

드론을 이용한 암반사면의 안정성평가 측정장비 개발

이현철^{1*}, 권기문², 문창은³, 조영훈⁴

Survey Equipment Development of Stability Evaluation for Rock Slope using Drone

Hyun-Chol Lee^{1*}, Ki-mun Kwon², Chang-eun Moon³, Yeong-hun Jo⁴

Abstract: Mechanical Properties of Rock Slope as a safe and effective interpretation should be thoroughly investigated. Clinometer, however, this new measurement due to the restrictions of the research for the joint orientation is needed. In this study, characteristics of the joint orientation can be used to analyze the joint orientation of developing a joint survey system that can be applied to the field. The system is developed and Analysis software to hardware. Hardware is composed to measure the joint orientation of measuring module, measuring the transfer of data transfer module. From the software is measuring module from the data to analyze the orientation of the joint development, and drone joint orientation survey system named. Can not be measured by the investigation, including regional development approach is a system that has been difficult if the Field Application of the lab test results of the joint orientation and effectively.

Keywords: Drone, Joint survey system, Joint orientation, Xbee, Servo Motor

1. 서론

일반적으로 지표에 노출된 암반해석은 절리방향 특성조사, 절리면의 역학적 특성시험, 절리방향 및 역학적 특성을 고려한 안정해석으로 분류된다. 이는 암반의 안정성이 절리의 방향성 및 그 역학적 특성과 관련이 크기 때문이다. 즉, 암반의 공학적 안정성은 절리 방향성과 역학적인 특성에 대한 자료를 정량적으로 분석하는 것이 중요하다.

이러한 암반 절리구조의 특성은 조사선 조사, 조사창 조사, 클리노미터에 의한 조사와 같이 절리 표면에 접촉하여 절리 조사를 수행한 후 통계분석을 통해 도출해왔다(Son et al., 2014). 하지만 현장 조사 과정은 수작업에 의해 진행되므로 측정 작업의 효율성이 떨어지는 단점이 있었다(Priest, 1993; Kim and Kim, 2008). 또한 사진측량기법 및 레이저 스캐너 방법 등을 이용한 원거리 조사기법들에 대한 이용은 증가하고 있으나, 일부 지역에서의 고정식 방법이 대부분을 차지하고 있어 대규모 암반에서의 절리구조 분석의 효율성 저하와 조사자의 주관적인 견해에서 기인하는 오류 및 낮은 조사 빈도

로 인한 자료의 부족으로 절리의 안정성 평가 측면에서 문제가 대두되고 있다(Moffitt and Mikhail, 1980; Hagan, 1980; Ryu et al., 2000).

이러한 제약 조건들을 해소하기 위하여 본 연구에서는 절리 방향 분석에 대한 기존 이론 및 드론을 효과적으로 이용하여 현장절리방향 측정용 장치를 개발하고자 하였다. 절리방향 측정 장치는 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구분된다. 하드웨어는 암반 절리구조의 방향성을 측정하기 위하여 드론, 아두이노, 우노, 서보모터, 절리방향 측정모듈, 측정자료의 무선송신모듈로 구성하였다. 해석 소프트웨어는 절리방향 측정모듈로 얻어진 자료를 화면상으로 출력하여 절리의 방향성을 분석하기 위해 개발하였으며 Drone Joint Survey로 명명하였다.

본 연구의 목적은 암반사면을 안전하고 효과적으로 해석하기 위해서 암반의 역학적 특성인 절리방향을 측정하는 장치를 개발하는 것이며 연구방법은 절리방향을 측정하는 측정모듈과 측정자료를 전송하는 전송모듈로 구성하여 드론을 이용한 비접촉방식으로 절리방향을 측정하여 기존의 측정방법인 클리노미터를 이용한 방법과 실내시험으로 비교 검증하였다.

¹정회원, (주)주엔지니어링 기업부설연구소 연구소장, 교신저자

²정회원, (주)주엔지니어링 기업부설연구소 전임연구원

³정회원, (주)주엔지니어링 기업부설연구소 주임연구원

⁴정회원, (주)주엔지니어링 토목기술부 연구원

*Corresponding author: lhc0414@chol.com

515, Inju-daero, Namdong-gu, Incheon, 21560, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2018년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 이론적 배경

역학적 안정성의 평가를 위한 암반사면의 측정은 단층, 절리와 같은 불연속면을 대상으로 측정하게 되며, 이러한 불연속면의 속성을 기반으로 사면의 안정성 분석을 수행하여 사면의

가능한 파괴 양상에 대한 결과를 취득할 수 있다(Lee, 2016). 암반사면의 조사에서는 특히 불연속면의 경사각과 경사방향은 사면 붕괴시 파괴형태와 방향을 결정하는 중요한 인자이다.

암반사면의 측정에는 컴퍼스 클리노미터(compass clinometer, geological compass, clino-compass, inclinometer with compass 등)를 사용한다. 클리노미터에서 경사방향은 수평면에서 측정되어야 하므로 측정대상 절리면에 밀착한 상태에서 장비를 수평으로 조정하는 과정이 필요하며, 이를 위해서 기포 수준기(air bubble level)가 설치되어 있는 경우가 많다. 각도의 측정은 나침반 등의 지침이 안정된 후 수행한다.

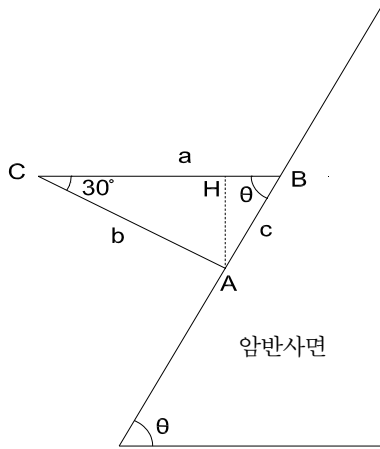


Fig. 1 Measurement diagram using drone

Fig. 1은 드론을 이용한 암반사면의 절리방향 측정장치의 측정개요도를 나타낸다. C지점에 드론을 호버링시켜 드론에 부착된 초음파센서를 통해 암반사면에 대한 수평거리 a의 값을 측정하고 서보모터를 이용하여 수평면에서 시계방향으로 임의의 각도인 30°회전시켜 A지점에 대한 직선거리 b의 값을 측정한다. 첫 번째 측정점(B)과 두 번째 측정점(A)을 서로 이어서 삼각형을 만들고 다음 식을 이용하여 사면상의 두점(A, B)을 잇는 c의 거리값을 산정한다.

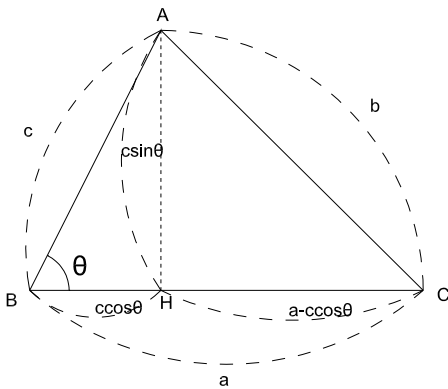


Fig. 2 Calculation diagram of degree

$\triangle ABH$ 에서

$$\sin\theta = \frac{\overline{AH}}{c} \text{ 이므로 } \overline{AH} = c\sin\theta \quad (1)$$

$$\cos\theta = \frac{\overline{BH}}{c} \text{ 이므로 } \overline{BH} = c\cos\theta$$

$\triangle ACH$ 에서

$$\overline{CH} = \overline{BC} - \overline{BH} = a - c\cos\theta \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \overline{AC}^2 &= \overline{AH}^2 + \overline{CH}^2 \\ &= (c\sin\theta)^2 + (a - c\cos\theta)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\overline{AC} = \sqrt{(c\sin\theta)^2 + (a - c\cos\theta)^2}$$

다음으로 제2코사인법칙을 사용하여 θ 의 값을 구한다.

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2accos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac} \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}\right)$$

암반사면절리의 경사방향은 오일러각으로부터 산정한다. 오일러각(Euler Angles)는 3차원 좌표에서 물체의 방위각을 표시하기 위한 3차원상 각도의 조합이다. 오일러각으로 대상을 회전할 때는 회전 순서에 유의하여야 한다. 회전순서(Z축, Y축, X축)에 따라 물체의 최종 방위각이 달라지기 때문이다.

일반적으로 ZYX (Roll-Pitch-Yaw) 회전이 사용된다.

기준좌표계에 대한 대상좌표계의 회전 결과는 다음과 같이 산정한다.

첫째, 기준좌표계를 X축(Yaw)을 중심으로 ϕ 만큼 회전한다:

$$R_x(\phi)$$

둘째, 기준좌표계를 Y축(Pitch)을 중심으로 θ 만큼 회전한다:

$$R_y(\theta)$$

셋째, 기준좌표계를 Z축(Roll)을 중심으로 ψ 만큼 회전한다:

$$R_z(\psi)$$

$$\begin{aligned} R_{xyz} &= R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi\sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\psi\sin\psi\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\psi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi\sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R_z(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

회전행렬에서 각도의 변화가 적다면 $\cos\alpha \approx 1$ $\sin\alpha \approx \alpha$ 로 볼 수 있다. 비선형 요소인 \sin 과 \cos 를 소거하면 다음과 표현할 수 있다.

$$R_{z_{yx}} \approx \begin{bmatrix} 1 & \theta\psi - \phi & \theta + \phi\psi \\ \phi & \phi\theta\psi + 1 & \phi\theta\psi - \psi \\ -\theta & \psi & 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\phi & \theta \\ \phi & 1 & -\psi \\ -\theta & \psi & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

회전행렬 R로부터 오일러각을 다음과 같이 계산할 수 있다. 다음 식에서 사용되는 r_{ij} 는 행렬 R의 i 행과 j 열의 원소다.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

θ 가 $(-\pi/2, \pi/2)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \\ \theta &= \text{asin}(-r_{31}) \\ \phi &= \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad (11)$$

θ 가 $(\pi/2, 3\pi/2)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(-r_{21}, -r_{11}) \\ \theta &= \text{asin}(-r_{31}) \\ \phi &= \text{atan2}(-r_{32}, -r_{33}) \end{aligned} \quad (12)$$

Pitch 각이 $\pi/2$ 근처일 때는 $\cos\theta \approx 0$ 이 된다. 이때는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} r_{23} - r_{12} &= (\sin\theta + 1)\sin(\psi - \phi) \\ r_{13} + r_{22} &= (\sin\theta + 1)\cos(\psi - \phi) \\ r_{23} + r_{12} &= (\sin\theta - 1)\sin(\psi + \phi) \\ r_{13} - r_{22} &= (\sin\theta - 1)\cos(\psi + \phi) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(r_{23} + r_{12}, r_{13} - r_{22}) \\ \theta &= \text{asin}(-r_{31}) \\ \phi &= \psi - \text{atan2}(r_{23} - r_{12}, r_{13} + r_{22}) \end{aligned} \quad (14)$$

3. 절리조사 시스템

3.1 절리조사 시스템의 구성 및 원리

본 연구에서는 SmartProjects社에서 개발한 sketch를 이용하여 자료 취득 및 분석을 실시하였다. 이 시스템은 크게 Arduino Uno, Sensor modules, Xbee module, Blynk로 구성되어 있다. Fig. 3은 절리조사 시스템의 구성도를 나타낸다.

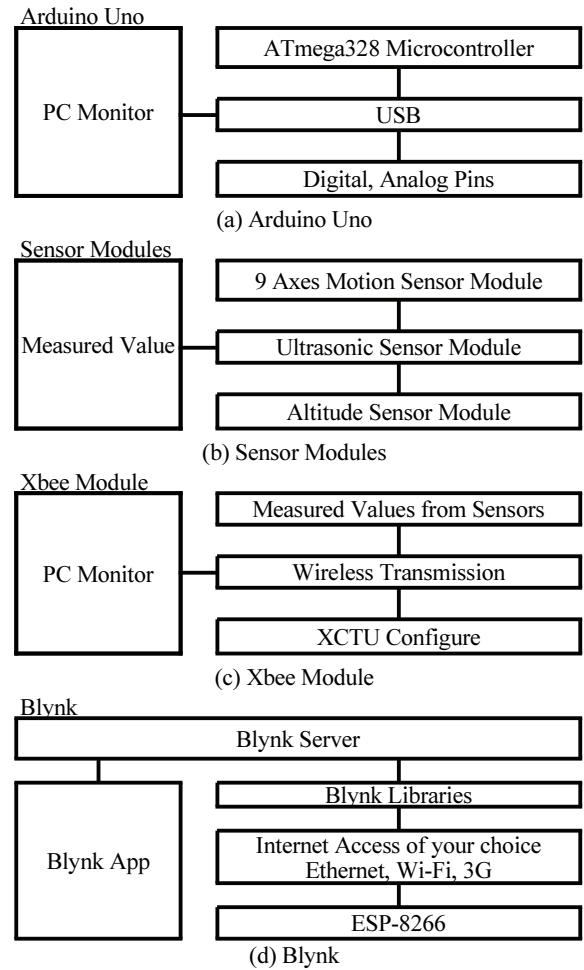


Fig. 3 Conceptual diagram of the joint survey System

3.2 Arduino Uno

아두이노 우노는 Atmel사의 16MHz 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 사용하며 총 20개의 입출력 핀을 통해 다양한 주변 장치를 연결할 수 있으며 연결을 위해 핀 헤더를 제공하고 있다. 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축모션센서, 초음파거리센서로부터 입력받은 신호를 디지털신호로 변환하여 수신부 컴퓨터의 모니터상에 출력하는 역할을 한다. Table 1은 Arduino Uno에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Technical Specification (Arduino Uno)

Division	Specifications
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Digital I/O Pins	14(of which 6 provide PWM output)
DC Current per I/O Pin	20mA
Flash Memory	32KB(ATmega328P) of which 0.5KB used by bootloader
Clock Speed	16 MHz

3.3 9축 모션센서

Bosch 사의 BNO055 absolute orientation sensor를 기반으로 제작된 제품으로, BNO055는 3축 14비트 가속도계, 3축 16비트 자이로스코프(+/- 2000도/초당) 3축 지자계센서, 그리고 BSX3.0 FusionLib 소프트웨어가 실행되는 32비트 마이크로컨트롤러를 내장하고 있다. 센서는 오일러 각, 회전 벡터, 선형 가속도, 중력 벡터와 같은 신호를 제공한다. 본 연구에서 9축 모션센서의 측정값은 암반사면의 경사방향을 결정하는데 활용된다. Table 2은 9 Axes Motion Shield에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 2 Technical Specification (9Axes Motion Shield)

Division	Specifications
Chip based	BOSCH Sensortech BNO055
Thinker Kit interface	2x TWI, 2x OUT, 2x IN
Motion Sensors	Triaxial accelerometer, Triaxial gyroscope, Triaxial geomagnetic
Fusion Engine	32-bit microcontroller with BSX3.0 FusionLib
Operating Voltage	5 / 3.3 V

3.4 초음파센서

초음파센서 모듈은 HC-SR04로서 측정거리가 4m까지이며 측정정확도는 2mm에 이른다. 초음파모듈은 송신부, 수신부, 조절회로로 구성된다. 모듈의 기본원리는 최소 10 μs의 시간신호로 입출력 트리거를 사용하며 자동적으로 약 40kHz로 송신하고 펄스신호로 반송한다. 반송신호인 경우 입출력 시간은 초음파의 송신에서 반송까지의 시간이다. 측정거리(L)은 식 (15)과 같다.

$$L = \frac{t}{2} \cdot v \quad (15)$$

여기서, t는 도달시간, v는 음속을 나타낸다. 초음파센서는 온도에 대한 보상회로를 포함하고 있고 기압과 상대습도의 영향은 미미하므로 무시할 수 있다. 본 연구에서는 초음파센서를 이용하여 대상 암반사면과 측정기기와의 직선거리를 측정하였다. Table 3은 Ultrasonic Sensor에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 3 Technical Specification (Ultrasonic Sensor)

Division	Specifications
Operating Voltage	DC 5V
Operating Current	15 mA
Operating Frequency	40 Hz
Measuring Angle	15 degree
Trigger Input Signal	10us TTL pulse

3.5 지그비센서

근거리 무선방식에 근거한 통신 네트워크 모듈인 XBee는 일대일 통신과 스타형 토폴로지, 메쉬형 토폴로지로 대별된다. 본 연구에서 적용된 XBee모듈은 Zigbee 통신규약을 적용하였으며 토폴로지는 일대일 통신을 적용하였다. XBee S2 모듈에 대해서 지그비 통신의 주소, 접속, 제어 등을 처리하기 위한 여러 가지 구성 설정을 제공해주는 설정프로그램인 XCTU를 이용하여 일대일 통신을 구축하였다. 이와 같은 지그비 통신을 통해서 9축 모션센서, 초음파센서로부터 얻은 데이터를 수신부 컴퓨터에 무선으로 송신할 수 있다. Table 4은 Xbee Module에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 4 Technical Specification (Xbee Module)

Division	Specifications
Transceiver Chipset	silicon Labs EM357 SoC
Data Rate	RF 250 Kpbs, Serial up to 1Mbps
Outdoor / RF Line-of-sight Range	2 miles / 3200m
Transmit Power	63 mW(+18dBm)
Receiver Sensitivity (1% per)	-101 dBm
Serial Data Interface	UART, SPI
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air (OTA)
Antenna Options	PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connctor
CPU / Clock Speed	HCS08 / up to 50.33 MHz
Protocol	ZigBee Pro 2007
Encryption	128-bit AES
Reliable Pack Delivery	Retries / Acknowledgements
IDS	PAN ID and addresses, cluster IDS and endpoints
Supply Voltage	2.7 to 3.6 V

3.6 데이터 취득 소프트웨어

아두이노의 통합개발환경은 Java와 C를 기반으로 개발되는 크로스 플랫폼 응용 소프트웨어이며, 에디터와 컴파일과 업로드가 가능하고 아두이노 동작을 위해서 C++언어 기반을 사용한다(Simon M, 2011). 컴파일러는 AVR-GCC을 사용하며 개발환경은 C++을 사용하여 코딩을 하고 이것을 보드에 업로드하면 동작한다. 이러한 아두이노 IDE를 통해 작성된 프로그램이나 코드를 Sketch라 부른다(Simon M, 2011). 본 연구에서 스케치를 이용하여 아두이노 우노와 센서를 통한 데이터를 수신부 컴퓨터에 출력하였다.

3.7 서보모터

TowerPro 사의 SG-90 제품으로, SG-90는 출력 전력이 높은 작고 가벼운 제품이다. 서보는 약 180도 회전이 가능하며,

3개의 전선으로 작동한다. Red와 Brown 와이어를 사용하여 5V로 모터에 전원을 공급하고 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 Orange 컬러 와이어에 보내야 한다. PWM 신호는 아두이노를 이용하여 생성할 수 있다. 본 연구에서 Drone Measure System의 각도를 조절하는데 활용된다. Table 5은 SG-90에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 5 Technical Specification (SG-90)

Division	Specifications
Weight	9 g
Dimension	22.2 × 11.8 × 31 mm approx
Stall torque	1.8 kgf · cm
Operating speed	0.1s / 60 degree
Operating Voltage	4.8 V (~5V)
Dead band width	10 μs
Temperature range	0°C - 55°C

3.8 드론

DJI 사의 MAVIC PRO 제품으로, 최대 7km의 송신 범위(FCC 기준, 장애물과 간섭이 없을 시)와 근거리 및 단거리 영상 스트리밍을 지원하는 DJI의 새로운 송신 기술인 OcuSync를 탑재했으며 최대 15m 앞에 있는 장애물까지 모두 감지한다. 전방과 하향 비전 센서를 이용하여 실내 및 위성이 잡히지 않는 곳에서도 정확하게 호버링하며, 고르지 못한 지형에서도 MAVIC PRO는 지면 위 일정한 고도를 유지하며 비행한다. Table 6은 MAVIC PRO에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 6 Technical Specification (MAVIC PRO)

Division	Specifications
Flight time	27 mins
Control range	7 km
Speed	65 km/h
Gimbal	3-axis
Video resolution	4K
Camera resolution	12 MP

3.9 ESP8266

ESP8266은 Espressif Systems에서 디자인 한 마이크로 컨트롤러이며, 많은 수의 ESP-xx 모듈이 3.3V에서만 동작하므로 3.3V 전원이 필요하다.

GPIO(General Purpose Input Output)는 아두이노의 핀처럼 ESP8266 모듈이 제어할 수 있는 핀이며, ESP-xx 모듈마다 사용할 수 있는 핀 수와 위치가 다르다. Table 7은 ESP8266에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

Table 7 Technical Specification (ESP8266)

Division	Specifications
Voltage	3.3V
Current consumption	10uA - 170mA
Flash memory attachable	16MB max (512K normal)
Processor	Tensilica L106 32 bit
Processor speed	80-160MHz
RAM	32K + 80K
GPIOs	17 (multiplexed with other functions)
ADC(Analog to Digital)	1 input with 1024 step resolution
802.11 support	b/g/n/d/e/i/k/r
Maximum concurrent TCP connections	5

3.10 Blynk

Blynk는 iOS 및 Android Application에서 Arduino, Raspberry Pi 등 IoT 기기를 개발하는 메이커를 제어할 수 있게 돕는 플랫폼이며, 하드웨어 간 연결을 지원하고, 가상 사용자 인터페이스를 지원하며 빠르게 성장하는 오픈소스 기반 IoT 플랫폼이다.

Blynk는 별도의 PC가 필요없으며 다양한 하드웨어와 앱을 서로 연결해주며 서버는 스마트폰과 하드웨어간 통신을 담당해 클라우드 플랫폼으로 동작된다.

복잡하고 불필요한 코딩대신 Blynk 앱에서 IoT로 만들고 싶은 인터넷에 연결된 보드종류와 입출력 핀 동작을 지정해 줘야 한다.

4. 실험결과

이 연구에 적용된 절리조사 시스템을 현장에 활용하기 위해서, 실내모형에 대해서 적용성을 평가하였다. 실내모형 시험에 사용된 대상은 Fig. 4와 같은 절리면으로 모사하였다. 각 절리면에는 표적을 미리 표시하여, 이를 통해 해당점의 좌표를 읽을 수 있다. 각 절리면에 대해서 경사각을 50°부터 10°씩 증가시켜 80°까지 측정하였으며 경사방향에 대해서는 0°부터 10°씩 증가시켜 90°까지 측정하였다. 경사각이 40°인 경우에 경사방향은 0°부터 90°까지 측정하는 방법으로 경사각이 80°가 되는 경우까지 조사하였다.

실내모형 시험에서는 클리노미터를 이용한 측정결과와 절리조사 시스템을 통한 결과를 비교 검토하였다. Fig. 5는 절리조사 시스템의 하드웨어 구성도를 나타낸다.

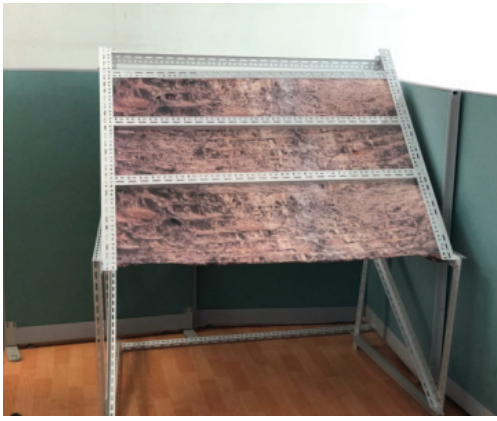
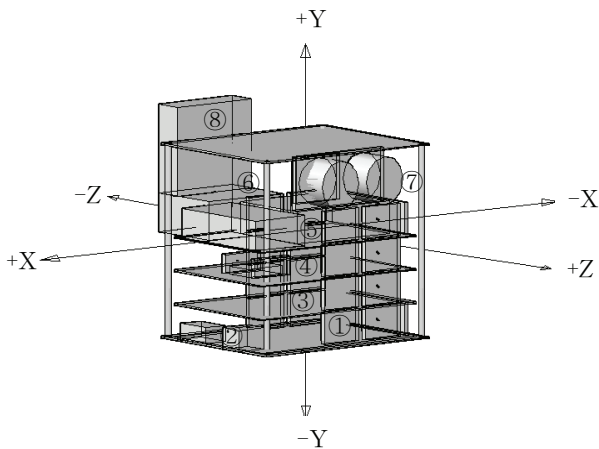


Fig. 4 Joint orientation test model



(a) Conceptual diagram

- ① Arduino Uno
- ② Power Supply
- ③ Arduino 9 axes motion shield
- ④ Arduino wireless SD shield
- ⑤ Arduino proto shield
- ⑥ ESP-8266
- ⑦ Ultrasonic sensor
- ⑧ SG-90



(b) Photograph

Fig. 5 Joint orientation test apparatus

4.1 절리 데이터의 결과

본 연구에서는 실내시험에서 얻은 데이터를 이용하여 절리면의 방향을 산정하였고, 실제 클리노미터를 이용하여 얻은 절리 데이터와 비교, 분석하였다.

4.2 데이터의 신뢰도 분석

40개의 절리를 선정하여 절리 방향을 직접 비교하고 신뢰도를 분석하였다. Ewan and West(1981)는 클리노미터의 조사자에 따른 경사와 경사방향의 측정 오차를 각각 $\pm 5^\circ$ 와 $\pm 10^\circ$ 라고 하였으며, 측정 장비는 $\pm 1 \sim 2^\circ$ 의 기계 오차가 발생할 수 있다고 하였기 때문에 본 연구의 허용 오차범위를 경사는 $\pm 7^\circ$, 경사방향은 $\pm 12^\circ$ 로 설정하였다(Park et al., 2015).

Table 8은 40개 절리의 경사/경사방향 측정결과를 비교한 것으로 40개 측정결과에 대한 오차의 평균은 Table 8과 같이 경사의 평균 오차는 $\pm 2.66^\circ$ 이고, 경사방향의 평균 오차는 $\pm 3.14^\circ$ 로 분석되었다.

40개의 자료에서 이 연구에서 설정한 허용 오차범위를 초과하는 데이터는 없는 것으로 분석되었다.

경사와 경사방향의 오차를 용이하게 확인하기 위해서 Fig. 6와 같이 그래프로 40개의 오차를 표현하였는데, 경사는 (+)값으로 표현하였으며, 경사방향은 (-)값으로 표현하였다. 경사의 오차 중 가장 큰 오차를 나타내는 절리는 24번 절리로 7.81° 의 오차를 가지며, 경사 방향의 경우 1번 절리가 6.51° 의 오차를 가지는 것으로 분석되었다.

상기 결과에서 경사/경사방향의 최대오차에 대한 편차는 경사가 더 큰 것으로 분석되었다. 오차들의 평균 편차를 산정하면, 경사의 평균 편차는 2.66° 로 분석되었으며, 경사방향의 경우 3.14° 로 산정되었는데 이를 통하여 경사보다 경사방향의 편차가 더 큰 것을 알 수 있다.

전체 40개의 자료 중에서 경사와 경사방향 모두 허용오차 범위 안에 들었다.

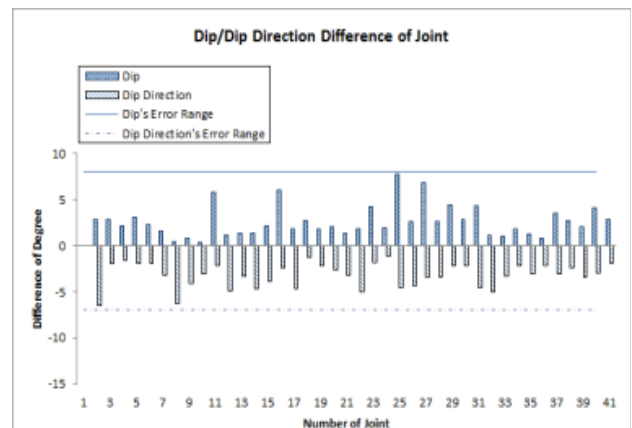


Fig. 6 Graph of total joint orientation error

Table 8 Comparison of each joint orientation(Clinometer and Drone Measure System)

(Unit : degree,°)

No.	Clinometer		Drone Measure System		Difference	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
1	51	135.00	48.12	126.49	2.88	8.51
2	49	118.00	46.12	119.86	2.88	1.86
3	50	123.00	47.84	121.42	2.16	1.58
4	49	107.00	52.13	108.88	3.13	1.88
5	49	100.00	51.34	98.12	2.34	1.88
6	51	101.00	49.34	97.90	1.66	3.10
7	50	98.00	50.53	104.21	0.53	6.21
8	50	118.00	50.82	113.98	0.82	4.02
9	49	122.00	48.62	118.97	0.38	3.03
10	49	126.00	54.81	128.09	5.81	2.09
11	58	132.00	56.77	127.15	1.23	4.85
12	60	117.00	58.61	120.21	1.39	3.21
13	59	116.00	60.38	111.42	1.38	4.58
14	60	96.00	62.24	99.78	2.24	3.78
15	59	94.00	52.98	96.34	6.02	2.34
16	61	103.00	62.82	98.36	1.82	4.64
17	60	102.00	57.22	100.78	2.78	1.22
18	60	126.00	58.12	123.87	1.88	2.13
19	61	127.00	63.12	129.55	2.12	2.55
20	59	130.00	60.42	126.87	1.42	3.13
21	70	122.00	68.12	126.92	1.88	4.92
22	71	109.00	66.78	107.23	4.22	1.77
23	70	107.00	67.98	105.87	2.02	1.13
24	69	114.00	76.81	109.48	7.81	4.52
25	71	97.00	73.64	101.24	2.64	4.24
26	71	95.00	64.12	98.42	6.88	3.42
27	71	109.00	68.29	112.36	2.71	3.36
28	69	117.00	73.48	114.87	4.48	2.13
29	70	130.00	72.87	127.88	2.87	2.12
30	69	122.00	73.38	126.49	4.38	4.49
31	79	127.00	80.23	131.98	1.23	4.98
32	81	129.00	79.94	125.71	1.06	3.29
33	80	112.00	81.87	109.87	1.87	2.13
34	80	100.00	81.31	103.06	1.31	3.06
35	81	97.00	80.12	99.10	0.88	2.10
36	79	93.00	82.62	96.08	3.62	3.08
37	79	107.00	76.21	104.62	2.79	2.38
38	80	108.00	82.04	111.35	2.04	3.35
39	81	123.00	76.87	120.12	4.13	2.88
40	80	115.00	82.87	116.85	2.87	1.85
Average Error					2.66	3.19

4.3 오차 원인 분석

40개의 절리결과를 비교·분석하기 위해 오차가 큰 절리를 이용해 오차의 원인을 분석하였다. 클리노미터와 Drone Measure System을 이용한 절리의 방향을 비교시 최대오차의 발생요인은 절리면의 측정방법의 차이로 판단된다. 실내 모형시험에서 절리면에 대한 모사를 실제 절리면의 크기에 근사하게 제작하여 측정하거나 절리를 다수의 지점에서 측정하여 평균값을 산정하면 오차를 줄일 수 있다고 판단된다.

Drone Measure System을 사용하여 절리방향 데이터를 얻을 때 초음파센서의 굴절의 영향, 자기센서의 자기장의 영향 및 온도의 영향으로 인한 데이터 오차를 최소화하고, 다수의 지점에서 측정을 하거나 다른 시기에 걸쳐 측정을 하는 경우에 절리방향 데이터의 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

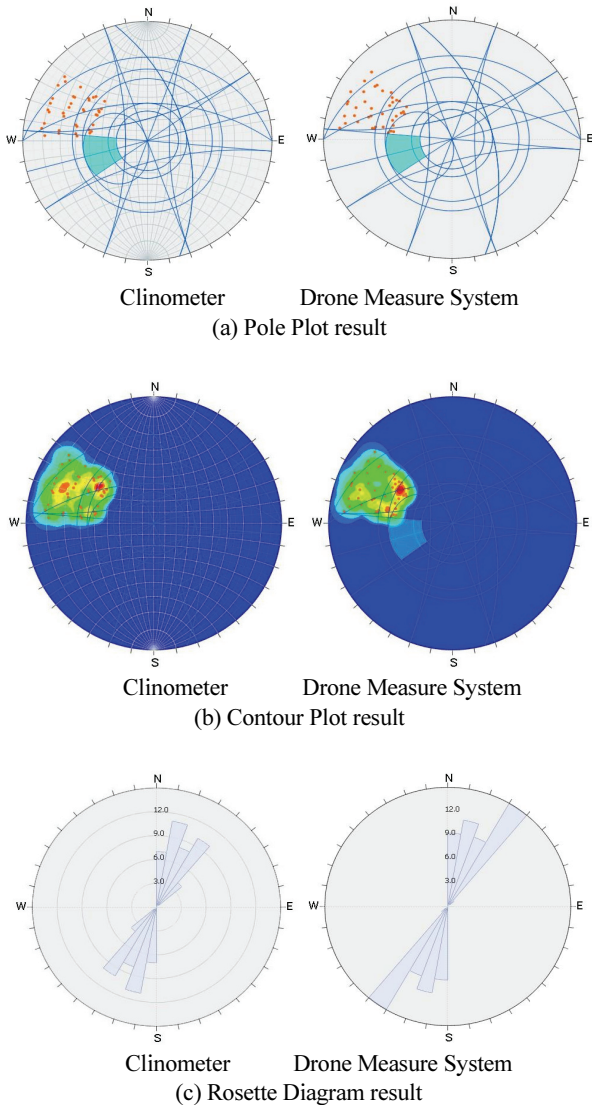


Fig. 7 Joint orientation using the stereographic projection method

4.4 평사투영법에 의한 분석 결과

데이터 분석 프로그램을 통해서 모형 사면의 절리를 측정 한 결과 총 40개의 절리가 측정되었으며, 절리의 방향에 따라서 다양한 절리가 모형 사면에 발달되어 있음을 알 수 있었다. Fig. 7은 40개의 절리 데이터를 평사투영법에 투영시킨 결과이다. 스테레오네트 상에서 확인한 결과 절리군이 분명하게 구분되는 것을 알 수 있었다. 클리노미터로 측정한 경우가 Drone Measure System으로 측정한 경우보다 Pole Plot result 및 Contour Plot result에서 분포범위가 더 조밀한 것으로 나타났다. 측정데이터 분포범위의 차이는 클리노미터로 측정하는 경우보다 Drone Measure System으로 측정하는 경우 초음파센서, 자기센서의 영향으로 인해서 발생된 것으로 추정된다. Rosette Diagram result에서는 절리의 빈도가 클리노미터로 측정한 경우보다 Drone Measure System으로 측정한 것이 크게 나타났으며 측정데이터 빈도의 차이는 클리노미터를 이용한 경우보다 Drone Measure System을 이용하는 경우에 데이터측정이 자동화로 인해서 발생된 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서 기존 암반 절리 조사방법에 대한 한계점을 극복할 수 있는 개선된 조사법의 하나인 Drone Measure System을 이용하여 절리의 방향성을 자동으로 측정하였으며, 직접 측정한 절리 방향 데이터 40개와의 비교를 통하여 Drone Measure System을 활용한 절리 방향 측정의 신뢰성에 대한 실험을 수행하였다.

상기의 연구결과는 다음과 같다.

연구대상 모형을 클리노미터로 측정한 40개의 절리 방향 측정결과와 Drone Measure System를 통해 측정된 절리 방향 측정결과를 비교·분석한 결과 경사는 $\pm 3^\circ$, 경사방향은 $\pm 3^\circ$ 내외의 편차가 발생하였고, 본 연구에서 정한 경사/경사방향의 허용오차범위인 $\pm 7^\circ$, $\pm 12^\circ$ 내에 있으므로 본 연구 결과는 신뢰할 수 있는 자료로 판단된다.

오차원인을 분석한 결과 절리의 측정방법의 차이로 인해 오차가 발생한 것으로 분석되었다. 특히, 클리노미터로 절리 방향을 측정하는 방법의 차이에 따라 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 오차를 최소화하기 위해서 다수의 지점을 조사하여 절리 방향의 평균을 산출하거나, 면적이 큰 판을 이용하여 측정하는 방법을 적용하면 절리 방향의 오차를 줄일 수 있다. Drone Measure System를 이용하여 절리 방향을 측정하는 경우에는 절리면에서의 굴절의 영향, 자기장의 영향 및 온도 등의 영향을 최소화해야 자료의 신뢰도를 높일 수 있다.

Drone Measure System를 이용한 절리 측정법은 기존 절리

조사법의 단점인 접근성의 제약을 해결할 수 있고, 조사자의 안전성을 확보하여 조사의 효율성을 향상시켰다. 이번 연구를 통해서 절리 방향 데이터에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

본 연구의 결과는 절리조사에 적용이 가능한 효율적인 하드웨어와 해석 소프트웨어를 개발하여 절리 측정 작업을 편리하게 하고, 절리구조에 대해서 신뢰도가 높은 자료를 제공하며 향후 절리 암반의 안정해석에 필요한 입력 자료들을 제공하여 기초자료로서 활용하는 데 기여할 수 있다고 본다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 2017년도 국토교통기술촉진연구사업(연구과제번호 1615008745)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ewan, V. J and West, G, (1981), Reproducibility of joint orientation measurements in rock, Transport and Road Research Laboratory supplementary report 702, 18P, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 19, Issue 4, August 1982, Page 94
- 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.
- 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.
- Lee, S. H. (2016), Development of mobile software for field survey of geological structures, Seoul National University, pp. 29-34.
- Moffitt, F. H. and E. M. Mikhail, 3rd Eds, (1980), Photogrammetry, Happer & Row Publisher, 648p.
- Park, S. H., Lee, S. G., Lee, B. K. and Kim, C. H, (2015), A Study on Reliability of Joint Orientation Measurements in Rock Slope using 3D Laser Scanner, Tunnel and Underground Space, Vol. 25, No. 1, pp. 97-106.
- Priest, S. D. (1993), Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, pp. 24-62.
- 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.
- Simon M. (2011), Programming Arduino Getting Started with Sketches, McGraw-Hill.
- Son, Y. G., Kim, J. D., Jong, W. S., Kim, J. H. and Kim, K. S. (2014), Development of Joint Survey System using Photogrammetric, Tunnel and Underground Space, Vol. 24, No. 1, pp. 55-66.
- XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules Datasheet (PDF). Digi International Inc. (2010). pp. 10.

Received : 04/17/2018

Revised : 06/08/2018

Accepted : 06/15/2018

요 지 : 암반사면을 안전하고 효과적으로 해석하기 위해서 암반의 역학적 특성을 면밀하게 조사해야 한다. 하지만 클리노미터를 사용한 절리조사의 한계점으로 인해 이를 보완한 새로운 측정법의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 절리방향의 특성을 분석하기 위해 절리의 방향성을 현장에 적용할 수 있는 절리조사 측정장비를 개발하였다. 개발된 측정장비는 해석 소프트웨어와 하드웨어로 구분된다. 하드웨어는 암반 절리 방향성을 측정하는 측정모듈, 측정자료를 전송하는 전송모듈로 구성되었다. 소프트웨어는 측정모듈을 통해 얻은 데이터로부터 절리의 방향성을 분석하기 위해 개발하였으며 Drone Joint Orientation Survey Measurement로 명명하였다. 개발된 측정장비는 접근이 어려운 지역 등 조사자가 측정할 수 없는 경우에 현장적용성이 양호하며 절리의 방향성에 대한 실내시험결과를 효과적으로 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 드론, 절리조사 시스템, 절리 방향성, 지그비, 서보모터
