사진측량기법에 의한 절리조사 시스템 개발

손영진, 김재동*, 정완순, 김종훈, 김기석

Development of Joint Survey System using Photogrammetric Technique

Youngjin Son, Jaedong Kim*, Wansoon Jeong, Jong-Hoon Kim, Ki-Seog Kim

Abstract In this study, a joint survey system was developed to efficiently analyze geometrical characteristics of joint structures in rock mass using photogrammetric technique. The system includes both hardware and software. The hardware consists of a high resolution image camera for photographing image of a surface of rock body, a direction controlling system for adjusting the attitude of camera, and a digital compass for measuring the rotation angle of camera. The software was also developed in order to analyze the orientation, density, mean length of joints revealed on the images of rock surfaces. The software developed in this study was named as JointeXtractor. As applying this system into several field measurements, the orientation, density, mean length of joints could be quantitatively measured through analyzing the images of rock surfaces, in which the case of a difficult-to-access area was especially included for the test of the system.

Key words Photogrammetry, Joint survey system, JointeXtractor, Collinear equation, Joint orientation, Joint density, Joint length

초 록 본 연구에서는 절리구조의 기하학적 특성을 분석하기 위해 사진측량기법을 효율적으로 현장에 적용하기 위한 절리조사 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구성된다. 하드웨어는 암반 절리구조의 영상촬영을 위한 영상 촬영 시스템, 카메라의 촬영방향과 높이를 제어하는 촬영방향 제어 시스템, 그리고 카메라 매개변수 중 회전각 성분을 측정하기 위한 디지털 컴퍼스로 구성되었다. 해석 소프트웨어는 사진촬영을 통해 얻어진 이미지 자료로부터 절리의 방향성, 밀도 및 평균 길이를 분석하기 위해 개발하였으며 JointeXtractor로 명명하였다. 개발된 시스템을 암반 상부와 수목이나 낙석방지 울타리의 설치로 인해 접근이 어려운 지역 등 수작업 조사자가 측정할 수 없는 경우의 현장에 적용한 결과 절리의 방향성 및 밀도, 평균 길이를 정량적으로 분석할 수 있었다.

핵심어 사진측량, 절리조사 시스템, JointeXtractor, 공선조건식, 절리 방향성, 절리 밀도, 절리 평균 길이

1. 서 론

일반적으로 지표에 노출된 암반의 해석은 절리분포 특성 조사, 절리면의 역학적 특성 시험, 절리분포 및 역학적 특성을 고려한 안정성 해석으로 구성된다. 이는

암반의 안정성이 절리의 발달 구조 및 그 역학적 특성과 밀접한 상관관계를 갖고 있기 때문이다. 즉, 암반의 공학적 안정성은 절리 구조 및 절리면의 물리, 역학적인 특성에 대한 자료를 정량적이고 구체적으로 파악하는 것이 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다.

이러한 암반 절리구조의 기하학적 특성은 조사선 조사, 조사창 조사, 클리노미터에 의한 조사 등과 같이 암반 표면에 접촉하여 절리조사를 수행한 후 통계분석을 거쳐 도출해왔다. 하지만 현장 측정 과정은 수작업에 의해 진행되므로 측정 작업의 효율성이 떨어지는 문제점이 있었다(Priest, 1993; Kim and Kim, 2008). 또한 사진측량기법 및 레이저 스캐너 방식 등을 이용한 원거

Received: Dec. 17. 2013

Revised: Jan. 6. 2014

Accepted: Jan. 6. 2014

*Corresponding Author: Jaedong Kim

Tel) +82332506256, Fax)+82332566256

E-Mail) jdkim@kangwon.ac.kr

Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

리 조사 기법들에 대한 활용은 증대되고 있으나, 특정 지역에서의 고정식 방법이 대부분을 차지하고 있기 때문에 대규모 암반의 증가에 따른 절리구조 분석의 효율성 저하와 분석자의 주관적인 판단에서 기인하는 오류 및 낮은 조사 빈도로 인한 자료의 부족으로 암반의 안정성 확보 면에서 문제가 대두되고 있으며 이에 대한 방안 수립은 중요하게 인식되고 있다(Moffitt and Mikhail, 1980; Hagan, 1980; Ryu et al., 2000).

2차원 영상을 이용한 3차원 측정 기술은 사진측량과 컴퓨터 비전 분야에서 발전되어 온 것으로 이미 기초 이론 부분(Atkinson, 1996)은 확립되어 있으며, 카메라 요소를 결정하는 방법에 따라 사진 측량에서는 전방 교회법, 후방교회법(Wolf, 1983), DLT법(Abdel-Aziz and Karara, 1971) 등이, 컴퓨터 비전에서는 Tsai법(Tsai, 1986) 등이 개발되어 적용되고 있다. 또한 이러한 이론을 응용 개발한 수평다중촬영기법과 이를 현장에 적용한 연구가 진행되어 왔다(Hartley and Mundy, 1993; Mason, 1995; Fraser, 1996; Kim and Kim, 2003; Kim and Kim, 2008). 그러나 이러한 방법들은 조사 범위의 한정, 접근하기 어려운 지역에 따른 측정이 불가능한 점, 측정 작업의 효율성이 떨어지는 등의 문제점들이 있어 현장 적용에 적합한 절리조사 시스템을 개발할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

이러한 제약 조건들을 극복하기 위하여 본 연구에서는 절리구조 분석에 대한 기존 이론을 효율적으로 현장에 적용하기 위한 절리조사 시스템을 개발하는 것을 목표로 하였다. 절리조사 시스템은 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구성된다. 하드웨어는 암반 절리구조의 영상 촬영을 위한 영상 촬영 시스템, 카메라의 촬영방향과 높이를 제어하는 촬영방향 제어 시스템, 카메라 매개변수 중 회전각 성분을 측정하기 위한 디지털 컴퍼스로 구성하였다. 해석 소프트웨어는 사진촬영을 통해 얻어진 이미지 자료를 2차원 디지털 영상으로부터 3차원 공간좌표로 계산하여 절리의 방향성, 절리 밀도 및 평균 길이를 분석하기 위해 개발하였으며 JointExtractor로 명명하였다.

본 연구의 결과는 절리의 기하학적 특성 조사의 기존 이론을 이용하여 현장 적용이 가능한 능률적인 하드웨어와 해석 소프트웨어를 개발함으로써 현장 측정 작업을 용이하게 하고, 절리구조에 대해 신뢰성 있는 자료를 제공하며 앞으로 절리 암반의 안정성 해석에 필요한 입력 자료들을 추출하고 활용하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 절리조사 시스템의 이론적 배경

본 연구에서는 현재까지 개발된 이론의 효율적인 현장 적용을 위해 절리조사 시스템을 개발하였으며, 시스템을 구성하는 하드웨어와 해석 소프트웨어의 이론적 배경이 되는 내용은 다음과 같다.

공간좌표를 유도하기 위해 기본적으로 사진측량에서는 공선조건식(Wolf, 1983)을 적용한다. 영상에 의해 공간 대상물의 정량적 특성을 추출하고 해석하는 방법은 대상물의 3차원 공간좌표를 2차원 영상좌표로부터 유도하여 3차원 공간좌표에 의한 대상물의 표면을 구성하는 것이 일반적이다. Fig. 1에서 투영중심 P , 영상점 a , 물체의 임의 점 A 는 중심투영에 의해 공간상의 동일 직선에 존재하며 이러한 조건을 공선조건(collinearity condition)이라고 한다. 이 때 투영중심 P 부터 영상점 a 까지의 벡터 a 와 P 부터 물체의 임의 점 A 까지의 벡터 A 의 표현이 가능하다(Moffitt and Mikhail, 1980). 본 연구에서는 3.1절의 영상 촬영 시스템과 4장의 해석 소프트웨어를 구성하는데 이와 같은 이론을 적용하였다.

일반적으로 2차원 영상으로부터 3차원 공간좌표를 도출하기 위해서는 카메라의 매개변수 결정이 요구된다. 카메라 매개변수는 내부, 외부 매개변수로 구성되며, 다양한 방법들을 통해 결정할 수 있다(Kim, 2002). 절리조사 시스템은 카메라의 내부 매개변수인 초점거리와 영상주점을 제조사 사양에 따라 결정하였으며 공

Fig. 1. Relationship of the perspective projections in a global coordinate system

Fig. 2. Schematic diagram of the joint survey system

선조건식에 의한 좌표 추출 알고리즘에서 외부 매개변수인 회전각과 중심투영점은 카메라베이스 상의 길이와 폭 및 카메라베이스 상에 설치한 디지털 컴퍼스로부터 결정하였다. 카메라 외부 매개변수의 결정에 이용한 디지털 컴퍼스에 대한 내용은 3.3절에 상세히 기술하였다.

이와 같이 좌우 카메라 각각에 대해 결정된 외부 매개변수인 회전각과 중심투영점 및 내부 매개변수인 초점거리, 영상중점으로부터 각각의 카메라의 공선조건식을 구성하고 이를 풀면 특정 영상좌표에 대응하는 공간좌표를 산정할 수 있다(Kim, 2002; Kim and Kim, 2003).

3. 절리조사 시스템의 하드웨어

암반 절리구조의 기하학적 특성 분석을 위한 전체적인 하드웨어의 구성은 Fig. 2와 같으며 각 시스템의 특성에 따라 영상 촬영 시스템, 촬영방향 제어 시스템, 디지털 컴퍼스로 구분할 수 있다.

영상 촬영 시스템은 디지털 카메라 2대(①)로 구성하였으며 영상촬영을 통한 이미지 획득을 목적으로 한다.

촬영방향 제어 시스템은 촬영방향을 상하, 좌우로 회전할 수 있게 하는 PTZ(pan-tilt-zoom) 장치(②)와 촬영방향을 원격 조작 하는 컨트롤러(③), 컨트롤러의 제어신호를 수신하여 PTZ 장치와 CCD 비디오 카메라에 제어신호를 보내는 장치인 수신 장치(④)로 구성하였다. 카메라 매개변수 중 회전각 성분을 측정하기 위한 디지털 컴퍼스(⑤)가 있으며, 이외에도 이 시스템에는 동영상 촬영 모듈인 CCD(charge-coupled device) 비디오 카메라(⑥)와 촬영된 영상을 저장 및 재생하는 디지털 비디오 레코더(⑦)를 추가하여 암반 표면의 정성적인 상태나 시간의 경과에 따른 변화 양상 등을 기록할 수 있는 기능을 추가하였다.

본 절에서는 절리조사 시스템을 구성하는 하드웨어적인 부분을 기능별로 분류하여 설명한다.

3.1 영상 촬영 시스템

연구에 적용한 영상 촬영 시스템은 절리구조 분석에 효율성을 높이기 위해 고해상 디지털 일안리플렉스(DSLR)방식의 카메라(Canon 社, EOS 450D)로 구성하였다. 카메라는 다양한 촬영환경에서 노출제어가 원

활하게 이루어지고 촬영거리에 따라 초점거리를 변경하기 위한 다양한 렌즈군의 적용이 가능하다는 장점을 가진다. 또한 조리개 값이나 셔터속도, 화이트 밸런스 등 촬영과 관련된 카메라의 설정 값들은 원격제어 프로그램인 EOS utility를 실행하여 조작할 수 있으며, 영상 측정을 통한 절리구조 분석이나 지질통계처리 프로그램으로의 적용이 가능하다. 본 연구에서는 화질저하와 초점거리의 변화에 의한 왜곡을 최소화하기 위하여 초점거리가 고정되어있는 단초점렌즈를 사용하였다. 기능적으로 줌렌즈에 비해 단초점렌즈는 영상왜곡을 최소화 해주며, 영상의 가장자리 부분에서 발생하는 미세한 왜곡의 정도는 소프트웨어 상에서의 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는 정도이다(Kim, 2002). 렌즈(Canon 社, EF 85mm F1.8 USM)의 제원은 Table 1과 같다.

영상 촬영 시스템에서는 다양한 렌즈군의 사용을 위해 Table 1의 렌즈 외에도 초점거리 35 mm, 50 mm의 단초점렌즈를 이용하여, 촬영 거리에 따른 수직방향의 촬영범위를 의미하는 촬영 높이를 분석하였다. Fig. 3은 초점거리가 35 mm, 50 mm, 85 mm인 단초점렌즈를 사용하였을 때 촬영 거리에 따른 촬영 높이를 측정한 결과이다. 촬영위치로부터 촬영하고자 하는 절리면과의 거리 및 절리면의 높이를 고려하여 다양한 렌즈를 적용할 수 있다.

더하여, 암반 표면의 정성적인 양태 파악과 변상 및

Table 1. Specifications of the lens, EF 85 mm F1.8 USM

Focal length & Maximum aperture	85 mm, f/1.8
Lens construction (elements/groups)	9/7
Diagonal angle of view	28° 30'
Closest focusing distance (m)	0.85
Filter Size (mm)	58
Max. Diameter x Length (mm)	75 × 71.5
Weight(g)	425

Fig. 3. Relationship of the photographing distance and height according for the various focal length

손상상태 등을 육안으로 모니터링 하고 기록하기 위해 동영상 촬영 모듈을 시스템에 포함하였다. 동영상 촬영을 구성하는 장비는 촬영에 사용된 CCD 비디오 카메라(Kocom 社, KZC-261)와 촬영된 동영상을 저장하는 디지털 비디오 레코더(삼성테크윈 社, SVR-440)이다.

3.2 촬영방향 제어 시스템

암반의 영상 촬영 중 촬영방향을 원격으로 제어하기 위해 PTZ 장치(삼성테크윈 社, SPT-3000)를 사용하였다. 실외 노출의 부식에 강한 고급 녹 방지 소재이고 최대 30kg을 적재할 수 있으며, 좌우 수평으로 355°와 상향 20° 회전이 가능하다. 컨트롤러의 신호는 PTZ 장치에 부착된 수신 장치(삼성테크윈 社, SRX-100B)를 거쳐 PTZ로 전달된다.

3.3 디지털 컴퍼스

사진영상을 이용하여 절리구조의 기하학적 특성을 파악하기 위해서는 공간상 절리구조의 3차원적 분포 특성을 파악하여야만 한다. 3차원적 특성은 공간좌표의 도출을 통해 가능하며, 2차원 사진영상으로부터 3차원 공간좌표를 도출하기 위해서는 카메라의 매개변수 결정이 요구된다. 카메라 매개변수는 내부 매개변수와 외부 매개변수로 구분되며 전자는 영상주점과 초점거리로 구성되고 후자는 회전각과 전이벡터로 구성된다(Kim and Kim, 2003).

내부 매개변수인 카메라의 초점거리와 영상주점은 제 조사 사양에 따라 결정하였으며 카메라 매개변수 중 회전각 성분을 측정하기 위해 Fig. 4와 같은 디지털 컴퍼스(Advanced Orientation Systems, INC. 社, EZ-Compass-3A-360)를 사용하였다. 디지털 컴퍼스는 자북을 기준으로 방위각, 상하회전각, 좌우회전각을 측정할 수 있으며 별도의 설치 프로그램이 필요 없이 Microsoft의 윈

Fig. 4. EZ-Compass-3A-360 digital compass

Table 2. Specifications of the digital compass, EZ-Compass-3A-360

Parameter	Specification	Units/description
Azimuth Range	0 to 360	deg, continuous
Azimuth Resolution	12(0.08)	bit(deg)
Azimuth repeatability	< 0.25	deg, typical horizontal
Azimuth Accuracy	< 0.5	deg, typical horizontal
Pitch Range	+90 to -90	Arc deg after linear correction
Roll Range	+180 to -180	Arc deg after linear correction
Dynamic Range	10	reading/sec
Communication	1200 to 38400 baud,8,N,1	RS-232 and RS-422 standards

Fig. 5. Photographing system **Fig. 6.** Controlling system

도우에서 기본적으로 제공하는 통신프로그램인 하이퍼 터미널을 이용하여 측정이 가능하다. 디지털 컴퍼스의 세부 사양은 Table 2와 같다.

3.4 전체 촬영 시스템

Fig. 5와 Fig. 6은 절리조사 시스템의 전체적인 설치 모습이다. 삼각대 위에는 영상 촬영 시스템을 구성하는 카메라 2대와 동영상 촬영 모듈의 CCD 비디오 카메라, 촬영방향을 제어하는 PTZ 장치를 설치하였고 촬영방향을 원격으로 조작할 수 있는 제어 시스템으로 구성하였다. 조합된 촬영시스템의 크기는 삼각대를 포함한 높이 1.3 m, 너비 1.2 m, 폭 1.2 m 정도 이다.

촬영과정은 촬영하고자 하는 촬영지점에 삼각대를 설치하고 제어 시스템을 통해 촬영 지점에 대해 원격으로 촬영 방향과 각도를 조절하여 촬영한다. 촬영된 이미지는 데스크톱 컴퓨터(또는 노트북 컴퓨터)에 실시간으로 전송되며 모니터에서 영상에 대한 분석을 수행할 수 있다.

4. 해석 소프트웨어: JointeXtractor

본 연구에서는 기존의 절리 해석 소프트웨어 JointCaptor Ver. 1.0 (Kim and Kim, 2003)의 단점을 보완하기 위해 새로운 절리 해석 소프트웨어를 개발하였다. 절리 방향성, 밀도 및 평균 길이에 대한 모듈은 기존 연구의 이론적 배경을 이용하였으며 사용자의 편의를 고려하여 기능적인 면을 발전시켰다. 소프트웨어는 Microsoft visual C++로 작성하였으며 JointeXtractor으로 명명하였다.

개발된 해석 소프트웨어는 2차원 디지털 영상으로부터 3차원 공간좌표를 계산하고 이를 기반으로 수작업에 의해 조사선 조사 및 조사장 조사를 디지털 영상 측정을 통해 수행할 수 있도록 하였다. 데이터 해석에 사용되는 이미지 소프트웨어, 엑셀, 절리군 해석 소프트웨어 등 일련의 소프트웨어를 모두 포함한 통합 소프트웨어이다.

Fig. 7. Flowchart of the software, JointExtractor

Fig. 8. Structure of analyzing modules in the JointExtractor

Fig. 7은 JointeXtractor의 작업 순서도이다. 프로그램의 흐름은 영상 시스템의 카메라 2대에서 획득한 양쪽 영상 이미지를 프로그램으로 불러와 양쪽 영상에서 대응점을 찾아 조사창을 설정하고, 조사창 내에 노출된 절리면의 방향성을 산출한 뒤, 절리면의 절리선을 선택하여 절리 밀도와 평균길이를 산출할 수 있도록 하였다.

Fig. 8은 JointeXtractor를 구성하고 있는 분석 모듈들의 구조이다. 프로그램은 영상에 마우스를 클릭하면 클릭된 점의 영상좌표가 저장되어 조사창, 조사선, 절리면 등을 자동으로 구성한다. 또한 분석 작업 시 단일 암반 표면에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 굴착이 진행 중인 터널 등에서 발파에 따라 나타나는 여러 개의 굴착면들에 대한 경우에도 데이터 분석을 용이하게 할 수 있다.

JointeXtractor의 주요 기능은 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)는 JointeXtractor를 실행 했을 때 로고화면이며 Fig. 9(b)는 촬영된 이미지를 좌우 영상에 불러낸 후 중심투영점, 회전각 등의 카메라 매개변수를 입력할 수 있는 화면이다. 매개변수가 입력된 좌우영상을 대상으로 영상 상에서 절리면에 대한 피킹작업을 수행하여 절리면 방향성을 산출할 수 있다(Fig. 9(c)). 방향성 산출

이 완료되면 Fig. 9(d)와 같이 절리 밀도 및 평균 길이 계산을 위해 구성된 절리면의 선을 선택하면 트레이스의 양 끝 점들의 위치에 따라 자동적으로 ‘한 끝 외포’(dissect), ‘양 끝 내포’(contained), ‘양 끝 외포’(transect)로 분류된다. 조사선과 조사창에 대한 트레이스의 위치에 의해 절리의 밀도와 평균 길이가 계산될 수 있다(Jeong, 2010).

JointeXtractor의 개발과정에서 중점을 둔 특징들은 다음과 같다.

1. 촬영된 이미지의 확대 및 축소: 촬영된 좌우 영상을 불러온 후 영상의 크기를 임의로 확대 축소할 수 있는 기능.
2. 영상의 흑백농도, 밝기 대비의 조정: 영상 상에서 절리 궤적을 쉽게 인식할 수 있도록 영상에 대한 이미지 프로세싱 기법 적용.
3. 절리면을 구성하는 특정 점들의 공간좌표 해석: 좌우 영상 상에서 특정 점에 대한 피킹(picking)으로부터 구한 영상 픽셀 좌표로부터 특정 점의 공간좌표 해석.
4. 절리면의 방향성 해석: 절리면상의 3-4개 특정 점들

(a) Start-up screen in JointeXtractor

(b) A window for parameter input

(c) Result from analysis after establishing joint planes

(d) Result of frequency calculation

Fig. 9. Analysis for geometrical characterization of rock joints using JointeXtractor

의 공간좌표를 해석하여 이로부터 절리면의 방향성을 해석.

5. 촬영된 암반 굴착면의 영상 상에 임의로 조사창과 조사선을 설정: 실제 암반 굴착면 상이 아니라 촬영된 좌우 영상 상에 적절한 크기와 모양의 조사선이나 조사창을 설정하고 조사선 및 조사창의 선경사/

선경사방향 등을 해석.

6. 조사선/조사창 조사법을 적용한 절리군의 군집성 분석: 조사선과 교차하거나 조사창과 관련된 절리들에 대한 군집성 분석.
7. 조사선/조사창 조사법을 적용한 절리군별 밀도 해석: 조사선과 교차하거나 조사창과 관련된 절리들의 선

Fig. 10. Field application of the system

Fig. 11. Manual measurement using clinometer

Table 3. Error measurement between the angles measured by the joint survey system and the clinometer

Planes	Measurement by clinometer		Measurement by image		Error measurement	
	Dip dir.	Dip angle	Dip dir.	Dip angle	Dip dir.	Dip angle
1	142	62	136	60	6	2
2	85	84	89	83	4	1
3	138	76	136	73	2	3
4	86	63	81	60	5	3
5	139	75	136	73	3	2
6	195	84	193	83	2	1
7	82	61	81	60	1	1
8	82	43	81	40	1	3
9	195	62	193	60	2	2
10	141	48	146	46	5	2
11	196	64	193	60	3	4
12	85	62	89	64	4	2
13	195	86	193	83	2	3
14	137	62	138	64	1	2
15	196	71	193	68	3	3
16	83	63	81	60	2	3
17	138	85	136	83	2	2
18	85	62	81	60	4	2
19	142	61	136	60	6	1
20	138	63	136	60	2	3

형밀도, 평면밀도, 체적밀도 및 절리길이 등과 같은 결과를 절리군 별로 분석.

5. 절리조사 시스템의 현장 적용 예

5.1 절리조사 시스템의 검증

개발된 절리조사 시스템을 설치하고 현장 적용성을 검토하였다. 검증을 위해 시험 암반 상의 특정 절리면 20개를 대상으로 시스템을 이용한 방향성 측정(Fig. 10)과 클리노미터를 이용한 방향성 측정(Fig. 11) 결과를 비교하였으며 그 결과는 Table 3과 같다. 두 방법에서의 측정 결과의 차이는 Fig. 12와 같이 경사방향의 경우 최대 6°, 최소 1°, 경사각의 경우 최대 4°, 최소 1°를 보였다. 일반적으로 조사자에 따라 동일한 절리면에 대한 클리노미터 측정 오차는 경사방향의 경우 $\pm 10^\circ$, 경사각의 경우 $\pm 5^\circ$ 정도(Ewan and West, 1981)로 보고되고 있으며, 클리노미터 기계오차 역시 $\pm 2^\circ$ 를 보이

고 있어 절리조사 시스템과 클리노미터에 의한 측정 차이는 일반적인 측정 오차 범위 이내의 수준으로 판단된다.

5.2 절리의 기하학적 특성 측정

Fig. 13(Site 1)의 강원도 지역에서 특정 절리면 33개를 기준으로 촬영하여 Fig. 14와 같이 JointeXtractor를 이용하여 절리군의 방향성 및 절리 밀도, 평균 길이를 산출하였다.

Table 4는 절리조사 시스템을 이용하여 얻어진 절리군 방향성 결과이며, Table 5는 절리 밀도와 평균 길이에 대한 측정값이다.

5.3 접근하기 어려운 지역에서의 측정

Fig. 15(Site 2)와 같이 수작업 측정 조사 시 조사자가 수목과 낙석방지 울타리의 설치로 인해 접근이 불리하거나, 암반의 불안정으로 절리구조 분석이 어려운 경우가 많다. 이러한 지역에서 절리조사 시스템을 이용하여

Fig. 12. Differences between the angles measured by the joint survey system and the clinometer

Fig. 13. Panoramic view of site 1

Fig. 14. Image of site 1 analyzed using JointeXtractor

Table 4. Result of joint set analysis of site 1

Measurement by image	
Joint set	Orientation(°)
Set 1	273/64
Set 2	327/55
Set 3	163/78

Table 5. Result of frequency calculation for Site 1

	Measurement by image
Linear frequency (/m)	5.547
Aerial frequency (/m ²)	9.083
Volumetric frequency (/m ³)	15.532
Mean trace length (m)	0.611

Fig. 15. Panoramic view of site 2 **Fig. 16.** Image of site 2 analyzed using JointExtractor

암반 절리의 방향성을 측정하였다.

도로변 옆의 암반 하부에는 수목으로 접근이 불가피하기 때문에 절리조사 시스템의 촬영방향 제어 장치를

Table 6. Result of joint set analysis of site 2

Measurement by image	
Joint set	Orientation(°)
Set 1	266/54
Set 2	135/86
Set 3	62/83

상향으로 조정하고 카메라의 리모트 컨트롤 기능으로 화면을 확대하여 도로면으로부터 암반의 높이 20 m 지점에 대해 촬영하였다. Fig. 16과 같이 JointExtractor를 이용하여 절리면을 설정한 후 얻어진 암반 주절리군의 방향성 결과는 Table 6과 같다.

절리의 기하학적 특성을 측정하기 위한 절리조사 시스템을 개발하여 현장 적용성을 확인하였다. 절리군 방향성 분석에서는 수작업 측정 결과와 비교했을 때 타당한 수준의 오차를 보였으며, 접근하기 어려운 지역에서의 측정 또한 탁월한 것으로 보인다. 하지만 촬영 지점의 확보가 원활하지 않고 촬영 지점마다 시스템을 설치하고 철거하는 과정을 반복해야 하는 점 등은 시스템을 차량에 탑재하는 방식으로 개량하여 실용화할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

사진측량기법의 효율적인 현장 적용을 위해 본 연구를 통하여 개발된 절리조사 시스템은 절리의 방향성 및 절리 밀도, 평균 길이에 대한 정량적 분석이 가능하도록 하드웨어와 소프트웨어로 구성된 토탈 시스템이다. 또한 안정적인 변화 양상을 파악하기 위한 동영상 촬영 기능도 부가되었다. 이상의 연구로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사진측량기법을 이용한 절리조사 방법을 효율적으로 현장에 적용하기 위하여 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구성된 절리조사시스템을 개발하였다.
2. 절리조사 시스템의 신뢰성을 검증하기 위해 클리노미터를 이용한 측정결과와 비교하였으며, 경사방향의 경우 최대 6°, 최소 1°, 경사각의 경우 최대 4°, 최소 1° 정도로 나타났다. 일반적인 클리노미터 측정 오차 수준을 고려해 볼 때 타당한 수준으로 판단된다.
3. 개발된 시스템의 현장 적용성을 검토하기 위하여 수작업 조사자가 측정할 수 없는 암반 상부에 위치한 절리면 33개를 대상으로 절리군의 방향성 및 절리

밀도, 평균 길이를 측정하였다.

4. 또한 수목과 낙석방지 울타리의 설치로 인해 접근이 어려운 지역에 대해 절리군 방향성을 측정하였으며, 그 결과 기존의 수작업에 의한 방법보다 측정 작업의 효율을 높이고 수작업 측정의 경우보다 높은 정밀도를 확보할 수 있는 것으로 판단되었다.

References

1. Abdel-Aziz, Y. I. and H. M. Karara, 1971, Direct linear transformation from comparator into object space coordinates in close-range photogrammetry, *Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Fall Church, VA: American Society of Photogrammetry, pp. 1-18.
2. Atkinson, K. B., 1996, *Close range photogrammetry and machine vision*, Whittles Publishing Services, pp. 9-51.
3. Ewan, V. J. and G. West, 1981, Reproducibility of joint orientation measurements in rock, TRRL Report SR 702, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
4. Fraser, C. S., 1996, Network Design, K.B., Atkinson, Edited, *Close range photogrammetry and machine vision*, Whittles Publishing, pp. 256-281.
5. Hagan, T. O., 1980, A case for Terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 17, pp. 191-198.
6. Hartley, R. I. and J. L. Mundy, 1993, The relationship between photogrammetry and computer vision, in E. B., Barrett, and D. M., McKeown, Jr., eds., *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision*, Vol. 1994. The International Society for Optical Engineering Proceedings, April 14-15, 1993, Orlando, Florida.
7. Jeong, W. S., 2010, Study of development for rock joint structure survey system loaded type in vehicle, Master of engineering thesis, Graduate school of Kangwon National University, 84p.
8. Kim, J. H., 2002, Development of a new digital photogrammetric technique for geometrical characterization, Ph.D. of engineering thesis, Graduate school of Kangwon National University, 176p.
9. Kim, J. D. and Kim, J. H., 2003, A new algorithm for the interpretation of joint orientation using multisatge convergent photographing technique, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 13, No. 6, pp. 486-494.
10. Kim, J. H. and Kim, J. D., 2008, Optimization of field Application conditions of the multistage convergent photographing technique for the measurement of joint orientation on rock slope, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 19, No. 1, pp. 31-42.
11. Mason, S., 1995, Conceptual model of the convergent multistation network configuration task, *Photogrammetric Record*, Vol. 15, No. 86, pp. 277-299.
12. Moffitt, F.H. and E. M. Mikhail, 3rd Eds, 1980, *Photogrammetry*, Happer & Row Publisher, 648p.
13. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, pp. 24-62.
14. Ryu, D. W., Lee, Y. L., Chang, Y. S., Lee, H. K. and Park, H. D., 2000, Rock joint survey system by image processing and stereophotogrammetry, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 10, pp. 329-343.
15. Tsai, R. Y., 1986, An efficient accurate camera calibration technique for 3D machine vision, *Proc. of IEEE Conf. on computer vision and pattern recognition*, Miami Beach, FL, pp. 364-374.
16. Wolf, P. R., 1983, *Elements of photogrammetry, with air photo interpretation and remote sensing*, McGraw-Hill, pp. 75-79.

손 영 진

2011년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사
2013년 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 공학석사

Tel: 033-256-6256

E-mail: withjin09@kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 대학원 박사과정

김 재 동

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

1988년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6256

E-mail: jdkim@kangwon.ac.kr

현재 강원대학교 에너지·자원공학과 교수

정 완 순

2007년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사

2010년 강원대학교 대학원 에너지·자원공학과 공학석사

TEL: 070-7510-1677

E-mail: jwsoon@hsgeo.co.kr

현재 (주)희송지오텍 기술연구소 연구원

김 중 훈

1995년 강원대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1997년 강원대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2002년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

TEL: 070-7510-1655

E-mail: jhkim@hsgeo.co.kr

현재 (주)희송지오텍 지반사업부 상무이사

김 기 석

1987년 서울산업대학교 공과대학 전자공학과 공학사

1992년 한양대학교 공학대학원 전자공학과 공학석사

2004년 충남대학교 대학원 토목공학과 공학석사

2008년 수원대학교 대학원 토목공학과 공학박사

TEL: 02-576-3801

E-mail: kskim@hsgeo.co.kr

현재 (주)희송지오텍 대표이사