

수치근접사진측량과 레이저 프로파일러를 이용한 암석 절리면의 표면 거칠기 정밀측정

The precision measurement of the roughness of rock joint surfaces using the digital close-range photogrammetry and the laser profilometer

이효성*, 안기원**, 신석효***, 김용일****

Hyo-sung Lee, Ki-won Ahn, Sok-hyo Shin, Yong-il Kim

1. 서론

수치근접사진측량에 있어서 수치영상의 획득을 위해서는 측정용 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하는 방법과 디지털 카메라로 촬영하는 방법을 들 수 있는데 디지털 카메라는 CCD(Couple Charged Device)센서에 의한 해상도가 고정되어 있고, CCD배열의 격자간격이 일정하지 않으며, 카메라의 검정자료가 부족하여 정밀도가 낮을 수 있다. 반면 측정용 카메라는 렌즈왜곡과 관련된 검증자료를 제공하고 있으며, 필름을 스캐닝한 후 해상도를 마음대로 조정할 수 있으므로 디지털 카메라에 비해 대상영역의 표면 거칠기 측정간격을 보다 조밀하게 측정할 수 있다는 장점이 있다(Jessell et al., 1995). 측정용 카메라로 촬영된 필름을 스캐닝하여 사용하는 방법도 필름현상 과정에 발생하는 필름의 신축변형, 카메라의 렌즈왜곡으로 인한 오차, 스캐너의 기하학적 왜곡을 포함한 여러 가지 오차가 생길 수 있기 때문에 높은 정밀도를 얻기 위한 수치사진측량기법의 개발과 적용이 필요하다.

본 연구에서는 측정용 카메라를 이용한 수치근접사진측량으로 암석의 표면 거칠기를 정밀측정하기 위하여 수치영상에 대한 각종 기하학적인 왜곡을 보정하고, 기준면 적용 방법을 개발한 후, 거칠기가 거의 없는 이상적인 평면과 곡면인 암석의 표면 거칠기를 측정하여, 이를 레이저 프로파일러로 측정 한 결과 값과 비교하여 두 방법에 대한 정밀도를 제시하고자 한다.

2. 표면 거칠기 측정방법

수치근접사진측량으로부터 획득한 3차원 위치의 원점에 대한 좌표체계는 레이저 프로파일러로부터 획득한 3차원 위치의 좌표체계와 다르며, 두 방법 모두 대상물의 배치상태에 따라 거칠기가 다르게 표현된다.(거칠기가 없는 대상물을 원점의 Z(고도)축에 비 수직으로 배치하면 측정하고자 하는 대상물의 경사에 의해 거칠기가 존재하게 된다.) 따라서 본 연구에서는 두 방법에 대한 정밀도의 정확한 비교를 위해서 기준면으로부터 표면 거칠기를 산정하는 방법을 도입하였다.

기준면 적용의 첫 번째 방법은 대상영역의 3차원 정보로부터 모든 격자 점에서 높이값 차이가 최소인 면을 평면 방정식을 적용하여 최소제곱법으로 결정하는 것으로서 일반적으로 표면 거칠기 산출 방법에 많이 활용되고 있다.(Swan, 1983; Fardin et al., 2001; Kulatilake and Um, 1998; Lanaro, 2000). 기준평면을 구하기 위해선 평면방정식을 적용한 후, 최소제곱법으로 결정할 수 있으며, 샘플영역의 임의의 점으로부터 기준평면까지의 수직거리는 아래의 식(1)으로부터 구할 수 있다.

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

여기서, X_i, Y_i, Z_i : 대상영역내 임의의 점의 3차원 위치

두 번째 방법은 대상영역의 표면이 거의 곡면으로 이루어진 경우 진폭과 관련한 표면 거칠기 파라미터 산출을 위하여 2차곡면 방정식에 의한 기준곡면 적용방법을 개발하였다. 기준곡면은 곡면으로 이루어진 산업제품의 3차원 정보로부터 외형적 품질검사 및 표면 변형해석 등에도 적용할 수 있다.

* 서울대학교 공학연구소 연구원

** 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수(경상대학교 공학연구원 책임 연구원)

*** 경상대학교 공학연구원 연구원

**** 서울대학교 지구환경시스템 공학부 부교수

기준곡면을 구하기 위해선 곡면 2차방정식을 적용한 후, 평면방정식과 마찬가지로 최소제곱법으로 구할 수 있으며, 결정된 기준곡면상의 임의의 점 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ 로부터 대상영역내의 임의의 점 $Q(X_i, Y_i, Z_i)$ 까지의 수직거리(d_i)를 구하기 위해서는 식(2)과 같은 단위연직벡터(n)로부터 구할 수 있다. 여기서 점 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ 즉, 대상영역내의 임의의 점으로부터 기준곡면까지의 거리가 최소인 점은 시산법의 적용을 통하여 구할 수 있다.

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

$P(X_0, Y_0, Z_0)$ 와 $Q(X_i, Y_i, Z_i)$ 사이의 거리는 식(3)으로 구할 수 있다. 따라서 이들 대상영역의 모든 점에 대하여 기준곡면으로부터의 높이를 구한 다음 표면 거칠기를 구할 수 있다.

$$d_i = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2} \quad (3)$$

또한 본 연구에서는 대상영역의 3차원 정보를 이용한 전체적인 진폭상태를 파악하기 위하여 식(4)과 같이 기준면으로부터 모든 점에 대한 높이차이의 평균제곱근 거칠기를 구하였으며, 표면기하의 특성파악을 위하여 Z2를 표면전체로 확장한 식으로서 기준평면으로부터 표면에 대한 경사의 평균제곱근인 Z2s(식 5)의 근사식을 적용하였다.(Belem et al., 2000).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N}} \quad (4) \quad Z2_s = \left[\frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서, N은 측정 수, $L_x L_y$ 는 기준평면의 면적, d_i 는 기준면으로부터 높이 값

3. 두 기법간의 상호 비교평가

두 방법에 의한 표면 거칠기 측정 정밀도의 직접적인 비교를 위해선 동일한 측정간격과 범위로 샘플링을 해야만 한다. 그러나 실질적으로 수치근접사진측량으로부터 획득되어지는 3차원 정보는 레이저 프로파일러와 같이 일정한 간격으로 획득되어 지는게 아니기 때문에 이를 다시 일정한 격자간격으로 재배열 해야하며, 이 과정에서 원천자료의 변질을 가져올 수 있다.(원래 샘플영역의 범위가 달라질 수 있다). 따라서 본 절에서는 두 방법의 측정결과 값에 대하여 정밀도를 상호비교하기 위하여 레이저 프로파일러가 수치사진측량에 의한 샘플링 영역보다 넓은 범위이지만 거칠기가 거의 없는 이상적인 평면과 곡면인 암석을 대상으로 거칠기 파라미터의 결과 값이 0에 가까운 값을 가져야 된다는 전제하에 표면 거칠기를 측정하였다.

3.1 수치근접사진측량에 의한 3차원 위치결정

평가용 대상물로는 채취한 화강암을 절삭한 후, 매끄럽게 연마한 거칠기가 거의 없는 평면인 암석(폭 75cm, 높이 30cm 및 깊이 30cm)과 해변가에서 매끄럽게 연마된 곡면 조약돌을 부착하여 사용하였다(Fig. 3). 평가용 대상물의 수치영상에서 외부표정요소 획득을 위한 기준점 및 검사점으로는 Fig. 1과 같은 중앙원형의 직경이 1.0mm인 별표모양의 타겟(15점)을 부착하여 사용하였다. 과거 연구에 의하면 별표모양의 타겟은 다른 모양에 비해 수치영상의 처리과정에서 기하학적 왜곡의 보정 정밀도가 높은 것으로 전하고 있다.(안기원, 1994)

촬영카메라로는 Fig. 2에서 보는바와 같이 Rolleiflex 6006(초점거리: 80.30mm) 필름전용 측정용 카메라를 사용하였다. 본 카메라에는 필름변형 및 필름 스캐닝시 발생하는 왜곡 및 렌즈왜곡을 보정하는데 활용할 수 있도록 필름 전면에 모두 121개의 십자선이 5mm 간격으로 그려져 있는 레조플레이트(reseau plate)가 내장되어 있으며, 레조플레이트와 렌즈에 대한 검정자료를 포함하고 있다.

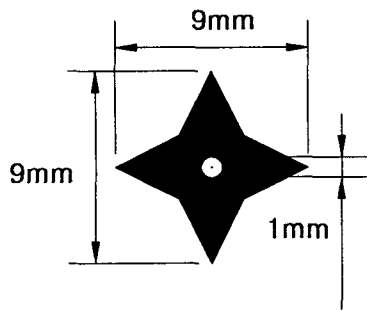


Fig. 1. Type of control point on the test field. Fig. 2. Rolleiflex 6006 metric camera.

촬영에 있어서는 대상영역의 수치영상에서 음영이 생기지 않도록 하기 위하여 2개의 서치라이트(각 500W)로 각각 조명하였으며, 촬영거리 약 1.2m와 촬영기선 1.0m에서 수렴 촬영하여 입체영상을 얻었다. 또한 촬영한 대상물을 수치영상으로 만들기 위하여 필름을 현상한 후, 필름전용 스캐너(MICROTEK 스캐너)로 스캐닝 하였다. 스캐닝 후의 영상은 약 6000×6000 화소크기(1화소는 사진상 약 0.01×0.01mm크기)가 되도록 하였으며, 데이터 값은 0에서 255사이가 되도록 하였다. 그림 8은 측정용 카메라로 취득한 평가용 대상물의 좌·우 수치영상을 나타낸 것이다.

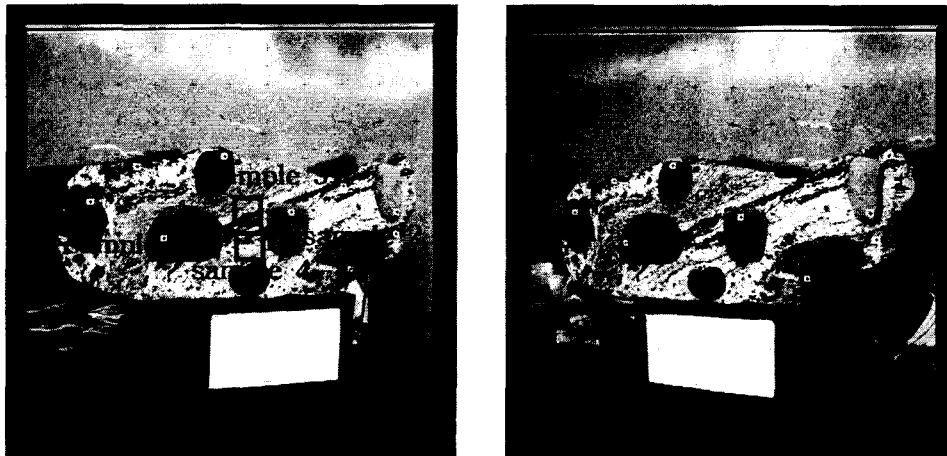


Fig. 3. Left and right image of appraising samples photographed by Rolleiflex 6006 camera.

현상 과정의 필름변형과 스캐닝 과정의 기하학적 왜곡은 레조플레이트상의 25개 십자선의 사진좌표(한 화소의 사진상 크기: 0.01mm)로 기하보정을 행하였으며, 검정자료(calibration data)를 토대로 카메라의 주점 이동량 및 렌즈방사왜곡을 Newton-Raphson기법으로 기준점을 사용하지 않고 직접보정하였다. 기준점과 검사점 및 카메라 중심의 3차원좌표는 1초 위기 T2 데오돌라이트를 이용한 삼각측량 원리에 의하여 구하였다. 본 연구에서는 Rolleiflex 6006 카메라로 획득한 수치영상의 외부표정요소를 번들조정법으로 구하였으며, 결정된 외부표정요소의 신뢰성 평가를 위해, 이를 이용하여 검사점의 3차원 위치를 계산하였다. 계산되어진 3차원 위치 정확도를 알아보기 위하여 T2 데오돌라이트로부터 구한 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 Rolleiflex 6006 camera(unit : mm)

Coordinate	X	Y	Z
RMSE	0.058	0.060	0.132

이상과 같은 결과로부터 Rolleiflex 6006 카메라로 취득한 평가석의 수치영상에서 한 화소의 실제 크기가 대략 0.15mm인 것을 감안한다면 평균제곱근오차가 한 화소이내에 들어오는 비교적 양호한 결과 값을 얻을 수 있었다.

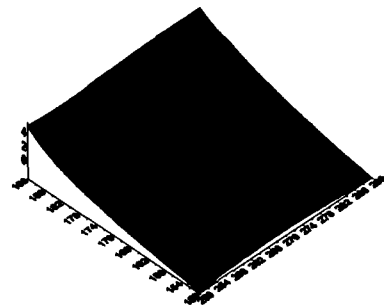
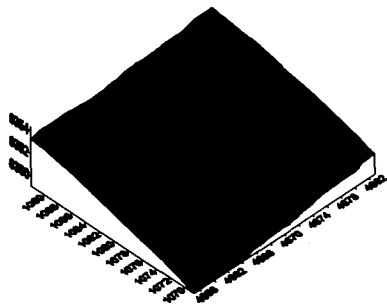
수치영상으로부터 대상영역에 대한 수치표고모델의 생성을 위하여 그림 8에서 보는바와 같이 샘플 영역만을 절출한 후, 표준상관기법으로 자동매칭을 수행하였다. 절출한 샘플영역은 좌·우영상간의 시차차가 심하게 발생하므로 좌측영상에 대해 우측영상을 기하보정한 후, 모든 점들에 대하여 자동매칭을 수행하였으며, 이를 이용하여 3차원위치를 획득하였다. 획득한 3차원 위치의 화소크기는 샘플 1이 150×150, 샘플 2는 170×170, 샘플 3과 4는 220×220이며, 한 화소의 실제크기는 약 0.15mm이다. 수치사진측량에 의한 각 샘플영역의 3차원 위치는 일정한 격자간격으로 이루어진게 아니기 때문에 이를 거리의 역에 따른 가중평균법으로 보간한 후, 0.2mm 격자간격으로 수치표고모델을 작성하였다. Fig. 4의 (a), (b), (c), (d)는 평가용 대상물에 대한 샘플영역의 수치표고모델을 나타낸 것이며, X, Y, Z축에 대한 스케일은 동일하다.

3.2 레이저 프로파일러에 의한 3차원 좌표취득

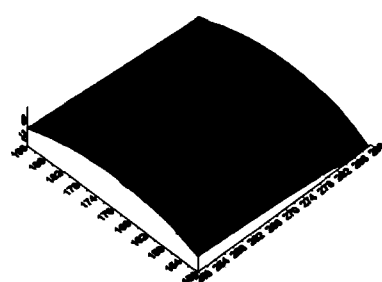
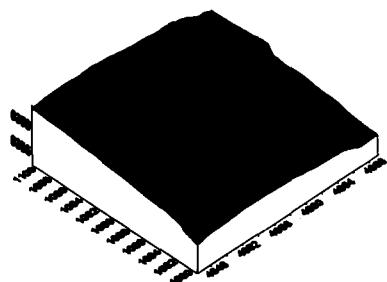
본 연구에서 사용되어진 레이저 프로파일러는 레이저 변위계, 위치지정시스템 및 전체 시스템을 직접 제어할 수 있는 컴퓨터로 이루어져 있으며, 레이저 변위계는 sensor header와 controller로 구성되어 있다. 위치지정시스템은 측정기 본체와 servo-controller, 입력부로 구성되어 있으며, 실제적인 X, Y의 측정 정밀도는 0.01mm이다. 측정된 자료는 본체와 연결된 컴퓨터로 수집되며, 수집된 자료는 ASCII 또는 Binary 형식으로 저장된다.

레이저 프로파일러를 이용하여 평가용 대상물의 표면 거칠기 측정을 위해서 수치근점사진측량으로 실시한 영역을 포함할 수 있도록 보다 넓은 영역을 절삭기를 이용하여 절취하였다. 절취한 샘플 중 샘플 3,4의 표면은 색깔변화가 심하므로 빛의 반사량이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 색깔변화에 따른 오차를 최소화하기 위하여 흰색 아크릴 물감을 표면에 얇게 칠한 후 높이 값을 측정하였다.

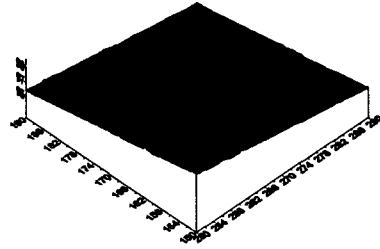
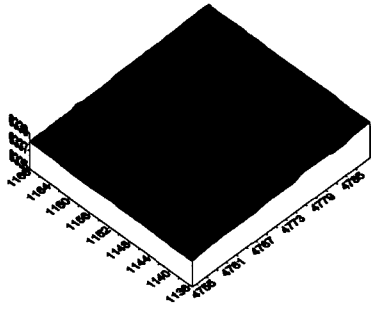
평가용 대상물의 높이는 0.2mm 간격으로 측정하였으며, 수치근점사진측량의 샘플영역을 포함할 수 있도록 모두 200×200점(40×40mm)을 측정하였다. 레이저 프로파일러로 독취한 높이 값의 null 값은 앞에서 언급한 방법으로 보간한 후, 0.2mm 격자간격으로 수치표고모델을 작성하였다. Fig. 4의 (e), (f), (g), (h)는 레이저 프로파일러에 의한 평가용 대상물에 대한 샘플영역의 수치표고모델을 나타낸 것이며, X, Y, Z축에 대한 스케일은 동일하다.



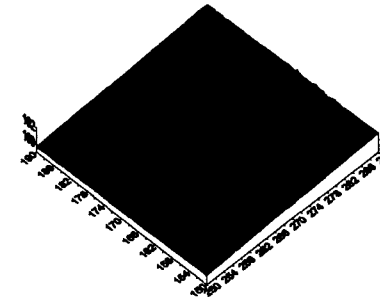
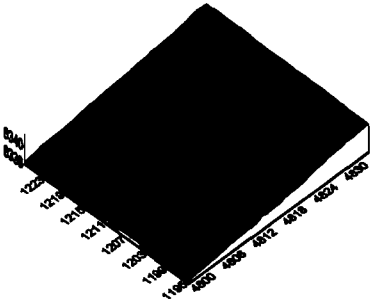
(a) Sample 1(26×26mm) by photogrammetry. (e) Sample 1(40×40mm) by profilometer.



(b) Sample 2(23×23mm) by photogrammetry. (f) Sample 2(40×40mm) by profilometer.



(c) Sample 3(33×33mm) by photogrammetry. (g) Sample 3(40×40mm) by profilometer.



(d) Sample 4(33×33mm) by photogrammetry. (h) Sample 4(40×40mm) by profilometer.

Fig. 4. DEM on each sample area for appraisal of applied reference surface.

3.3 기준면으로부터 표면 거칠기 측정

대상영역에 대한 전체적인 표면기하의 특성파악을 위하여 기준면으로부터의 수직거리를 평균제곱근 한 평균제곱근 거칠기(RMS roughness)와 표면에 대한 경사의 평균제곱근인 Z2s를 구하여 두 방법의 정밀도를 비교하고자 하였다. Table 2는 두 방법에 의한 샘플영역내의 모든 점들과 적용기준면간의 수직거리를 이용한 평균제곱근 거칠기를 나타낸 것이다. 여기서 샘플 1과 2는 기준곡면만을 적용하였으며, 샘플 3과 4는 기준평면만을 적용하였다. Table 3은 기준평면과 대상영역 표면간의 Z2s를 나타낸 것이다. 여기서, Z2s가 평면을 기준으로 한 파라미터이므로 샘플 1, 2, 3, 4 모두 기준평면으로부터 산출된 수직거리만을 적용하였다.

Table 2. RMS roughness from the reference surface by digital photogrammetry and laser profilometer(unit : mm)

Method Reference surface Sample area	Digital photogrammetry		Laser profilometer	
	surface	plane	surface	plane
Sample 1	0.100		0.156	
Sample 2	0.103		0.113	
Sample 3		0.065		0.054
Sample 4		0.078		0.041

Table 3. Z2s between reference plane and topography

Method Sample area	Digital photogrammetry	Laser profilometer
Sample 1	0.159	0.260
Sample 2	0.182	0.263
Sample 3	0.155	0.266
Sample 4	0.130	0.221

Table 2에서 RMS 거칠기는 샘플 1, 2의 경우 레이저 프로파일러의 값이 크며, 샘플 3, 4의 경우 수치사진측량기법의 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 두 방법에 의한 RMS 거칠기의 차이는 0.011mm ~ 0.056mm의 결과를 얻을 수 있었으며, 샘플 1, 2의 경우 자연상태에서 연마된 암석이기 때문에 두 방법 모두 인공적으로 절삭 가공한 샘플 3, 4에 비해 약간의 거칠기가 존재함을 알 수 있다. Table 3에서 Z2s는 샘플 3, 4의 경우 RMS 거칠기와는 달리 수치사진측량의 결과 값보다 레이저 프로파일러의 결과 값이 크게 나타났다. 이는 진폭과 관련한 거칠기 파라미터가 대상영역 전체에 대한 큰 규모의 굴곡만을 반영하는데 비해 경사와 관련한 거칠기 파라미터는 더욱더 작은 규모의 세밀한 거칠기를 반영함으로써 RMS 거칠기와 Z2s가 상관성이 떨어지는 결과 값을 얻었기 때문인 것으로 판단되어진다.

전반적으로 수치사진측량에 의한 경사보다 레이저 프로파일러의 경사가 0.081 ~ 0.111정도로 크게 나타났으며, 특히 레이저 프로파일러의 결과 값 중 샘플 3의 경우, 샘플1, 2보다 오히려 거칠기가 크게 나타났음을 알 수 있다.

결과적으로 본 연구에서 사용한 샘플영역이 거칠기가 거의 없는 아주 매끄러운 면이기 때문에 거칠기 파라미터의 결과 값이 0에 가까운 값을 가져야 된다는 전제하에서는 전반적으로 수치사진측량기법의 정밀도가 높은 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 이는 수치사진측량에 의한 위치산출에 있어서 오차의 원인이 될 수 있는 수치영상의 여러 가지 기하학적인 왜곡, 입체모델간의 과도한 시차차로 인한 불량 매칭쌍의 위치왜곡 등에 대하여 카메라의 검정자료와 적절한 보정기법으로 왜곡의 크기를 최소화 해준 반면, 실험에 사용된 레이저 프로파일러는 자체의 검정자료를 제공하고 있지 않으므로 3차원 위치결정에 있어서 오차의 원인으로 작용할 수 있는 측정시 미세한 진동 또는 레이저 투과성, 빛의 반사, 센서헤드 높이영향 등에 의한 왜곡크기를 규명하여 보정하지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 Rolleiflex 6006 측정용 카메라로부터 획득한 암석의 수치영상을 이용하여 표면 거칠기 정밀측정을 위한 수치근점사진측량 기법을 제시할 수 있었다. 또한 기준평면 및 기준곡면으로부터 이상적인 평면과 곡면으로 이루어진 암석의 표면 거칠기를 측정하고, 이를 레이저 프로파일러로 측정된 값과 비교한 결과 RMS 거칠기 파라미터의 경우 최소 0.011에서 최대 0.056mm, Z2s 파라미터의 경우 최소 0.081에서 최대 0.111의 차이가 났다. 그러나 본 연구에서 사용한 대상영역의 거칠기가 거의 없는 아주 매끄러운 면이기 때문에 거칠기 파라미터의 결과 값이 0에 가까운 값을 가져야 된다는 전제하에서는 전반적으로 수치사진측량기법의 정밀도가 높은 결과를 보여주었다.

참고문헌

- Ahn, K. W. (1994): Correction for scanning errors of a CCD camera scanner. *Journal of the Korean Society of Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 12(2), 173-180.
- Belem, T., Homand-Etienne, F., Souley, M. (2000): Quantitative parameters for rock joint surface roughness. *Rock Mech. Rock Engng.* 33(4), 217-242.
- Fardin, N., Stephansson, O., Lanru Jing. (2001): The scale dependence of rock joint surface roughness. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 659-669.
- Jessell, M. W., Cox, S. J. D., Schwarze, P. Power. W. L. (1996): The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique. *Geol. Soc. Special Pub.*, 92, 27-37.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J. (1999): Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, 5-18.
- Lanaro, F. (2000): A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 1195-1210.
- Rollei fototechnic. (1998): Rolleiflex 6006 User's Manual. Rollei fototechnic GmbH & CO KG, West Germany, 1-38.
- Swan, G. (1983): Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements. *Rock Mech. Rock Engng.* 16, 19-38.