

17CTAP-
C114630-
02

드론을 이용한 암반사면 경사의 오차범위
3도미만의 안전성평가 측정장비 개발

최종보고서

2018

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통기술촉진연구사업 R&D Report

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 제2차연도 최종보고서

R&D / 17CTAP-C114630-02

드론을 이용한 암반사면 경사의 오차범위 3도미만의 안전성평가 측정장비 개발 최종보고서

2018. 07. 20.

주관연구기관 / (주)구주엔지니어링

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘드론을 이용한 암반사면경사의 오차범위 3도미만의 안정성평가 측정장비 개발’ (연구개발 기간 : 2016. 06. 24 ~ 2018. 06. 23) 과제의 최종보고서 7부를 제출합니다.

2018. 07. 20.

주관연구기관명 : (주)구주엔지니어링 이현철 (인)

주관연구기관책임자: 이 현 철

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C114630-02	해당 단계 연구 기간	2016-06-24 ~ 2018-06-23	단계구분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	드론을 이용한 암반사면경사의 오차범위 3도미만의 안정성평가 측정장비 개발			
연구책임자	이현철	해당단계 참여 연구원 수	총: 4명 내부: 4명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 50천원 기업: 17천원 정부 외: 천원 계: 67천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 7명 내부: 7명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 100천원 기업: 34천원 정부 외: 천원 계: 134천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)구주엔지니어링			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수 68페이지	
암반사면을 안전하고 효과적으로 해석하기 위해서 암반의 역학적 특성을 면밀하게 조사해야 한다. 하지만 클리노미터를 사용한 절리조사의 한계점으로 인해 이를 보완한 새로운 측정법의 연구가 필요하여 새로운 측정장비를 개발하였으며, 주요 연구내용 및 연구성과는 다음과 같다. <연구내용> ① 절리방향의 기하학적 특성을 분석하기 위해 절리의 방향성을 현장에 효율적으로 적용할 수 있는 절리조사 시스템을 개발하였으며 개발된 시스템은 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구분된다. ② 하드웨어는 암반 절리 방향성을 측정하는 측정모듈, 측정자료를 전송하는 전송모듈로 구성되었으며 소프트웨어는 측정모듈을 통해 얻은 자료로부터 절리의 방향성을 분석하기 위해 개발하였으며 Arduino Joint Orientation Survey System로 명명하였다. <연구성과> ① 개발된 시스템을 접근이 어려운 지역 등 조사자가 측정할 수 없는 경우의 현장적용성이 뛰어나며 실내시험결과인 절리의 방향성을 효과적으로 분석할 수 있었다. ② 개발된 시스템과 기존 측정방법과의 비교분석을 통하여 오차범위내로 만족하여 실제현장에 대한 적용성을 확보하였다.					

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	암반사면의 안정성을 해석하기 위해 드론에 클리노미터를 설치하여 암반사면에 접촉하여 클리노미터를 무인조정을 통해서 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하므로써 암반사면 안정성해석의 기초자료를 제공하는 데 그 목적이 있다. ◦ 드론에 클리노미터를 장착할 수 있는 연결부 설계 및 제작 클리노미터를 드론의 기체하부에 결합하기 위한 고정부재를 마련하되, 연결부재 및 고정부재에는 상기 연결부재를 90도 이내의 범위로 회전시킬 때 서로 맞물리는 돌기 및 홈을 구비하여 흔들림 없이 견고한 고정이 이뤄지고 또한 간편하게 분리할 수 있는 고정장치를 설계 및 제작한다. ◦ 클리노미터가 암반사면에 밀착되도록 하는 힌지 연결부 설계 및 제작 클리노미터가 암반사면에 완전히 밀착되도록 카메라를 이용하여 반복적인 미세조정을 통해서 클리노미터가 고정되게 하는 힌지 연결부를 만든다. ◦ 클리노미터 측정 시 결과값을 촬영하는 카메라 카메라를 이용하여 클리노미터의 결과값을 촬영하고, 촬영된 영상을 준비된 모니터를 통해 실시간으로 확인하여 저장한다.				
연구개발성과	암반사면의 안정해석을 위해서 암반사면의 경사방향 및 경사각이 필요한 데 본 연구를 통해서 암반사면의 경사방향 및 경사각을 드론에 설치한 클리노미터를 측정하여 알 수 있다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	◦ 기존의 방법으로는 암반사면의 전체면적에 대한 정확한 측정이 제한되었으나 드론을 이용하면 암반사면의 전체면적에 대한 정밀한 조사가 가능하게 되어 기존의 암반사면 안정해석결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있게 되며 조사자가 암반사면에 직접 접근하지 않아도 되므로 안전사고를 예방하는 효과를 얻게 된다. ◦ 기존의 방법은 많은 인원이 오랜 시간을 소요하고 암반사면의 전체조사면적 중 접근이 가능한 부위에 국한적으로 측정되었으나 드론을 이용하면 현장측정 작업시간을 단축할 수 있으며, 많은 조사자료를 추출할 수 있어 정확도가 향상되고 경제적이며 안전한 방법으로 평가된다.				
핵심어 (5개 이내)	드론	암반사면	절리의 방향성	클리노미터	안전점검

5. 영문 요약문

< SUMMARY >

Purpose & Contents	It aims to install a clinometer on drones to measure the inclination direction and inclination of the clinometer in contact with the rock slope surface through the unmanned adjusted to provide a basis for the rock slope stability analysis to analyze the stability of a rock slope. ◦ Connection design and fabrication that can be mounted on drones clinometer. But it provided a fixing member for coupling the clinometer to the lower the drone, the connecting member and the fixing member has a solid fixing being made without shaking by having a mutually interlocking projection and the groove when rotating in a range of within 90° to the connecting member in addition to design and produce a retainer that can easily separate. ◦ Hinge connection clinometer is designed and manufactured to ensure close contact with the rock slopes. Clinometer is through repetitive fine adjustment by using a camera to completely close contact with the rock slope makes a hinge connection to be a fixed clinometer. ◦ Clinometer to take a measurement result Using the camera to take the result of the clinometer, and stores in real-time to check the monitor ready the taken images.				
Results	It has an inclination direction and inclination angle of rock slope through the study needed to inclination direction and inclination angle of rock slope stability analysis for rock slope by measuring the clinometer installed on drones.				
Expected Contribution	◦ By conventional methods, but is limited accurate measurement of the entire area of the rock slope by using drones a precise investigation of the total area of rock slopes is possible, and possible to improve the reliability of the existing rock slope stability analysis results because investigators do not have direct access to the rock slope has the effect of preventing accidents. ◦ Traditional way many people it takes a long time and was measured with limitedly on possible areas accessible during the entire research area of the rock slope by using the drones can be shortened on-site measurement of time, to extract a lot of research it can improve the accuracy and economical and are evaluated in a safe way.				
Keywords	Drone	Rock slope	Joint orientation	Clinometer	Safety inspection

6. 영문 목차

Chapter 01. R&D project overview	11
Chapter 02. Technologies in Korea & overseas	18
Chapter 03. R&D process & results	20
Chapter 04. Evaluation & contribution of the project	48
Chapter 05. How to utilize the R&D results	52
Chapter 06. Overseas technologies collected during the R&D	53
Chapter 07. Security level of the R&D achievements	54
Chapter 08. R&D facilities & equipment registered in national science & technology information system	55
Chapter 09. Compliance with safety guidelines	56
Chapter 10. Major R&D achievements	57
Chapter 11. Notes	58
Chapter 12. References	59

7. 본문 목차

< 목 차 >

1장. 연구개발과제의 개요	11
1. 연구개발 목적	11
가. 우리나라 암반현황	11
나. 클리노미터를 이용한 지질조사	11
다. 암반사면의 유지관리현황	11
2. 연구개발의 필요성	12
가. 불연속면의 주향과 경사측정의 문제점	12
나. 클리노미터의 측정오차	12
다. 불연속면의 절리방향성의 영향	12
라. 안전사고 대책미흡	12
3. 연구개발 범위	12
가. 암반사면의 안정해석을 위한 주요인자 산정	12
나. 1차년도 연구개발범위	17
2장. 국내외 기술 개발 현황	18
1. 국내 현황	18
2. 국외 현황	18
가. 기술개발 성숙도	19
나. 국내 무인비행장치의 연도별 추이	19
다. 국내-외 주요시장 경쟁사	19
3장. 연구 수행 내용 및 성과	20
1. 1차년도 연구수행 내용 및 성과	20
가. 서론	20
나. 절리조사 시스템의 이론적 배경	20
다. 절리조사 시스템의 하드웨어와 소프트웨어	22
라. 실험실 모형을 이용한 적용성 평가	28
마. 평사투영해석방법	29
바. 실험결과 분석	32
사. 실험 데이터 및 결과	35
2. 2차년도 연구수행 내용 및 성과	37
가. 절리조사 시스템의 이론적 배경	37
나. 절리조사 시스템의 하드웨어와 소프트 웨어	40
다. 실험실 모형을 이용한 적용성 평가	44
라. 2차년도 절리방향 데이터	45
마. 결론	47
4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	48
1. 목표 달성도	48
2. 관련 분야 기여도	51

5장. 연구개발성과의 활용 계획	52
1. 기술개발의 활용방안	52
6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	53
7장. 연구개발성과의 보안등급	54
8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	55
9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	56
10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	57
11장. 기타 사항	58
12장. 참고 문헌	59

〈 표 차 례 〉

표 3.1 Technical Specification (Arduino Uno)	23
표 3.2 Technical Specification (9 Axes Motion Shield)	24
표 3.3 Technical Specification (Ultrasonic Sensor)	25
표 3.4 Technical Specification (Altitude Sensor)	26
표 3.5 Technical Specification (Xbee Module)	27
표 3.6 Comparison of each joint orientation (Clinometer and Arduino Measure System)	36
표 3.7 Technical Specification (SG-90)	40
표 3.8 Technical Specification (MAVIC PRO)	41
표 3.9 Technical Specification (ESP8266)	42
표 3.10 Comparison of each joint orientation (Clinometer and Drone Measure System)	45
표 7.1 보안등급의 분류 및 결정사유	54

〈 그림 차례 〉

그림 3.1 Structure diagram showing major components required for calculating orientations of devices.	21
그림 3.2 Conceptual diagram of the joint survey System	22
그림 3.3 Arduino Uno	23
그림 3.4 Axes Motion Shield	24
그림 3.5 Ultrasonic Sensor	25
그림 3.6 Altitude Sensor	26
그림 3.7 Xbee Module	27
그림 3.8 Joint orientation test model	28
그림 3.9 Joint orientation test apparatus	29
그림 3.10 Rock Failure Patterns Using Stereo Net	31
그림 3.11 Graph of total joint orientation error	33
그림 3.12 Joint orientation using the streographpic projection method	34
그림 3.13 Measuerment diagram using drone	37
그림 3.14 Calculation diagram of degree	38
그림 3.15 Blynk	40
그림 3.16 SG-90	40
그림 3.17 MAVIC PRO	41
그림 3.18 ESP8266	42
그림 3.19 Blynk	43
그림 3.20 Joint orientation test apparatus	44
그림 3.21 Clinometer and Mobile application	44
그림 3.22 Joint orientation using the streographpic projection method	46

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 우리나라 암반현황

우리나라의 지질특성상 산지가 약 70% 이기에 도로나 터널 등의 공사현장에서는 암반을 발견할 수 있다. 그러나 이 암반에서는 불연속면(암반에 나타나는 모든 연약면을 총칭함)을 포함한다.

나. 클리노미터를 이용한 지질조사

클리노미터는 야외 및 현장에서 지질조사 및 관련 산업계에서 여러 노두에 발달된 지질구조(층리, 엽리, 습곡, 절리 및 단층 등)의 측정에 있어 필수 불가결한 휴대용 장비에 속한다.

다. 암반사면의 유지관리현황

고속도로 주변의 절토사면의 경우는 통행량이 많고 차량의 속도가 매우 빠르기 때문에 절토사면의 붕괴는 대형 사고를 유발할 가능성이 매우 높다. 조그마한 낙석이 발생하더라도 운전자의 반사적 행동으로 인해 매우 큰 위험을 초래할 수 있으므로 절토사면의 안정성과 안전시설의 확보는 통행량이 비교적 적은 국도나 지방도 절토사면의 안정성 확보에 비하여 상대적으로 중요하게 고려되어야 한다. 1970년대 초에 건설된 고속도로는 기술력 부족이나 건설당시의 재정 형편이 충분하지 않아 사면안정을 확보하지 못한 경우가 많다. 이러한 사면에서는 비교적 장기간에 걸친 풍화작용으로 사면표면이 토사화 된 상태이며, 태풍이나 집중호우에 의한 붕괴나 유실이 잦고 해빙기에 낙석이 빈번하게 발생하는 등 붕괴위험을 내포하고 있는 상태이다. 그러나 외견상 안정한 것으로 나타나므로 사전에 문제의 가능성을 예측하는 것은 매우 어렵다. 체계적인 유지관리를 위해서는 이러한 장기화된 사면의 문제도 인식할 필요성이 있으며, 건설 후 관리기간, 과거의 문제이력을 고려하여 차등화된 관리방안을 적용할 필요가 있다.



2. 연구개발의 필요성

가. 불연속면의 주향과 경사측정의 문제점

불연속면의 주향(성층면과 수평면의 교선의 방향을 말하며, 이 방향을 북을 기준으로 하여 나타냄)과 경사(성층면이 주향선과 직각을 이루며 수평면과 이루는 각이 최대인 각을 나타냄)를 알기 위하여 종래에는 클리노미터(Clinometer), 브란트컴파스 (Brunton compass), 클리노컴파스(Clino-compass) 등을 작업자가 직접 암반의 절리면에 갖다 대고 측정을 한다. 이 경우에는 넓은 면적으로 이루어지는 도로사면이나 터널에 있어서 주향과 경사의 측량에 시간이 많이 걸리며, 대절토 사면이나 위험구간에서는 작업자의 접근이 불가능하므로 주향과 경사의 측량이 어렵다.

나. 클리노미터의 측정오차

종래의 클리노미터 장치를 이용하여 지층면의 주향과 경사를 측정하는 경우, 주향을 측정하는 동작과 경사를 측정하는 동작을 분리하여 수행하여야 했다. 주향을 측정하는 동작과 경사를 측정하는 동작을 분리하여 수행하는 경우, 지층면의 주향과 경사를 측정하는 과정에서 측정 동작에 의한 오차가 발생하는 문제가 있었다.

다. 불연속면의 절리방향성의 영향

암반내에 포함되어 있는 불연속면의 방향과 강도 특성에 좌우된다. 특히, 암반내 방향과 사면방향의 상대적 위치는 암반사면의 불안정성에 중요한 영향을 준다.

라. 안전사고 대책미흡

작업자의 사고방지에 대한 대책을 수립하는데 많은 시간과 비용이 발생한다는 문제점이 있으며, 또한 대책수립의 지연으로 인하여 사고발생을 전혀 예방할 수 없다는 문제점이 있다.

3. 연구개발 범위

가. 암반사면의 안정해석을 위한 주요인자 산정

암반사면에 대한 안정해석은 먼저 현장지질조사에서 얻은 불연속면의 주향과 경사(또는 경사방향과 경사)를 측정 및 분석하여 평사투영법(Stereographic Projection Method)에 의해 붕괴가능 사면을 판단한 후 위험지역에 대해 불연속대 및 예상파괴 범위를 선정하여 한계평형해석법에 의한 붕괴 가능성 및 안전율을 구하는 방법으로 수행한다.

일반적으로 사면의 파괴형태는 원형파괴 (Circular Failure), 평면파괴 (Plane Failure), 쐈기파괴(Wedge Failure) 및 전도파괴 (Topping Failure)가 있다.

평면파괴는 파괴블럭이 하나의 활동면을 따라 미끄러지며 발생하는 가장 단순한 형태의 파괴유형이다. 기본적으로 평면파괴가 발생하기 위해서는 다음과 같은 4가지 조건을 만족해야 한다.

(1) 자유면 조건

독립적인 파괴블럭이 하나의 활동면을 따라 미끄러질 수 있도록 파괴블럭의 양쪽 측면은 개방 혹은 분리되어 있어야 한다.

(2) 주향 조건

미끄러짐이 발생하는 활동면(절리면)의 주향은 비탈면의 주향과 평행하거나 $\pm 20^\circ$ 이내여야 한다. 하지만 이 조건은 경험에 근거한 제안으로 켜기파괴 중 한쪽 절리면을 따라 미끄러지는 1면 켜기파괴와 같은 형태도 평면파괴로 분류될 수 있으며 각도에 대한 제안은 현장조건에 따라 유동적으로 적용될 수 있다.

(3) 경사각 조건1

활동면의 경사각은 비탈면의 경사각보다 작아야 한다. 파괴블럭이 형성되기 위한 기하학적 조건에 해당된다.

(4) 경사각 조건2

활동면의 경사각을 활동면의 강도특성인 마찰각보다 커야 한다. 즉, 미끄러져 내려가는 활동력이 마찰각(전단강도)에 의해 버티는 저항력보다 커야 파괴가 발생한다는 의미이다. 켜기파괴는 두 개의 불연속면에 의해 형성된 파괴블럭이 불연속면의 교차선을 따라 미끄러지는 2면 켜기파괴와 한 불연속면에 의해 절단되면서 분리되어 다른면을 따라 미끄러지는 1면 켜기파괴 형태로 분류된다. 기본적으로 켜기파괴가 발생하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 만족해야 한다.

(가) 두 불연속면의 교차선 경사는 절리면의 내부마찰각보다 커야 한다. 즉, 미끄러져 내려가는 활동력이 절리면 전단강도보다 커야 파괴가 발생한다.

(나) 두 불연속면의 교차선 경사는 비탈면 경사보다 작아야 한다.

(다) 두 불연속면의 교차선 방향은 비탈면의 경사방향과 평행하거나 오차범위 $\pm 20^\circ$ 이내로 비탈면과 교차해야 한다.

전도파괴는 비탈면 주향과 동일한 방향의 주향 및 비탈면 경사와 반대방향의 급경사를 가지는 불연속면이 높은 빈도로 발달되어 있을 때 주로 발생한다.

전도파괴는 파괴블럭 무게중심 위치에 따라 회전과 미끄러짐을 동반하기 때문에 미끄러짐 방향에 대한 활동력과 저항력만으로는 안전율을 계산할 수 없다.

한계평형이론에 의한 비탈면의 안전율은 다음과 같이 활동력에 대한 저항력의 비로 나타낼 수 있다.

1을 기준으로 안정, 불안정상태로 구분된다.

안전율을 계산하는데 있어서 가장 중요한 요소는 절리경사, 인장균열위치 등과 같은 파괴블럭의 규모와 절리면의 강도특성이다. 이외 지하수, 충전물의 유무, 상재하중이 안전율에 영향을 미치는 중요한 인자로 작용한다.

암반사면의 주향, 경사각, 경사방향을 측정할 수 있는 클리노미터는 야외 및 현장에서 지질조사 및 관련 산업계에서 여러 노두에 발달된 지질구조(층리, 엽리, 습곡, 절리 및 단층 등)의 측정에 있어 필수 불가결한 휴대용 장비에 속한다.

(1) 주향 측정 방법

(가) 측정하고자 하는 지층면에 클리노미터의 장변을 붙이고 수준기를 이용해수평이 되게 한다.

(나) 클리노미터 안쪽 방위표시 중 N을 기준으로 자침이 E 또는 W방향에 위치하게 된다. 이때 자침(북침 또는 남침)이 바깥눈금을 가리키는 숫자(각도)와 방향을 읽으면 된다.

- 자침이 N과 E사이에 있고 30°을 가리키면 주향은 N30°E임
- 자침이 N과 W사이에 있고 30°을 가리키면 주향은 N30°W임
- 자침이 N과 S에 일치하면 주향은 NS임
- 자침이 EW에 일치하면 주향은 EW임

(2) 경사 측정 방법

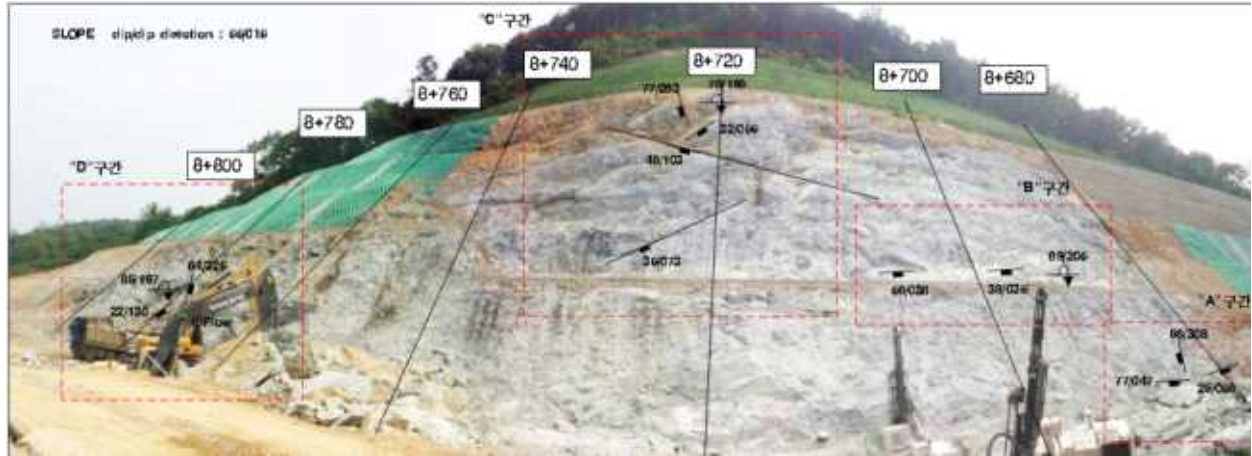
(가) 경사각은 지층면과 수평면이 만나는 선(즉, 클리노미터의 장변방향의 교선)에 직각인 직선과 평면과의 각이 경사각이다. 경사 각도를 측정하기 위해서는 주향의 직각방향으로 클리노미터를 위로하고 경사각 측정 바늘이 가리키는 안쪽 눈금을 읽으면 된다.

(나) 경사각을 측정한 후, 경사방향을 판단해야 한다. 그러나 클리노미터에서는 경사 방향을 알 수 있다. 경사방향은 지층의 실제 기울어진 방향을 측정자가 스스로 방위를 고려하여 결정해야 한다.

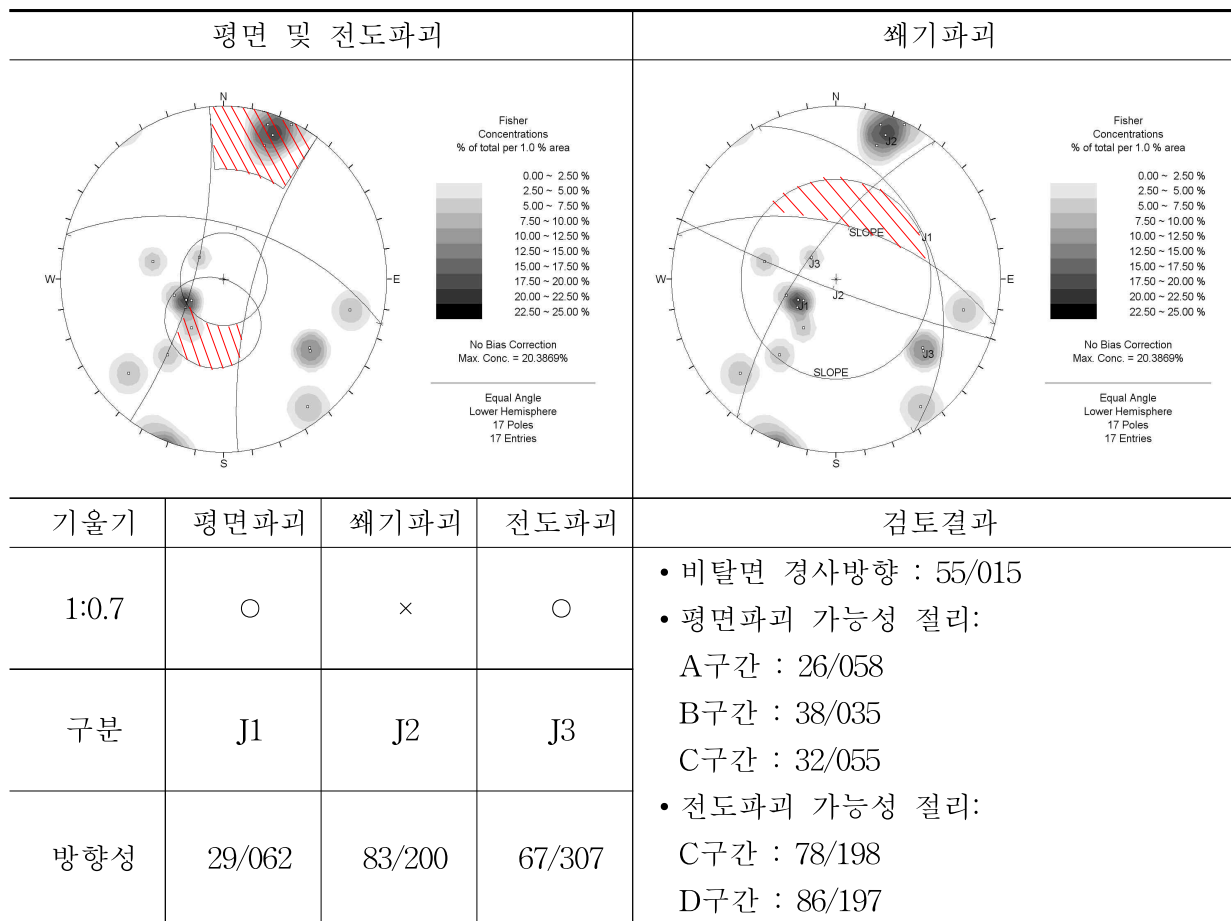
(다) 경사각과 경사방향을 측정한 후, 경사의 표시는 30°SE와 같이 경사방향 앞에 경사각도를 기록한다. 결국 주향과 경사를 측정하면, 주향과 경사의 방향은 항상 직각이 된다.

암반사면의 안정성 해석을 위해서는 암반사면의 경사방향 및 경사각의 측정이 필요하며 현재는 다수의 인원이 오랜 시간을 소요하여 제한된 암반사면의 조사면적으로서 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하여 안정성해석을 수행하고 있는 실정으로서 암반사면의 신뢰성이 높은 안정해석을 위해서는 암반사면의 전체면적에 대한 조사가 필요하며 이를 위해서 드론을 이용하여 암반사면 안정해석을 위한 기초자료획득 측정장비를 개발할 필요가 있다.

(라) 암반사면에 대한 현장조사결과 예시



(마) 암반사면에 대한 안정해석결과 예시

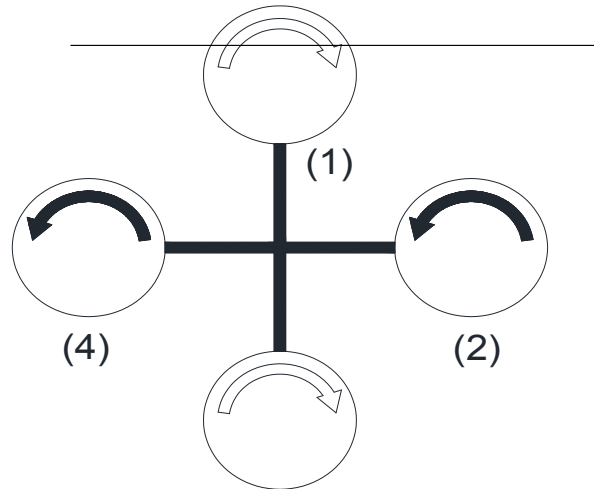


(바) 기술개발의 필요성

암반사면의 안정성 해석을 위해서는 암반사면의 경사방향 및 경사각의 측정이 필요하며 현재는 다수의 인원이 제한된 암반사면의 조사면적으로서 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하여 안정성해석을 수행하고 있는 실정으로서 암반사면의 신뢰성이 높은 안정해석을 위해서는 암반사면의 전체면적에 대한 조사가 필요하며 이를 위해서 드론을 이용하여 암반사면 안정해석을 위한 기초자료획득 시스템을 개발할 필요가 있다.

(사) 드론의 활용방법

일반적으로 무인비행체는 사람이 타지 않고 무선전파의 유도에 의해서 비행하는 비행기나 헬리콥터 모양의 비행체로서 드론(drone)이라고도 한다. 드론의 활용목적에 따라 다양한 크기와 성능을 가진 비행체들이 다양하게 개발되고 있는데 대형 비행체의 군사용 뿐만 아니라, 초소형 드론도 활발하게 개발 연구되고 있다. 또한 개인의 취미활동으로 개발되어 상품화된 것도 많이 있다. 정글이나 오지, 화산지역, 자연재해지역, 원자력 발전소 사고지역 등 인간이 접근할 수 없는 지역에 드론을 투입하여 운용한다. 드론의 구성요소는 크게 8가지 정도로 구분할 수 있다. 드론의 뼈대가 되어줄 프레임과 배터리를 이용하여 동력을 만드는 모터, 드론을 떠오르게 하는 프로펠러, 모터의 회전속력을 정밀하게 조절해줄 전 자변속기, 자이로, 지자계 등의 센서들을 탑재하여 기체가 수평비행 할 수 있도록 해주는 비행제어유닛, 무선조종기가 송신한 무선신호를 받아 비행제어유닛에 전달해줄 무선 수신기, 드론을 원격조종하는 무선조종기, 드론을 작동시키기 위한 배터리로 구분할 수 있다.



- (1) 상승 및 하강 : (1)~(4)를 동일하게 회전속도를 올리면 기체는 상승하고 동일하게 회전 속도를 낮추면 기체는 하강하게 된다.
- (2) 전 · 후진 : (3)의 속도만 올리면 기체는 앞으로 기울어져 전진하게 되고 (1)의 속도만을 올리면 기체는 뒤로 기울어져 후진하게 된다.
- (3) 좌 · 우진 : (2)의 속도만을 올리면 기체는 왼쪽으로 기울어져 왼쪽으로 이동하고 (4)의 속도만을 올리면 기체는 오른쪽으로 기울어져 이동한다.
- (4) 회전 : (1)과 (3)의 속도를 동일하게 증가시키면 기체의 반토크 균형이 깨져 기체 후미가 왼쪽으로 돌아가고 (2)와 (4)의 속도를 동일하게 증가시키면 마찬가지로 기체 앞부분이 오른쪽으로 돌아간다.

나. 1차년도 연구개발범위

(1) 개발 목표

- 주관연구기관(주식회사 구주엔지니어링):

드론과 클리노미터의 세부도면 및 결합도면을 작성하고 클리노미터를 드론에 장착한 시제품을 제작하여 암반사면조사용 장비를 개발한다.

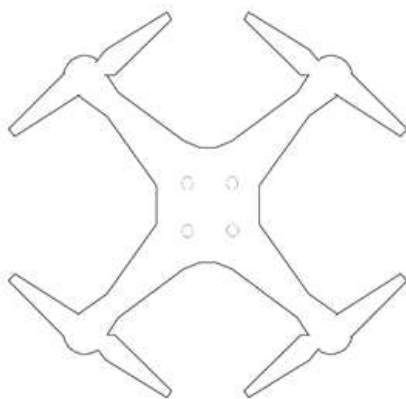
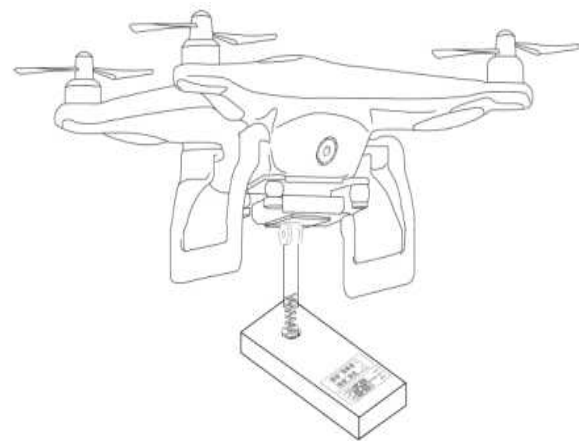
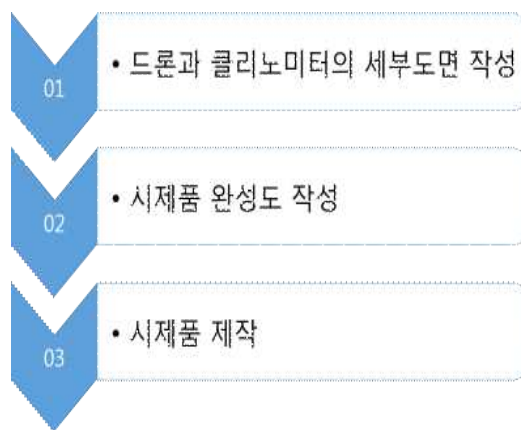
(2) 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(주식회사 구주엔지니어링):

1단계 : 드론과 클리노미터의 세부도면 및 결합도면 작성

2단계 : 클리노미터를 드론에 장착한 시제품 완성도 작성

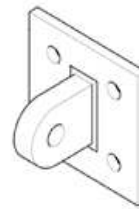
3단계 : 클리노미터를 장착한 드론의 시제품 제작



(a) 고정공



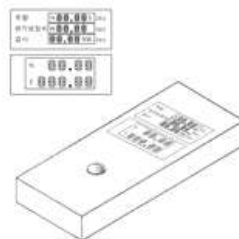
(a) 연결부재



(b) 브라켓패널



(c) 힌지부재



(d) 클리노미터



(d) 나사

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

국내 수준	개념정립단계(), 기업화단계(●), 기술안정화단계()
	국내의 기술은 특허등에서는 증가추세를 보이나 실용화 단계 혹은 기업화 단계에서는 미진한 상태임

드론은 대부분 군사용이나 민수용으로는 항공측량, 방송촬영 등에 사용된다.

국내에서도 드론의 숫자는 크게 증가하고 있으나 대부분이 레저용이며 실제 산업현장에서 활용도는 매우 낮은 상황이다.

정부기관 및 대기업 위주의 군수용 시장과 달리 상업용 시장은 스타트업 기업들이 선도하고 있다. 최근 스타트업 업계는 SW와 HW가 결합된 제품 또는 서비스를 출시하는 기업이 각광받고 있으며, 드론은 그동안 장난감 또는 군사용이었던 목적에서 벗어나 SW와 HW 기술이 함께 다양하게 활용되는 산업으로 주목중이다. 마이크로 칩, 센서 등 관련 부품 가격의 하락 및 드론 관련 기술의 발전으로 드론 제작 비용이 500달러 이하까지 떨어지고, 드론 제작의 진입 장벽이 낮아져 스타트업 기업 참여가 용이해졌다. 드론의 뛰어난 이동성과 다양한 활용성은 단순히 드론을 영상촬영에 활용하는 단계를 넘어서, 드론을 통해 영상 및 데이터를 수집하는 데 활용 가능하게 되어, 드론을 통해 대량의 데이터를 수집, 분석, 처리하는 SW에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있는 실정이다.

2016년 2월 25일 미래창조과학부는 ICT R&D(연구·개발) 투자 로드맵 2020 발표를 했으며, 드론(무인기)과 같은 무인이동체와 웨어러블 기기 등 83개 정보통신기술(ICT)을 중점투자 분야로 선정했다. 이는 융합서비스와 이동통신, 네트워크 등 '10대 ICT 기술분야'를 토대로 83개 중점투자분야이다.

2. 국외 현황

세계적 수준	개념정립단계(), 기업화단계(), 기술안정화단계(●)
	기술 선진국에서는 기초연구 및 응용연구가 활발히 진행되어 안정화 단계

최근 기술선진국에서 활용되고 있는 사면의 계측 기술들은 광섬유 케이블을 이용한 방법, 사진측량을 이용한 방법, 자동광파기 또는 Aka 로봇광파기를 이용한 방법, 음향에너지를 이용하는 방법, 인공위성을 이용하는 방법 등등을 들 수 있다. 이들은 한층 더 많은 데이터를 보다 적은 시간과 노력을 들여 가능한 한 정확하게 수집 하고 평가를 할수 있게 해주고 있다. 하지만 국내에서는 비용상의 문제와 모델의 검증, 불확실성을 저감시킬수 있는 기술연구 개발의 부재 등으로 인해 극히 일부만 적용하고 있다.

가. 기술개발 성숙도

연구착수시 암반사면의 드론을 이용한 조사방법의 기술적 개념정립 단계인 TRL2 단계에서 연구종료시 드론을 이용하여 암반사면의 조사결과를 평가할 수 있는 TRL4단계로 진행 할 수 있다.

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

나. 국내 무인비행장치의 연도별 추이

(단위 : 대)

연도	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
대수	164	239	297	396	496	637	600	750

다. 국내·외 주요시장 경쟁사

경쟁사명	제품명	판매가격 (천원)	연 판매액 (천원)
① 바이텍코리아(주)	인터넷기반 사면계측시스템	-	-
② 이제이텍(주)	대절토사면 등 경사측정 및 지하수위 계측	-	-
③ (주)지엠지	지반, 사면계측	-	-
④ 테스콤(주)	터널, 지반계측 중 포함된 사면계측	-	-
⑤ 아남이엔지(주)	흙막이계측관리, 터널계측관리, 연약지반 침하안정 계측관리	-	-
⑥ 호승시스템(주)	지반계측, 구조물계측	-	-

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 1차년도 연구수행 내용 및 성과

가. 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 기하학적 특성은 조사선 조사, 조사창 조사, 클리노미터에 의한 조사 등과 같이 암반 표면에 접촉하여 절리조사를 수행한 후 통계분석을 거쳐 도출해왔다(Son et al., 2014). 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 원거리 조사기법들에 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 있다(Moffitt and Mikhail, 1980; Hagan, 1980; Ryu et al., 2000).

이러한 제약 조건들을 해소하기 위하여 본 연구에서는 절리방향 분석에 대한 기존 이론을 효과적으로 절리조사에 적용하기 위해 절리조사 시스템을 개발하고자 하였다. 절리방향 조사시스템은 하드웨어와 해석 소프트웨어로 구분된다. 하드웨어는 암반 절리구조의 방향성을 측정하기 위하여 아두이노 우노, 절리방향 측정모듈, 측정자료의 무선송신모듈로 구성하였다. 해석 소프트웨어는 절리방향 측정모듈로 얻어진 자료를 화면상으로 출력하여 절리의 방향성을 분석하기 위해 개발하였으며 Arduino Joint Survey로 명명하였다. 본 연구의 목적은 암반사면을 안전하고 효과적으로 해석하기 위해서 암반의 역학적 특성인 절리방향을 측정하는 절리조사 시스템을 개발하는 것이며 연구방법은 절리방향을 측정하는 측정모듈과 측정자료를 전송하는 전송모듈로 구성하여 비접촉방식으로 절리방향을 측정하여 기존의 측정방법인 클리노미터를 이용한 방법과 실내시험으로 비교검증하였다.

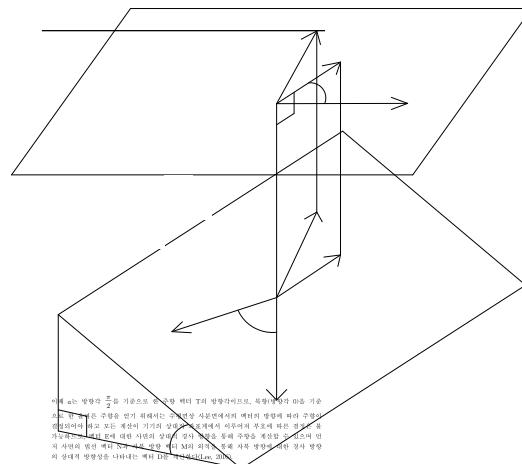
나. 절리조사 시스템의 이론적 배경

공학적 안정성의 평가를 위한 암반사면의 측정은 단층, 절리와 같은 불연속면을 대상으로 수행하게 되며, 이러한 불연속면의 속성을 토대로 사면의 안정성 분석을 수행하여 사면의 가능한 파괴 양상에 대한 정보를 취득할 수 있다(Lee, 2016). 암반사면의 조사에서는 특히 불연속면의 경사각과 경사방향은 사면 붕괴시 붕괴의 형태와 방향을 결정하는 중요한 요소이다(Wyllie and Mah, 2004).

암반사면의 측정에는 컴퍼스 클리노미터(compass clinometer, geological compass, clino-compass, inclinometer with compass 등)를 사용한다. 이 장비는 통상적으로 정사각형 혹은 직사각형의 모양을 가지며, 본체에 나침반이 포함되어 있어 측정대상 절리구조에 특정 모서리를 밀착하여 대상 구조의 방향각을 측정할 수 있다. 경사각의 측정은 힌지 등에 포함된 각도계나 중력 방향으로 기울어지는 보조 지침을 이용하여 수행 가능하며, 두 측정을 동시에 수행하거나 정확한 측정을 위해 각 측정을 별도로 수행할 수 있다(Wyllie and Mah, 2004).

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 수행하며, 절리구조의 형태에 따라 값을 읽는 방법이 상이하고, 구조의 위치상 값을 읽기 곤란한 경우도 존재하므로 측정자에게는 어느 정도의 숙련 과정이 요구된다.

면구조의 경사각은 그림 3.1와 같이 기기의 Z축과 중력가속도 벡터 G 의 사잇각과 같고 기기의 좌표체계 상에서 기기의 반대 방향 단위법선 벡터를 $N(0, 0, -1)$ 이라 하고, 센서 자료로부터 얻은 중력가속도 벡터를 $G(G_x, G_y, G_z)$ 라고 할 때, 경사 방향은 주향으로부터 계산하는 것이 편리한데, 이는 그림 3.1에서 나타난 바와 같이 G 와 N 의 외적 T 가 사면의 경사방향에서 반시계 방향을 지시하는 벡터, 즉 사면의 주향을 나타내는 벡터와 같기 때문이다(Lee, 2016). 또한 지자기장의 복각(magnetic dip)이 지역에 따라 다르므로(Finlay et al., 2010), 수평면 상에서의 기준 방향은 $G \times M$ 을 통해 항상 수평면상에 위치하며 방향각을 가리키는 벡터 E 를 얻음으로써 최소한의 계산으로 주향의 방향 α 를 계산할 수 있다.



$$\begin{aligned}
D &= N \times M \\
&= (0, 0, -1) \times (M_x, M_y, M_z) \\
&= (M_y, -M_x, 0)
\end{aligned} \tag{4}$$

다음으로 D와 G의 내각 β 에 의해 경사 방향의 제 1, 2사분면과 제 3, 4분면간 구분이 가능하다(Lee, 2016).

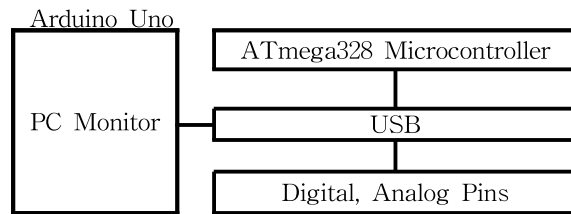
$$\begin{aligned}
\beta &= \cos^{-1} \left(\frac{D \cdot G}{|D||G|} \right) \\
&= \cos^{-1} \left(\frac{E_z}{|D||G|} \right)
\end{aligned} \tag{5}$$

앞서 계산한 α 는 부호에 의해 주향의 제 1, 2사분면과 제 3, 4사분면간의 구분이 이루어지며 주향의 크기는 경사방향보다 항상 $\frac{\pi}{2}$ 만큼 작으므로, 경사방향 n 은 β 에 따라 다음과 같이 표현된다(Lee, 2016).

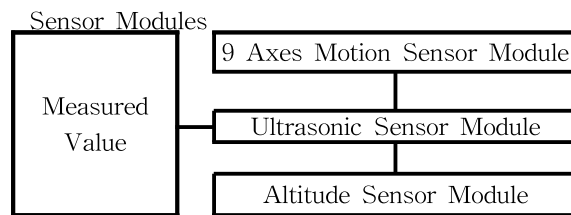
$$n = \begin{cases} \pi - \alpha \left(\beta > \frac{\pi}{2} \right) \\ \pi + \alpha \left(\beta \leq \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \tag{6}$$

다. 절리조사 시스템의 하드웨어와 소프트웨어

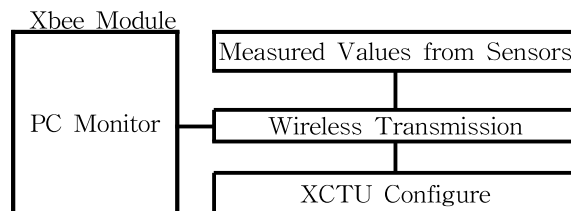
본 연구에서는 SmartProjects社에서 개발한 sketch를 이용하여 자료 취득 및 분석을 실시하였다. 이 시스템은 크게 Arduino Uno, Sensor modules, Xbee module으로 구성되어 있다. Fig. 2.은 절리조사 시스템의 구성도를 나타낸다.



(a) Arduino Uno



(b) Sensor Modules



(c) Xbee Module

그림 3.2 Conceptual diagram of the joint survey System

(1) 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. 다운로드 할 수 있는 프로그램의 최대 크기는 32KByte이지만 아두이노의 특징 중 하나인 부트로더가 그 중 일부를 사용하므로 실제로는 부트로더 크기를 뺀 나머지를 프로그램을 위해 사용할 수 있다. 이외에도 프로그램 실행 중 데이터 저장을 위한 2KByte 크기의 SRAM과 전원이 꺼진 이후에도 데이터가 보존되는 1KByte 크기의 EEPROM을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축모션센서, 초음파거리센서, 고도센서로부터 입력받은 신호를 디지털신호로 변환하여 수신부 컴퓨터의 모니터상에 출력하는 역할을 한다. 표 3.1은 Arduino Uno에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.1 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

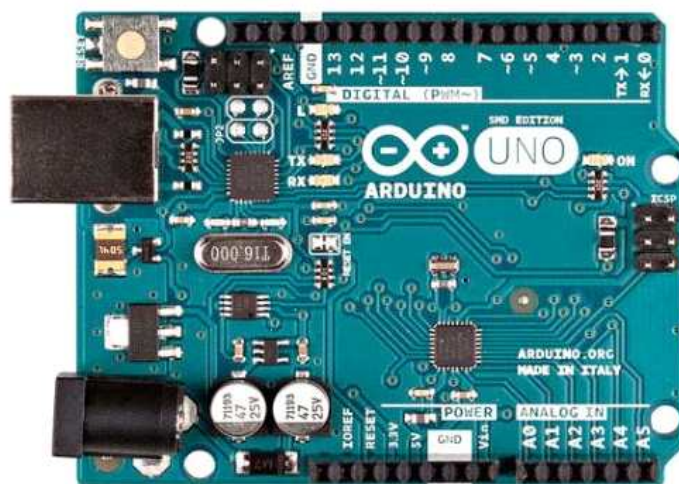


그림 3.3 Arduino Uno

(2) 9축 모션센서

Bosch 사의 BNO055 absolute orientation sensor를 기반으로 제작된 제품으로, BNO055는 3축 14비트 가속도계, 3축 16비트 자이로스코프(± 2000 도/초당) 3축 지자기센서, 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 결정하는 데 활용된다. 표 3.2은 9 Axes Motion Shield에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.2 Technical Specification (9 Axes 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

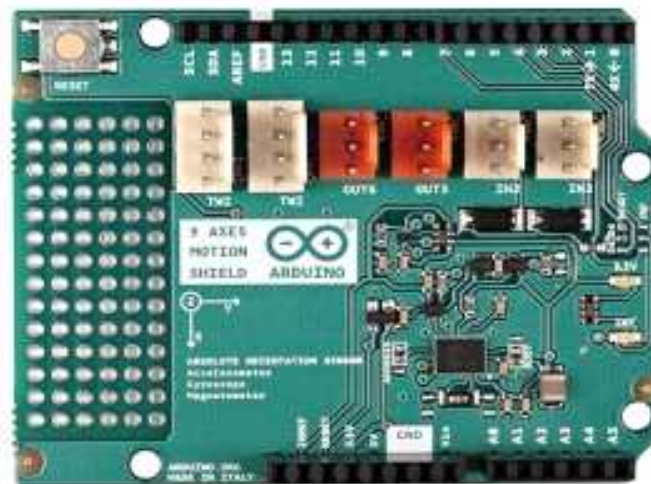


그림 3.4 9 Axes Motion Shield

(3) 초음파센서

초음파센서 모듈은 HC-SR04로서 측정거리가 4m까지이며 측정정확도는 2mm에 이른다. 초음파모듈은 송신부, 수신부, 조절회로로 구성된다. 모듈의 기본원리는 최소 10μs의 시간신호로 입출력 트리거를 사용하며 자동적으로 약 40kHz로 송신하고 펄스신호로 반송한다. 반송신호인 경우 입출력시간은 초음파의 송신에서 반송까지의 시간이다. 측정거리(L)은 식(7)과 같다.

$$L = \frac{t}{\left(\frac{v}{2}\right)} \quad \text{식(7)}$$

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 수평거리를 측정하였다. 표 3.3은 Ultrasonic Sensor에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.3 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



그림 3.5 Ultrasonic Sensor

(4) 고도센서

고도센서 모듈은 고정밀의 디지털 압력센서인 BMP180로서 초저전력, 저전압으로 최적화되어 장기간의 안정성 및 고정밀과 선형성을 갖고 전자기장의 강도에 대한 압전저항성에 기초를 두고 있다.

본 연구에서의 고도센서는 압력값을 고도(H)로 변환하여 적용하였으며 변환식은 다음 식(8)와 같다.

$$H = 44330 \times \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{5.255}}\right) \quad \text{식(8)}$$

여기서 p는 측정된 압력, p₀는 해수면에서 압력을 나타낸다.

상기 식(7)과 식(8)을 통해서 경사각(d)는 다음 식(9)와 같이 계산된다.

$$d = \tan^{-1}\left(\frac{H}{L}\right) \quad \text{식(9)}$$

표 3.4은 Altitude Sensor에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.4 Technical Specification (Altitude Sensor)

Division	Specifications
Pressure range	300 ~ 1100 hPa(+9000 m ~ -500 m relating to sea level)
Supply Voltage	1.8 ~ 3.6 V
Interface	I2C
Resolution of output data	0.01 hPa



그림 3.6 Altitude Sensor

(5) 지그비 센서

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, 초음파센서, 고도센서로부터 얻은 데이터를 수신부 컴퓨터에 무선으로 송신할 수 있다. 표 3.5은 Xbee Module에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.5 Technical Specification (Xbee Module)

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



그림 3.7 Xbee Module

(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 아두이노 개발환경은 C++을 사용하여 원하는 동작을 하도록 코딩을 하고 이것을 보드에 업로드하면 아두이노가 동작한다. 아두이노 업로드는 플래시 메모리에 쓰지므로 다음부터는 전원만 인가하면 동작하며 이러한 아두이노 IDE를 통해 작성된 프로그램이나 코드를 Sketch라 부른다(Simon M, 2011).

본 연구에서 스케치를 이용하여 아두이노 우노와 센서를 통한 데이터를 수신부 컴퓨터에 출력하였다.

라. 실험실 모형을 이용한 적용성 평가

이 연구에 적용된 절리조사 시스템을 현장에 활용하기에 앞서, 실내모형에 대해서 적용성을 평가하였다. 실내모형 시험에 사용된 대상은 그림 3.8와 같이 방향이 서로 다른 9개의 절리면으로 모사하였다. 각 절리면에는 표적을 미리 표시하여, 이를 통해 해당점의 좌표를 읽을 수 있다. 각 절리면에 대해서 경사각을 40°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 검토 하였다. 그림 3.9는 절리조사 시스템의 하드웨어 구성도를 나타낸다.

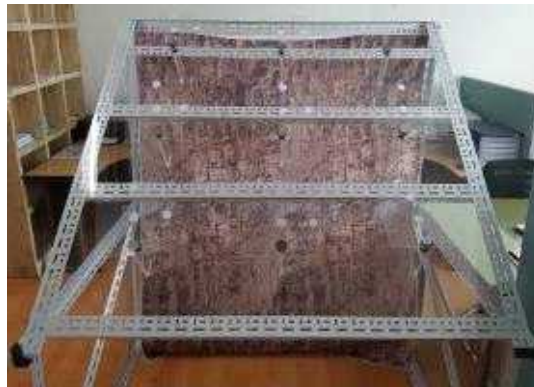
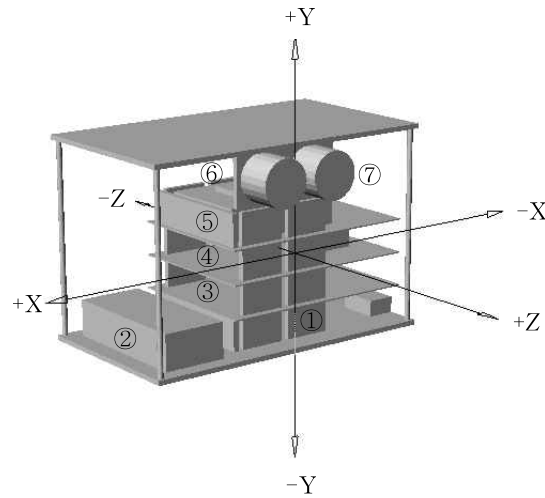


그림 3.8 Joint orientation test model



(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 Tilt sensor
- ⑦ Ultrasonic sensor

그림 3.9 Joint orientation test apparatus

마. 평사투영해석방법

(1) 평사투영해석 이론

신속하고 개략적인 암반사면의 안정성을 분석하기 위하여 지표지질조사 및 실측에 의해 얻어진 절취면의 방향, 절리면의 방향, 절리면의 전단각 등을 고려하여 계산하는 평사투영법(Stereo Projection Method)을 널리 이용하고 있다. 이 방법은 대원(great circle)과 극점(pole)으로 해석하는 두 가지 방법으로 대별할 수 있다. 대원투영방법을 이용하여 암반사면의 안정성을 해석하는 방법은 Hoek & Bray(1971)가 제시하였는데 주로 평면파괴와 켜기파괴에 관한 몇 가지 충분조건을 선정하였다.

암괴가 어떤 절리면을 따라서 붕괴하려면 평면파괴는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다. 먼저 절리의 주향이 절리면의 주향과 비슷하여야 하며, (최소한 $\pm 20^\circ$ 내외) 절리의 주향이 절취면상에 나타나야 한다. 또한 이것은 절리경사(α)가 절취면 경사(β)보다도 작아야 한다는 것을 의미한다. ($\alpha < \beta$) 그리고 절리의 경사(α)가 절리면의 마찰각(Φ)보다 커야 하고 ($\Phi < \alpha$) 붕괴되는 암괴의 양쪽측면이 절단되어서 암괴가 무너지는데 측면의 영향이 없어야 한다.

켜기파괴는 상기의 평면파괴의 충분조건과 같다. 다만 절리면의 주향과 경사 대신에 두 절리면이 만나서 이루는 선의 주향과 경사를 대입한다($\Phi < \alpha < \beta$).

간략한 평사투영해석방법은 절취면의 대원을 그리고 이 그림을 오른쪽에서 서서히 돌리면서 대원과 WE선이 만나는 점들에서 90되는 점들을 찍어서 나중에 만나는 점을 연결시킨 타원형의 데이라이트 구역(daylight envelope)을 설정한다(Markland, 1972).

이 구역 안에 찍히는 점들의 의미는 단지 절취면의 경사보다도 작은 경비탈면을 가지고 있으며 절취면상에 나타난 절리들을 의미할 뿐이지 여기에서 그 절리들의 방향이 절취면의 방향과 20°차이 범위 내에 있다는 개념은 없음에 특히 주의하여야 한다.

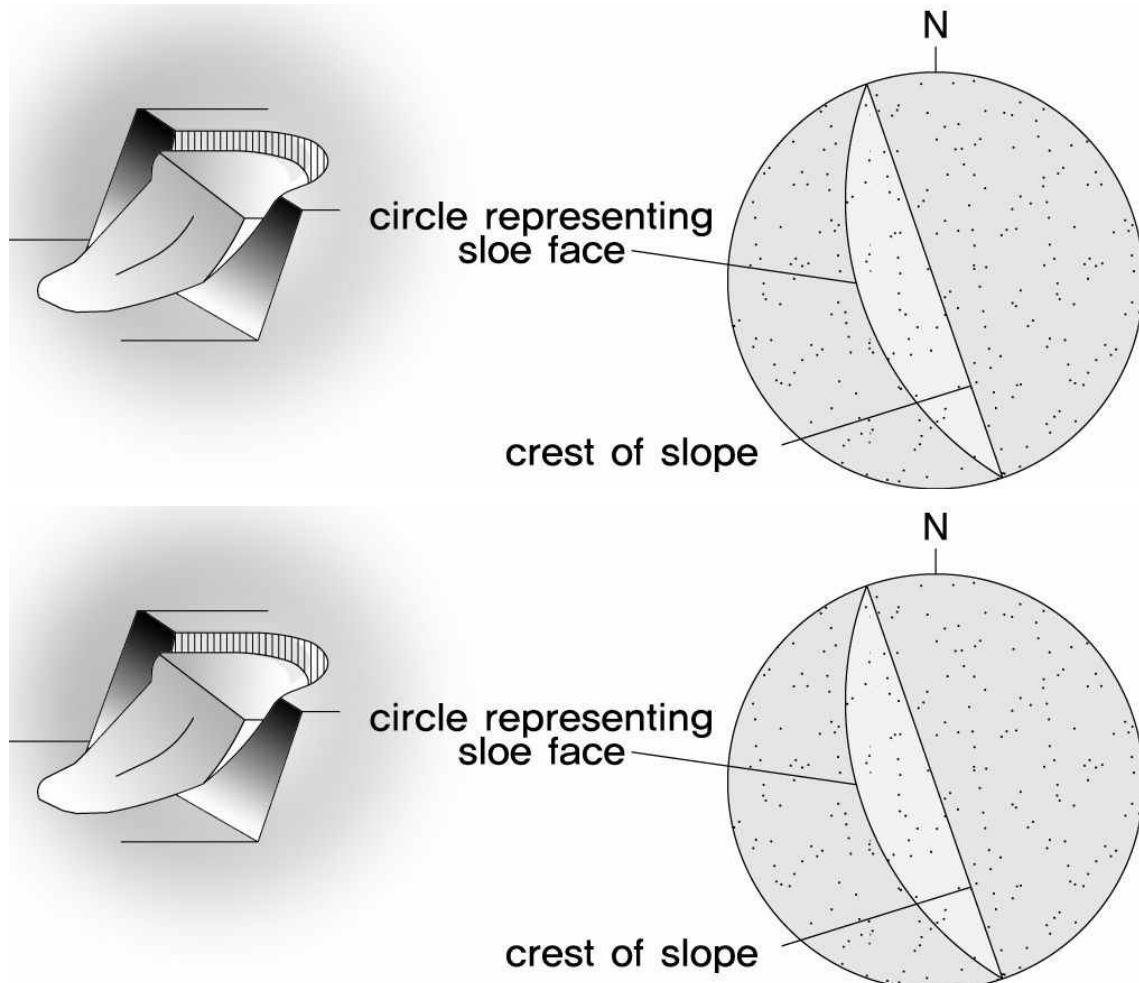
마찰 콘(friction cone)은 투영망(stereonet)의 원 중심으로부터 절리의 마찰각만큼 떨어져서 원을 그린다. 마찰 콘 바깥부분과 데이라이트 구역을 공유하는 지역을 불안정영역(unstable zone)으로 설정한다. 절취면의 대원은 WE쪽으로 돌려놓고 절리면 경사에서 절리면의 마찰각만큼을 뺀 각도에서 대원을 그린 후, 이 대원 바깥부분과 WE선의 $\pm 20^\circ$ 이내의 부분과의 공유지역을 "토플링 구역(toppling zone)"으로 설정한다.

평면파괴의 가능성을 알아보기 위해서는 절리의 경사가 $\phi < \alpha < \beta$ 인 절리를 조사한 후에 그 절리가 절취면의 주향과 $\pm 20^\circ$ 내외에 있는가를 확인한다. 쉼기파괴의 가능성을 알아보기 위해서는 두 절리가 만나는 선의 경사가 $\phi < \alpha < \beta$ 인가 확인하여야 하는데 이의 충분조건인 불안정영역에 찍힌 두 대원의 교차점을 찾아본다.

불안정영역에 절리면의 극점이나 두 절리면이 이루는 접선의 극점이 위치하면 각각 암괴가 평면이나 쉼기파괴가 일어날 가능성이 있는 것으로 판단하고 토플링 구역에 절리면의 극점이 위치하면 암괴가 전도파괴 가능성이 있는 것으로 판단하며 전도파괴 가능성이 있는 것으로 고려된다.

(2) 암반사면의 파괴형상

암반사면의 안정해석법으로 사용되는 평사투영법의 각 파괴형태에 대한 절리의 극점분포는 그림 3.10와 같다.



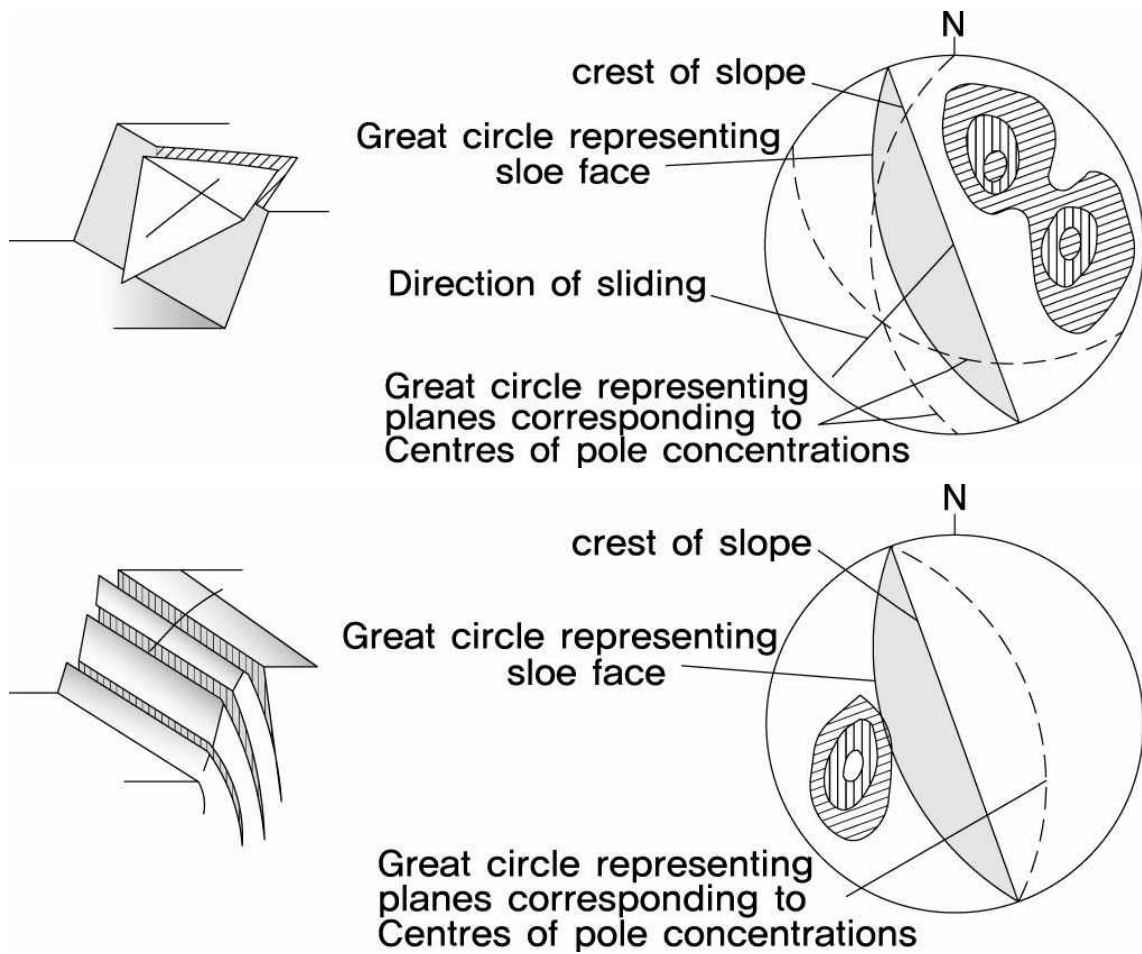


그림 3.10 Rock Failure Patterns Using Stereo Net

바. 실험결과 분석

(1) 절리조사 시스템을 이용한 절리 데이터의 결과

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

(2) 절리 방향 데이터의 신뢰도 분석

50개의 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). 표 3.5은 50개 절리의 경사/경사방향 측정결과를 비교한 것으로 50개 측정결과와 경사/경사방향에 대한 오차의 평균은 표 3.5에서 나타난 것과 같이 경사의 평균 오차는 $\pm 3.51^\circ$ 이고, 경사방향의 평균 오차는 $\pm 5.42^\circ$ 로 분석되었다. 50개의 자료에서 이 연구에서 설정한 허용 오차범위를 초과하는 데이터는 없는 것으로 분석되었다.

경사와 경사방향의 오차를 용이하게 확인하기 위해서 그림 3.11와 같이 그래프로 50개의 오차를 표현하였는데, 경사는 (+)값으로 표현하였으며, 경사방향은 (-)값으로 표현하였다. 경사의 오차 중 가장 큰 오차를 나타내는 절리는 30번 절리로 6.92° 의 오차를 가지며, 경사방향의 경우 27번 절리가 11.7° 의 오차를 가지는 것으로 분석되었다. 경사/경사방향의 허용오차범위와 2개의 측정방법에 의한 오차의 편차는 30번 절리의 경우 6.92° 이고, 27번의 경우 11.7° 의 편차를 가지므로 경사/경사방향의 최대오차에 대한 편차는 경사방향이다. 오차들의 평균 편차를 산정하면, 경사의 평균 편차는 3.51° 로 분석되었으며, 경사방향의 경우 5.42° 로 산정되었는데 이를 통하여 경사보다 경사방향의 편차가 더 큰 것을 알 수 있다. 전체 50개의 자료 중에서 경사와 경사방향 모두 허용오차 범위 안에 들었다.

(3) 오차 원인 분석

50개의 절리결과를 비교·분석하기 위해 오차가 큰 절리를 이용해 오차의 원인을 분석하였다. 클리노미터와 Arduino Measure System을 이용한 절리의 방향을 비교시 최대오차의 발생요인은 절리면의 측정방법의 차이로 판단된다. 클리노미터를 이용하여 절리의 방향을 측정하는 경우에는 절리의 면적이 큰 경우에 비하여 실내에서 절리면을 모형화하여 측정하였기 때문에 측정 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 실내 모형시험에서 절리면에 대한 모사를 실제 절리면의 크기에 근사하게 제작하여 측정 하거나 절리를 다수의 지점에서 측정하여 평균값을 산정하면 오차를 줄일 수 있다고 판단된다.

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

(4) 평사투영법에 의한 절리 방향 분석 결과

데이터 분석 프로그램을 통해서 모형 사면의 절리를 측정한 결과 총 50개의 절리가 측정되었으며, 절리의 방향에 따라서 다양한 절리가 모형 사면에 발달되어 있음을 알 수 있었다. 그림 3.12는 50개의 절리 데이터를 평사투영망에 투영시킨 결과이다. 스테레오네트 상에서 확인한 결과 절리군이 분명하게 구분되는 것을 알 수 있었다.

클리노미터로 측정한 경우가 Arduino Measure System으로 측정한 경우보다 Pole Plot result 및 Contour Plot result에서 분포범위가 더 조밀한 것으로 나타났으며 측정데이터 분포범위의 차이는 클리노미터로 측정하는 경우보다 Arduino Measure System으로 측정하는 경우 초음파센서, 지자기센서 및 고도센서의 영향으로 인해서 발생한 것으로 추정된다. Rosette Diagram result에서는 절리의 빈도가 클리노미터로 측정한 경우보다 Arduino Measure System으로 측정한 것이 낮게 나타났으며 측정데이터 빈도의 차이는 클리노미터를 이용한 경우보다 Arduino Measure System을 이용하는 경우에 데이터측정이 자동화로 인해서 발생한 것으로 추정된다.

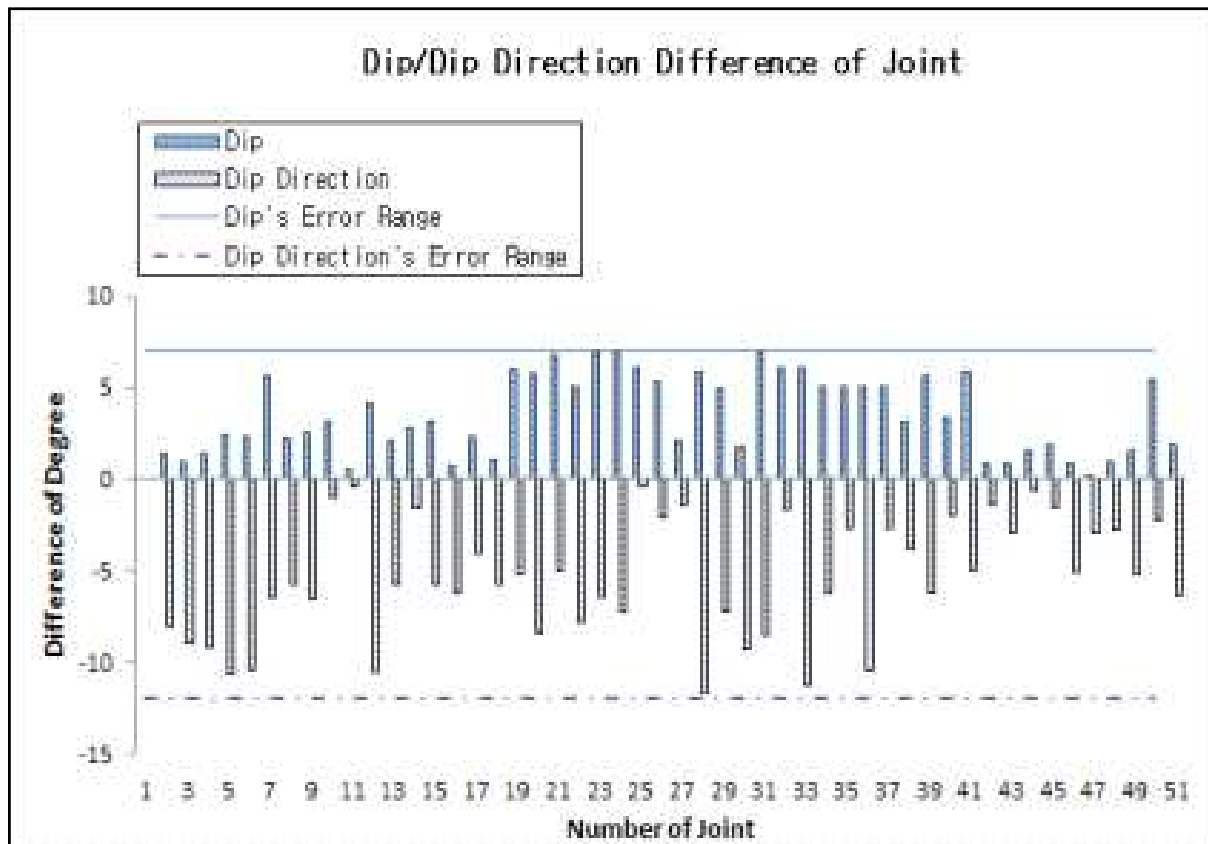
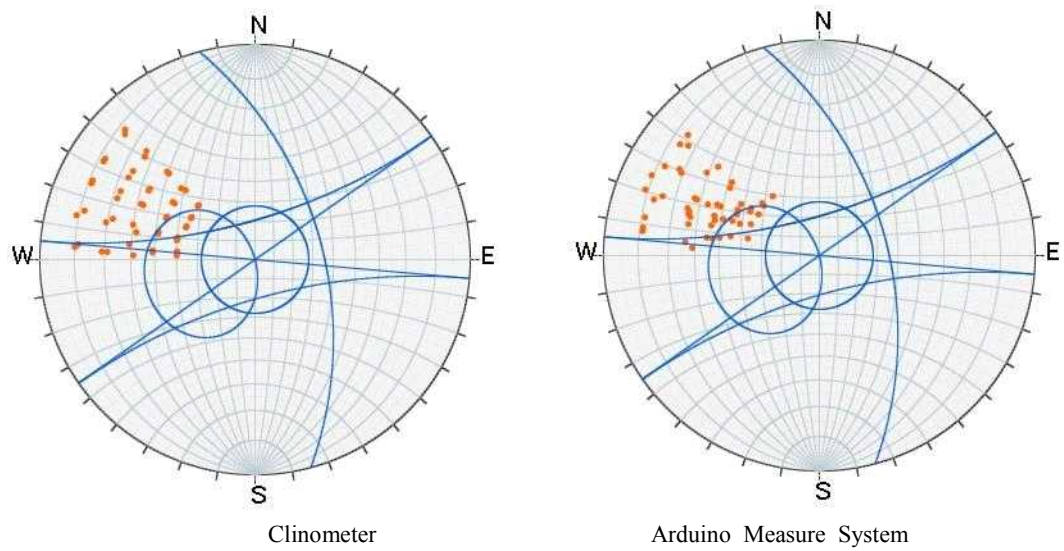
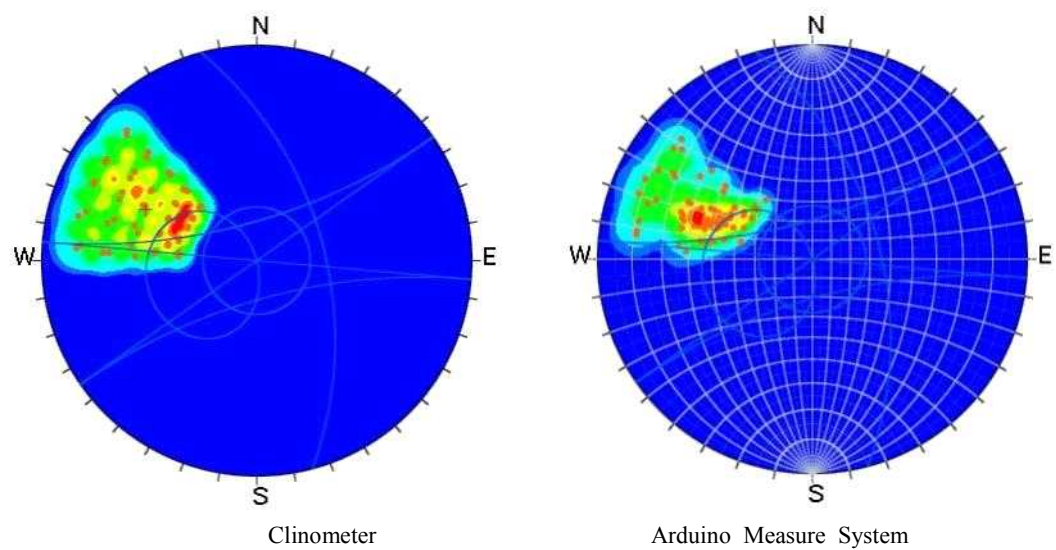


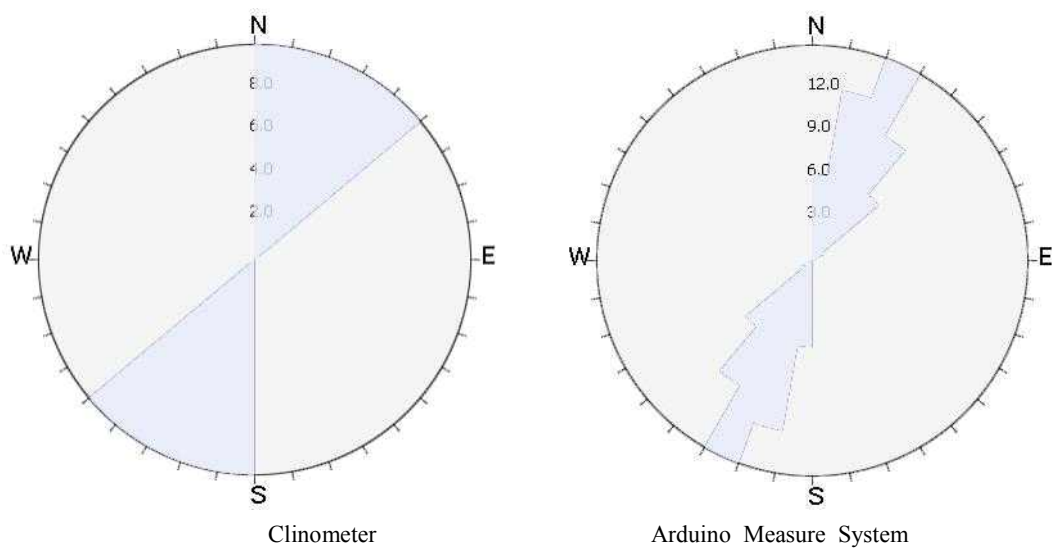
그림 3.11 Graph of total joint orientation error



(a) Pole Plot result



(b) Contour Plot result



(c) Rosette Diagram result

그림 3.12 Joint orientation using the stereographic projection method

사. 실험 데이터 및 결과

본 연구에서 기존 암반 절리 조사방법에 대한 한계점을 극복할 수 있는 개선된 조사법의 하나인 Arduino Measure System를 이용하여 절리의 방향성을 자동으로 측정하였으며, 직접 측정한 절리 방향 데이터 50개와의 비교를 통하여 Arduino Measure System를 활용한 절리 방향 측정의 신뢰성에 대한 실험을 수행하였다.

사물인터넷기반의 효과적인 현장 적용을 위해 본 연구를 통해 개발된 절리조사 시스템은 절리의 방향성에 대한 정량적 분석이 가능하며 하드웨어와 소프트웨어로 이루어진 통합 시스템이다. 상기의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

표 3.5에서 연구대상 모형을 클리노미터로 직접 측정한 50개의 절리 방향 데이터와 Arduino Measure System를 통해 측정된 절리 방향 측정결과를 비교·분석한 결과 경사는 $\pm 3^\circ$, 경사방향은 $\pm 5^\circ$ 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 절리방향을 측정하는 방법의 차이에 따라 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 오차를 최소화하기 위해서 직접 측정하는 경우에는 절리면적에 비례하여 다수의 지점을 조사하여 절리 방향의 평균을 산출하거나, 면적이 큰 판을 이용하여 측정하는 방법을 적용하면 절리 방향의 오차를 줄일 수 있다. Arduino Measure System를 이용하여 절리 방향을 측정하는 경우에는 절리면에서의 굴절의 영향, 자기장의 영향, 기압 및 온도 등의 영향을 최소화해야 자료의 신뢰도를 높일 수 있다.

Arduino Measure System를 이용한 절리 측정법은 기존 절리 조사법의 단점인 접근성의 제약을 해결할 수 있고, 조사자의 안전성을 확보하여 조사의 효율성을 향상시켰다. 마지막으로 Arduino Measure System를 통해 측정된 자료는 데이터로 보존되기 때문에 암반 사면 보강공사 후에도 조사된 자료로 체계적인 관리가 가능하고, 사면붕괴시 신속한 대안을 수립하는 자료로 활용할 수 있다. 이번 연구를 통해서 절리 방향 데이터에 대한 신뢰성을 높일 수 있었다.

본 연구의 결과는 절리의 방향성에 대한 특성조사의 기존이론을 활용하여 절리조사에 적용이 가능한 효율적인 하드웨어와 해석 소프트웨어를 개발하여 절리 측정 작업을 편리하게 하고, 절리구조에 대해 신뢰도가 높은 자료를 제공하며 향후 절리 암반의 안정해석에 필요한 입력 자료들을 제공하고 활용하는 데 기여할 수 있다고 본다.

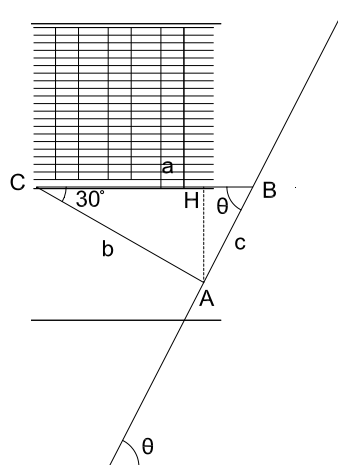
표 3.6 Comparison of each joint orientation(Clinometer and Arduino Measure System)
(Unit : degree,°)

No.	Clinometer		Arduino Measure System		Difference	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
1	40.00	134.00	38.54	142.00	1.46	8.00
2	39.00	123.00	38.07	131.99	0.93	8.99
3	39.00	115.00	37.61	124.22	1.39	9.22
4	41.00	104.00	38.54	114.70	2.46	10.70
5	40.00	93.00	37.61	103.50	2.39	10.50
6	40.00	96.00	45.62	102.41	5.62	6.41
7	41.00	106.00	43.23	111.80	2.23	5.80
8	39.00	116.00	41.57	122.62	2.57	6.62
9	39.00	124.00	42.11	124.99	3.11	0.99
10	40.00	133.00	39.51	132.61	0.49	0.39
11	51.00	134.00	46.89	123.42	4.11	10.58
12	49.00	125.00	46.89	119.25	2.11	5.75
13	49.00	115.00	46.25	116.57	2.75	1.57
14	50.00	106.00	46.89	111.80	3.11	5.80
15	51.00	94.00	50.31	100.20	0.69	6.20
16	51.00	95.00	53.33	99.09	2.33	4.09
17	50.00	105.00	51.04	110.81	1.04	5.81
18	49.00	116.00	54.93	110.81	5.93	5.19
19	50.00	125.00	55.75	116.57	5.75	8.43
20	49.00	135.00	55.75	130.03	6.75	4.97
21	60.00	135.00	54.93	127.23	5.07	7.77
22	61.00	123.00	54.12	116.57	6.88	6.43
23	61.00	116.00	54.12	108.78	6.88	7.22
24	61.00	106.00	54.93	105.64	6.07	0.36
25	61.00	97.00	55.75	99.09	5.25	2.09
26	59.00	92.00	61.05	93.43	2.05	1.43
27	59.00	103.00	64.92	114.70	5.92	11.70
28	60.00	116.00	64.92	108.78	4.92	7.22
29	61.00	124.00	59.22	114.70	1.78	9.30
30	59.00	135.00	65.92	126.50	6.92	8.50

2. 2차년도 연구수행 내용 및 성과

가. 절리조사 시스템의 이론적 배경

1차년도와 비교하여 암반사면의 경사각과 경사방향의 측정방법을 간소화 시켰으며 그 방법은 다음과 같다.



[illegible]

$$R_{xyz} = R_z(\Psi)R_y(\theta)R_x(\Phi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\Psi \sin\Phi \sin\theta \cos\Psi - \cos\Phi \sin\Psi \cos\Phi \sin\theta \cos\Psi + \sin\Phi \sin\Psi \\ \cos\theta \sin\Psi \sin\Phi \sin\theta \sin\Psi + \cos\Phi \cos\Psi \cos\Phi \sin\theta \sin\Psi - \sin\Phi \cos\Psi \\ -\sin\theta & \sin\Phi \cos\theta & \cos\Phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{식(14)}$$

$$R_x(\Phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi - \sin\Phi \\ 0 & \sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \quad \text{식(15)}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{식(16)}$$

$$R_z(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos\Psi - \sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{식(17)}$$

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

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad \text{식(18)}$$

θ 가 $(-\pi/2, \pi/2)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \\ \theta &= \text{asin}(-r_{31}) \\ \phi &= \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) \end{aligned} \quad \text{식(19)}$$

θ 가 $(\pi/2, 3\pi/2)$ 일 때는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \text{atan2}(-r_{21}, -r_{11}) \\ \theta &= \text{asin}(-r_{31}) \\ \phi &= \text{atan2}(-r_{32}, -r_{33}) \end{aligned} \quad \text{식(20)}$$

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

$$\begin{aligned} r_{23} - r_{12} &= (\sin\theta + 1)\sin(\psi - \phi) \\ r_{13} + r_{22} &= (\sin\theta + 1)\cos(\psi - \phi) \\ r_{23} + r_{12} &= (\sin\theta - 1)\sin(\psi + \phi) \\ r_{13} - r_{22} &= (\sin\theta - 1)\cos(\psi + \phi) \end{aligned} \quad \text{식(21)}$$

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

나. 절리조사 시스템의 하드웨어와 소프트웨어

Arduino Uno, Sensor modules, Xbee module로 구성되어 있던 1차년도에 Blynk 시스템을 추가시켰으며 그림 3.15은 추가된 Blynk 시스템의 구성도를 나타낸다.

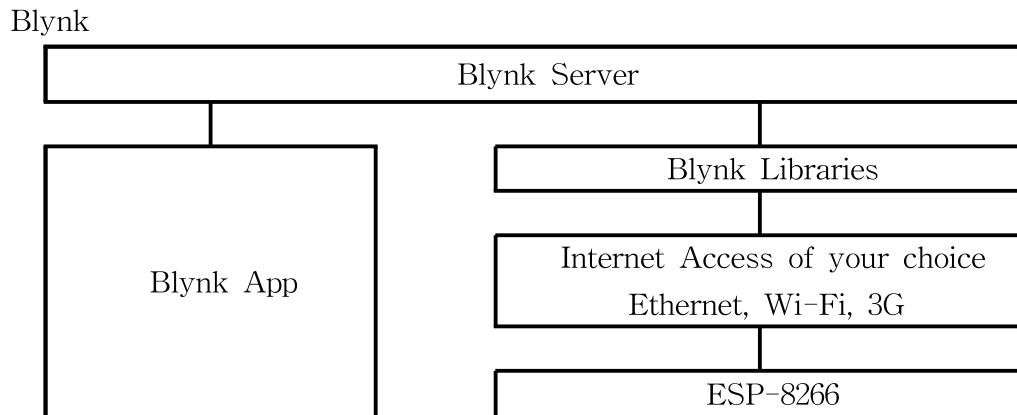


그림 3.15 Blynk

(1) 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. 표 3.7은 SG-90에 대한 기술적 사양을 나타내고 있다.

표 3.7 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



그림 3.16 SG-90

(2) 드론

DJI사의 MAVIC PRO 제품으로, 최대 7km의 송신 범위(FCC 기준, 장애물과 간섭이 없을 시)와 FHD 1080p 근거리 및 HD 720p 단거리 영상 스트리밍을 지원하는 DJI의 새로운 송신 기술인 OcuSync를 탑재했으며 FlightAutonomy 기술로 최대 15m 앞에 있는 장애물까지 모두 감지한다.

전방과 하향 비전 센서의 도움을 받아, 실내 환경이나 위성이 잡히지 않는 환경에서도 정확하게 호버링하며, 고르지 못한 지형에서도 MAVIC PRO는 지면 위 일정한 고도를 유지하며 비행한다.

표 3.8 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



그림 3.17 MAVIC PRO

(3) ESP8266

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

또한, UART 통신 라인도 3.3V로 동작하므로 아두이노 5V 동작전압의 보드들과 연동하려면 level converter 모듈을 이용하거나 저항을 이용해서 전압 분배 회로를 구성해줘야 한다.

ESP8266 프로세서는 Flash 메모리를 가변적으로 붙일 수 있으며, 판매되는 ESP-xx 모듈마다 플래시 메모리 용량에 차이가 있다.

GPIO(General Purpose Input Output)는 아두이노의 핀처럼 ESP8266 모듈이 제어할 수 있는 핀이며, ESP-xx 모듈마다 사용할 수 있는 핀 수와 위치가 다르다.

표 3.9 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

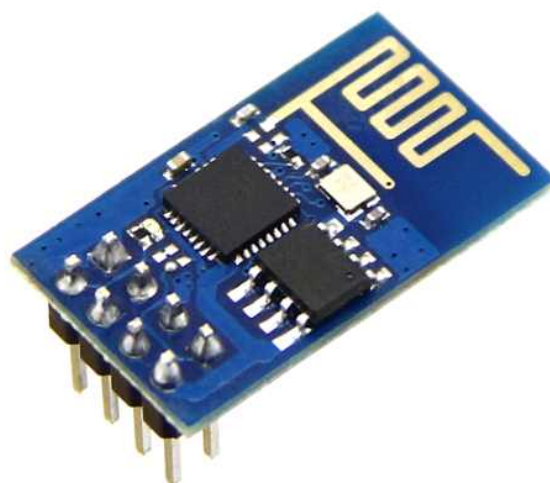


그림 3.18 ESP8266

(4) Blynk

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

Blynk는 별도의 PC가 필요없으며 인터넷접근 가능한 다양한 하드웨어와 앱을 서로 연결 해주며 서버는 스마트폰과 하드웨어간 통신을 담당해 클라우드 플랫폼으로 동작된다.

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

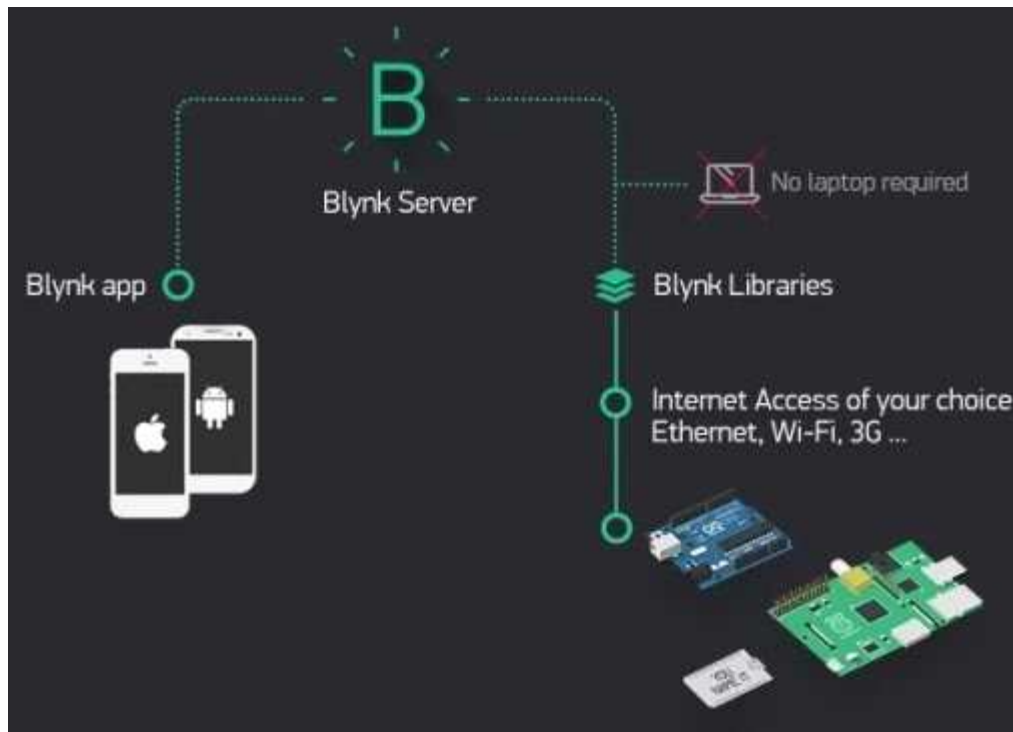
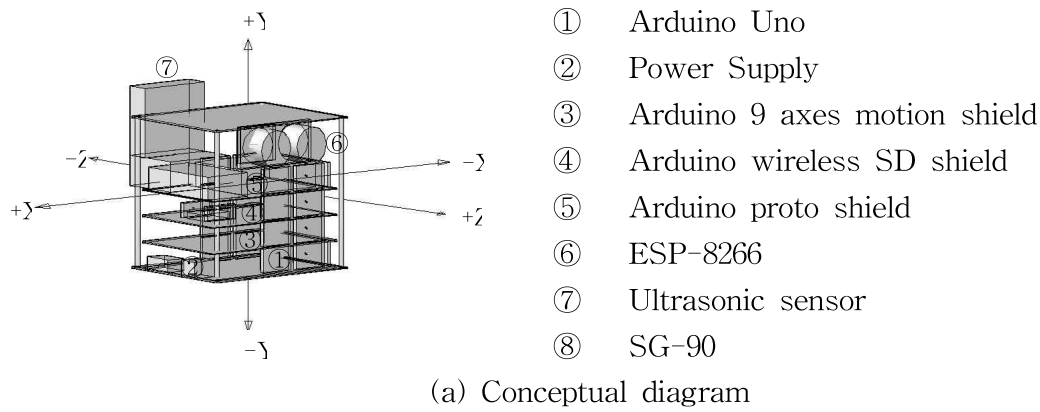


그림 3.19 Blynk

다. 실험실 모형을 이용한 적용성 평가

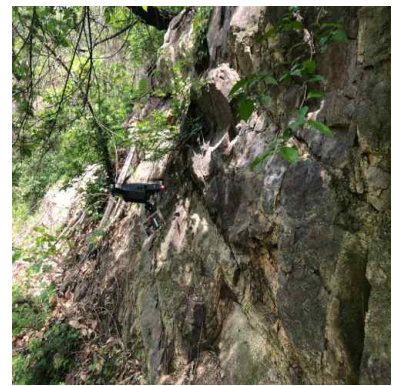
이 연구에 적용된 절리조사 시스템을 실내모형과 현장에 대해서 적용성을 평가하였다. 그림 3.20은 절리조사 시스템의 하드웨어 구성도와 하드웨어를 장착한 드론, 절리면 모형, 실험 사진이다. 각 절리면에는 표적을 미리 표시하여, 이를 통해 해당점의 좌표를 읽을 수 있다. 각 절리면에 대해서 경사각을 50°부터 10°씩 증가시켜 80°까지 측정하였으며 경사방향에 대해서는 0°부터 10°씩 증가시켜 90°까지 측정하였다. 경사각이 40°인 경우에 경사방향은 0°부터 90°까지 측정하는 방법으로 경사각이 80°가 되는 경우까지 조사하였다. 실내모형 시험에서는 클리노미터를 이용한 측정결과와 절리조사 시스템을 통한 결과, 모바일 어플리케이션을 비교 검토 하였다. 그림 3.21은 클리노미터와 모바일 어플리케이션의 실험사진이다.



(b) Photography

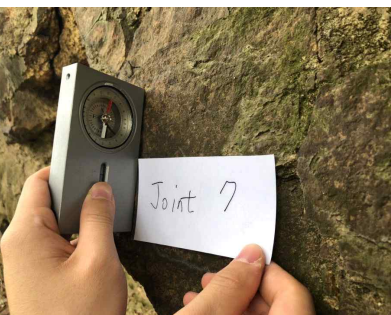


(c) Joint orientation model

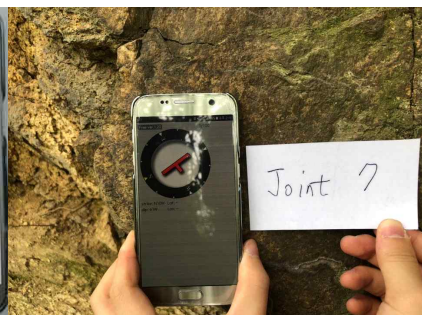


(d) Test photography

그림 3.20 Joint orientation test apparatus



(a) Clinometer



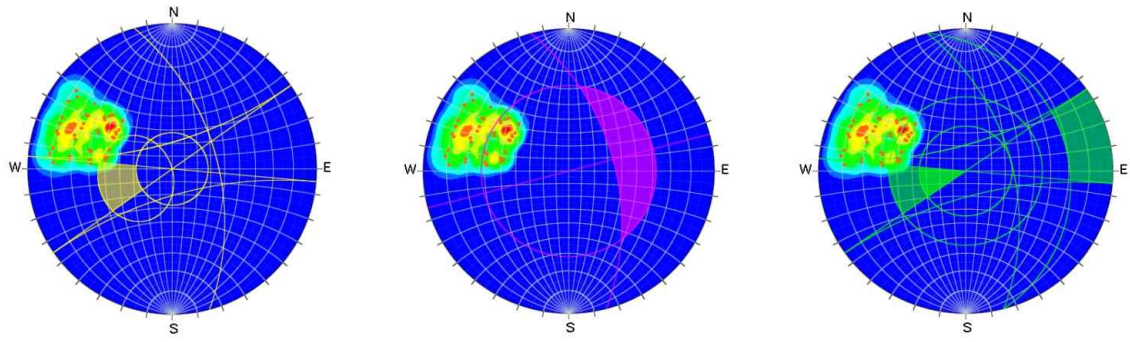
(b) Mobile application

그림 3.21 Clinometer and Mobile application

라. 2차년도의 절리방향 데이터

표 3.10 Comparison of each joint orientation(Clinometer and Drone Measure System)
(Unit : degree,°)

No.	Clinometer (a)		Arduino Measure System (b)		Mobile application (c)		Difference (a:b)		Difference (b:c)	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
1	51	134.00	48.11	128.61	50	131.00	2.89	5.39	1.89	2.39
2	49	118.00	45.34	123.56	49	120.00	3.66	5.56	3.66	3.56
3	50	123.00	47.26	115.65	51	121.00	2.74	7.35	3.74	5.35
4	49	107.00	52.48	101.66	51	108.00	3.48	5.34	1.48	6.34
5	49	100.00	53.54	107.31	50	102.00	4.54	7.31	3.54	5.31
6	51	101.00	48.65	94.42	50	99.00	2.35	6.58	1.35	4.58
7	50	98.00	46.12	105.09	49	100.00	3.88	7.09	2.88	5.09
8	50	118.00	47.33	114.56	49	117.00	2.67	3.44	1.67	2.44
9	49	122.00	46.26	117.13	50	120.00	2.74	4.87	3.74	2.87
10	49	126.00	53.89	131.65	50	125.00	4.89	5.65	3.89	6.65
11	58	132.00	54.46	128.35	59	130.00	3.54	3.65	4.54	1.65
12	60	117.00	57.65	121.06	60	119.00	2.35	4.06	2.35	2.06
13	59	116.00	63.79	110.71	60	116.00	4.79	5.29	3.79	5.29
14	60	96.00	57.46	102.49	61	98.00	2.54	6.49	3.54	4.49
15	59	94.00	53.12	100.74	61	95.00	5.88	6.74	7.88	5.74
16	61	103.00	63.42	98.85	59	101.00	2.42	4.15	4.42	2.15
17	60	102.00	56.21	97.56	60	103.00	3.79	4.44	3.79	5.44
18	60	126.00	57.68	121.98	60	123.00	2.32	4.02	2.32	1.02
19	61	127.00	64.31	132.67	58	129.00	3.31	5.67	6.31	3.67
20	59	130.00	63.36	125.64	60	130.00	4.36	4.36	3.36	4.36
21	70	122.00	65.34	126.11	71	123.00	4.66	4.11	5.66	3.11
22	71	109.00	65.88	115.87	70	110.00	5.12	6.87	4.12	5.87
23	70	107.00	66.13	102.64	69	108.00	3.87	4.36	2.87	5.36
24	69	114.00	75.99	119.11	68	112.00	6.99	5.11	7.99	7.11
25	71	97.00	75.89	102.35	70	98.00	4.89	5.35	5.89	4.35
26	71	95.00	66.23	99.65	70	96.00	4.77	4.65	3.77	3.65
27	71	109.00	67.94	113.17	71	109.00	3.06	4.17	3.06	4.17
28	69	117.00	74.10	112.34	69	118.00	5.10	4.66	5.1	5.66
29	70	130.00	74.54	125.61	70	129.00	4.54	4.39	4.54	3.39
30	69	122.00	71.64	126.74	68	120.00	2.64	4.74	3.64	6.74
31	79	127.00	81.98	131.45	79	129.00	2.98	4.45	2.98	2.45
32	81	129.00	78.25	124.99	80	128.00	2.75	4.01	1.75	3.01
33	80	112.00	82.33	109.35	80	110.00	2.33	2.65	2.33	0.65
34	80	100.00	84.09	104.32	81	100.00	4.09	4.32	3.09	4.32
35	81	97.00	79.02	100.11	81	98.00	1.98	3.11	1.98	2.11
36	79	93.00	83.29	97.36	79	95.00	4.29	4.36	4.29	2.36
37	79	107.00	76.33	101.64	78	110.00	2.67	5.36	1.67	8.36
38	80	108.00	84.99	111.28	80	106.00	4.99	3.28	4.99	5.28
39	81	123.00	76.87	120.36	80	120.00	4.13	2.64	3.13	0.36
40	80	115.00	83.07	117.84	81	117.00	3.07	2.84	2.07	0.84
Average Error							3.70	4.82	3.63	3.99

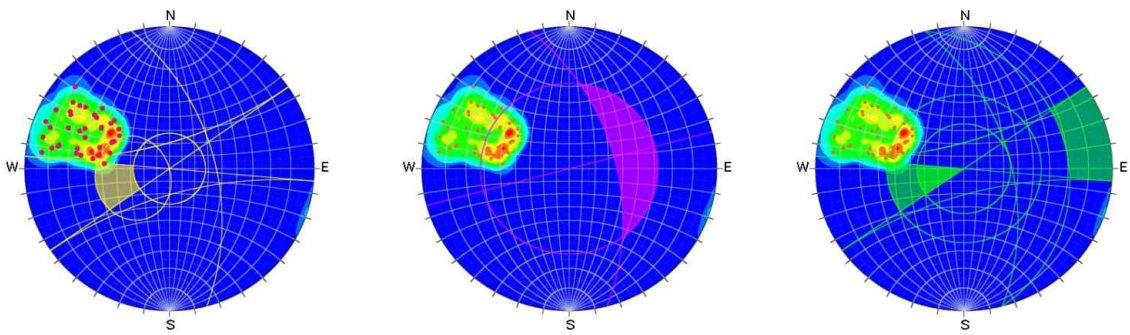


plane failure

wedge failure

toppling failure

(a) Clinometer result

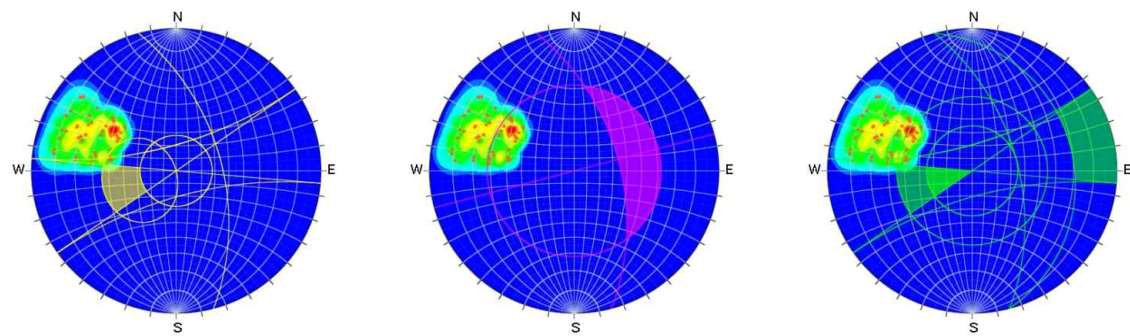


plane failure

wedge failure

toppling failure

(b) Drone Measurement System result



plane failure

wedge failure

toppling failure

(c) Mobile application result

그림 3.22 Joint orientation using the stereographic projection method

마. 결론

1차년도 연구에서 기존 암반 절리 조사방법에 대한 한계점을 극복할 수 있는 개선된 조사법의 하나인 Arduino Measure System를 이용하여 절리의 방향성을 자동으로 측정하였으며, 직접 측정한 절리 방향 데이터 50개와의 비교를 통하여 Arduino Measure System를 활용한 절리 방향 측정의 신뢰성에 대한 실험을 수행하였고, 2차년도 연구에서는 오차를 최소화 시키는 방법으로 서보모터를 활용하여 Drone Measure System를 활용한 절리 방향 측정의 신뢰성에 대한 실험을 수행하였다.

사물인터넷기반의 효과적인 현장 적용을 위해 본 연구를 통해 개발된 절리조사 시스템은 절리의 방향성에 대한 정량적 분석이 가능하며 하드웨어와 소프트웨어로 이루어진 통합 시스템이다. 상기의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1차년도에서는 연구대상 모형을 클리노미터로 직접 측정한 50개의 절리 방향 데이터와 Arduino Measure System를 통해 측정된 절리 방향 측정결과를 비교·분석한 결과 경사는 $\pm 3^\circ$, 경사방향은 $\pm 5^\circ$ 내외의 편차가 발생하였고, 2차년도에서는 연구대상 모형을 클리노미터로 직접 측정한 40개의 절리 방향 데이터와 Drone Measure System를 통해 측정된 절리 방향 측정결과 모바일 어플리케이션을 비교·분석한 결과 경사는 $\pm 3^\circ$, 경사방향은 $\pm 3^\circ$ 내외의 편차가 발생하였다.

본 연구에서 정한 경사/경사방향의 허용오차범위인 $\pm 7^\circ$, $\pm 12^\circ$ 내에 있으므로 본 연구 결과는 신뢰할 수 있는 자료로 판단되므로 절리 측정 작업을 편리하게 하고, 절리구조에 대해 신뢰도가 높은 자료를 제공하며 향후 절리 암반의 안정해석에 필요한 입력 자료들을 제공하고 활용하는 데 기여할 수 있다고 본다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 2년에 걸쳐 연구개발 성과목표를 달성하였으며 다음 표 4.1과 같다.

나. 드론에 클리노미터를 장착하여 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정할수 있는 시제품을 제작함.

다. 개발된 시제품에 대해 실내실험 및 현장검증을 통하여 암반사면의 측정시스템을 개발함.

라. 연구개발성과 및 평가 방법

(1) 성과 목표

[1차년도 성과지표]

성과지표	성과 목표	성과목표 달성건수
SCI(E)급 학술지 게재(2점)		
일반학술지 게재(1점)	1건	1건
특허출원(1점)	1건	1건
특허등록(2점)		
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)		1건
하드웨어(1점)		
기타(1점)		
소계(점수)	2점	3점

[2차년도 성과지표]

성과지표	성과 목표	성과목표 달성건수
SCI(E)급 학술지 게재(2점)		
일반학술지 게재(1점)	1건	1건
특허출원(1점)		1건
특허등록(2점)	1건	
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)		1건
하드웨어(1점)		
기타(1점)		
소계(점수)	3점	3점

(2) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	암반사면조사 측정용 시제품제작	드론에 클리노미터를 장착하여 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정할 수 있는 시제품을 제작함. 시제품을 제작하기 위해서 연결상세를 구체화 할 수 있는 연결상세도면을 작성한다.	4	(주)구주엔지니어링	1	4
2	암반사면조사 측정시스템 개발	개발된 시제품에 대해 실험 및 검증을 통하여 암반사면의 측정시스템을 개발함.	4	(주)구주엔지니어링	1	4

(3) 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	클리노미터를 장착한 암반사면조사 측정용 시제품 제작	
정의	암반사면조사 측정용으로 클리노미터를 장착한 드론의 시제품을 제작함.	
목적	암반사면의 조사시 접근제한성을 해소하고 조사경비를 절감하며 다수의 데이터를 확보하여 유지관리의 효율화와 데이터의 전산화를 가능하게 하고 조사인력의 안전성을 확보한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 조사인력이 직접 암반사면에 근접하여 접근하여 제한된 개소의 암반사면의 경사방향 및 경사각의 측정결과를 얻는 수준이다. (개발기술 수준) 조사인력이 드론을 이용하여 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하므로써 접근성 향상, 다수의 데이터 확보, 유지관리 효율화 및 안전성을 확보하고 경비를 절감하며 신뢰도가 높은 조사결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	이현철(주식회사 구주엔지니어링)	
소요기간	'16.06 ~ '17.06(1년0개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	암반사면경사의 실내실험에서 오차범위 3도를 충족하는지 유무를 확인하여 성과달성의 여부를 결정한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	학술지 : 1건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2	클리노미터를 장착한 암반사면조사 측정용 드론 시스템의 개발	
정의	암반사면조사 측정용으로 클리노미터를 장착한 드론을 개발하여 실제현장의 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정한다.	
목적	암반사면의 조사시 접근제한성을 해소하고 조사경비를 절감하며 다수의 데이터를 확보하여 유지관리의 효율화와 데이터의 전산화를 가능하게 하고 조사인력의 안전성을 확보한다.	
성능목표	(기존기술 수준) 조사인력이 직접 암반사면에 근접하여 접근하여 제한된 개소의 암반사면의 경사방향 및 경사각의 측정결과를 얻는 수준이다. (개발기술 수준) 조사인력이 드론을 이용하여 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하므로써 접근성 향상, 다수의 데이터 확보, 유지관리 효율화 및 안전성을 확보하고 경비를 절감하며 신뢰도가 높은 조사결과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.	
성과달성 책임자 (소속기관)	이현철(주식회사 구주엔지니어링)	
소요기간	'17.06 ~ '18.06(1년0개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	암반사면경사의 실제 현장에서의 오차범위 3도를 충족하는지 유무를 확인하여 성과달성의 여부를 결정한다.	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	학술지 : 1건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건

2. 관련 분야 기여도

가. 암반사면의 안정해석을 위해서 암반사면의 경사방향 및 경사각이 필요한 데 기존의 방법으로는 암반사면의 전체면적에 대한 측정이 제한되었으나 드론을 이용하면 암반사면의 전체면적에 대한 조사가 가능하게 되어 기존보다 암반사면의 안정해석결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있게 되며 조사자가 암반사면에 직접 접근하지 않아도 되므로 안전사고를 예방하는 효과를 얻게 된다.

나. 기존의 방법으로는 암반사면의 경사방향 및 경사각을 측정하기 위해서 많은 인원이 오랜 시간을 소요하고 암반사면의 전체면적중 접근이 가능한 조사면적에 대해서만 측정되었으나 드론을 이용하면 현장측정 작업시간을 단축할 수 있으며, 많은 조사자료를 추출할 수 있어 경제적이며 안전한 방법으로 평가된다.

다. 드론을 이용하여 절리방향성을 측정하는 시스템을 개발하는 기술로서 연구기간은 2년이며 1차년도에는 시작품을 제작하고 2차년도에는 시작품을 실험 및 검증하여 암반사면의 유지관리관련자료를 용이하게 확보할 수 있으며 암반사면의 안정해석을 효과적으로 파악 및 운영할 수 있다.

라. 기대효과

드론을 이용하여 조사시 기존 절리 조사법의 단점인 지형적 제약의 문제점을 해결할 수 있으며, 조사자의 안전성을 확보하여 조사의 효율성을 극대화할 수 있다고 판단된다. 또한 측정된 자료는 컴퓨터 파일로 남아있기 때문에 사면보강공사 후에도 조사된 자료로 체계적인 사면관리가 가능하고, 사면 붕괴가 발생하였을 때 신속하고 정확한 대안을 강구하는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

경제성	정밀성	신속성
- 드론을 이용하여 인건비를 낮춘은 물론이고 안전사고에 위험성을 대폭 낮춤 - ICT R&D 투자로드맵의 한분야인 드론분야를 활용하였기에 파급효과가 큼	- 기존의 관련 기술의 정밀도와 견주어도 손색없는 기술 개발 - 인력으로는 측정이 불가능한 지역까지 산정 가능	- 누구나 손쉽게 측정을 가능하게 하여 상시에 사면의 신속한 대처가 가능 - 3D 모델링도 가능함에 따라 보다 빠른 사면의 안정성을 확보 가능

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 개발기술의 활용방안

가. 사면의 유지관리를 실시하고 있는 관리주체에 대해 개발기술에 대한 홍보를 통하여 기술의 활용도를 높임.

나. 사면의 조사를 실시하는 기관에 대해서 개발된 측정시스템을 활용하도록 권장하여 개발시스템의 현장적용성을 향상시킴.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

(해당사항 없음)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

표 7.1 보안등급의 분류 및 결정사유

보안등급	보안	일반
		○
결정사유	국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제24조의5(분류 절차)에 따라 검토한 결과 일반으로 분류	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
----------	----------------	-------------	----	--------	---------------	---------------	---------------	-----------------

○ 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 해당사항 없음

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명 /기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허출원	드론을 이용한 암반사면 안정성 평가를 위한 절리특성 측정방법	주식회사 구주엔 지니어링	주저자	대한민국		2016.12.15.		
2	논문	아두이노기반 암반사면의 절리방향측정 시스템개발	주식회사 구주엔 지니어링	주저자	한국방재학회	-	2017.06.02	단독	
3	프로그램 등록	암반사면 절리방향 측정프로그램	주식회사 구주엔 지니어링	주저자	대한민국		2017.03.10		
4	논문	무인항공기를 이용한 절리사면의 안정성평가 계측장비 개발	주식회사 구주엔 지니어링	주저자	한국암반공학회		2018.03.28	단독	
5	특허출원	드론을 이용한 암반사면 안정성 평가 측정장비	주식회사 구주엔 지니어링	주저자	대한민국		2018.04.13		

제11장. 기타 사항

○ 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

1. 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.
 2. Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, pp. 24-62.
 - 3 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.
 4. Moffitt, F. H. and E. M. Mikhail, 3rd Eds, 1980, Photogrammetry, Happer & Row Publisher, 648p.
 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. 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.
 7. Wyllie, Duncan C. and Mah Christopher W., 2004, Rock Slope Engineering civil and mining 4th edition, Spon Press Inc.
 8. Finlay, C.C., Maus, S., Beggan, C.D., Bondar, T.N., Chambodut, A., Chernova, T.A., Chulliat, A., Golovkov, V.P., Hamilton, B., Hamoudi, M., Holme, R., Hulot, G., Kuang, W., Langlais, B., Lesur, V., Lowes, F.J., Luhr, H., Macmillan, S., Mandea, M., McLean, S., Manoj, C., Menvielle, M., Michaelis, I., Olsen, N., Rauberg, J., Rother, M., Sabaka, T.J., Tangborn, A., Tøffner-Clausen, L., Thebault, E., Thomson, A.W.T., Wardinski, I., Wei, Z., Zvereva, T.I., 2010. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. Geophysical Journal International, 183 (3), pp. 1216-1230.
 9. Lee, S. H., 2016, Development of mobile software for field survey of geological structures, Seoul National University, pp. 29-34.
 10. Simon M., 2011, Programming Arduino Getting Started with Sketches, McGraw-Hill.
 11. 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
 12. 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.
 13. XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules Datasheet (PDF). Digi International Inc. 2010. pp. 10.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.