

디지털 사진측량에 의한 암석의 절리면 거칠기 측정에 관한 연구

서현교, 엄정기*

A Study on Measurement of Rock Joint Roughness
Using the Digital Photogrammetry

Seo Hyeonkyo, Jeong-Gi Um*

Abstract Applicability of the digital photogrammetry technique for measurement of rock joint roughness is addressed in this study using the DSLR camera. Measurements of roughness were performed for two rock joint specimens using the laser profiler and the digital photogrammetry technique. The statistical roughness parameters were estimated for two dimensional roughness profiles constructed from each method. Obtained results showed that the statistical roughness parameters estimated from the digital photogrammetry technique were lower than that based on the laser profilometer, even though a high degree of correlation might exist between them. The effects of camera direction on roughness measurements were found to negligible in practice. The digital photogrammetry could be a cost effective method to measure the roughness of rock joints with various scale at the fields.

Key words Joint roughness, Laser profiler, Digital photogrammetry, Statistical roughness parameters

초 록 이 연구는 암석 절리면의 거칠기 측정을 위하여 범용의 일안반사식 디지털카메라를 이용한 사진측량의 방법론 및 적용성을 고찰하였다. 암석 절리면에 대한 사진측량 및 레이저 프로파일러에 의한 측정을 통하여 다양한 이차원적 거칠기 단면을 구성하고 통계적 거칠기 파라미터를 산정한 결과 디지털 사진측량이 레이저 프로파일러에 비하여 거칠기를 과소평가 하는 것으로 나타났다. 거칠기의 정도에 따른 거칠기 파라미터의 변화 양상은 두 측정법에서 매우 유사하게 나타났다. 카메라의 촬영방향은 거칠기 측정에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 디지털 사진측량은 현장에서 비교적 큰 제약 없이 저비용으로 다양한 규모의 거칠기를 측정하는 데에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 절리면 거칠기, 레이저 프로파일러, 디지털 사진측량, 통계적 거칠기 파라미터

1. 서 론

암석 절리면 거칠기는 암반의 강도 및 변형, 수리학적 특성, 파괴 거동 등을 좌우하는 데에 지대한 영향을 미친다. 절리면 거칠기가 암반의 전단강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 국내외적으로 많은 연구가 수행된 바 있

며 현재에도 암석 절리면의 거칠기는 암반공학 분야에서 중요한 연구 주제 중 하나로 인식되고 있다. Barton(1973)이 절리면 거칠기계수(JRC; Joint Roughness Coefficient)를 제안한 이후 JRC가 갖는 단점을 보완하기 위하여 여러 연구자들은 수치화된 암석 절리면의 이차원적 프로파일 또는 삼차원적 거칠기 면을 이용하여 산정할 수 있는 통계적 거칠기 파라미터, 프랙탈 파라미터 등을 거칠기 크기의 정량적 지수로 제안하였다(Seo and Um, 2012).

이와 같은 거칠기 파라미터를 산정하기 위하여 초창기의 프로파일계이지(Barton and Choubey, 1977; Brown and scholz, 1985)를 비롯하여, 촉침식 프로파일러(Swan, 1983; Lee et al., 1990, Kulatilake et al., 1995), 레이저 프로파일러(Huang et al., 1992, Jermy, 1995, Lee et al., 1997, Bea and Lee, 2002, Jang et al., 2010, Park

Received: Dec. 10, 2012

Revised: Dec. 18, 2012

Accepted: Dec. 19, 2012

***Corresponding Author:** Jeong-Gi Um

Tel) +82516296559, Fax) +82516296553

E-Mail) jum@pknu.ac.kr

Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

et al., 2012), 라이더(Kim and John, 2009) 등을 이용한 거칠기 측정 방법으로 암석 절리면의 표고가 측정되었다. 이들 중 레이저 프로파일러가 고해상도로 비교적 정밀하게 암석표면의 형상화 할 수 있는 것으로 인식되고 있으나, 이러한 장점에 불구하고 실내실험실에서만 사용 가능하다는 점과 장비가 고가라는 점으로 인하여 현장 기술자들은 현재에도 프로파일게이지를 이용한 JRC에 의한 거칠기 정량화를 선호하는 실정이다.

최근에는 시간 및 비용 면에서 경쟁력이 있는 사진측량을 이용한 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 암반공학 분야에서 사진측량기법은 노동에서 수작업으로 이루어지는 절리분포에 대한 조사를 효과적으로 수행하기 위한 대안으로 적용한 것이 대부분이다(Brandow et al., 1976, Hagan, 1980, Yeu et al., 1983, Franklin and Bennett, 1988, Ryu et al., 2000, Jung and Park, 2003). Jung and Park(2003)은 암반사면에 대하여 디지털카메라와 레이저스캐너를 이용하여 수치표고모델(DEM; digital elevation model)을 구현하고 각각에 대한 비교 분석을 통하여 사진측량에 의한 암석 표면의 DEM 획득 가능성을 제시하였다.

암석의 절리면 거칠기와 관련된 연구로는 레이저 프로파일러와 카메라 방식의 3-D 스캐너에 의한 결과를 비교·분석하여 3-D 스캐너의 정확성을 고찰한 연구(Hong et al., 2006)가 수행된 바 있다. 최근에는 초고가의 라이더 장비를 이용하여 대규모 암석 절리면의 거칠기에 대한 측정을 시도한 연구(Kim and John, 2009)와

디지털화상보정법에 의한 JRC 평가에 관한 연구(Tung et al., 2009)도 보고되었다. 사진측량을 이용한 암석 거칠기의 측정과 관련된 기존의 연구는 현장적용성과 표준화 측면에서 아직 요소이론에 대한 확립이 미흡한 실정이다. 특히 3-D 스캐너 또는 라이더와 같은 고가의 전용장비의 사용은 비용적 측면에서도 제약이 따른다. 또한, 미세 거칠기 측정을 위해서는 실내실험실에서 거칠기 측정에 의존해야 된다는 점은 현장적용성 확보를 위하여 개선의 여지가 있다.

이 연구는 암석 절리면의 거칠기 측정을 위하여 범용의 일안반사식 디지털카메라를 이용한 사진측량의 방법론 및 적용성을 고찰하였다. 이를 위하여 암석 절리면에 대한 거칠기 측정이 사진측량 및 레이저 프로파일러를 통하여 수행되었으며, 절리 거칠기 면에 대한 각각의 수치표고모델로부터 다양한 거칠기 정도를 갖는 거칠기 단면이 추출되었다. 이와 같이 사진측량 및 레이저 프로파일러에 의해 추출된 거칠기 단면에 대하여 통계적 거칠기 파라미터를 산정하고 두 측정방법에 의한 결과가 제시되었다. 또한, 이 연구는 사진촬영 조건이 측정 결과에 미치는 영향에 대해서도 분석하였다.

2. 절리면의 거칠기 측정

2.1 디지털 사진측량

일반적으로 사진측량은 사진좌표계에서 임의의 점에 대한 삼차원 좌표를 산정하기 위하여 시차방정식을 사용하

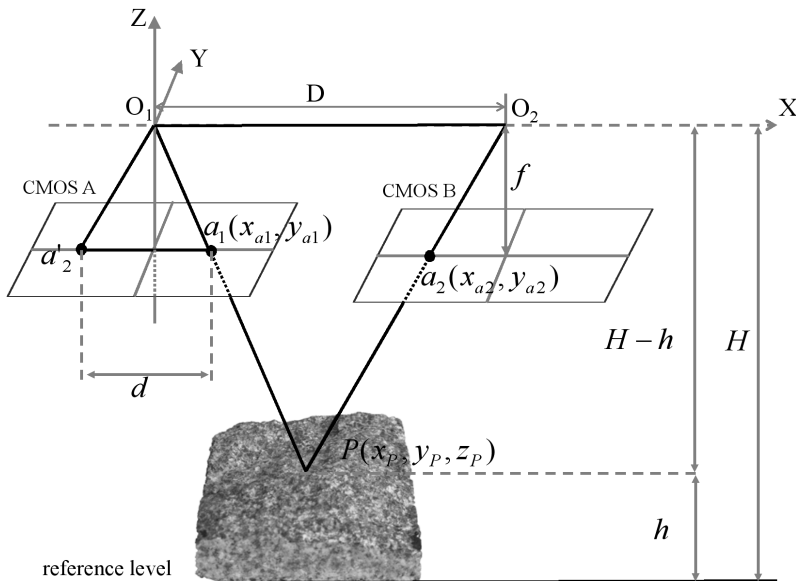


Fig. 1. Principles of a digital photogrammetry

는데, 이는 Fig. 1에서와 같이 피사체 상의 임의의 점 P와 카메라의 투영중심 O_1 그리고 필름면에 투영된 피사체의 점 a_1 이 일직선상에 위치하는 공선조건(collinearity condition)이 기본원리이다. 필름카메라 대신 디지털카메라에서는 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor) 또는 CCD(charge coupled device) 센서가 필름의 역할을 대신한다. 카메라를 평행 이동하여 피사체를 다른 위치에서 촬영하면 피사체 내의 동일한 지점에 대한 디지털 정보는 각각의 카메라 센서에서 다른 위치에 기록된다. Fig. 1에서와 같이 동일한 피사체에 대하여 디지털카메라를 거리 D만큼 평행 이동하여 다른 위치에서 촬영하면 피사체의 점 P로부터 각각의 촬영위치에 대한 투영중심 O_1 과 O_2 , 그리고 각각의 CMOS센서 A와 B에 투영된 a_1 과 a_2 를 연결하는 두 개의 직선이 형성된다. 여기서 센서 B에 투영된 점 a_2 를 센서 A에서의 같은 위치 a_2' 으로 이동시키면 삼각형 O_1O_2P 와 삼각형 $O_1a_1a_2'$ 은 닮음꼴을 이루게 된다. 점 P의 공간좌표는 이들 닮음꼴 삼각형이 갖는 기하학적 정리를 통하여 다음과 같이 유도된 식으로부터 산정할 수 있다.

$$x_P = \frac{Dx_{a2}}{d} \quad (1a)$$

$$y_P = \frac{Dy_{a2}}{d} \quad (1b)$$

$$H-h = \frac{Df}{d} \quad (1c)$$

여기서, f는 초점거리, d는 시차에 의한 센서 상에서의 거리이다. Fig. 2는 암석 절리면에 대하여 디지털카메라를 이용하여 디지털영상을 획득한 후 산정한 포인트 클라우드를 보여주는 예이다. 포인트 클라우드를 이루는 각각의 점에 대한 공간좌표는 식 (1)에 의하여 산정될 수 있다. 이 연구에서는 디지털영상으로부터 포인트 클라우드를 구현하기까지 렌즈의 화각에 따른 왜곡 보정과 일련의 공정을 수행할 수 있는 3G사의 ShapeMetrix3D 소프트웨어를 사용하였다.

2.2 절리면에 대한 수치표고모델

이 연구는 레이저 프로파일러를 이용하여 측정된 절리면 거칠기를 기준으로 사진측량에 의한 절리면 거칠기를 비교함으로써 거칠기 연구를 위한 사진측량 기법의 적용 가능성을 고찰하는 것이 주목적이다. 이를 위하여 이 연구에서 사용된 암석 시료는 국내에 널리 분포하는 화강암이다. 현장에서 절리를 포함하는 화강암 블록을 채취하고 실내 성형을 통하여 GR-1(66.5 mm×73.5 mm) 및 GR-2(65.5 mm× 82.5 mm) 두 개의 시편이 제작되었다. Fig. 3은 이 연구에서 사용한 시편의 사진이다. 두 개의 화강암 절리면에 대한 수치표고모델이 레이저 프로파일러와 디지털 사진측량에 의하여 각각 구현되었다.

이 연구에서 사용된 삼차원 레이저 프로파일러는 최대 200 mm × 200 mm의 면적을 측정할 수 있으며 높이 조절은 100 mm 까지 가능하다(Fig. 4). 최대 측정 속도는 10 mm/sec이며 제어 정밀도는 1/1000 mm이다. 각각의 시편에 대한 측정간격은 0.5 mm로 설정하였다. 즉, 폭(width) 방향으로 시작점에서 끝점까지 0.5 mm

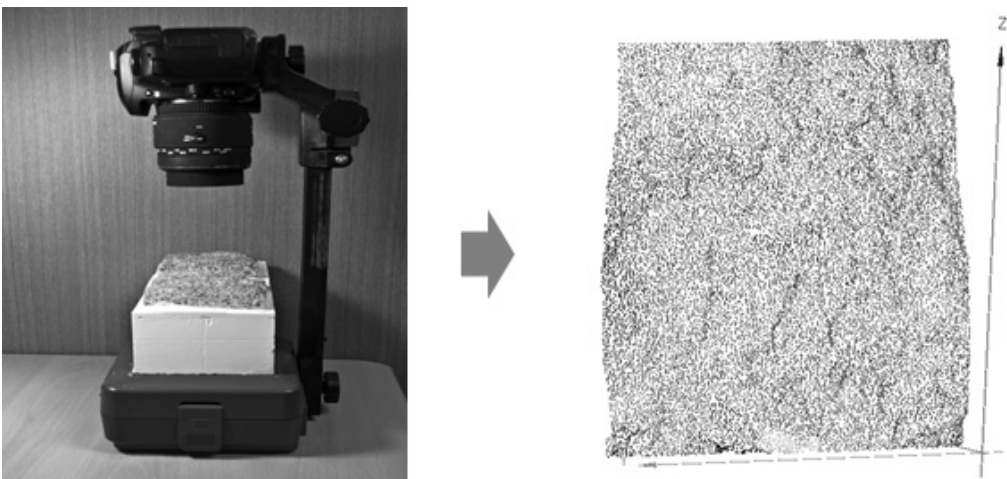


Fig. 2. Construction of points clouds using the digital photogrammetry

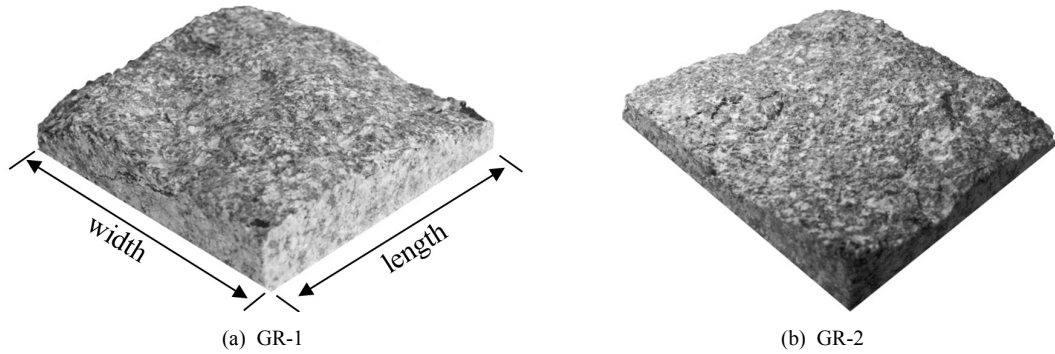


Fig. 3. Photographs of rock joint specimens



Fig. 4. The laser profiler which was used for roughness measurements

간격으로 연속적으로 단면을 측정한 후 길이(length) 방향으로 0.5 mm 이동하여 다시 폭 방향으로 측정하는 방식으로 각각의 절리면에 대하여 수치표고모형을 구현하기 위한 자료가 취득되었다.

이 연구에서 디지털 사진측량에 사용된 카메라는 Nikon 사의 D90 기종이다. 디지털 일안반사식 카메라인 D90의 유효화소수는 약 1200만 화소로이며, 연구에 사용된 영상의 크기는 L size(4288×2848 화소)이다. 렌즈는 Sigma사의 50 mm 접사렌즈를 사용하였다. 촬영 거리는 절리면에서 카메라까지 300 mm이며, 수평으로 50 mm 이동하여 촬영하는 방식으로 각각의 시편에서 두 개의 디지털영상이 취득되었다. 각각의 절리면에서 취득된 영상으로부터 왜곡 보정과 영상 정합 과정을 통하여 포인트 클라우드가 산정되었으며 0.5 mm의 정방형 격자로 수치표고모형을 위한 자료가 추출되었다.

Fig. 5는 레이저 프로파일러와 디지털 사진측량에 의

한 수치표고모형을 보여준다.

GR-1 및 GR-2에 대한 수치표고모형 결과를 육안으로 관찰하였을 때 절리면 거칠기에 의한 기복을 재현함에 있어서 두 측정방법 간의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 미세 거칠기에 의한 표면기복을 재현함에 있어서는 레이저 프로파일러에 의한 결과가 디지털 사진측량에 의한 결과보다 우수함을 인지할 수 있다. Fig. 6은 레이저 프로파일러와 디지털 사진측량에 의한 결과를 비교하기 위하여 GR-2 시편에 대한 수치표고모형에서 특정 부분의 거칠기 단면을 구성한 예이다. 암석 절리면의 동일한 지점에 대한 두 측정법에 의한 거칠기 단면을 비교할 때 전반적인 표면기복의 형태는 유사하나 레이저 프로파일러가 더욱 세밀하게 시료의 표면을 재현하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 사용되는 측정법에 따른 거칠기 차이를 파악하기 위하여 수치표고모형에 대한 정량적 분석이 필요하다.

3. 거칠기 측정법에 따른 거칠기 파라미터의 변화

이 연구에서는 거칠기 크기에 대한 정량적 분석을 위하여 Fig. 6과 같이 수치표고모형에서 추출한 이차원적 거칠기 단면에 대하여 기존에 통계적 거칠기 분석을 통하여 제안된 다양한 거칠기 파라미터 중 일차미분의 제곱평균자승근(Z_2), 평균기울기(SL_{ave}), 기울기의 표준편차(SD_{Sl}) 등을 적용하였다. 이차원적 거칠기 단면에서 측정간격(Δx)이 일정하고 전체 측정수가 N 일 때 각각의 통계량을 산정하는 식은 다음과 같다(Seo and Um, 2012).

$$Z_2 = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

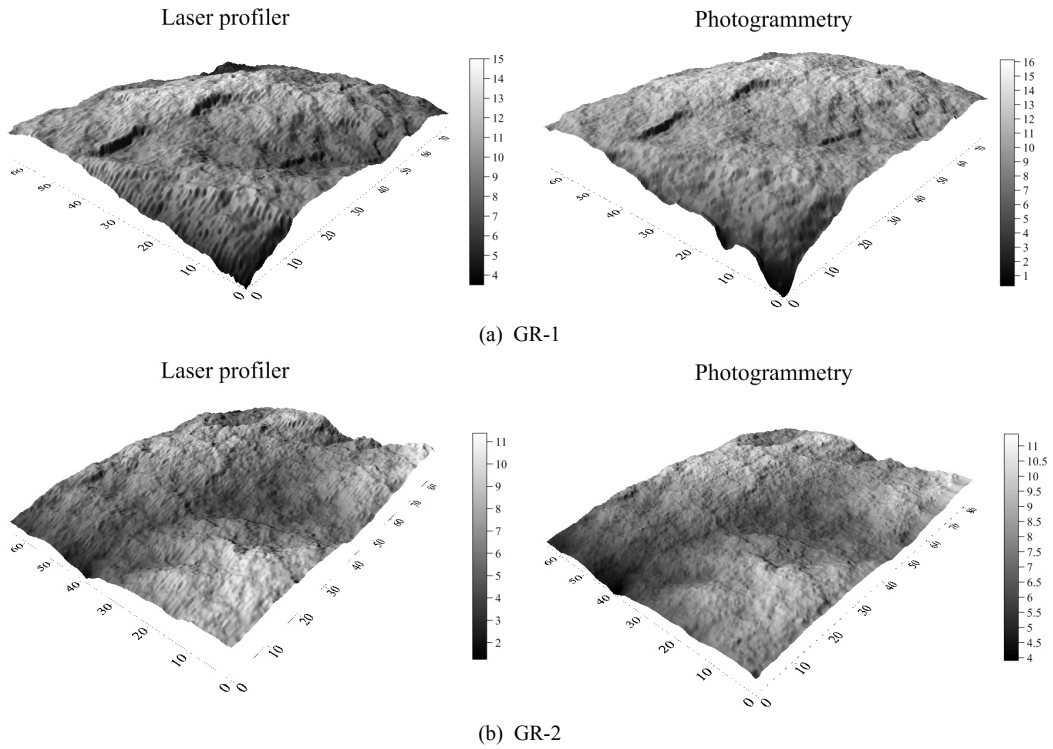


Fig. 5. Digital elevation models of rock joint surfaces using the data from laser profiler and photogrammetry

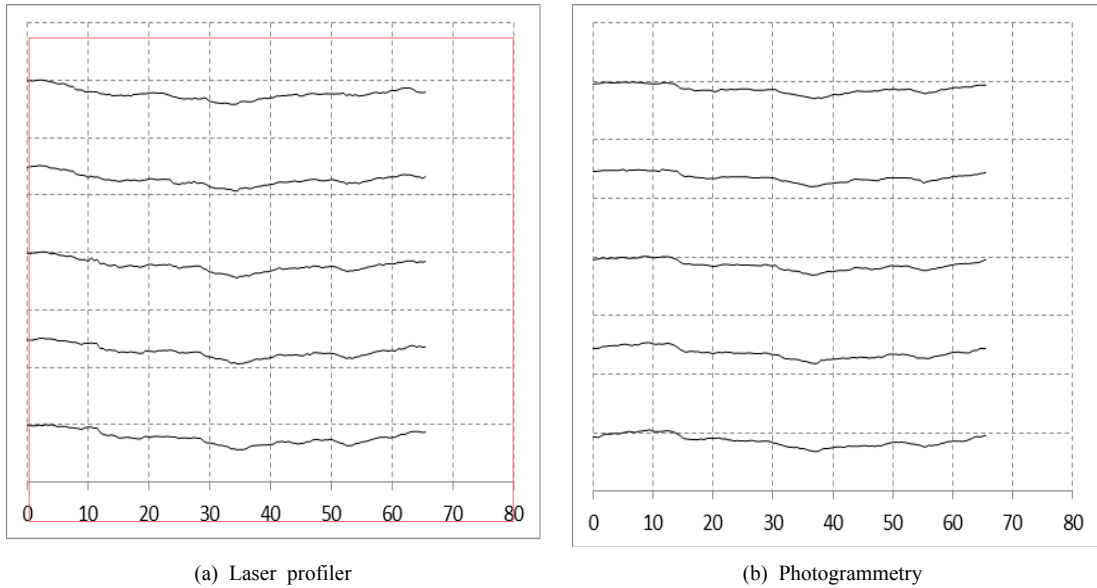


Fig. 6. Selected profiles from digital elevation models of GR-2

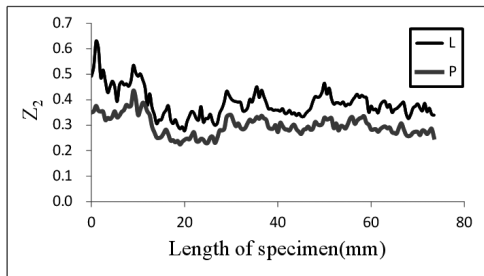
$$SL_{ave} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right| \quad (3)$$

$$SD_{SL} = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\left| \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right| - SL_{ave} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

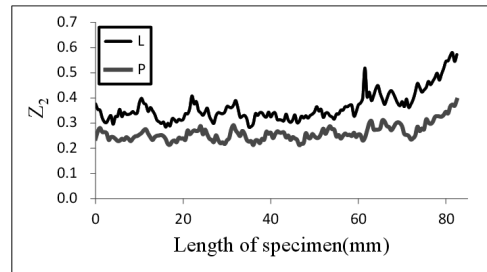
이 연구의 수치표고모델로부터 시료의 폭 방향으로 추출한 이차원적 거칠기 단면에서 측정 점 간의 간격은 $\Delta x=0.5\text{ mm}$ 이다. 이와 같은 이차원적 거칠기 단면이 시료의 길이 방향으로 0.5 mm 간격으로 추출되었으며, 거칠기 단면의 총 개수는 GR-1, GR-2에서 각각 148개, 166개이다. Fig. 7은 GR-1에서 두 측정법에 의한 각각의 수치표고모델로부터 추출한 이차원적 거칠기 단면에 대하여 산정한 통계적 거칠기 파라미터 값을 도시한 것이다. 여기서, 가로축은 148개의 거칠기 단면이 시료의 길이 방향을 따라 시작되는 위치이며 세로축은 각각의 이차원적 거칠기 단면에서 산정된 통계적 거칠기 파라미터 값이다. Fig. 7에서와 같이 레이저 프로파일러와 디지털 사진측량에 의한 거칠기 크기를 정량적으로 비교하였을

때 적용한 모든 파라미터에서 레이저 프로파일러에 의한 거칠기 값이 크게 산정되었음을 알 수 있다. 그러나 전체적인 거칠기 값의 변화 양상은 매우 유사하다고 판단된다. Fig. 8에 나타난 GR-2의 결과에서도 디지털 사진측량에 의한 거칠기 값이 레이저 프로파일러에 의한 거칠기 값보다 전체적으로 낮은 값을 나타내지만 거칠기의 정도에 따른 파라미터의 변화양상은 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 범용의 디지털 카메라에 의한 근접사진측량이 미세 거칠기의 진폭 또는 기울기를 레이저 프로파일러 만큼의 정밀도로 고려하기에는 어려움이 있을 수 있지만 디지털 사진측량이 거칠기의 측정에 유용하게 활용될 수 있는 가능성을 지시한다.

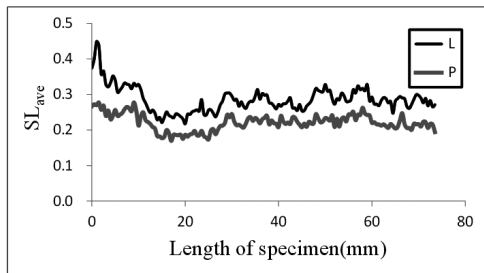
Tung et al.(2009)은 디지털 일안반사식 카메라(Canon



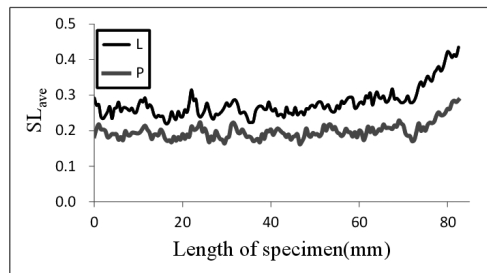
(a)



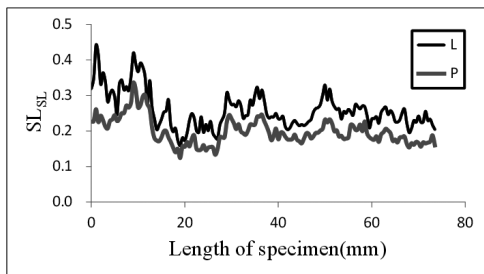
(a)



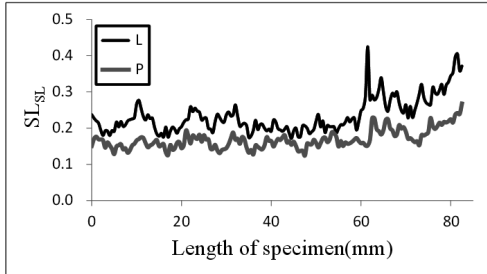
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7. Variation of statistical parameters for each profile in the GR-1 using the laser profiler (L) and photogrammetry (P)

Fig. 8. Variation of statistical parameters for each profile in the GR-2 using the laser profiler and photogrammetry

EOS 400D)와 60 mm 접사렌즈를 이용한 사진측량을 통하여 Z_2 에 의한 JRC를 산정한 결과 측정 간의 간격이 0.5 mm인 경우 레이저 프로파일러에 비해 낮은 값을 나타내나 측정 간의 간격이 1 mm에서는 두 결과가 거의 유사하다고 보고한 바 있다. 또한, 사진측량을 이용한 방법에서 측정 간의 간격이 0.5 mm에서 1 mm, 2 mm로 늘어남에 따라 더욱 낮은 JRC 값을 도출하였다. 측정 간의 간격이 거칠기 파라미터 값에 미치는 영향에 대해서는 기존에 여러 연구자들에 의하여 논의된 바 있으며(Seo and Um, 2012), 간격이 커질수록 두 방법에 의한 결과가 더욱 일치할 것으로 사료된다. 예로서 측정 간의 간격이 10 mm 정도로 큰 경우라고 가정하면 레이저 프로파일러나 사진측량에 의한 방법 모두 매우 평탄한 절리면에 해당하는 거칠기 파라미터 값을 도출할 것이다. 이 연구는 사진측량 기법이 가질 수 있는 문제점 및 현장적용 가능성을 고찰하는 데에 초점을 두고자하며 측정 간의 거리에 의한 거칠기 값의 변화에 관계된 사항은 논외로 한다.

Table 1은 GR-1 및 GR-2에 대하여 계산한 통계적 거칠기 파라미터의 평균, 표준편차, 최대값, 최소값 등을 수록하고 있다. 수치표고모델에서 각각의 거칠기 단면에 대한 통계적 거칠기 파라미터의 평균은 Z_2 , SL_{ave} , SD_{SL} 모두 GR-1의 경우 약 20%, GR-2의 경우 약 30% 가량 디지털 사진측량에 의한 값이 레이저 프로파일러에 의한 값보다 낮게 나타났다. Fig. 9는 각각 GR-1에서 동일한 거칠기 단면에 대하여 두 측정법에 의해 산정된 통계적 거칠기 파라미터 값을 도시한 것이다. 여기서, 가로축은 레이저 프로파일러에 의한 값을, 세로축은 디지털 사진측량에 의한 값으로 두 측정방식에 의한

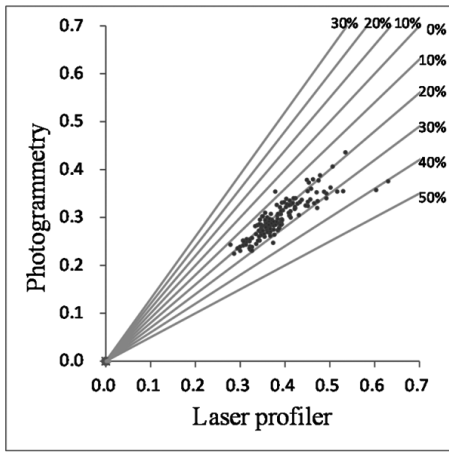
파라미터 값이 같다면 파라미터 값은 오차 0%선 상에 위치할 것이다. 이 연구에서 사용한 모든 파라미터 공히 디지털 사진측량에 의한 값이 낮게 나타남을 알 수 있다. 레이저 프로파일러에 의한 파라미터 값이 높게 산정된 거칠기 단면일수록 두 방법 간의 차이가 더욱 커지는 경향을 확인할 수 있지만 전체적으로 20~30% 범위의 오차 내에 파라미터 값이 산포한다. 따라서 범용의 디지털카메라를 이용한 근접사진측량에 의한 거칠기 측정법이 레이저 프로파일러에 의한 측정법 보다 거칠기를 과소평가할 가능성이 있지만 파라미터 값의 산포 특성은 두 방법 간에 상관성이 존재할 수 있음을 지시한다고 판단된다. Z_2 및 SL_{ave} 의 경우 가장 거친 단면에서 디지털 사진측량에 의한 값이 40% 정도 작게 나타났음을 알 수 있는데, 이는 이 연구에서의 디지털 사진측량이 절리면에서 측정점 간의 표고 차이에 의한 진폭 또는 미세 거칠기의 기울기가 클 경우 레이저 프로파일러 수준의 정밀한 수치표고모델의 구현이 어려울 수 있음을 의미한다.

Fig. 10 및 Fig. 11는 각각 GR-1 및 GR-2에 대하여 디지털 사진측량에 의한 파라미터 값을 일정 비율만큼 증가시킨 후 레이저 프로파일러에 의한 파라미터 값과 함께 그래프에 나타낸 것이다. 디지털 사진측량에 의한 파라미터 값에 대하여 두 측정법 간의 오차를 평균한 25%를 증가시킨 결과 두 측정법에 의한 결과가 유사해짐을 확인할 수 있다. 이는 디지털 사진측량에 의한 파라미터 값과 레이저 프로파일러에 의한 파라미터 값의 상관성에 대한 적절한 지침이 수립된다면 현장적용성이 확보될 수 있다고 사료되며, 이를 위하여 체계적인 후속 연구가 뒷받침 되어야 할 것이다.

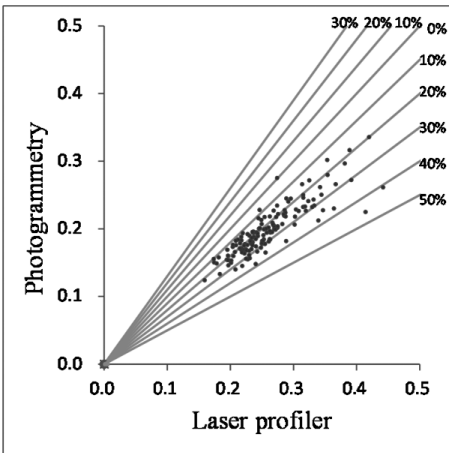
Table 1. Statistics of estimated roughness parameters

	Z_2		SL_{ave}		SD_{SL}	
	L	P	L	P	L	P
GR-1						
Ave.	0.38	0.30	0.28	0.23	0.26	0.20
Stdev.	0.06	0.05	0.04	0.03	0.05	0.05
Max	0.63	0.57	0.45	0.36	0.44	0.44
Min	0.28	0.22	0.22	0.17	0.16	0.12
GR-2						
Ave.	0.36	0.26	0.28	0.20	0.23	0.17
Stdev.	0.06	0.03	0.04	0.02	0.05	0.03
Max	0.58	0.39	0.44	0.29	0.42	0.27
Min	0.28	0.21	0.22	0.16	0.17	0.12

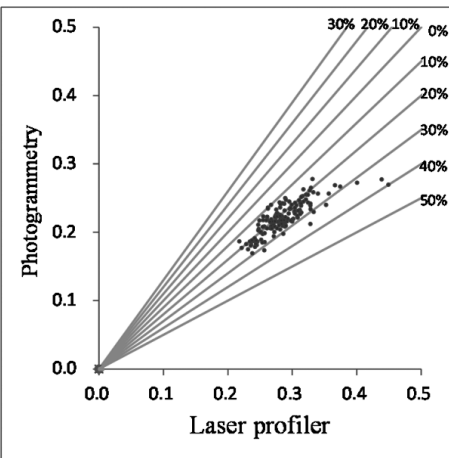
note: L=laser profiler, P=photogrammetry



(a)

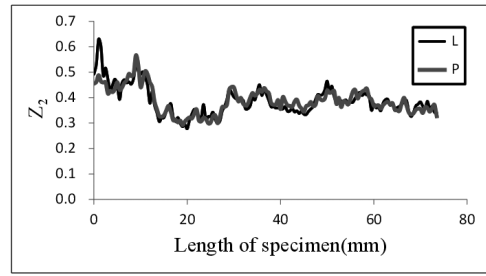


(b)

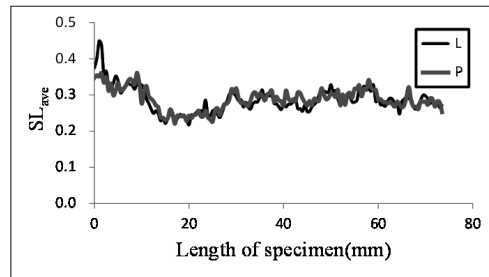


(c)

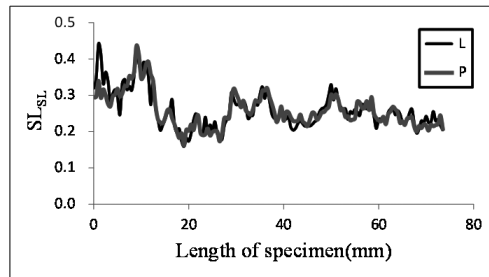
Fig. 9. Laser profiler vs. photogrammetry for the GR-1



(a)



(b)

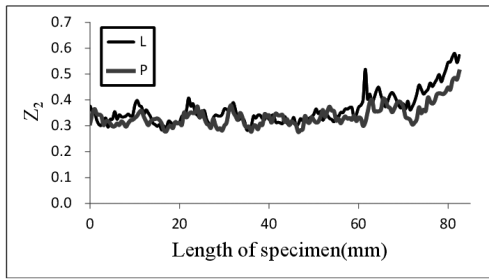


(c)

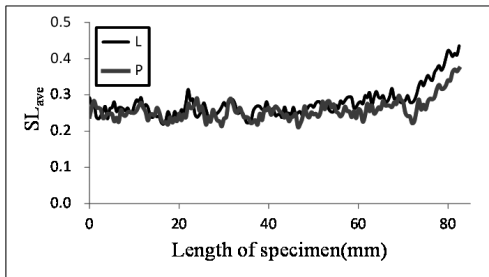
Fig. 10. Results obtained from estimated statistical parameters of photogrammetry with 25% increasement for the GR-1

4. 촬영 조건이 거칠기 측정에 미치는 영향

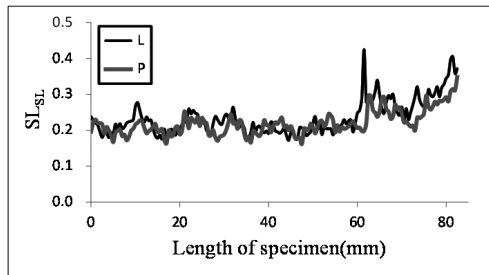
앞에서 논의한 연구결과는 암석 절리면에 대하여 수직으로 디지털 영상을 획득한 경우에 해당한다. 현장에서 암석 절리면에 대하여 수직으로 카메라를 설치시키기에는 많은 제약이 따를 것으로 사료된다. 이 연구에서는 카메라의 촬영방향과 절리면의 수직방향에 이루는 각도를 40° 이내로 제한하고 이에 따른 거칠기 파라미터의 변화를 고찰하였다. 이를 위하여 GR-1 시편의 66.5 mm×66.5 mm 면적에 대하여 촬영방향을 연직방향으로 설정하고 절리면을 0°, 20°, 40°의 경사를 유지시키면서 촬영한 디지털 영상으로부터 각각에 대한 수



(a)



(b)

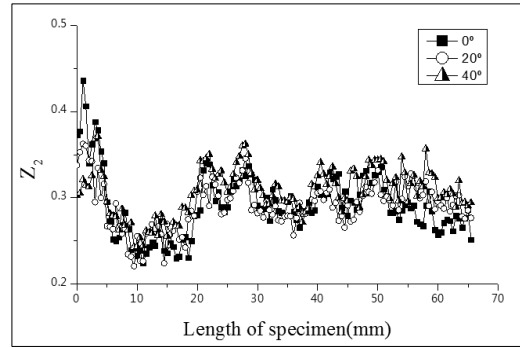


(c)

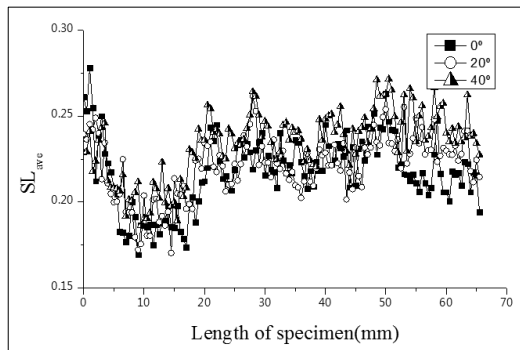
Fig. 11. Results obtained from estimated statistical parameters of photogrammetry with 25% increase for the GR-2

치표고모델을 구현하였다.

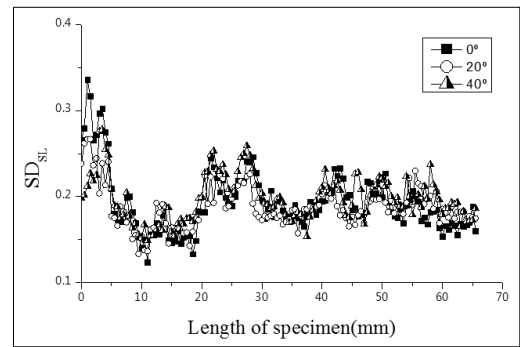
Fig. 12는 절리면의 경사에 따라 산정된 통계적 거칠기 파라미터의 결과를 보여준다. 절리면의 경사가 20° 및 40°인 경우에 산정된 파라미터 값은 수평인 절리면의 경우와 비교할 때 전반적인 변화 양상에 있어서 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 특히, 사용된 통계적 파라미터 중 Z_2 와 SD_{SL} 이 SL_{ave} 보다 차이가 작음을 알 수 있다. Table 2는 촬영 각도에 따른 통계적 거칠기 파라미터의 평균, 표준편차, 최대값, 최소값 등을 수록하고 있는데, 사용된 모든 파라미터에서 평균과 표준편차의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 디지털 사진측량이 현장 적용에 있어서 발생할 수 있는



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. The effects of camera direction on roughness measurements

제약을 극복할 수 있다는 가능성을 시사한다. 다만 최대값의 변화는 절리면의 특정 단면에서 큰 차이가 발생할 수도 있다는 것을 지시한다.

최근에 수행된 거칠기 측정법에 관한 연구 중 카메라 방식의 3-D 스캐너를 적용한 연구는 주목할 만한 연구 결과를 도출하였다. Hong et al.(2006)은 카메라 방식의 3-D 스캐너를 이용하여 암석 거칠기를 측정하고 거칠

Table 2. Statistics of estimated roughness parameters with respect to camera direction

angle	Z ₂			SL _{ave}			SD _{SL}		
	0°	20°	40°	0°	20°	40°	0°	20°	40°
Ave.	0.29	0.29	0.31	0.22	0.22	0.23	0.19	0.19	0.20
Stdev.	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
Max	0.44	0.36	0.37	0.28	0.26	0.27	0.34	0.27	0.28
Min	0.22	0.22	0.24	0.17	0.17	0.19	0.12	0.13	0.15

기가 레이저 프로파일러에 의한 방법보다 10% 정도 더 크게 평가된다고 보고한 바 있다. 또한, 신속성, 정밀성 및 정확성 면에서 카메라 방식의 3-D 스캐너에 의한 거칠기 측정법이 갖는 장점을 개진하였다. 그러나 장비의 고가성과 소규모의 절리면에 대한 실내측정만 가능한 점은 다양한 현장조건에 대하여 보편적으로 적용하기에는 제약이 따를 수 있다고 사료된다. 또한, 사용되는 거칠기 측정법에 따라 거칠기에 대한 평가가 달라지므로 측정법에 따라 측정 절차에 관련된 표준시험법의 제정과 거칠기 평가 기준을 확립하는 것이 무엇보다도 중요하다고 사료된다. 현재 암반공학 분야에서 국내외적으로 많은 연구자들이 사진측량과 관련된 연구를 수행하고 있으며, 차후 촬영거리와 관계된 촬영기선거리비에 의한 영향, 사용하는 렌즈에 따른 초점거리에 의한 영향 등과 같은 촬영조건에 대한 다양한 연구결과가 도출된다면 사진측량에 의한 거칠기 측정법의 현장적용성이 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

이 연구는 암석 절리면에 대하여 범용의 디지털 카메라에 의한 근접사진측량과 레이저 프로파일러에 의한 측정을 통하여 절리면 거칠기에 대한 수치표고모델을 구현하고 통계적 거칠기 파라미터를 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 측정 간의 간격이 0.5 mm인 거칠기 단면에 대하여 통계적 거칠기 파라미터를 산정한 결과 디지털 사진측량이 거칠기를 과소평가 하는 것으로 나타났다. 이는 범용의 디지털카메라와 렌즈를 사용한 사진측량이 미세 거칠기의 진폭 또는 기울기를 레이저 프로파일러의 정밀도로 고려하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.
2. 거칠기의 정도에 따른 거칠기 파라미터의 변화 양상은 두 측정법에서 매우 유사하게 나타났다. 두 측정법에 의한 결과 간에 상관성이 존재할 수 있다고 사

료되며 이를 위하여 다수의 거칠기 시편에 대한 측정·분석을 통한 후속 연구가 필요하다.

3. 절리면의 수직방향에 대하여 촬영방향이 이루는 각이 40° 이내인 경우 카메라의 촬영방향이 거칠기 측정에 주목할 만한 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 차후 촬영기선거리비 및 렌즈의 초점거리 등과 같은 촬영조건에 대한 적절한 지침이 수립된다면 현장적용성이 확보될 수 있을 것으로 기대된다.
4. 디지털 사진측량이 현장에서 저비용으로 다양한 규모의 거칠기 측정에 활용되기 위해서는 측정 절차에 관련된 표준시험법의 제정과 거칠기 평가 기준의 확립이 선행되어야 한다.

사 사

이 논문은 2009학년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었음(PS-2009-0203).

참고문헌

1. Bae, K. Y. and C. I. Lee, 2002, Development of a 3D roughness measurement system of rock joint using laser type displacement meter, Tunnel and Underground Space, Vol. 12, pp. 268-276.
2. Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engrg. Geology, Vol. 7, pp. 287-332.
3. Barton, N. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics (Springer-Verlag), Vol. 10, pp. 1-54.
4. Brandow, V. D., H. M. Karara, H. H. Damberger and H. F. Krause, A non-metric close-range photogrammetric system for mapping geologic structures in mines, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 43, 1976, pp. 637-648.
5. Brown, S. R. and C. H. Scholz, 1985, Broad band width study of the topography of natural rock surfaces, J. Geophys. Res. 90, pp. 12575-12582.
6. Franklin, J. A., N. H. Maerz and C. P. Bennett, 1988, Rock mass characterization using photoanalysis, Int. J. Min. & Geo. Engrg., Vol. 6, pp. 97-112.

7. Hagan, T. O., 1980, A case for terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 17, pp. 191-198.
8. Hong, E.S., J. G. Lee, J. S. Lee and I. M. Mo, 2006, application of new measurement method for improvement of rock joint roughness underestimation, J. Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, pp. 133-142.
9. Huang, S. L., S. M. Oelfke and R. C. Speck, 1992, Applicability of fractal characterization and modeling to rock joint profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 29, pp. 89-98.
10. Jang, B. A., T. H. Kim and H. S. Jang, 2010, Characterization of the three dimensional roughness of rock joints and proposal of a modified shear strength criterion, The Journal of Engineering Geology, Vol. 20, pp. 319-327.
11. Jermy, C. A., 1995, A Laser Scanning Device to Measure Joint Surface Roughness, Proc. Int. Conf. on Mech. of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith P.(Ed.), Balkema, pp. 169-174.
12. Jung, C. Y. and H. D. Park, 2003, DEM generation of rock slope using laser scanning and digital stereo photogrammetry, Tunnel and Underground Space, Vol. 13, pp. 207-214.
13. Kim, C. H. and K. John., 2009, Measurement of joint roughness in large-scale rock fracture using LIDAR, Tunnel and Underground Space, Vol. 19, pp. 52-63.
14. Kulatilake P. H. S. W., G. Shou, T.H Huang and R.M Morgan, 1995, New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, pp. 673-697.
15. Lee, S. D., C. I. Lee and Y. Park, 1997, Characterization of Joint Profiles and Their Roughness Parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34(3-4), Paper No. 174
16. Lee Y. H., J. R. Carr, D. J. Barr and C. T. Haas, 1990, The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, pp. 453-464.
17. Park, J. W., Y. K. Lee, J. J. Song and B. H. Choi, 2012, A new coefficient for three dimensional quantification of rock joint roughness, Tunnel and Underground Space, Vol. 22, pp. 106-119.
18. Ryu, D. W., Lee, Y. R., Chang, Y. S, Lee, H. K. and Park, H. K., 2000, Rock joint survey system by image processing and stereophotogrammetry, Tunnel and Underground Space, Vol. 10, pp. 329-343.
19. Seo, H. K. and J. G. Um, 2012, Generation of roughness using the random midpoint displacement method and its application to quantification of joint roughness, Tunnel and Underground Space, Vol. 22, pp. 196-204.
20. Swan, G., 1983, Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements. Rock Mech. & Rock Engrg., Vol. 16, pp. 19-38.
21. Tung, S. H., M. H. Shih and J. C. Kuo, 2009, Evaluation of the joint roughness coefficient using the digital image correction method, Proceedings of the Twelfth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves and R.C. Barros, (Editors), Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland, Paper 229.
22. Yeu, B. M, U. Y. Park and I. T. Yang, 1983, Theoretical research on potogrammetric dip and strike determination of inclined surfaces, J. Korean society of civil engineers, Vol. 3, pp. 129-135.

서현교

2011 부경대학교 에너지자원공학과 공학사



Tel: 051-629-6550

E-mail: sehyky@nate.com

현재 부경대학교 에너지자원공학과 석사과정

엄정기

1988년 연세대학교 이과대학 지질학과 이학사
 1990년 연세대학교 대학원 지질학과 이학석사
 1997년 University of Arizona 자원지질공학과 공학박사



Tel: 051-629-6559

E-mail: jum@pknu.ac.kr

현재 부경대학교 에너지자원공학과 교수
