### 3.3 수치표고모델의 작성

수치화상데이터로부터 3차원좌표를 획득하기 위하여는 모든 격자점들에 대한 자동매칭이 선행되어야 한다. 그러나 좌·우 원화상의 크기 및 매칭사이즈의 크기로 볼 때 많은 시간이 소요되므로 연마이전 면과 연마이후의 면에 대한 3개의 샘플영역만을 절출하였다. 절출한 샘플영역은 좌·우화상간의 기복변위가 심하게 발생하므로 좌측화상에 대하여 우측화상을 기하보정한 후 자동매칭하였다. 또한 자동매칭으로 찾은 좌·우화상좌표를 이용하여 공간교차이론으로 3차원위치를 획득하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 연마이전 및 연마이후에 대한 샘플영역의 수치표고모델이며, Table 3은 수치표고모델에 대한 Z좌표의 표준편차를 나타낸 것이다.

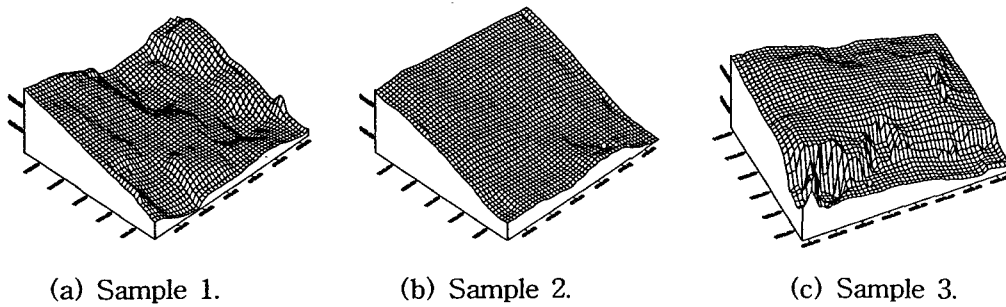


Fig. 2. The graphic visualization from the digital elevation model of study areas in case of rough surface(30mm×30mm).

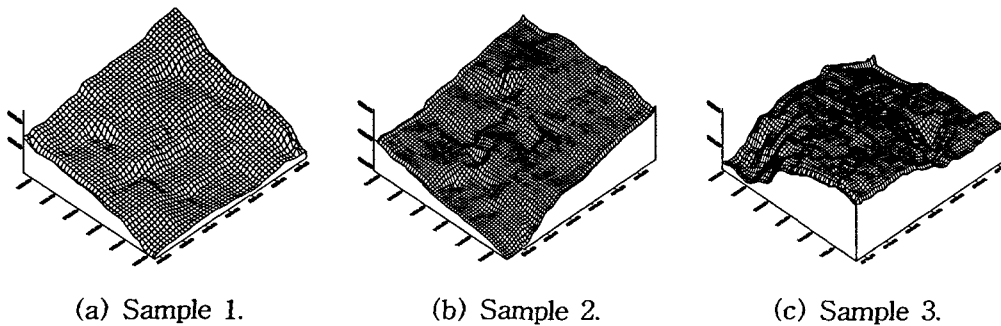


Fig. 3. The graphic visualization from the digital elevation model of study areas in case of manufactured surface(30mm×30mm).

Table 3. Standard deviation of Z values of digital elevation model (unit ; mm)

Surface Sample area	Standard deviation	
	Rough surface	Manufactured surface
Sample 1	1.117	1.085
Sample 2	2.452	0.995
Sample 3	2.837	0.703

#### 4. 샘플영역의 표면 거칠기 측정

##### 4.1. 표면 거칠기 표시방법

현행 KS에서는 여러종류의 가공법에 의하여 제작된 공업제품이나 부품의 표면에서 작은 간격으로 나타나는 표면의 요철로서 거칠다 매끄럽다하는 감각의 근본이 되는 것을 표면 거칠기로 정의하고 있으며, 그 표시 방법으로는 최대높이 거칠기, 10점 평균거칠기, 중심선 평균 거칠기의 3종류의 거칠기를 규정하고 있다. 이중 중심선 평균거칠기 표시방법은 국제적으로 가장 많이 사용되는 표면 거칠기의 표시방법으로서 Fig. 4 및 식(1)에서 보는바와 같이 거칠기 곡선의 요철과 그 중심선에 포함된 면적의 합을 측정 길이로 나눈 것 즉, 중심선으로부터 모든 측정점에 대한 절대값의 높이 차이를 산술평균한 것이다.



Fig. 4. Profile of a curved line for centerline average height roughness designation method.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (3)$$

##### 4.2. 표면 거칠기 측정

본 연구에서는 현행 KS에서 규정한 표면 거칠기 표현방법 중 국제적으로 가장 많이 사용되고 있는 중심선 평균거칠기와 본 연구에서 적용한 표면 거칠기의 평균제곱근오차를 이용한 방법 즉, 평균제곱근 거칠기를 구하기 위하여 먼저 대상물내 샘플영역의 모든 격자점에서 Z값 차이가 최소인 기준면을 찾은 다음 그 기준면으로부터의 거리를 구하고자 하였다. 따라서 기준면을 구하기 위하여 평면의 방정식 및 곡면 방정식을 적용하였다. 기준평면(Reference plane)을 구하기 위한 평면방정식은 식(4)과 같으며, 이 식의 계수는 함수 F에 관한 식(5)을 사용하여 최소제곱법으로 구할 수 있다.

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y \quad (4)$$

$$F = \sum \{Z_i - (a_0 + a_1X_i + a_2Y_i)\}^2 = \min. \quad (5)$$

여기서,  $X_i, Y_i, Z_i$  : : 대상영역내 임의 점의 3차원 위치

샘플영역의 임의 점으로부터 기준평면까지의 수직거리는 아래의 식(6)으로부터 구할 수 있으며, 대상영역의 모든점에 대하여 평면으로부터의 거리를 구한 다음 표면 거칠기를 구할 수 있었다.

$$d_i = \frac{|a_0 + a_1X_i + a_2Y_i - Z_i|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + (-1)^2}} \quad (6)$$

또한 기준곡면(Reference surface)으로부터의 표면 거칠기 측정을 위한 식(7)과 같은 2차 곡면방정식을 적용하였다.

$$Z = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5Y^2 \quad (7)$$

이 식에서의 계수는 평면방정식과 마찬가지로 함수 F에 관한 식(8)을 사용하여 최소제곱법으로 구

할 수 있으며, 구한 계수를 이용하여 샘플영역내의 모든 격자 점들간의 Z값 차이가 최소인 기준곡면 방정식이 얻어진다.

$$F = \sum \{ Z_i - (a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i^2 + a_4 X_i Y_i + a_5 Y_i^2) \}^2 = \min. \quad (8)$$

결정된 기준곡면상의 임의의 점 P (X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>)로부터 샘플영역내의 임의의 점 Q (X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>)까지의 수직거리(d)를 구하기 위하여는 식(9)과 같은 단위연직벡터(unit normal vector)로부터 구할 수 있으며, 대상영역의 모든 점에 대하여 곡면으로부터의 거리를 구한 다음 표면 거칠기를 구할 수 있었다.

$$n = \frac{-\frac{\partial F}{\partial X}(X_0, Y_0)i - \frac{\partial F}{\partial Y}(X_0, Y_0)j + k}{\sqrt{\left\{ \frac{\partial F}{\partial X}(X_0, Y_0) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial F}{\partial Y}(X_0, Y_0) \right\}^2 + 1}} \quad (9)$$

본 연구에서는 시산법의 적용을 통하여 샘플영역내의 임의점 Q(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>)로부터 기준곡면까지의 거리가 최소인 곡면상의 점 P(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>)를 구하였다. P(X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>, Z<sub>0</sub>)가 얻어지면 최소거리(즉, 수직거리)는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$\sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2} \quad (10)$$

이들 대상영역의 모든 점에 대하여 곡면으로부터의 거리를 구한 다음 중심선 평균거칠기 및 중심선 평균제곱근 거칠기를 구할 수 있었다.

Table 4는 각각 연마이전면과 연마이후면에 대한 중심선 평균거칠기를 나타낸 것이며, Table 5는 각각 연마이전면과 연마이후면에 대한 중심선 평균제곱근 거칠기를 나타낸 것이다.

Table 4. Average of normal distances between the sample points and the reference surface (unit : mm)

Reference surface Sample area	Reference plane		Reference surface	
	Rough	Manufactured	Rough	Manufactured
Sample 1	0.468	0.296	0.383	0.235
Sample 2	0.329	0.234	0.319	0.229
Sample 3	1.289	0.395	0.595	0.285

Table 5. RMSE of normal distances between the sample points and the reference surface (unit : mm)

Reference surface Sample area	Reference plane		Reference surface	
	Rough	Manufactured	Rough	Manufactured
Sample 1	0.576	0.352	0.490	0.283
Sample 2	0.570	0.291	0.533	0.277
Sample 3	1.559	0.530	0.961	0.365

앞의 표에서 보는바와 같이 연마이전에 비해 연마이후 면의 표면 거칠기가 약 0.4mm 정도 감소한 결과를 나타내었다.

### 4.3. 표면 거칠기 측정 시스템 구축

수치근접사진측량에 의한 표면 거칠기 측정에 있어서 주제별 처리과정이 서로 독립되어 있지 않은 단일화된 통합환경을 구축한다면 보다 신속하고 효율적인 처리가 가능하리라고 본다. 따라서 본 연구에서는 디지털 카메라와 윈도우 환경의 Microsoft Visual basic 6.0을 이용하여 표면 거칠기 결과값을 현장에서 직접 얻을 수 있도록 수치화상처리용 소프트웨어에서 제공되지 않으면서 기본적으로 필요한 프로그램을 주제별 클래스 및 모듈로 작성하여 기초적 표면거칠기측정 시스템을 구축하고자 하였다.

표면 거칠기 측정 시스템의 메뉴형식은 사용자가 편리하게 이용할 수 있도록 다중문서인터페이스(Multiple Document Interface) 폼으로 주화면을 구성한 후 하위메뉴로서 이미지 뷰어, 기준점 측량, 번들조정, 자동매칭, 3차원 위치결정 및 표면 거칠기의 순으로 작성하였다. 표면거칠기 측정시스템에 사용되는 하위메뉴들은 주화면창 안에 있으며, 주화면 창은 응용 프로그램에서 모든 하위메뉴창에 작업 공간을 제공할 수 있도록 구성하였다. 특히 검정데이터가 있는 필름전용 카메라인 경우엔 스캐닝 왜곡, 필름변형 및 렌즈왜곡에 대한 보정을 해주기 위하여 다항식에 의한 기하보정 및 뉴턴랩션 방법에 의한 방사보정을 할 수 있는 모듈을 추가하였다. 본 연구에서 제작한 시스템의 흐름도와 주화면 메뉴는 Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는바와 같다.

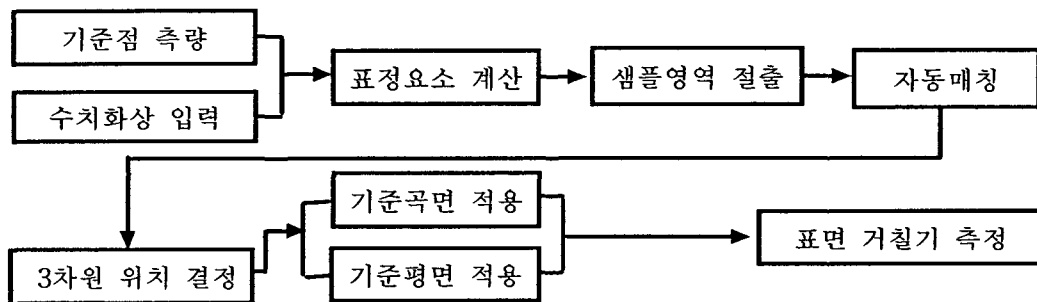


Fig. 5. Flow chart of roughness measurement system.

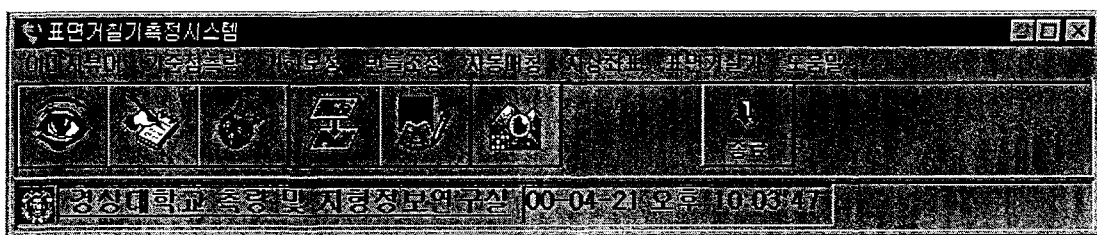


Fig. 6. Program of roughness measurement system.

### 5. 평가 및 고찰

본 연구에서 제시된 표면 거칠기 측정방법의 유효성을 검증하기 위하여 Rolleiflex 6006 측정용 카메라로 Fig. 7에서 보는바와 같이 거칠기가 거의 없는 평면인 돌과 자연석이면서 곡면에 가까운 돌 즉, 평가석의 표면 거칠기를 앞에서 언급한 방법과 동일한 과정으로 측정하여 평가해보았다. 또한 Fig. 8에서 보는바와 같이 DCS 420 디지털 카메라로 평가석의 표면 거칠기를 측정하여 측정용 카메라의 결과 값과 상호 비교한 후, 디지털 카메라의 표면 거칠기 측정 수행능력을 평가하고자 하였다.



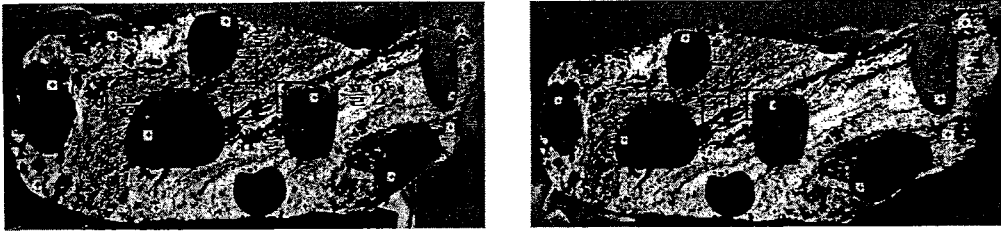


Fig. 7. Sample areas of reference stone acquired by Rolleiflex 6006 camera.

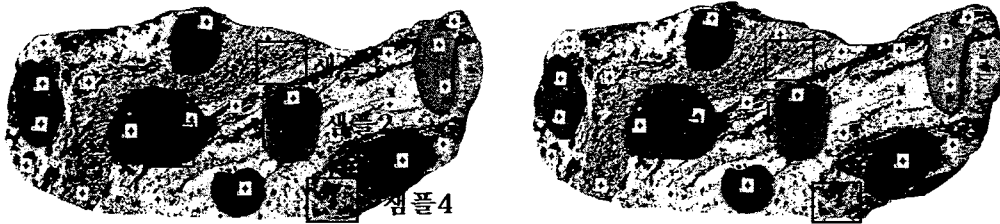


Fig. 8. Sample areas of reference stone acquired by DCS 420 camera.

먼저 Fig. 7에서 표면 거칠기 측정방법의 유효성을 평가를 위한 샘플영역 1과 2는 곡면방정식 적용을 위한 곡면이며 샘플영역 3과 4는 평면방정식 적용을 위한 평면이다.

Fig. 8의 디지털 카메라에 의한 샘플영역도 측정용 카메라로 획득한 수치화상의 샘플영역과 동일한 영역을 택하여 평가해 보았다. 그리고 각 샘플영역에 대한 3차원 위치를 결정하기 위하여 번들조정법으로 외부표정요소를 구한 후, 자동매칭과 공간교차이론을 적용하였다. 결정된 3차원 위치 정보를 이용하여 앞에서 제시한 기준면 방정식을 적용, 표면 거칠기를 측정할 수 있었으며, 그 결과는 Table 6과 Table 7에서 보는바와 같다.

Table 6. Average of normal distance between the sample points and the reference surface by DCS 420 digital camera and Rolleiflex 6006 camera(unit : mm)

Camera Reference surface Sample area	DCS 420		Rolleiflex 6006	
	surface	plane	surface	plane
Sample 1	0.122		0.076	
Sample 2	0.092		0.076	
Sample 3		0.093		0.051
Sample 4		0.085		0.060

Table 7. RMSE of normal distance between the sample points and the reference surface by DCS 420 digital camera and Rolleiflex 6006 camera(unit : mm)

Camera Reference surface Sample area	DCS 420		Rolleiflex 6006	
	surface	plane	surface	plane
Sample 1	0.155		0.100	
Sample 2	0.119		0.103	
Sample 3		0.124		0.065
Sample 4		0.108		0.078

앞의 결과에서 보는바와 같이 측정용 카메라인 경우 중심선 평균 거칠기 및 중심선 평균제곱근 거칠기는 평균적으로 각각 0.07mm, 0.09mm이며, 디지털 카메라인 경우 각각 0.10mm, 0.13mm로서 표면 거칠기 측정에 있어서 측정용에 비해 약 0.03mm 정도 측정정확도가 떨어짐을 알 수 있다. 이는 측정용 카메라인 경우 렌즈왜곡과 관련된 검정자료를 제공하고 있으며, 필름을 스캐닝 한 후 해상도를 마음대로 조정할 수 있는 반면에 디지털 카메라인 경우 검정자료가 없는 비측정용이면서 CCD 센서에 의한 해상도가 1524×1012화소로서 고정되어 있으며, CCD 배열의 격자 간격이 일정하지 않기 때문이다. 특히 본 연구에서 사용되어진 모니터의 최대 해상도는 1600×1200 화소로서 디지털 카메라의 해상도와 맞지 않기 때문에 화상을 전산기상의 모니터로 표현하기 위한 화상재배열 과정에서 왜곡이 발생하여 위치결정의 정확도에 영향을 미친다고 판단된다.

또한 현행 KS에서는 표면 거칠기의 등급에 대한 평가를 금속시편이나 기계부품 등에 적용 가능한  $\mu\text{m}$  이하 단위로 제한하여 제시하고 있으므로 조경석의 표면 거칠기 등급에 적용하기란 어렵다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 제시한 연마이전 면과 연마이후 면에 대한 표면 거칠기 결과 값, 평가석에 대한 표면 거칠기의 측정 정확도 결과 값을 토대로 조경석의 표면 거칠기를 대략 4등급으로 평가하여 Table 8과 같이 정의하는 것이 적절할 것으로 판단 되어진다.

Table 8. A grade of roughness

등급	표면 거칠기	내용	사용 가능성
1 등급	0.1mm 이하	거칠기가 거의 없는 상태	작은 거칠기가 요구되는 대부분의 경우
2 등급	0.1~0.3mm	채취된 원석을 많이 연마하여 거칠기가 매우 작은 상태	유아 또는 사람의 접근이 많거나 좌대로서 사용되는 경우
3 등급	0.3~0.5mm	채취된 원석을 약간 연마하여 거칠기가 다소 있는 상태	1등급 또는 2등급외의 비탈면 보호석, 경계석등으로 사용되는 경우
4 등급	0.5mm이상	원석을 채취하여 연마하지 않은 상태	연마하지 않은 돌의 사용이 가능한 경우

## 6. 결론

측정용 카메라인 Rolleiflex 6006과 고해상력의 DCS 420 디지털 카메라로 취득한 좌·우 중복된 수치화상데이터를 이용하여 조경석의 표면 거칠기를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Rolleiflex 6006 측정용 카메라로 촬영된 사진과 DCS 420 디지털 카메라로부터 촬영된 화상을 이용, 수치근접사진측량을 실시하여 기준평면 및 기준곡면으로부터의 조경석 표면 거칠기를 측정된 결과, 그 거칠기를 각각  $\pm 0.1\text{mm}$  및  $\pm 0.2\text{mm}$ 이하의 높은 정확도로 측정할 수 있었다.
2. DCS 420 디지털 카메라와 윈도우 운영체제인 Visual basic 6.0을 이용하여, 표면거칠기 측정에 기본적으로 필요한 프로그램을 모듈화한 표면 거칠기 측정시스템을 구축함으로써 연마이전의 조경석과 연마이후의 조경석에 대한 표면 거칠기 및 형상을 정밀 측정할 수 있는 수치근접사진측량기법을 제시할 수 있었고, 이는 근접사진측량에 의하여 높은 정밀도를 요하는 산업분야의 정밀측정에 응용이 가능할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) 안기원, 1994, CCD Camera Scanner의 스캐닝 왜곡 보정기법 연구, 한국측지학회지, 제12권, 제2호, pp. 173-180.
- 2) 이진덕, 1998, 고해상도의 스틸비디오 카메라를 이용한 수치근접사진측량 시스템의 실용성 평가, 대한토목학회논문집, Vol. 18, No. III-2, pp. 183-193.
- 3) 이정구, 이종대, 1989, 정밀측정학, 기전연구사, pp. 273-286.
- 4) 유복모, 이석균, 1998, CCD 사진기를 이용한 근거리사진측량의 실시간 처리에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 18, No. III-3, pp.317-327.
- 5) 한승희, 강준목, 1995, 3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표 획득에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제15권 제6호, pp. 1721-1730.
- 6) Butler, J. B. and Lane, S. N., 1998, Assessment of DEM Quality for Characterizing Surface Roughness Using Close Range Digital Photogrammetry, The Photogrammetric Record, Vol. 16, No. 92, pp. 271-291.
- 7) El-Hakim, S. F., 1985, Photogrammetric Measurement of Microwave Antennae, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 51, No. 10, pp. 1557-1581.
- 8) Merel, A. P. and Farres, P. J., 1998, The Monitoring of Soil Surface Development Using Analytical Photogrammetry, The Photogrammetric Record, Vol. 16, No. 92, pp. 331-345.
- 9) Zhou, W., Brock, R. H. and Hopkins, P. F., 1996, A Digital System for Surface Reconstruction, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 6, pp. 719-726.