

열적외선 기기와 3차원 레이저 스캐너를 이용한 암석 표면의 풍화강도 분석 Analysis The Intensity of Weathering of The Rock Surface Using 3D Terrestrial Laser Scanner and Thermal Infrared Instrument

이수곤¹⁾, Soo-Gon Lee, 조향교²⁾, Hang-Kyo Cho, 쉬징³⁾, Jing Xu

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

²⁾ 동아특수건설 대리, Assistant Manager, Dong-A Special Construction Company(심석래)

³⁾ 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

SYNOPSIS : This paper is used in a recent civil engineering field in three-dimensional laser-meter tiles using thermal imaging cameras for the weathered rock slopes precisely measured indirectly, to the degree that began in the will.

In the field is difficult to access the degree of weathering of the rock slope to the existing direct way to compensate for the shortcomings of 3D Terrestrial Laser Scanner and weathering characteristics of rocks using thermal imaging cameras to get the information to analyze the degree of rock weathering is. Intensity of 3D TLS and the thermal camera with image analysis to analyze the degree of weathering of bedrock in the field of core drilling targeting indoor laboratory tests were analyzed through the study. Granite, gneiss, sandstone, much of the cancerous samples, each experiment has a 40 per category, each of which 30 were used to analyze the data collected. That degree of rock weathering, the rock, depending on the strength of the Intensity values can change, depending on the level of thermal imaging camera, also weathered the changes in temperature could see. Intensity is the strength of weak rocks, the more value decrease, the temperature of the thermal imaging camera through the swell Intensity and notice that the temperature had an inverse relationship. Intensity value of the low strength of weak rock, but the value came out of the rocks have been proved to be largely dependent on the contrast. The contrast of the surface rocks are weathered dark Intensity values lower temperature to swell the contrary, the degree of weathering can be distinguished.

Keywords : 3D laser scanners, Thermal Cameras, Equotip, Schmidt Hammer, Elastic Wave, weathering of rocks

1. 서 론

한반도의 약 70%가 산악지역으로 구성 되어 국가 발전 및 산업 발전에 있어서 매우 중요한 역할을 수행하는 기존의 도로, 철도, 터널과 수많은 암반사면이 존재한다. 이런 암반사면에서의 낙석, 붕괴, 산사태 등은 지질 재해 중의 하나로서 매년 심각한 피해를 유발하고 있다. 이는 암반 및 절취 사면의 풍화로 인하여 더욱더 증가하고 있는 실정이다. 국내의 사면붕괴는 대부분 해빙기나 우기시 발생되고 있으며 다양한 방재대책에도 불구하고 다수의 대규모 붕괴사례가 보고되고 있다. 이러한 사면의 붕괴가 발생된 후 추가적인 붕괴를 막거나 붕괴된 사면의 안정화를 위한 공법을 결정하는 사후처리에 집중되고 있으며, 가장 근원적인 붕괴의 원인을 규명하거나, 기록하는 문제에 있어서는 상대적으로 소홀하였다. 그럼으로 암반사면에 대한 안전도를 효율적이고 체계적인 평가 방법 개발과 시스템 구축이 요구 된다. 지상

레이저 스캔 측정은 암석의 정성분석을 통해 풍화정도를 알 수 있으며, 암석 표면에 대한 Intensity 값을 통해 암석의 상태를 정성적으로 분석 하여 풍화정도를 가늠 할 수 있다. 또한 열화상 이미지를 통해 암석의 풍화정도를 비교할 수 있는 기준이 된다. 암석의 풍화정도에 따른 온도차를 측정하여 암반의 약한 부분에 위험 가능성을 찾을 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 적외선 열화상 카메라

2.1.1 적외선 열화상 측정 원리

적외선 열화상의 측정원리는 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장이 적색으로, 낮은 곳은 단파장이 청색으로 나타난 이미지이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정 할 수 있다. 물체에 입사한 복사에너지는 흡수(Absorptivity, λA), 반사(Reflectivity, λR), 투과(Transmissivity, λT)의 3가지 형태로 나타난다.(그림 2.1 참조)

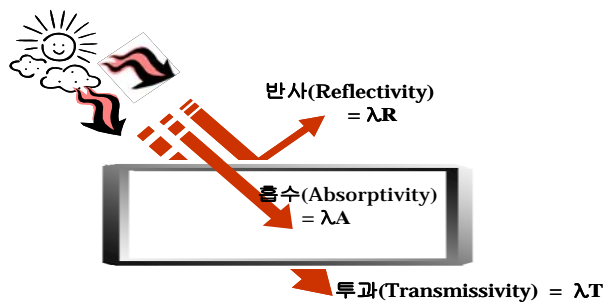


그림 2.1 방사율(Emissivity)

열화상 장치는 피사체로부터 방사하는 적외선 에너지만을 측정하는 것이 아니라 피사체 주변으로부터 반사된 에너지와 대기로부터의 적외선 에너지도 함께 측정된다. 대상체의 재질에 대한 방사율의 선정에 따라 온도 값이 달라질 뿐만 아니라 시험 환경에 미치는 요소인 카메라의 민감도 및 주변 환경 또한 주요한 요소임을 알 수 있다. 따라서 현장 측정 시에는 이러한 항들을 고려하여 방사율(ϵ), 주변의 온도($^{\circ}C$) 등을 정확히 입력하여야 정확한 온도를 측정하여 진단을 바르게 할 수 있다.

2.1.2 사용 장비의 사양

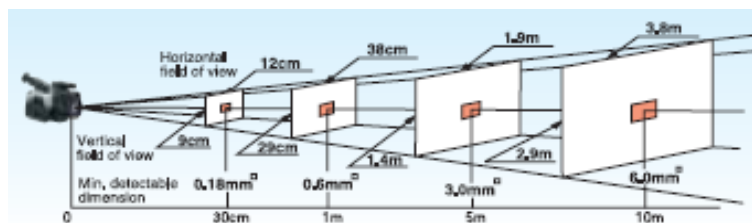


그림 2.2 열적외선 장비의 순시 시야각

표 2.1 열적외선 장비 사양서

| | | |
|--------|------------------------------|----------|
| 모델 | Thermal Camera H2640 | |
| 측정범위 | 범위 1 | -20~120℃ |
| 정확도 | ±2℃ 또는±2% 측정 범위 | |
| 측정 파장 | 8~14μm | |
| 초점 범위 | 30cm ~ ∞ | |
| 측정 시야각 | 21.7°(수평) × 16.4°(수직) | |
| 방사율 보정 | 0.1~1.0(0.01단계 조정), 방사율 테이블 | |
| 치수 | 약 110(W) × 110(H) × 210(D)mm | |
| 무게 | 약1.7Kg(LCD & 배터리포함) | |
| 시야각 | 30.1°(H) × 22.7°(V) | |



2.2 3D Terrestrial Laser Scanner

2.2.1 3D TLS(Terrestrial Laser Scanner) 원리

3D TLS 의 측정 원리는 측정대상에 대해 레이저 빔을 방출하여 되돌아오는 beam의 왕복시간 또는 위상차를 계산하여 X, Y, Z 의 3차원 좌표성분의 데이터 덩어리(Point Clouds)로 저장을 하는 장치이다. 무타겟 비접촉방식의 레이저 측정방식으로 대상물을 간접 측정하는데, 접촉식 측량장비에 비하여 우연 오차나 누락되는 현장 데이터를 최소화 할 수 있으며, 신속한 데이터 취득이 장점으로 실시간 자료 제출요구 등에 신속하게 대응할 수 있어 접촉식 측량에 따른 단점을 극복할 수 있는 장비로 인정되고 있다.

표 2.2 3D TLS의 측정 방법 종류

| | |
|----------------------|---|
| TOF Method | 송신된 레이저가 물체에 반사되어 돌아오는 왕복시간을 관측하는 방법으로 거리를 결정 |
| Phase based Method | 송신된 레이저 빔과 물체에 반사되어 돌아오는 변화된 연속 레이저 빔 파동과의 사이를 측정 거리를 결정 |
| Triangulation Method | 광원과 반사된 빛을 카메라 또는 센서를 통하여 수집, 광원과 센서와의 이격거리를 Base Line으로 하는 삼각측량법에 의해 거리를 계산함 |

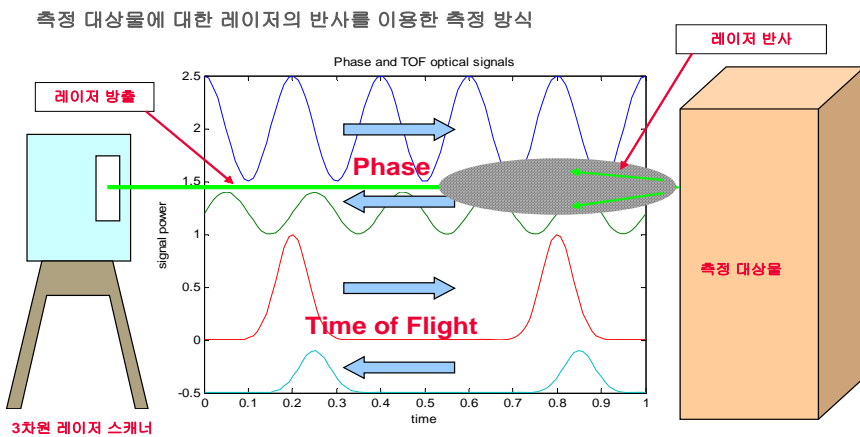


그림 2.3 3D TLS의 Time-of-Flight와 Phase-based 측정 원리

2.2.2 3D TLS(Terrestrial Laser Scanner) 의 자원

3D TLS는 as-built, engineering, 기초공학, 건축 조사 등에 사용되고 있으며, IntelliSum, Leica Geosystems, Optech, Trimble 등의 회사가 연구, 생산 하고 있다. 본 연구에서는 Hexagon Group의 Leica Geosystems의 ScanStation 2를 사용하였다. 이는 Class 3R등급으로 레이저의 색상은 녹색을 사용하며, 레이저의 스캔 방식은 Time-of-Flight Method 이다. Scan 데이터들을 스캐닝하는 동안 laptop에 전달 저장하며, 다른 대상체를 활발히 스캐닝하는 동안 ScanStation 2을 제어/준비할 수 있는 매개 변수들을 입력 할 수 있다. Built-in 사진기는 스캔하여 얻은 데이터의 3차원 형상인 Point Cloud의 위에 공간적으로 조성된 사진을 오버레이 하여 볼 수 있게 제공한다. 3D TLS의 실행에 있어서 스캔을 통해 얻어진 데이터 값에 영향을 주는 변수들이 있는데, 그것은 laser spot size, Angle of Incidence, Surface reflectivity, Gray Scale, Surface roughness, Edge effect 등이 있다.

표 2.3 3D TLS의 제원

| Leica ScanStation 2 of 3D TLS | | |
|-------------------------------|----------|--------------------------------------|
| 일반 | 기계형식 | 장거리 |
| | 측정방법 | Time-of-flight(TOF) |
| | 전원 | 2개의 배터리 동시 장비에 연결사용 가능 (6시간 연속 사용가능) |
| 특성 | 레이저 | Green Color |
| | 화각 | 수평 360 × 수직 270 |
| | 카메라 | 자체 내장 고해상도 디지털 카메라(레이저부와 동축 장착) |
| 수행성 | 범위 | 300m 이상 측정 |
| | 스캔속도 | Up to 50,000 point/sec |
| | 표준편차 | 거리 : 0~50m @4mm |
| | 단일 점 정확도 | 위치 : 6mm이하, 거리 : 4mm이하 |
| | 정확도 | ≤ 6 mm from 0~50m |

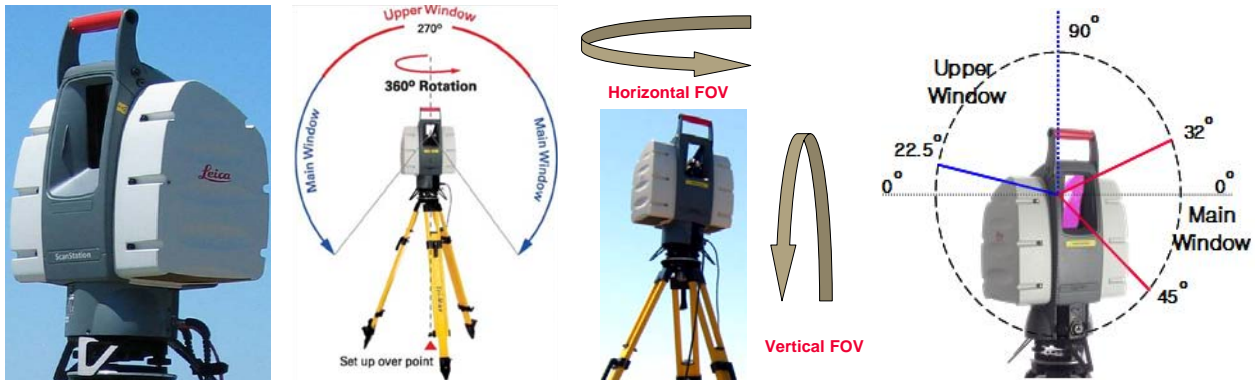


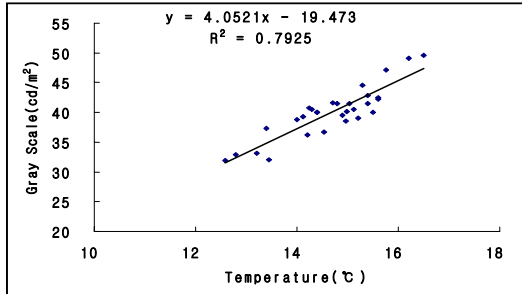
그림 2.4 Leica ScanStation 2 & 3D TLS의 측정 범위

Laser 의 Intensity(i)란 Laser return intensity value of a point 이며, 이 값은 반사력에 비례하고 반사력은 물체의 명암에 의해 그 세기가 달라진다. 각각 흰색, 회색, 검정색으로 반사력은 80%, 40%, 8%로 흰색이 가장 크다. 즉 밝은 표면을 가진 물체는 어두운 표면의 물체보다 high Intensity를 갖는다

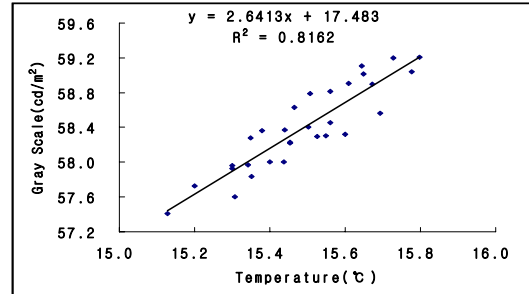
3. Thermal Camera와 암석과의 관계

3.1 명암(Gray Scale)과 암석의 온도 관계

3.1.1 화강암



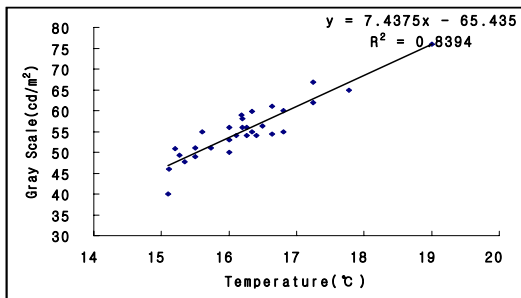
(a) Dry



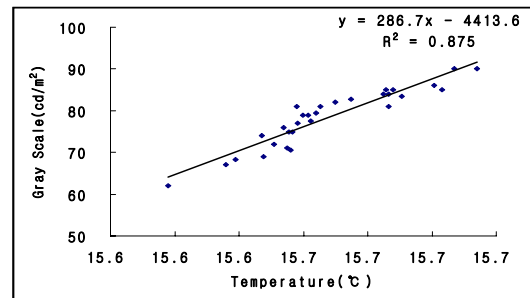
(b) Saturation

그림 3.1 Relationship between Temperature & Gray Scale on Granite

3.1.2 편마암



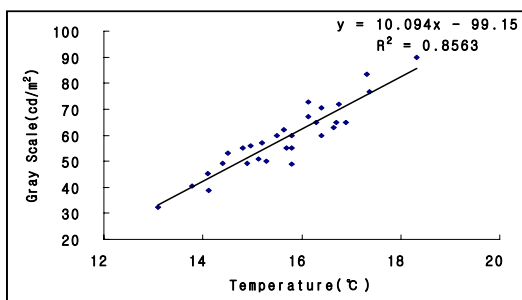
(a) Dry



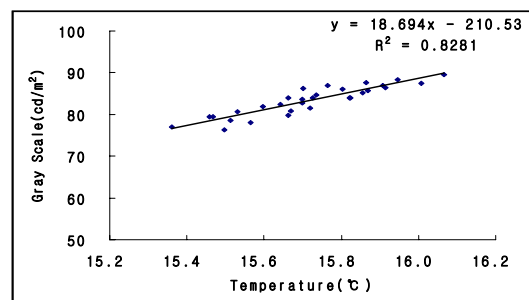
(b) Saturation

그림 3.2 Relationship between Temperature & Gray Scale on Gneiss

3.1.3 사암



(a) Dry



(b) Saturation

그림 3.3 Relationship between Temperature & Gray Scale on Sandstone

3.1.4 명암(Gray Scale)과 암석의 온도 관계 결론

본 연구에서 상관관계식의 분석결과 화강암, 편마암, 사암의 건조·습윤 상태에서의 결정계수(R^2)값이

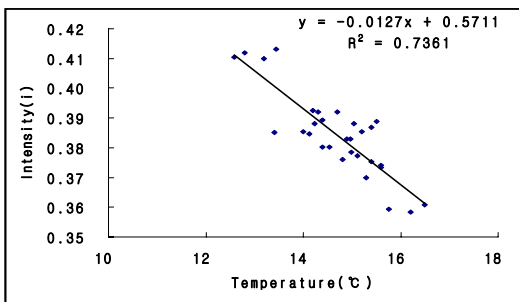
0.8이상으로 매우 양호함을 나타냈으며, 명암에 따른 온도의 관계는 매우 신뢰성이 있게 표3.1과 같이 분석되었다.

표 3.1 명암(Gray Scale)과 암석의 온도 관계식 & R2값과 판정 분류표

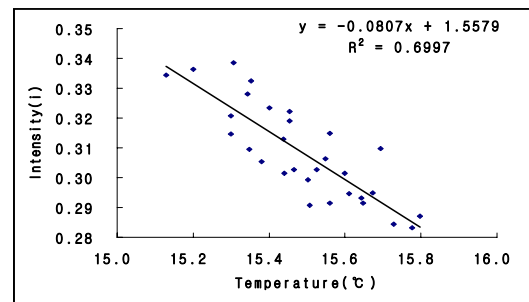
| 암 종 | Condition | 관계식 & R ² | | 판정 |
|-----|------------|----------------------|--------------------|-------|
| 화강암 | Dry | y | = 4.0521x - 19.473 | 양호 |
| | | R ² | 0.7925 | |
| | Saturation | y | = 2.6413x - 17.483 | 매우 양호 |
| | | R ² | 0.8162 | |
| 편마암 | Dry | y | = 7.4375x - 65.435 | 매우 양호 |
| | | R ² | 0.8394 | |
| | Saturation | y | = 286.7x - 4413.6 | 매우 양호 |
| | | R ² | 0.875 | |
| 사암 | Dry | y | = 10.094x - 9915 | 매우 양호 |
| | | R ² | 0.8563 | |
| | Saturation | y | = 18.694x - 210.53 | 매우 양호 |
| | | R ² | 0.8281 | |

3.2 Intensity와 암석의 온도 관계

3.2.1 화강암



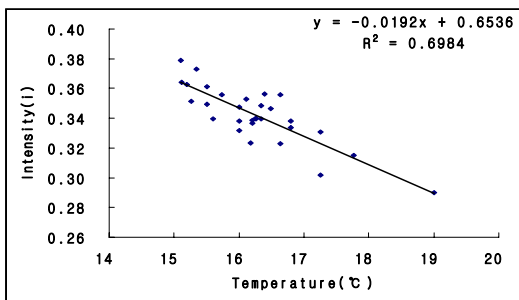
(a) Dry



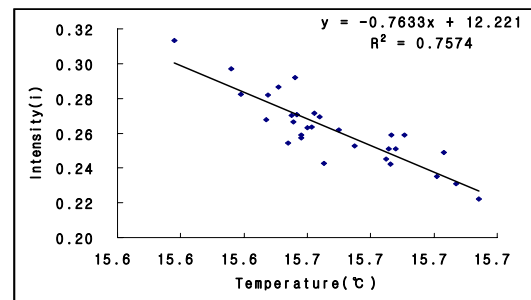
(b) Saturation

그림 3.4 Relationship between Temperature & Intensity on Granite

3.2.2 편마암



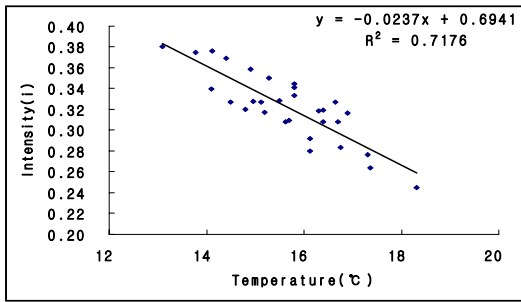
(a) Dry



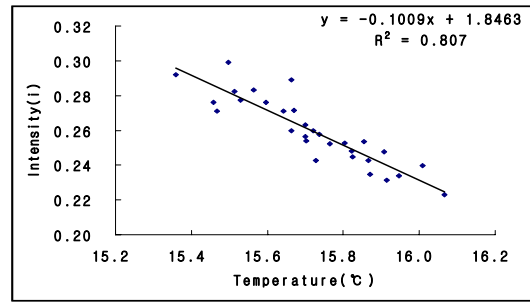
(b) Saturation

그림 3.5 Relationship between Temperature & Intensity on Gneiss

3.2.3 사암



(a) Dry



(b) Saturation

그림 3.6 Relationship between Temperature & Intensity on Sandstone

3.2.4 Intensity와 암석의 온도 관계 결론

본 연구에서 상관관계식의 분석결과 화강암, 편마암, 사암의 건조·습윤 상태에서의 결정계수(R^2)값이 0.6~0.8로 양호함을 나타냈으며, Intensity에 따른 암석의 온도 관계가 신뢰성 있는 것으로 표 3.2와 같이 분석되었다.

암석의 Intensity와 온도와 관계는 온도가 높을수록 암석의 Intensity 값이 낮아지는 것으로 분석되었다.

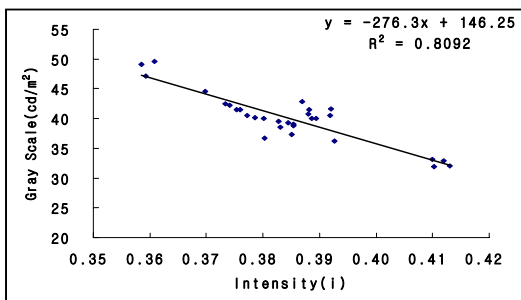
표 3.2 Intensity와 암석의 온도 관계식 & R^2 값과 판정 분류표

| 암 종 | Condition | 관계식 & R^2 | | 판정 |
|-----|------------|-------------|-----------------------|-------|
| 화강암 | Dry | y | = $-0.0127x + 0.5711$ | 양호 |
| | | R^2 | 0.7361 | |
| | Saturation | y | = $-0.0807x + 1.5579$ | 양호 |
| | | R^2 | 0.6997 | |
| 편마암 | Dry | y | = $-0.7633x + 0.6536$ | 양호 |
| | | R^2 | 0.6984 | |
| | Saturation | y | = $-0.7633x + 12.221$ | 양호 |
| | | R^2 | 0.7574 | |
| 사암 | Dry | y | = $-0.0237x + 0.6941$ | 양호 |
| | | R^2 | 0.7176 | |
| | Saturation | y | = $-0.1009x + 1.8463$ | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.807 | |

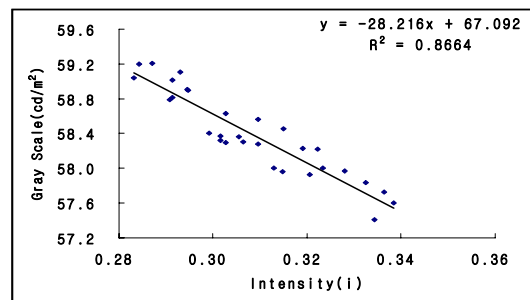
4. Intensity of 3D Terrestrial Laser Scanner와 암석과의 관계

4.1 명암(Gray Scale)과 암석의 Intensity 관계

4.1.1 화강암



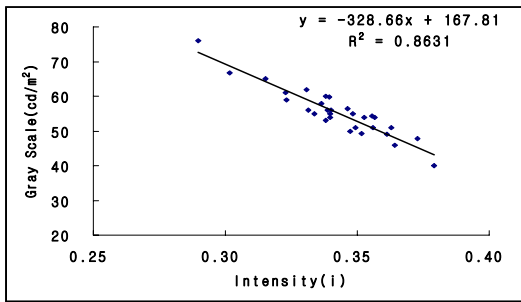
(a) Dry



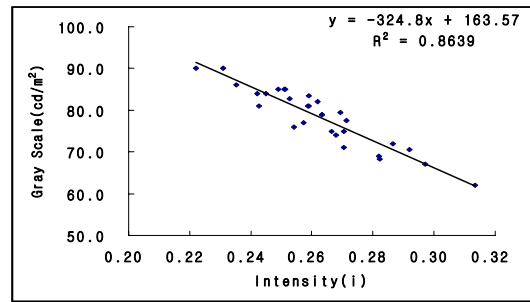
(b) Saturation

그림 4.1 Relationship between Intensity & Gray Scale on Granite

4.1.2 편마암



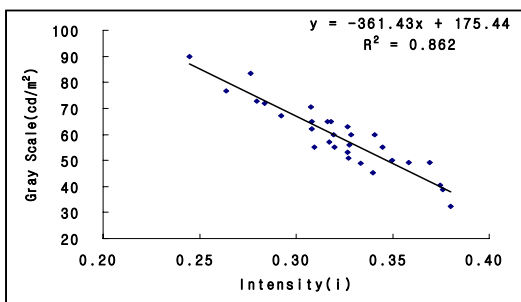
(a) Dry



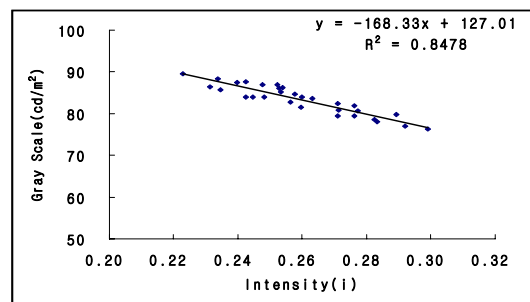
(b) Saturation

그림 4.2 Relationship between Intensity & Gray Scale on Gneiss

4.1.3 사암



(a) Dry



(b) Saturation

그림 4.3 Relationship between Intensity & Gray Scale on Sandstone

4.1.4 명암과 암석의 Intensity 관계 결론

본 연구에서 상관관계식의 분석결과 화강암, 편마암, 사암의 건조·습윤 상태의 결정계수(R^2)값이 0.8이상이므로 매우 양호함으로 나타났으며, 이러한 상관관계에서 명암과 암석의 Intensity 관계에 대해 매우 신뢰성 있는 것으로 표 4.1과 같이 분석되었다.

명암과 암석의 Intensity 관계를 통해 암석의 명암이 밝을수록 Intensity 값이 커짐을 알 수 있다. 따라서 암석의 풍화가 진행되면서 명암이 밝아지거나 어두워 질 경우 Intensity를 통해 풍화의 진행 상태를 알 수 있다.

표 4.1 명암과 암석의 Intensity 관계식 & R^2 값과 판정 분류표

| 암 종 | Condition | 관계식 & R^2 | | 판정 |
|-----|------------|-------------|---------------------|-------|
| 화강암 | Dry | y | = -276.3x + 146.25 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.8092 | |
| | Saturation | y | = -28.216x + 67.092 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.8664 | |
| 편마암 | Dry | y | = -328.66x + 167.81 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.8631 | |
| | Saturation | y | = -324.8x + 163.57 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.8639 | |
| 사암 | Dry | y | = -361.43x + 175.44 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.862 | |
| | Saturation | y | = -168.33x + 127.01 | 매우 양호 |
| | | R^2 | 0.8478 | |

5. 분석 및 결론

5.1 시료분석 결과

화강암, 편마암, 사암 각각 시료 30개를 대상으로 풍화정도에 따라 Intensity 값과 온도의 변화를 살펴보았다. 여러번 시행착오를 겪으면서 얻은 데이터를 분석하여 상관관계를 분석한 결과 각각의 양호한 결과 값을 얻을 수 있었다. 통계결과 결정계수(R^2)를 0~0.2일 경우 매우 불량, 0.2~0.4일 경우 불량, 0.4~0.6일 경우 보통, 0.6~0.8일 경우 양호, 0.8~0.1일 경우 매우 양호로 구분하여 결과 값을 판별하였으며, 각각의 실험결과에 대한 상관관계를 분석하여 다음 표 5.1과 같은 결과를 얻게 되었다.

표 5.1 R^2 값의 범위에 의한 판정 분류표

| 등급 | R^2 값의 범위 | 판정 |
|----|-------------------|-------|
| 1 | $0 < R^2 < 0.2$ | 매우 불량 |
| 2 | $0.2 < R^2 < 0.4$ | 불량 |
| 3 | $0.4 < R^2 < 0.6$ | 보통 |
| 4 | $0.6 < R^2 < 0.8$ | 양호 |
| 5 | $0.8 < R^2 < 1.0$ | 매우 양호 |

5.2 암석의 풍화정도에 따른 온도에 대한 분석 결과

암석의 풍화정도에 따라 열화상카메라와 3D TLS에 의한 암석을 분석한 결과 명암에 대한 온도와 Intensity의 관계는 각각의 암석 건조 상태와 습윤 상태에 따라 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 분석되었다.

표 5.2에서 명암과 온도 관계는 화강암, 편마암, 사암의 결정계수(R^2)값이 0.7~0.9 범위로서 암석에 대한 상관관계가 매우 양호 하며, 신뢰성 있는 것으로 분석되었다.

또한 표 5.2에서 온도에 대한 Intensity와의 관계는 화강암, 편마암, 사암의 결정계수(R^2)값이 0.6~0.8 범위로서 암석에 대한 상관관계가 양호 하며, 신뢰성 있는 것으로 분석되었다.

온도에 대한 탄성과 속도(V_p), SHV, Equotip, 흡수율, 밀도 등에 암석분석은 전반적으로 매우 불량한 것으로 나타나 신뢰성이 희박한 것으로 분석되었다.

그러나 표 5.2에서 건조 상태 화강암은 결정계수(R^2)값이 0.5~0.7 범위로 보통과 양호함으로 분석되었으며, 이는 화강암의 풍화가 진행될수록 명암이 어두워지고, 명암의 밝기가 어두워질수록 온도가 높아지기 때문이다.

따라서 본 실험에서 화강암의 풍화가 진행되면 명암의 밝기가 어두워지고, 암석에 갈라진 틈이 생겨 미세한 공극에 의해 암석의 온도 또한 높아지게 된다. 이를 이용하여 온도의 변화로 부터 풍화암석을 구별 할 수 있고, 암석의 약한 부위를 구별 할 수 있게 된다.

표 5.2 온도와 측정시료의 관계를 R^2 값에 의한 판정 분류표

| 암의 측정 범위 | 암 종 | Condition | R^2 | 판정 |
|----------------|-----|------------|--------|-------|
| 명암(cd/m^2) | 화강암 | Dry | 0.7925 | 매우 양호 |
| | | Saturation | 0.8162 | |
| | 편마암 | Dry | 0.8394 | |
| | | Saturation | 0.875 | |
| | 사암 | Dry | 0.8563 | |
| | | Saturation | 0.8281 | |
| Intensity(i) | 화강암 | Dry | 0.7361 | 양호 |
| | | Saturation | 0.6997 | |
| | 편마암 | Dry | 0.6984 | |
| | | Saturation | 0.7574 | |
| | 사암 | Dry | 0.7176 | |
| | | Saturation | 0.807 | |
| $V_p(m/sec)$ | 화강암 | Dry | 0.5583 | 보통 |
| SHV(Rn) | 화강암 | Dry | 0.6863 | 양호 |
| Equotip(L) | 화강암 | Dry | 0.6211 | 양호 |
| 흡수율(%) | 화강암 | Dry | 0.5095 | 보통 |

5.3 암석의 풍화정도에 따른 Intensity에 대한 분석 결과

Intensity에 대한 명암과의 관계는 화강암, 편마암, 사암 등에 결정계수(R^2)값이 0.8~0.9 범위로서 암석에 대한 상관관계가 매우 양호 하며, 매우 신뢰성 있는 것으로 분석되었으며, 명암이 밝을수록 Intensity 값이 증가함을 알 수 있었다.

또한 건조 상태의 화강암은 SHV, Equotip, 탄성과 속도, 흡수율에 대한 상관관계의 결정계수(R^2)값은 0.4~0.7 범위로서 보통의 결과를 얻을 수 있었다.

화강암의 풍화가 진행될수록 명암은 어두워지며, 그에 따른 암석의 Intensity 값은 명암이 어두워질수록 작아졌다. 표 5.3과 같이 명암과 Intensity의 관계는 매우 양호함을 통해 우리는 스캐너의 intensity가 풍화에 따라 변화함을 알 수 있었다.

표 5.3 Intensity와 측정시료의 관계를 R^2 값에 의한 판정 분류표

| 암의 측정 범위 | 암 종 | Condition | R^2 | 판정 |
|----------------|-----|------------|--------|-------|
| 명암(cd/m^2) | 화강암 | Dry | 0.8092 | 매우 양호 |
| | | Saturation | 0.8664 | |
| | 편마암 | Dry | 0.8631 | |
| | | Saturation | 0.8639 | |
| | 사암 | Dry | 0.862 | |
| | | Saturation | 0.8478 | |
| SHV(R_n) | 화강암 | Dry | 0.6494 | 보통 |
| Equotip(L) | 화강암 | Dry | 0.5827 | |
| Vp(m/sec) | 화강암 | Dry | 0.4802 | |
| 흡수율(%) | 화강암 | Dry | 0.4852 | |

참고문헌

1. 박종화, 2005, 적외선을 이용한 구조물 진단 기술, 한국관개배수 제11권 1호, pp.87-98.
2. 송영귀, 2007, 지상레이저 스캐닝 기법을 이용한 해안 지형 추출, 석사학위논문, 부경대학교 산업대학원
3. 엄대용, 김지혜, 2009, 대상물 표면물질에 따른 3차원 레이저스캐닝 시스템의 반사특성분석, 한국측량학회지, 제 27권 제 3호, pp.347-356.
4. 이승호, 황영철, 심석래, 정태영, 2005, 3차원 영상처리를 이용한 암반 사면의 절리 측정에 관한 연구, 한국지반공학회학술, pp.854-857.
5. 이재원, 김용석, 송연경, 2007, 3차원 레이저 측량기를 이용한 터널 변위 관측, 동아대학교 토목공학과, 대한지구물리학회 지구물리, 10권, 1호, pp.27-35.
6. 조형식, 김성삼, 손홍규, 윤공현, 2008, 대상체의 반사 특성에 따른 지상레이저 스캐너의 정확도 분석, 학술발표자료, 한국GIS학회, pp.306-309.
7. 최만용, 김원태, 2004, 적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단, 비파괴검사학회지 제 24권 제5호, pp.525-531.
8. Jagannath Hiremagalur, Kin S. Yen, Kevin Akin, Triet Bui, Ty A. Lasky, Bahram Ravani, Principal Investigator, 2007, Creating Standards and Specifications for the Use of Laser Scanning in Caltrans Projects, AHMCT Research Report, California
9. 3차원 스캐너(지상 Lidar)의 원리와 종류, <http://blog.daum.net/mybhst/8820704>
10. (주)주원, 휴대형카메라(H2640), <http://www.visual-data.co.kr/>
11. Leica Geosystems Switzerland , 2007, Leica ScanStation 2 User Manual