





#### 2018년 2월

석사학위논문

## 회전익 무인항공기를 이용한 사면 안정성 평가 모니터링 기법에 관한 연구

### 조선대학교 대학원

에너지자원공학과

이 건 주



## 회전익 무인항공기를 이용한 사면 안정성 평가 모니터링 기법에 관한 연구

Monitoring Techniques for Evaluating Slope Stability by a Rotary-wing Unmanned Aerial Vehicle

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

이 건 주





# 회전익 무인항공기를 이용한 사면 안정성 평가 모니터링 기법에 관한 연구

지도교수 강 성 승

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

이 건 주

Collection @ chosun



### 이건주의 석사학위논문을 인준함

- 위원장 조선대학교 조교수 장 일 식 (인)
- 위 원 조선대학교 조교수 최 태 진 (인)
- 위 원 조선대학교 부교수 강성 승 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원





표 목차 ···································
그림 목차
Abstract iv
1. 서론
2. 연구지역
3. 연구방법
3.1 평사투영법
3.2 한계평형법
3.3 강도감소법
3.4 3차원 영상 분석법
3.4.1 지상기준점 설치 및 좌표 측정
3.4.2 회전익 무인항공기 항공사진 촬영
3.4.3 항공사진 모델링
3.4.4 3차원 영상 분석
4. 연구결과
4.1 평사투영법 결과
4.1.1 평사투영의 결과
4.2 한계평형법 결과
4.3 강도감소법을 이용한 사면안정해석 결과
4.4 3차원 영상 분석법 결과
4.4.1 1차 영상 분석
4.4.2 2차 영상 분석
4.4.3 3차 영상 분석
4.4.4 4차 영상 분석
5. 결론
참고문헌

-목 차-

Collection @ chosun



### 표 목차

표	3.1	사면의 파괴유형 및 발생조건
표	3.2	평사투영해석을 위해 적용된 입력자료
표	3.3	한계평형 해석을 위해 적용된 입력자료
표	3.4	레이저 거리 측정기로 측정된 사면의 크기
표	3.5	강도감소 수치해석에 이용된 지반물성 입력자료
표	3.6	1, 2, 3, 4차 영상 지상기준점 좌표 측정
표	3.7	무인항공기 자동모드와 수동모드의 기능18
표	3.8	Zenmuse X3 카메라 특징21
표	3.9	카메라 짐벌 특징21
표	3.10	) 각 회별 항공사진의 수
丑	4.1	OO노천 석회석 광산 절취사면에서 측정된 불연속면의 주향과 경사31
표	4.2	한계평형법에 의한 평면파괴 검토 결과
표	4.3	한계평형법에 의한 쐐기파괴 검토 결과
표	4.4	1차 영상 보정계수 및 상관행렬41
표	4.5	1차 영상 카메라 위치 오차
표	4.6	1차 영상 지상기준점 좌표 오차43
표	4.7	2차 영상 보정계수 및 상관행렬
표	4.8	2차 영상 카메라 위치 오차
표	4.9	2차 영상 지상기준점 좌표 오차
표	4.10	) 3차 영상 보정계수 및 상관행렬55
표	4.11	L 3차 영상 카메라 위치 오차 ······56
표	4.12	2 3차 영상 지상기준점 좌표 오차
표	4.13	3 4차 영상 보정계수 및 상관행렬62
표	4.14	4 4차 영상 카메라 위치 오차63
표	4.15	5 4차 영상 지상기준점 좌표 오차



그림 목차

그림	2.1 고흥지역 지질도
그림	2.2 연구지역 OO노천 석회석 광산 위성사진
그림	2.3 조사대상 OO노천 석회석 광산 절취사면 현황
그림	3.1 레이저 거리 측정기
그림	3.2 (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4차 영상 지상기준점 설치 위치
그림	3.3 GPS 좌표 측정 장비16
그림	3.4 DJI사 Inspire 1 V2 무인항공기 구성
그림	3.5 적절한 사진 획득 방법 예시
그림	3.6 연구지역 무인항공기 영상촬영 경로
그림	3.7 Agisoft lens 64-bit를 활용한 카메라 검정22
그림	3.8 방사왜곡과 접선왜곡 그래프
그림	3.9 국내 비행제한구역 표시
그림	3.10 촬영 항공사진 영상의 모델링 순서
그림	3.11 항공사진측량 단면도
그림	3.12 연구지역 발과전과 후의 지형 변화
그림	3.13 발파 후 지형변화 표기
그림	3.14 Polygon 변환
그림	4.1 ○○노천 석회석 광산의 절취사면에 대한 평사투영 해석 결과32
그림	4.2 한계평형법에 의한 Case 1과 2의 평면파괴 검토 결과
그림	4.3 한계평형법에 의한 Case 1과 2의 쐐기파괴 검토 결과
그림	4.4 강도감소법(SRM) 해석을 위한 해석모델
그림	4.5 강도감소법(SRM)으로 구한 최대 전단 변형률
그림	4.6 강도감소법(SRM)으로 구한 전체변위
그림	4.7 1차 영상 카메라 위치 및 중복도
그림	4.8 FC350을 이용한 1차 영상 이미지 잔상40
그림	4.9 Photoscan에서의 1차 영상 Z 좌표 오차 ···································
그림	4.10 1차 영상 지상기준점 좌표 오차43
그림	4.11 1차 영상 대상지역 DEM





그림	4.12 Photoscan을 이용한 1차 영상 절취사면 위험도 분석(1차 영상)	····· 44
그림	4.13 1차 채굴량 측정 위치 및 채굴량	····· 45
그림	4.14 2차 영상 카메라 위치 및 중복도	····· 47
그림	4.15 FC350을 이용한 2차 영상 이미지 잔상	····· 47
그림	4.16 Photoscan에서의 2차 영상 Z 좌표 오차	····· 49
그림	4.17 2차 영상 지상기준점 좌표 오차	····· 50
그림	4.18 2차 영상 대상지역 DEM	····· 51
그림	4.19 Photoscan을 이용한 2차 영상 절취사면 위험도 분석	····· 51
그림	4.20 2차 채굴량 측정 위치 및 채굴량	••••• 52
그림	4.21 3차 영상 카메라 위치 및 중복도	····· 54
그림	4.22 FC350을 이용한 3차 영상 이미지 잔상	····· 54
그림	4.23 Photoscan에서의 3차 영상 Z 좌표 오차	····· 56
그림	4.24 3차 영상 지상기준점 좌표 오차	····· 57
그림	4.25 3차 영상 대상지역 DEM	····· 58
그림	4.26 Photoscan을 이용한 3차 영상 절취사면 위험도 분석	····· 58
그림	4.27 3차 채굴량 측정 위치 및 채굴량	59
그림	4.28 4차 영상 카메라 위치 및 중복도	61
그림	4.29 FC350을 이용한 4차 영상 이미지 잔상	61
그림	4.30 Photoscan에서의 4차 영상 Z 좌표 오차	····· 63
그림	4.31 4차 영상 지상기준점 좌표 오차	····· 64
그림	4.32 4차 영상 대상지역 DEM	65
그림	4.33 Photoscan을 이용한 4차 영상 절취사면 위험도 분석	65





#### Abstract

Monitoring Techniques for Evaluating Slope Stability by a Rotary-wing Unmanned Aerial Vehicle

> By Geon Ju Lee Adv. Prof. : Seong-Seung Kang, Ph.D, Dept. of Energy and Resources Engineering Graduate School of Chosun University

The entire country is the forestry with a ratio of 7:3 which are more than twice as wide as the land and road. However, due to industrialization and urbanization every year, the development area of forestry is constantly increasing. The growth in the development area of forestry has increased in not only the road but also the steep slope such as the retaining wall and cut slope of the downtown area. It is also an important factor causing damages such as landslides. Therefore, an efficient and systematic method are required to evaluate stability of steep slope.

Recently, studies using unmanned aerial vehicles(UAVs) have been actively progressed in various fields at the inside and outside of the country. Because UAVs are inexpensive to operate and can quickly acquire data in a pervasive area, it is applied to disaster such as flood, fire, searching for marine or mountain, various monitoring, large-scale pesticide application, communication, image, geospatial information, design, geological survey and mapping, and natural disaster monitoring. For this study, the information of slope which is difficult to be measured is obtained through 3D image analysis using UAVs and through its information is carried out the stability evaluation for cut slope of open-pit limestone mine.

The stability evaluation for cut slope was carried out at open-pit limestone mine with a width of about 70 m and a height of about 30 m. As a result of the stereographic projection analysis using 45 discontinuities data measured at the cut slope, there are two pole points in the envelope of plane failure, and 167





Collection @ chosun

intersection lines in the envelope of wedge failure. Therefore, it can be estimated that the plane failure or wedge failure may be occurred. However, there is no possibility of toppling failure. As a result of the limit equilibrium method(LEM) based on the results of the stereographic projection analysis, the safety factor of plane type for Case 1 was estimated 0.992/0.875 at dry/wet condition, and 0.762/0.622 for Case 2 at dry/wet condition. It is less than the safety factor of 1.5/1/2 at dry/wet condition. The wedge failure was evaluated to be the safety factor of 7.857/7.337 for Case 1, 0.764/0.666 for Case 2. Therefore, Case 1 was evaluated to stable and Case 2 was evaluated to unstable condition, respectively. The safety factor for the final excavation of the analytical model calculated by the strength reduction method was evaluated to be stable at 3.21. The maximum shear strain( $_{max}$ ) was confirmed to be the largest value of 2.4 cm at toe.

As a result of the analysis of 3D image in the four case using unmanned aerial vehicle, especially in the third case ground control point error was represented 1.7847 cm in the X axis, 1.5747 cm in the Y axis, 1.2530 cm in the Z axis, it is lowest error compared to other cases. It is generally correspond that the average error of 10 cm used for the ground control point in aerial photogrammetry is within the allowable error range. Therefore it is considered that the third image monitoring method is most suitable for risk analysis and calculation of blasted limestone volume in this study. As a result of the analysis of the 3D slope model and the risk analysis, it is possible to visually confirm the joint development status from the first to fourth aerial photogrammetry. Using Digital Elevation Model(DEM) and Orthomosaic, it was confirmed that quantitative limestone volume calculation analysis was possible by the difference of topographic changes before and after blasting.



#### 1. 서론

우리나라의 전 국토는 7:3 정도의 비율로 임야면적이 대지 및 도로 면적보다 2 배 이상 넓게 분포한다. 하지만 해마다 증가하고 있는 산업화와 도시화로 인한 임 야개발 면적이 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 임야개발 면적의 증가는 도로 뿐만 아니라 도심지의 옹벽이나 절토사면과 같은 급경사지 수를 증가시켰으며, 이 는 산사태와 같은 피해를 일으키는 중요한 요인으로 작용하기도 한다. 산사태 발생 의 형태로는 자연사면의 붕괴, 절취사면의 붕괴, 또는 주택지 축대 및 옹벽의 붕괴 등을 예로 들 수 있다. 산사태는 주거지나 산업부지의 피해, 농작물과 산림의 피해, 하천과 호수의 수질 악화, 또는 인명 및 구조물의 피해 등을 초래하여 직간접적으 로 사회적 및 경제적 손실에 영향을 끼치기도 한다. 그러므로 이들 급경사지에 대 한 안정성 평가를 위한 효율적이고 체계적인 방법과 시스템 구축이 필요하다(손호 용 외, 2006).

사면에 대한 안정성 평가를 위한 대표적인 해석 방법으로는 평사투영법 (Stereographic projection), 한계평형법(Limit Equilibrium Method), 수치해석법 (Numerical analysis) 등이 폭넓게 이용되고 있다. 평사투영법은 사면의 방향과 경 사, 불연속면의 주향과 경사를 고려하고, 현장 지질조사를 통하여 조사된 불연속면 의 방향과 내부마찰각을 평사투영하여 사면 붕괴유형별 안정성을 평가하는 방법이 다. 평사투영에 의한 사면의 파괴유형은 원호파괴(Circular failure), 평면파괴(Plan failure), 쐐기파괴(Wedge failure), 그리고 전도파괴(Toppling failure) 등 크게 4가 지로 구분할 수 있다(ISRM, 1977). 한계평형법은 사면을 통과하는 활동면을 가정하 여 전체 파괴에 대한 현재 상태의 안전율을 직접적으로 제공하는 방법으로서 적용 이 쉽고 비교적 높은 신뢰도의 결과를 나타낸다. 한계평형법의 종류로는 Fellenius 법, Bishop법, Janbu법 등이 이용된다. 수치해석법은 사면 각 지점의 힘 평형조건 과 적합조건, 구성방정식과 경계조건을 모두 만족시키는 정밀한 근사해법으로서 실 제와 가까운 파괴형상 구현, 더 정확한 현장조건 반영, 사면의 최소 안전율 계산, 자세한 사면의 파괴거동 분석 가능 등의 장점이 있다. 해석에는 유한요소법에 근거 한 강도감소법과 간접법이 사용된다(Griffith, 1999).

최근에는 운영비용이 저렴하고 광범위한 지역의 데이터를 신속하게 취득할 수 있는 무인항공기의 공간정보 분야로의 적용 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반







적으로 드론(drone)으로 불리고 있는 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)는 항공기에 조종사가 탑승하지 않고, 자동 또는 원격으로 비행하거나 사전에 입력된 프로그램에 따라 자율적으로 비행할 수 있는 1회용 또는 회수 가능한 비행체를 말 한다. 또한 기체의 형태에 따라 고정익과 회전익으로 분류할 수 있으며, 고정익은 에너지 효율이 높아 장기간 비행 가능하여 넓은 지역의 조사에 적합한 반면, 회전 익은 에너지 효율이 낮아 비행시간이 짧지만 수직이착륙이 가능하다(이성재와 최요 순, 2016).

무인항공기가 1910년대에 고안된 이후 주로 군사적 목적으로 이용되다가 현재 는 전 세계적으로 홍수나 화재와 같은 재난, 해양이나 산악지역 수색, 각종 모니터 링, 대규모 농약살포, 통신, 영상, 지형공간정보, 디자인, 지질조사 및 지질도 작성. 자연재해 감시 등 다양한 분야에 적용되고 있다(Gross et al., 2005; 정성혁 외., 2010; Rau et al., 2011; Wich and Koh, 2012; Costa et al., 2012; Jordan, 2015). 또 한 자원의 탐사와 개발 분야에도 점착적으로 그 응용 범위가 확대되고 있다(박계순 외., 2010; Cryderman et al., 2014; 이성재와 최요순, 2015a; 조성준 외, 2015).Costa et al.(2012)는 농작물에 대규모 농약을 살포하는데 무인항공기와 무선센서 네트워 크를 활용한 결과 농약 소비를 최소화 할 수 있음을 보고하였다. Wich and Koh(2012)는 여러 국가의 환경분야인 동물군 조사에 고정형 무인항공기를 적용한 결과 동물들의 밀도와 이동경로에 관한 정보를 파악할 수 있음을 제시하였다. 정성 혁 외(2010)는 무인항공기 촬영 영상을 통하여 변화가 빈번한 도시지역의 3차원 정 보 취득 기법를 제시하고 처리공정을 개발하였으며, 그 결과로부터 3차원 가상도시 구축, 3차원 GIS 데이터베이스 갱신, 지형 및 지물 변화정보 추출 및 수치지도 수 시생신에 활용할 수 있음을 제시하였다. Jordan(2015)은 초소형 무인항공기의 지질 학분야로의 적용 가능성을 제시하였으며, 지질 및 지질구조 조사, 지질도 작성, 시 료채취, 화산활동 모니터링 등에 활용될 수 있음을 보고하였다. 박계순 외(2010)는 무인항공기를 이용한 3차원 자력탐사에서 자성체에 대한 효과적인 3차원 표현이 가능함을 보였으며, 향후 지형의 형태와 함께 3차원 자력이상 분포를 도시함으로써 광체의 위치와 특성을 해석하는데 활용될 수 있음을 제시하였다. Remondino et al.(2011)은 무인항공기를 이용함으로써 구조물 맵핑과 3차원 모델링이 가능함을 제 시하였으며, 이를 고고학 유적지 조사에 활용한 결과 구조물 3차원 형태를 성공적 으로 얻을 수 있음을 확인하였다. 장선웅 외(2011)은 무인항공기 사진 촬영을 이용 하여 해안에 산재한 해안표착물을 탐지하는 새로운 방법을 제시하였으며, 다양한







형태의 해안표착물을 안정적으로 탐지하는 결과를 보여주었다. 김덕인 외(2014)는 무인항공기의 재해지역 분석이나 지도제작 등 국토모니터링분야로의 적용 가능성 에 대한 연구를 실시한 결과 무인항공기의 효과적 활용 가능성을 확인하였다. 김민 규 외(2010)는 풍수해와 같은 자연재해 현상을 모니터링하기 위해 무인항공기 적용 성을 분석한 결과, 하천범람과 구조물 유실 및 붕괴, 사면의 유실 및 붕괴, 낙석과 하천 및 저수지 통수능 저하, 농경지 침수 및 퇴적 피해조사, 해안의 침수 및 침식, 시설물 및 구조물 파손 등의 분석이 가능한 것으로 보고하였다. 박홍기(2014)는 무 인항공기를 이용하여 저수지 방재 모니터링을 실시한 결과, 강우에 따른 수위 상승 과 수면 면적의 증가를 효과적으로 관측할 수 있음을 확인하였으며, 저수지의 방재 관리 모니터링 업무뿐만 아니라 긴급을 요하는 방재 업무에 최적임을 제시하였다. 이수암 외(2015)는 태풍이나 홍수와 같은 자연재해 발생 시 영상을 기반으로 댑. 보, 교량과 같은 수변구조물의 피해정보를 정량적으로 할 수 있는 방법으로 무인항 공기 촬영 영상 활용 가능성을 제시하였다. Rau et al.(2011)은 소형 무인항공기에 의한 항공측량 결과를 산사태 등의 지질재해 모니터링에 활용한 결과를 보고하였 다. 조성준 외(2015)는 무인항공 사진 촬영을 통한 비금속 노천광산 정밀 수치지형 모델 구축 연구에서 짧은 시간에 고정밀 항공측량 자료 확보가 가능함으로 노천광 산의 주기적인 촬영을 통한 채광량과 사면붕괴 모니터링이 적은 비용과 시간으로 가능함을 확인하였다. 또한 이성재와 최요순(2015a, 2015b)은 고정익과 회전익 무인 항공기를 이용하여 노천광산의 지형측량을 분석한 결과 고정익 무인항공기는대규 모 노천광산 현장, 그리고 회전익 무인항공기는 소규모 노천광산에 효과적으로 활 용될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 제4차 산업과 융합된 기술로서 무인항공기인 드론을 활용하여 노천 석회석 광산의 절취사면 안정성 평가를 위한 최적의 모니터링 기법을 제시하 고자 한다. 이를 위하여 첫째, 현장을 확인하여 비행계획을 수립하고, GCP(Ground control point)를 설치하였다. 둘째, 드론촬영을 통해 3D 모델을 만든다. 셋째, 현장 조사 자료와 드론을 통해 얻은 자료를 비교·분석하였다. 마지막으로, 조사한 현장자 료와 드론자료를 바탕으로 안정성을 평가·비교하였다.







#### 2. 연구지역

한반도 서남부에 위치한 고흥반도는 E127°05 ' 24 " -127°33 ' 30 ", N34°18 ' 4 2 " -34°49 ' 30 " 에 위치해 있다. 지형적으로 볼 때 반도 남쪽으로는 폭이 넓어지는 형태로 서쪽의 보성만과 득량만, 동쪽의 순천만에 의해 둘러싸여 있는 전형적인 반 도상의 지형을 이루고 있다. 고흥반도의 지형은 북부산지보다 남부내륙의 산지가 연속성이 있으며 해발고도도 더 높다. 산지의 주향방향은 고흥반도의 주향과 거의 일치한 NE-SW방향이 우세하다. 고흥반도의 지질은 대부분 중생대 백악기의 화성 압류에 기인한 산성화성암인 유문암질 응회암이 넓게 분포한다. 그 주변을 중심으 로 중생대 백악기의 화성활동과 관계가 있는 안산반암과 불국사화강암, 섬록암 등 이 분포하고 있다. 고흥반도 서남부와 서부, 그리고 북서부에 해당되는 비봉산 지 역은 선캠브리아기의 편마암류와 백악기의 퇴적암류가 분포하고, 국지적으로 안산 암과 응회암도 분포한다. 적대봉과 마치산 지역은 안산암과 응회암, 안산반암, 흑운 모화강암, 미문상화강암, 응회암질유문암이 분포한다(그림 2.1). 고흥지역의 선구조 는 N70E방향이 가장 우세하고, N60E과 N80E방향도 나타나는 것으로 보고되고 있 다(건설교통부, 2003).

연구지역은 고흥반도 남쪽의 고흥군 도화면 구암리에 위치한 OO노천 석회석 광산이다(그림 2.2). 본 광산의 개발은 하나 이상의 수평 벤치를 개설하여 굴착된 노천의 채광장에서 지표 근처의 광상을 채광하는 노천채굴 방식을 사용하고 있다. 조사대상 연구지역 노천 석회석 광산 좌측에 위치한 사면이다(그림 2.3). 사면의 크 기는 좌우 길이가 약 70 m, 한 벤치의 높이가 약 15 m인 두 개의 벤치, 소단의 폭 은 약 5 m이다. 사면의 주향/경사는 N2E/66E로 나타났다. 대상 사면에는 두 방향 의 뚜렷한 불연속면이 관찰되며, 발파를 위한 발파공의 흔적들도 관찰된다. 사면에 서 관찰되는 불연속면의 경우 자연절리뿐만 아니라 발파로 인해 발생한 인공절리 도 관찰된다. 대상 사면의 불연속면은 사면 내 접근이 용이하고 안전 확보가 가능 한 구간에 대해 조사를 실시하였다.







그림 2.1 고흥지역 지질도(건설교통부, 2003). Qa: 충적층, Jb: 미문상화장암, Jg: 흑 운모화장암, Kh: 섬록암, Kiv:안산반암, Ka: 유문암, Kav: 유문암질 응회암, Kan: 안산암, Ka: 퇴적암류, Pg: 편마암류







그림 2.2 연구지역 OO노천 석회석 광산 위성사진(www.google.co.kr/maps)







2.3 조사대상 OO노천 석회석 광산 절취사면 현황





#### 3. 연구방법

○○노천 석회석 광산의 절취사면에 대한 안정성 평가를 하기 위하여 기존의 폭넓게 사용되고 있는 방법들과 함께, 최근 관심을 갖고 응용되어 활용되고 있는 방법을 적용하였다. 절취사면 안정성 평가에 이용되고 있는 기존의 방법으로는 평 사투영법, 한계평형법, 그리고 강도감소법 등을 예로 들 수 있다. 이들 방법들에는 수치해석적 방법도 사용된다. 최근 이용되고 있는 응용 방법으로는, 무인항공기를 활용한 모니터링를 예로 들 수 있다. 무인항공기 모니터링 방법은 절취사면의 위험 도 분석뿐만 아니라 3D 모델링과 채굴량 분석도 가능하다.

평사투영법, 한계평형법, 그리고 강도감소법은 2차원 종합해석 및 설계 시스템 으로서 터널, 사면, 암반, 연약지반, 기초, 침투 및 동해석을 수행하여 합리적인 설 계 검토와 신뢰도 높은 결과를 제공하는 SoilWorks 프로그램을 활용하여 실시하였 다. 마이다스 아이티에서 개발된 SoilWorks 상용프로그램은 총 8개의 모듈로 구성 되어 있으며, 모듈 간 데이터 연동이 가능하여 효율적이며 정확한 자료처리가 가능 하다. 또한 무인항공기를 이용한 모니터링은 촬영된 영상들을 Photoscan 프로그램 을 이용하여 자료처리하며, 분석과 평가도 가능하다. 무인항공기는 DJI사의 Inspire 1 V2 회전익 모델이 사용되었으며, Photoscan은 Agisoft사에서 개발된 상용프로그 램으로서 쵤영된 영상을 3D 모델로 변환시켜 고해상도의 지오레퍼런스 (Geo-reference) 정사영상으로부터 고정밀의 3D 모델 및 DEM(Digital elevation model)을 만들 수 있다.



- 8 -



Collection @ chosun

#### 3.1 평사투영법

평사투영법은 현장 지질조사를 통하여 조사된 사면의 경사방향과 경사, 불연 속면의 주향과 경사, 마찰각과 같은 3차원적인 형태를 2차원적인 평면상에 평사투 영하여 사면 파괴유형을 평가하는 방법이다. 불연속면의 주향과 경사를 이용하여 평사투영망에 선 또는 점으로 표현 할 수 있어 추상적인 숫자보다 도식적인 표현 으로 나타낼 수 있다. 따라서 사용자가 이용하기 쉬울 뿐만 아니라 해석도 간편하 여 이해하는데 유용하다는 장점이 있다

암반사면의 파괴형태는 원호파괴, 평면파괴, 쐐기파괴, 전도파괴로 구분할 수 있다. 암반사면의 안정성 검토는 불연속면 요소인 방향, 간격, 연속성, 충전물질, 투 수 및 블록의 크기 등에 영향을 받는다. 이 중 불연속면의 주향과 경사, 마찰각 및 사면의 경사방향이 특히 중요하다. 원호파괴는 불연속면의 방향성이 다양한 가운데 발생하며, 주로 암석의 풍화가 심하거나 암석 파쇄도가 클 경우에 발생한다. 평면 파괴는 평사투영망에서 극점이 사면의 미끄러짐 방향의 반대 즉, 경사면을 나타내 는 대원의 반대, 사면의 상단에 위치하며 극점이 한 곳에 집중되어 있으며, 쐐기파 괴는 두 불연속면이 사면방향으로 교차되는 암반에서 발생하여 극점이 두 곳에서 집중된다. 전도파괴의 경우 다른 파괴들과는 다르게 극점이 미끄러짐 방향 즉, 경 사면을 나타내는 대원의 앞부분에 위치해있다. 이를 간략히 정리하면 다음 표 3.1 과 같다.

평사투영법을 적용하기 위해 사용된 입력자료는 현장조사와 관련 자료(김종우 외, 2012)를 참고하여 선정하였으며, 그 결과를 정리하면 표 3.2와 같다. SoilWorks 프로그램을 이용한 평사투영해석 시 사용되는 파괴기준 인자로는 사면 경사방향, 불연속면 마찰각 및 표준경사가 있다. 사면의 경사방향은 92°, 불연속면 마찰각은 46°이다. 사면의 경사는 사면을 구성하는 암의 종류와 상태, 구조지질학적 특징, 지 하수위의 유무 등 복합적인 요소에 의해 정해진다. 대상 사면의 경우 사면을 구성 하는 암종은 석회암이며, 두 방향의 불연속면이 우세하고 사면의 경사는 66° 이다.



표 3.1 사면의 파괴유형 및 발생조건

파괴유형	발생조건
원호파괴	•불연속면의 방향성이 다양함 •암석의 풍화가 심하고, 암석 파쇄도가 큼
평면파괴	•불연속면의 주향은 사면의 주향의 ±20° •절취면의 경사 > 불연속면의 경사 > 불연속면의 내부마찰각
쐐기파괴	•절취면의 경사 > 두 불연속면의 교선의 경사 > 불연속면의 내부마찰각
전도파괴	<ul> <li>불연속면의 주향이 절취면과 유사하고 경사방향은 반대</li> <li>경사각이 수직에 가까울 때 또는 급할 때</li> </ul>

표 3.2 평사투영해석을 위해 적용된 입력자료

구분	사면 경사방향 (°)	불연속면 마찰각 (°)	사면 경사 (°)
석회암층	92	46	66





#### 3.2 한계평형법

한계평형법은 평사투영법을 이용하여 예측된 결과를 바탕으로 파괴가 예산되는 사면형태에 대해 실시한다. 한계평형 해석에는 현장조사 및 참고문헌을 토대로 지 반정수를 선정하며 암괴의 자중, 불연속면의 마찰각 및 점착력, 공극수압 등을 고 려하여 활동파괴면을 따라 미끄러지려는 순간의 암괴에 대한 안전성을 안전계수 (Safety factor)로 나타내는 방법이다. 한계평형 해석에서 구한 안전율은 사면의 안 정성을 정량적으로 표현할 수 있으나 안전율 계산 시 암반의 인장강도와 탄성계수 와 같은 중요한 역학적 변수가 고려되지 않는 단점이 있다. 한계평형 해석에 사용 되는 인자로는 사면과 불연속면의 특성 및 수압이 있다. 사면 특성에서는 단위중 량, 사면의 윗면경사, 경사방향, 각 단의 높이, 경사 및 소단의 폭 등을 이용하여 사면을 모사하고, 주어진 파괴가능 불연속면 정보에 의해 보다 정확한 파괴블럭의 무게를 적용할 수 있다. 불연속면 강도특성에서는 각 불연속면의 경사방향과 경사 각, 점착력 및 마찰각이 있다. 현장계측 및 실내시험 결과와 그 종류에 따라 불연 속면의 전단강도를 정의할 수 있도록 모델종류를 선택할 수 있다.

본 연구에서는 현장조사를 통해 얻은 값을 토대로 SoilWorks 프로그램 에 적 용하여 한계평형 해석을 실시하였다. 불연속면의 모델은 Mohr-Coulomb 모델이며, 사면 특성 값으로는 단위중량 26.7 ton/m<sup>3</sup>, 사면의 윗면경사는 10°, 경사방향 92°이 며, 각 단의 높이 15 m, 경사 66°, 소단 폭은 5 m로 불연속면 특성 값은 점착력 3 tonf/m<sup>2</sup>, 마찰각 35°이다(표 3.3). 또한 각 구간의 절취사면에 대한 높이, 길이 및 소단 등의 실측 자료를 얻기 위하여 Leica사의 DISTO <sup>M</sup> D 레이저 거리 측정기를 사용하였다.(표 3.4)

단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	윗면경사 (°)	경사방향 (°)	높이 (m)
26.7	10	92	15
경사 (°)	소단 폭 (m)	점착력 (tonf/m²)	마찰각 (°)
66	5	3	35

표 3.3 한계평형 해석을 위해 적용된 입력자료







그림 3.1 레이저 거리 측정기

표 3.4 레이저 거리 측정기로 측정된 사면의 크기

사면의 높이 (m)	사면의 길이 (m)	소단의 폭 (m)
30	70	5





#### 3.3 강도감소법

강도감소법은 점착력과 내부마찰각을 서서히 감소시켜 가면서, 계산이 수렴되 지 않는 지점까지 해석을 수행하여 그 시점을 사면의 파괴로 간주하고, 그때의 최 대 강도 저하율을 사면의 최소안전율로 정하는 방법이다. 이 방법은 실제와 가까운 파괴 형상을 구현할 수 있고, 파괴면을 미리 가정할 필요가 없으며, 파괴까지의 변 형 형상 과정을 알 수 있다. 또한 파괴 후의 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 현 장 조건을 좀 더 잘 반영할 수 있다.

본 연구에서는 SoilWorks 상용프로그램을 이용하여 강도감소법에 의한 수치해 석을 실시하였다. 수치해석을 위해 필요한 입력자료는 탄성계수 45 GPa, 포아송비 0.15, 습윤단위중량 2.1 tonf/m<sup>3</sup>, 포화단위중량 2.2 tonf/m<sup>3</sup>, 점착력 18 tonf/m<sup>2</sup>, 내 부마찰각 46°등이며, Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다(표 3.5).

ስትሯ	탄성계수	포아송비	습윤단위중량	포화단위중량
임종	(E, GPa)	( )	$(\gamma, \text{ tonf/m}^3)$	$(\gamma_{sat}, tonf/m^3)$
석회암	45	0.15	2.1	2.2

표 3.5 강도감소 수치해석에 이용된 지반물성 입력자료



#### 3.4 3차원 영상 분석법

무인항공기로 촬영된 영상은 Photoscan 상용프로그램을 이용하여 처리되며, 다 양한 과정을 통해 3차원 영상으로 분석될 수 있다. 3차원 영상 분석을 위한 과정을 정리하면 다음과 같다.

#### 3.4.1 지상기준점 설치 및 좌표 측정

항공사진 측량을 위한 비행계획을 수립한 후 촬영하기에 앞서 연구지역에 4개 의 지상기준점(Ground Control Point)을 설치하고 좌표를 측정하였다. 지상기준점 은 무인항공기에 내재되어있는 GPS의 오차를 보정하기 위해 식별가능한 대공표지 판을 설치해 측정한 좌표를 말한다. 지상기준점은 촬영된 사진들의 한 지점을 기준 점으로 잡고, 다른 사진에서 같은 지점을 찾아 정확도를 올려주는 점이다. Photoscan에서는 최소한 3점 이상의 지상기준점 설치 및 최대한 균등하게 분포시 켜 정확도 향상을 권장하고 있다. 또한 지형의 기복이 심한 지점, 사진 중복도가 부족한 지점은 정확도에 문제가 생길 수 있으므로 이를 고려하여 설치해야 한다.

본 연구에서는 연구지역과 현장의 작업 상황을 고려하여 각 차마다 4 곳을 선 정하여 지상기준점을 설치하고, 좌표를 측정하였다(그림 3.2). 설치된 지상기준점은 항공 사진촬영 시 식별 가능한 크기여야하며, 가로 0.5 m, 세로 0.5 m 크기로 제작 한 대공표식지를 이용하였다. 좌표의 측정은 GARMIN사의 GPSmap 60csx 휴대용 위성 항법 장치를 이용하여 각 지점의 위도, 경도, 고도 좌표를 측정하였다(그림 3.3). 사용된 GPS 장비의 성능 사양은 다음과 같다. 수신기는 12 채널(WAAS 칩내 장), 위성 포착 시간은 웜 스타트 약 1 초, 콜드 스타트 약 38 초, 업데이트 속도는 초당 1 회, DGPS 정확도는 3~5 초이다. WGS84 좌표계를 기준으로 총 4회의 항 공사진이 측량되었으며, 각 회별 지상기준점들의 좌표를 구한 결과는 표 3.6과 같 다. 지상기준점의 정확도는 Photoscan Report에서 평가결과를 확인 할 수 있다.





GCPs		Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
	1	127.309062	34.486913	84.0
1 –]	2	127.310023	34.487563	70.5
174	3	127.310887	34.487692	71.0
	4	127.310774	34.487051	71.0
	1	127.310659	34.487641	57.5
0-5]	2	127.310789	34.487029	57.0
27F	3	127.309070	34.486898	71.0
	4	127.310269	34.487158	57.0
	1	127.309394	34.487861	95.0
0-5]	2	127.310339	34.487158	81.0
<u>ا^د</u>	3	127.311168	34.487253	81.0
	4	127.310928	34.486734	81.0
	1	127.309044	34.4866900	62.0
4-5]	2	127.309363	34.487082	47.5
4 <b>^</b> [	3	127.310380	34.487591	49.5
	4	127.310228	34.487032	48.5

표 3.6 1, 2, 3, 4차 영상 지상기준점 좌표 측정







그림 3.2 (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4차 영상 지상기준점 설치 위치



그림 3.3 GPS 좌표 측정 장비



Collection @ chosun

#### 3.4.2 회전익 무인항공기 항공사진 촬영

#### 비행계획 수립

본 연구에서 항공사진촬영은 DJI사의 Inspire 1 V2 기체를 사용하였다(그림 3.4). DJI Inspire 1 V2는 총 4 개의 날개를 가진 쿼드콥터로 지능형 GLONASS와 GPS 의 시스템을 활용하여 기체의 위치와 더불어 안정적인 호버링이 가능하며, IMU가 내장되어 있어 작은 기울기의 변화와 움직임도 관찰할 수 있다. 이는 기체를 신속 하게 반응하게 하여 항상 일정한 자세를 유지할 수 있게 한다. 또한 배터리가 부족 하거나 신호를 잃어버리면 자동으로 기체를 날렸던 곳, 홈(Home)으로 돌아와 기체 가 떨어지거나 분실 할 가능성을 줄였다. Inspire 1 V2는 수동모드와 자동모드 총 2 가지의 비행모드를 지원한다. 수동모드는 조종기를 이용하여 운전자가 직접 기체 를 조종한다. 자동모드는 스마트폰이나 태블릿 PC를 조종기에 연결한 후, 어플리케 이션을 이용하여 비행경로 설정, 고도 설정, 기체의 속도조절, 촬영범위, 사진 중복 도 등 다양한 기능을 갖고 있어 측량 또는 계획된 비행에 보다 적합하다(표 3.7).

무인항공기를 이용하여 항공사진촬영에 앞서 연구지역의 비행계획을 수립하였 다. 비행계획 수립에는 무인항공기의 경로 설정 및 촬영 기법 등이 있다. 경로 및 촬영 기법에 따라 촬영 대상의 범위가 결정되므로, 먼저 현장을 확인하여 위험요소 및 촬영하고자 하는 연구대상의 크기 등을 확인해야 한다. 또한 사진 촬영 기법에 따라 대상의 3D 모델 구현의 정확도 또한 영향을 미치게 되므로, 촬영 기법을 결 정하여야 한다. Photoscan은 다음과 같은 사진 촬영 기법을 요구하고 있다. 첫째, 사진의 수는 다양한 각도의 사진이 많으면 좋다. 둘째, 최소한 두 개의 사진으로부 터 보이는 지오메트리만을 이용하여 재구성하기 때문에 블라인드 존(Blind-Zones) 의 수는 최소화 되어야 한다. 셋째, 최소한 60 %의 중첩이 필요하다. 이러한 사진 획득 방법은 다음과 같은 예를 통해서 확인 할 수 있다(그림 3.5).

본 연구는 독립된 객체가 아닌 넓고, 고도차가 있는 지면을 대상으로 촬영을 하기 때문에 3D 모델 구현 시 정확도를 올리기 위해 일정한 높이에서 횡방향과 종 방향의 경로를 중첩하는 촬영 기법을 선택하였다. 항공사진촬영을 수행한 비행코스 는 다음과 같다(그림 3.6).





그림 3.4 DJI사 Inspire 1 V2 무인항공기 구성

표	3.7	무인항공기	자동모드와	수동모드의	기능
	· · ·			10-1	, 0

	수동모드	자동모드
비행경로 설정		가능
중복도 설정		가능
기체속도 설정	조종자에 의해 결정	가능
고도 설정		가능
촬영범위 설정		가능

![](_page_28_Picture_5.jpeg)

![](_page_29_Picture_0.jpeg)

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

그림 3.5 적절한 사진 획득 방법 예시(Photoscan tutorial, 2016)

![](_page_29_Picture_3.jpeg)

![](_page_30_Picture_0.jpeg)

![](_page_30_Picture_1.jpeg)

그림 3.6 연구지역 무인항공기 영상촬영 경로, (a) 연구지역 전경, (b) 전체 경로, (c) 횡방향 경로, (d) 종방향 경로

#### 카메라 검정

항공사진측량에서 항공측량 전용 카메라가 아닌 일반인들이 사용하는 카메라가 아 닌 일반 카메라를 사용하는 경우는 카메라의 초점 거리나 렌즈 왜곡량 등이 제공 되지 않거나, 실제 값과 다른 경우가 많다. 따라서 무인항공기를 활용하여 사진(영 상) 촬영을 할 경우에는 반드시 카메라에 대한 왜곡량을 보정하여 정확한 카메라 검증(Camera Calibration)을 해야 한다. 카메라 렌즈 왜곡에는 대표적으로 방사왜 곡, 접선왜곡이 있으며 이러한 왜곡을 보정한 값을 산출해야 한다. 방사왜곡(Radial

![](_page_30_Picture_6.jpeg)

![](_page_31_Picture_0.jpeg)

distortion)은 렌즈의 곡률의 왜곡으로서, 렌즈의 연마 과정 등에서 발생하는 왜곡이 다. 접선왜곡(Tangential Distortion)은 렌즈를 조합할 때 렌즈의 중심이 정확히 맞 지 않아서 발생하며, 방사왜곡에 비해 무시할 수 있을 정도로 왜곡량이 매우 적다 (이강원 외, 2016).

본 연구의 항공사진촬영에 사용된 카메라는 중국 DJI사의 Zenmuse X3로 1200 만 화소의 해상도를 갖고 있다. Zenmuse X3와 카메라 짐벌의 성능은 다음 표 3.8 과 표 3.9와 같다. 항공측량 전용 카메라가 아닌 일반 카메라인 Zenmuse X3는 왜 곡량을 보정하기 위해 카메라 검정(Camera calibration)을 실시해야한다. 카메라 검 정은 Agisoft Lens 64-bit를 이용하여 실시하였다(그림 3.7). 소프트웨어를 이용해 나온 카메라 왜곡정도를 계산한 결과와 방사왜곡, 접선왜곡을 나타내는 그래프는 다음 그림 3.8과 같다.

카메라	이름	Zenmuse X3
	모델	FC350
	해상도	1200만 화소
	시야각(FOV)	94°
	CMOS 센서	SONY EXMOR 1/2.3"
	렌즈	f/2.8 (20mm equivalent)
		9군 9요소
		비구면 렌즈요소
		왜곡 방지필터
		UV 필터
	사진촬영모드	단일촬영, 연속촬영, 타임랩스
	작동온도	0~40°

표 3.8 Zenmuse X3 카메라 특징

표 3.9 카메라 짐벌 특징

짐벌	모델	Zenmuse X3 짐벌
	출력(카메라 포함)	정지 : 9 W / 동작시 : 11 W
	사용전류	정치 : 750 mA / 동작시 : 900mA
	각도 진동범위	± 0.03°
	고정방식	탈착식
	조종가능 범위	피치 : -90° ~ +30°, 팬 : ± 320°
	기계적 범위	피치 : -125° ~ +45°, 팬 : ± 330°
	최대 조종가능 속도	피치 : 120°/s, 팬 : 180°/s

![](_page_31_Picture_8.jpeg)

![](_page_32_Picture_0.jpeg)

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

그림 3.7 Agisoft lens 64-bit를 활용한 카메라 검정

![](_page_32_Figure_3.jpeg)

그림 3.8 방사왜곡과 접선왜곡 그래프

![](_page_32_Picture_6.jpeg)

![](_page_33_Figure_0.jpeg)

#### 항공사진 촬영

본 연구에서는 항공사진촬영 시 일정한 고도 및 간격의 사진 촬영을 위해 Fix 4D Capture 어플리케이션을 사용하여 자동모드로 촬영을 실시하였다. 자동모드를 이용 한 비행 시, 촬영범위는 기체의 배터리와 밀접한 관계가 있으므로 가능한 빠른 작 업을 위해 최대 범위를 지정하였다. 이 때 사진의 중복도는 80 %, 고도는 70 m로 설정하였다. 사진의 중복도는 「항공사진측량 작업규정」 제20조 항공사진의 중복 도(국토지리정보원, 2013)에 명시된바와 같이 무인항공기를 이용한 항공사진측량에 서는 비행기보다 낮은 고도로 인한 바람 등의 영향으로 기체의 불안정성이 발생하 기 쉽기 때문에 사진과 사진사이의 중복(Overlap)을 종 중복도 70 ~ 90 %, 횡 중 복도 60 % 이상으로 설정하는 것이 일반적이다(이강원 외, 2016).

무인항공기는 GPS 등을 이용한 항법시스템을 이용하기 때문에 항상 지구자기 장 지수를 확인하였다. GPS 등의 항법시스템은 지구자기장에 의한 교란으로 인하 여 GPS 장애가 발생할 가능성은 가급적 피하였다. 지구자기장 지수는 Ready to fly 스마트폰 어플리케이션을 이용하였다. 이는 국토교통부와 (사)한국드론협회가 공동으로 개발한 스마트폰 어플리케이션으로 전국 비행금지구역, 관제권 등 공역현 황 및 지역별 기상정보, 일출·일몰시각, 지역별 비행허가 소관기관과 연락처 등을 간편하게 조회할 수 있다. 또한, 과학기술정보통신부 국립전파연구원의 우주전파센 터의 정보를 받아 확인 하는 것으로 지구자기장 지수가 5가 넘으면 전력, 위성, 통 신 장애등이 발생 할 염려가 있으므로 5를 넘지 않는 선에서 작업을 수행하였고, 비행제한구역을 확인 한 후 작업을 수행하였다. 큰 원은 비행금지구역으로 공익 목 적 등으로만 가능하고, 작은 원은 관제권으로써 비행장과 그 주변 공역으로 시계비 행 및 계기비행 항공기에 대하여 항공교통관제업무를 제공하는 구역이다(그림 3.9).

![](_page_33_Picture_4.jpeg)

![](_page_34_Picture_0.jpeg)

![](_page_34_Figure_1.jpeg)

그림 3.9 국내 비행제한구역 표시(국토교통부, 2013)

![](_page_34_Picture_3.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

#### 3.4.3 항공사진 모델링

무인항공기로 촬영된 항공사진은 Agisoft사의 Photoscan 프로그램을 이용하여 3D 모델링을 실시한다. Photoscan의 3D 모델링 과정은 그림 3.10와 같다. 항공사진 들의 3D 모델링을 위해 먼저 촬영된 항공사진들을 Photoscan으로 불러온다. 이 때 각 사진들의 품질을 확인하고, 0.5 이하인 사진들인 낮은 품질의 사진들은 이후 처 리하게 될 작업 시 부정확한 결과를 도출하기 때문에 비활성화를 시켜야한다. 사진 정렬(Align photos)은 각 사진에서 중요하게 고려되어야 할 객체 점들의 상한(Key point limit)과, 각 사진에 대한 매칭 점들의 상한(Tie point limit)을 설정한다. 이는 이후 처리하게 되는 조밀 점군(Dense point cloud)의 기초 자료로 활용된다. 사진 정렬이 완료되면 Photoscan내에서 예측된 카메라 위치들에 기초하여 각 카메라에 대한 심도 정보(Depth information)를 계산한다. 각 카메라에서 계산된 심도 정보는 조밀 점군(Dense point cloud)에 적용된다. 이렇게 생성된 조밀 점군으로부터 메쉬 를 만들고(Building mesh), 3D 모델 텍스처(Building model texture), 고해상도의 방대한 3D 모델들의 가시화를 가능하게 하는 타일 모델(Building tiled model)을 만 들 수 있으며, 수치지형모델(Building digital elevation model), 수치지형모델 (Digital terrain model), 정사영상(Orthomosaic) 등을 만들 수 있다.

본 연구에서는 총 4차에 걸쳐 항공사진을 촬영하였다. 각 차별로 촬영한 사진 의 수는 촬영범위에 따라 조금씩 다르며, GCP의 위치 역시 방문한 날의 현장상황 에 맞추어 설치하였다. 또한, 촬영된 항공사진들 중 사진이 대부분이 수목으로 이 루어져 작업에 불필요한 사진들도 포함되어있다(표 3.10). 불필요한 사진들 제외한 사진들은 사진 정렬 기능에 의해 점군을 형성하고, 이를 기반으로 조밀 점군을 형 성하였다. 1차~4차의 모든 작업들은 Photoscan에서 지형이 대상일 경우 권장하고 있는 Aggressive depth filtering을 적용하였다.

![](_page_35_Picture_4.jpeg)

![](_page_35_Picture_5.jpeg)




그림 3.10 촬영 항공사진 영상의 모델링 순서

표 3.10 각 회별 항공사진의 수

	1차	2차	3차	4차
촬영된 사진의 수	349	335	310	300
비활성화한 사진의 수	7	8	4	6





#### 3.4.4 3차원 영상 분석

일반적으로 사면 안정성을 평가하기 위해서는 현장조사를 통해 대상 사면에 대 한 정보를 획득해야 한다. 하지만 대규모 사면 또는 조사가 이루어지지 않은 사면 의 경우 이를 실측하기란 어려운 일이며, 조사가 가능하여도 측정방법에 따라 오차 가 생기거나, 측정에 오랜 시간이 소요된다. 채굴량 산정 또한 마찬가지이다. 대규 모 채굴장에서 발파를 통해 얻어지는 석회암의 채굴량은 금전적인 부분과 직접적 으로 연관되며, 한 번에 많은 양의 석회암의 부피를 정확하게 계산하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 3D 모델링 작업 시 완료된 DEM, 3D 모델링을 분석하여 대 상 사면의 단면분석, 위험도 분석 및 발파 후 석회암 채굴량을 측정하였다.

Photoscan에서는 내가 원하는 지점을 선택하여 면적, 부피, 단면, 위치 좌표 등 을 확인 할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서는 실측하지 못하거나, 측정하기 어려 운 대상의 정보를 획득하였다.

단면도 분석은 레이저 거리 측정기로 실측하기 어려운 소단 폭을 분석하기 위 해 실시하였다. 사면의 단면을 분석하기 위해서 사면을 대표할 수 있는 단면을 선 정하였다. 대표 단면은 현장조사 시 사면의 경사를 측정한 곳으로 설정하고, 그 위 치를 기준으로 사면의 단면방향으로 기준선을 잡아 측정하였다. 단면도에서 사면의 소단부분의 굴곡은 소단에 존재하는 식물들의 상단부분이 촬영되어 평평하지 않고 고도가 평평한 부분보다 높은 것처럼 보인다(그림 3.11).

채굴량 분석은 발파 전과 후의 지형차를 이용하여 부피를 계산하였다. 발파 전 의 DEM과, 발파 후의 DEM을 겹쳐 발파 후 지형변화를 확인하고(그림 3.12), 달라 진 지형을 Polyline으로 표시하였다(그림 3.13). 이를 정사영상으로 확인하여 부피 측정이 가능한 폐합된 Polygon을 만들었다(그림 3.14). 위에서 언급 한 것과 같이 Photoscan은 폐합된 Polygon을 DEM내에서 부피, 면적 등의 계산이 가능하므로, 이 기능을 활용하여 부피를 구하였다.







그림 3.11 항공사진측량 단면도



그림 3.12 연구지역 발파 전과 후의 지형 변화







그림 3.13 발파 후 지형변화 표기, (a) Orthomosaic, (b) DEM



그림 3.14 Polygon 변환, (a) Orthomosaic, (b) DEM





# 4. 연구결과

#### 4.1 평사투영법 결과

#### 4.1.1 평사투영의 결과

○○노천 석회석 광산의 절취사면에 대한 안정성 평가하기 위해 대상 사면으 로부터 불연속면의 주향/경사를 측정하였다. 조사한 불연속면의 주향/경사는 모두 45개로 사면조사 시 많이 사용되는 조사선 방법(Scanline method)을 이용하여 측정 하였다. 조사선의 높이는 약 1.5 m로 조사가 가능한 높이 내에서 가능한 많은 불연 속면을 측정하고자 하였다. 조사선 방법으로 조사를 한 결과 불연속면은 N28~ 88°E 와 N28~78°W로 두 방향의 불연속면이 분포하는 것으로 나타났다. 표 3.2는 각 지점에서 측정된 불연속면의 주향/경사를 표시한 것이다.

불연속면에 의한 평사투영 결과는 다음과 같다. 평면파괴의 경우 평면파괴 영 역에 포함된 불연속면은 존재하지만 전체 불연속면 수에 비해 매우 적게 포함되었 다(그림 4.1(a)). 쐐기파괴의 경우 쐐기파괴 영역에 포함된 교차점이 존재해 파괴 양상을 보이지만 전체 교차점에 비해 적게 포함되었다(그림 4.1(b)). 전도파괴의 경 우 전도파괴 영역에 포함된 불연속면이 존재하지 않아 다른 두 파괴유형에 비해 안정한 상태로 나타났다(그림 4.1(c)). 이상의 평사투영 결과만을 고려할 때, 대상 절취사면의 경우 국부적으로 평면파괴와 쐐기파괴 양상을 보이는 구간에 대해서는 추가적으로 지속적인 관찰이 필요하다고 판단된다.





번호	주향/경사	번호	주향/경사
1	N40W/78E	24	N44W/32E
2	N46W/60E	25	N32W/81W
3	N60E/82W	26	N78W/62W
4	N42W/70E	27	N38W/83E
5	N52W/88W	28	N62E/44E
6	N50E/86W	29	N70W/63W
7	N28W/88W	30	N14W/64E
8	N38E/74W	31	N34E/80E
9	N34W/88E	32	N18W/79E
10	N38W/82E	33	N64E/80W
11	N66E/77E	34	N60E/81W
12	N40W/54E	35	N50E/57E
13	N46W/86E	36	N24W/78E
14	N80E/78E	37	N20E/44W
15	N40W/68W	38	N60E/76W
16	N80E/79E	39	N60E/82W
17	N28E/88E	40	N42W/58E
18	N52E/56W	41	N32W/52W
19	N42W/80W	42	N80E/50E
20	N74E/88E	43	N20E/66E
21	N46E/86W	44	N34W/85E
22	N58W/82W	45	N64E/36E
23	N88E/66E		

표 4.1 OO노천 석회석 광산 절취사면에서 측정된 불연속면의 주향과 경사







그림 4.1 ○○노천 석회석 광산의 절취사면에 대한 평사투영 해석 결과, (a) 평면파 괴, (b) 쐐기파괴, (c) 전도파괴





#### 4.2 한계평형법 결과

○○노천 석회석 광산 절취사면을 대상으로 실시한 평사투영해석을 실시하여 파괴가 일어날 가능성이 있는 불연속면을 대상으로 한계평형해석을 실시하여 암반 사면의 안정성을 확인하였다. 불연속면의 최소안전율은 건기 시 1.5, 우기 시 1.2를 기준으로 하였다. 평면파괴에 의한 한계평형해석 검토 시 안전율은 Case 1의 불연 속면은 건기 시 0.992, 우기 시 0.875, Case 2의 불연속면은 건기 시 0.762, 우기 시 0.622로 최소안전율보다 낮게 계산되었다(표 4.2, 그림 4.2). 쐐기파괴에 의한 한계 평형해석 검토 시 안전율은 대부분의 불연속면에서 최소안전율보다 높게 나타났다. 즉, Case 1의 경우 건기 시 7.857, 우기 시 7.337로 안전율보다 높게 계산된 반면 Case 2의 경우 안전율이 건기 시 0.764, 우기 시 0.666으로 최소안전율보다 낮게 나 타났다(표 4.3, 그림 4.3).

표 4	4.2	한계평형법에	의한	평면파괴	검토	결과
-----	-----	--------	----	------	----	----

평면파괴 검토안전율								
	건기 시	우기 시						
Case 1	0.992 < 1.5 : N.G	0.875 < 1.2 : N.G						
Case 2	0.762 < 1.5 : N.G	0.622 < 1.2 : N.G						

#### 표 4.3 한계평형법에 의한 쐐기파괴 검토 결과

쐐기파괴 검토안전율

	건기 시	우기 시
Case 1	7.857 > 1.5 : O.K	7.337 > 1.2 : O.K
Case 2	0.764 < 1.5 : N.G	0.666 < 1.2 : N.G







그림 4.2 한계평형법에 의한 Case 1과 2의 평면파괴 검토 결과







그림 4.3 한계평형법에 의한 Case 1과 2의 쐐기파괴 검토 결과





## 4.3 강도감소법을 이용한 사면안정해석 결과

SoilWorks 프로그램을 이용하여 강도감소법(SRM)에 의한 사면안정해석을 실 시하였다. 수치해석 시 지반모델은 항공사진촬영을 통해 얻은 단면도를 이용해 사 면의 높이와 폭 등 지반모델의 크기를 결정하였다. 또한 수치해석 시 ISRM에 근거 하여 수행하였다(Duncan and Christopher, 2003 그림 4.4)).

사면안정해석 시 각 시공단계별 사면의 안전율 및 파괴 양상을 확인하기 위하 여 총 3개의 시공단계 원지반, Excavation1, Excavation2로 구성하였다. 원지반에서 사면 상단부 앞을 발파한 Excavation1의 안전율은 3.90, 사면 하단부까지 발파한 Excavation2의 안전율은 3.21로 나타났다. 사면안정 검토에 적용한 허용안전율은 국내 깎기 비탈면의 기준인 건기 시 1.5 이상으로 시공단계 1에서와 시공단계 2에 서 모두 안전함을 보였다. 사면활동형상을 예측하기 위해 최대 전단 변형률(max) 을 확인한 결과 최대값은 8.89467e-004, 최소값은 2.0558e-007으로 사면의 하단부에 집중되는 것으로 나타났다(그림 4.5). 사면의 거동을 확인하기 위해 전체 변위를 확 인한 결과 사면의 1단의 1/3지점에서 가장 크게 발생하였고 이때의 값은 약 2.41 cm로 나타났다. 변위는 수치해석을 통해 얻은 예상 값일 뿐 안전율처럼 일정한 기 준으로 사면을 평가할 수는 없다.



그림 4.4 강도감소법(SRM) 해석을 위한 해석모델

- 36 -

Collection @ chosun





그림 4.5 강도감소법(SRM)으로 구한 최대 전단 변형률



그림 4.6 강도감소법(SRM)으로 구한 전체변위



Collection @ chosun

#### 4.4 3차원 영상 분석법 결과

#### 4.4.1 1차 영상 분석

대상 석회석 광산에 대한1차 항공사진촬영을 실시(2017년 8월 31일)하였다. 항 공사진촬영을 통해 획득한 사진은 총 349장으로 주 대상지역인 광산의 채굴장 및 사면을 대상으로 촬영하였다. 점군 데이터 생성 시 기초가 되는 데이터인 카메라의 중복도는 채굴장 및 사면에서 모두 9장 이상의 사진이 중복되었다. 촬영지역에 무 관하게 촬영되거나 사진의 품질이 0.5이하로 낮은 7장은 자료 처리 작업 시 부정확 한 결과를 도출하기 때문에 이를 제외한 총 342장의 항공사진을 3D 모델링에 이용 하였다. 사진의 중복도 및 카메라의 위치는 다음 그림 4.7과 같다.

항공사진 촬영에 사용된 카메라인 X3의 초점거리는 3.61 mm, 분해능은 4000×3000, Pixel Size는 1.56×1.56 m이다. 사용된 캘리브레이션 계수 및 카메라의 왜곡에 따른 잔상은 다음 표 4.4와 그림 4.8과 같다. 카메라 캘리브레이션을 통해 왜곡도를 줄인 후 측정한 촬영 위치에서의 카메라의 X, Y, Z의 오차는 X(Longitude) 2.92 cm, Y(Latitude) 3.42 cm, Z(Altitude) 1.07 cm로 10 cm 미만이 다. 이는 항공사진 촬영 시 생길 수 있는 오차가 작기 때문에 3차원 모델형성 시 석회석 광산을 정확하게 표현할 수 있게 한다(표 4.5, 그림 4.9). 또한 무인항공기에 내재되어 있는 GPS의 오차를 줄이기 위해 사용된 지상기준점의 위치 및 오차는 표 4.6과 그림 4.10과 같다.

실제 지형 정보 중 구조물, 수목 등을 제외한 지형 부분을 표현하는 수치 모형 으로 3차원 좌표 형태로 지형의 기복을 표현한 수치 표고 모형(DEM)은 그림 4.11 과 같다. DEM은 지형학, 지질학, 측량학 등 다양한 분야에서 활용 되고 있다. 측정 된 최저 표고는 23 m, 최대 표고는 104 m이며, 분해능은 12.6 cm/pix, 포인트 밀도 는 62.5 points/m2로 나타났다.

항공사진촬영을 통해 얻은 3D 모델을 이용하여 위험도 분석을 실시하였다. 위 험한 지역 및 파괴가 일어난 부분을 육안을 통해 식별하고, 불연속면의 빈도수 및 간격 등을 Photoscan을 이용하여 확인하였다. 3D 사면모델의 상단 좌측에 위치한 파란색 줄로 표현한 쐐기파괴 영역과 빨간색 줄로 표현한 사면의 불연속면을 확인 할 수 있다(그림 4.12). 또한 현장의 관리를 위한 하나의 방안으로 무인항공기를 이



용하여 채굴량을 조사하였다. 현장에서 발파에 의한 채굴량은 발파 전과 발파 후의 부피의 차이를 통해 구하였다. 이를 통해 구한 당일 채굴량은 982.975 이다(그 림 4.13).







그림 4.8 FC350을 이용한 1차 영상 이미지 잔상(3.61 mm Focal Length)





	Value	Error	F	Cx	Су	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2331.23	0.15	1.00	0.11	0.02	-0.49	0.08	-0.25	0.34	-0.10	-0.42	-0.18
Сх	-32.5741	0.038		1.00	-0.12	0.01	-0.03	-0.10	-0.02	0.06	0.52	0.26
Су	-8.76546	0.066			1.00	-0.43	-0.25	0.17	-0.03	0.05	0.16	-0.45
B1	1.2918	0.06				1.00	0.11	-0.11	0.01	-0.10	0.02	0.22
B2	0.914811	0.045					1.00	-0.11	0.04	-0.03	-0.15	0.24
K1	-0.128931	3.8e-05						1.00	-0.91	0.87	0.24	-0.36
K2	0.107032	7.3e-05							1.00	-0.95	-0.26	0.03
K3	-0.014033	4.4e-05								1.00	0.18	-0.12
P1	4.11675e-05	6.1e-06									1.00	-0.03
P2	0.000421119	5.9e-06										1.00

표 4.4 1차 영상 보정계수 및 상관행렬







그림 4.9 Photoscan에서의 1차 영상 Z 좌표 오차 (Z 오차는 타원의 색으로, X, Y 오차는 타원 모양으로 구별, 추정된 카메라 위치는 검은 점으로 표시)

표 4.5 1차 영상 카메라 위치 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	전체 오차 (cm)
카메라 위치 오차	2.92	3.42	1.07	4.62







그림 4.10 1차 영상 지상기준점 좌표 오차

표 4.6 1차 영상 지상기준점 좌표 오차

	X 오차(cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	합 (cm)	사진 (pix)
GCP_1	-19.5025	-8.5371	-9.6638	23.3798	0.080 (41)
GCP_2	2.9084	3.2369	-28.3102	28.6427	0.087 (53)
GCP_3	-5.4011	12.1072	9.6161	16.3776	0.079 (42)
GCP_4	-9.0518	9.9933	-3.9098	14.0388	0.083 (53)
하	11.1794	9.0804	15.8320	21.4029	0.083





그림 4.11 1차 영상 대상지역 DEM



그림 4.12 Photoscan을 이용한 1차 영상 절취사면 위험도 분석







그림 4.13 1차 채굴량 측정 위치 및 채굴량





#### 4.4.2 2차 영상 분석

2017.09.09 전라남도 고흥 ○○노천 석회석 광산을 대상으로 항공사진촬영을 실 시하였다. 항공사진촬영을 통해 획득한 사진은 총 343장으로 주 대상지역인 광산의 채굴장 및 사면을 대상으로 촬영하였다. 점군 데이터 생성 시 기초가 되는 데이터 인 카메라의 중복도는 채굴장 및 사면에서 모두 9장 이상의 사진이 중복되었다. 촬 영지역에 무관하게 촬영되거나 사진의 품질이 0.5이하로 낮은 7장은 자료 처리 작 업 시 부정확한 결과를 도출하기 때문에 이를 제외한 총 335장의 항공사진을 3D 모델링에 이용하였다. 사진의 중복도 및 카메라의 위치는 다음 그림 4.14와 같다.

항공사진 촬영에 사용된 카메라인 X3의 경우 초점거리는 3.61 mm, 분해능은 4000×3000, Pixel Size는 1.56×1.56 m이다. 사용된 캘리브레이션 계수 및 카메라의 왜곡에 따른 잔상은 다음 표 4.4과 그림 4.15와 같다. 카메라 캘리브레이션을 통해 왜곡도를 줄인 후 측정한 촬영 위치에서의 카메라의 X, Y, Z의 오차는 X(Longitude) 2.74 cm, Y(Latitude) 3.57 cm, Z(Altitude) 1.48 cm로 10 cm 미만이 다. 이는 항공사진 촬영 시 생길 수 있는 오차가 작기 때문에 3차월 모델형성 시 석회석 광산을 정확하게 표현할 수 있게 한다(표 4.8, 그림 4.16). 또한 무인항공기 에 내재되어 있는 GPS의 오차를 줄이기 위해 사용된 지상기준점의 위치 및 오차 는 표 4.9와 그림 4.17과 같다.

실제 지형 정보 중 구조물, 수목 등을 제외한 지형 부분을 표현하는 수치 모형 으로 3차원 좌표 형태로 지형의 기복을 표현한 수치 표고 모형(DEM)은 그림 4.18 과 같다. DEM은 지형학, 지질학, 측량학 등 다양한 분야에서 활용 되고 있다. 측정 된 최저 표고는 11 m, 최대 표고는 97 m이며, 분해능은 1.6 m/pix, 포인트 밀도는 0.391 points/m2로 나타났다.

항공사진촬영을 통해 얻은 3D 모델을 이용하여 위험도 분석을 실시하였다. 3D 사면모델의 상단 좌측에 위치한 파란색 줄로 표현한 쐐기파괴 영역과 빨간색 줄로 표현한 사면의 불연속면, 노란색 원의 영역에서 변질대를 확인 할 수 있다(그림 4.19). 또한 현장의 관리를 위한 하나의 방안으로 무인항공기를 이용하여 채굴량을 조사하였다. 현장에서 발파에 의한 채굴량은 발파 전과 발파 후의 부피의 차이를 통해 구하였다. 이를 통해 구한 당일 채굴량은 1100.9 m 이다(그림 4.20).







그림 4.14 2차 영상 카메라 위치 및 중복도



그림 4.15 FC350을 이용한 2차 영상 이미지 잔상(3.61 mm Focal Length)





	Value	Error	F	Сх	Су	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2330.33	0.16	1.00	0.09	-0.10	-0.50	0.04	-0.35	0.37	-0.12	-0.44	-0.11
Сх	-32.3041	0.037		1.00	-0.09	0.00	-0.06	-0.06	-0.04	0.08	0.57	0.19
Су	-8.09867	0.059			1.00	-0.35	-0.20	0.13	-0.05	0.03	0.12	-0.37
B1	1.2942	0.053				1.00	0.07	-0.04	-0.02	-0.08	0.12	0.17
B2	0.706131	0.041					1.00	-0.06	0.03	-0.03	-0.15	0.20
K1	-0.129159	3.7e-05						1.00	-0.93	0.86	0.23	-0.24
K2	0.107474	7.5e-05							1.00	-0.95	-0.25	0.01
K3	-0.0144305	4.6e-05								1.00	0.16	-0.07
P1	0.000117694	6.2e-06									1.00	0.02
P2	0.00045584	4.4e-06										1.00

### 표 4.7 2차 영상 보정계수 및 상관행렬







그림 4.16 Photoscan에서의 2차 영상 Z 좌표 오차 (Z 오차는 타원의 색으로, X, Y 오차는 타원 모양으로 구별, 추정된 카메라 위치는 검은 점으로 표시)

표 4.8 2차 영상 카메라 위치 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	전체 오차 (cm)
카메라 위치 오차	2.74	3.57	1.48	4.74







그림 4.17 2차 영상 지상기준점 좌표 오차

표 4.9 2차 영상 지상기준점 좌표 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	합 (cm)	사진 (pix)
GCP_1	-1.4607	1.8074	14.2564	14.4446	0.099 (24)
GCP_2	5.8420	-12.8315	7.6082	16.0206	0.057 (19)
GCP_3	-8.7545	-6.0127	-30.2562	32.0660	0.049 (17)
GCP_4	-8.0700	7.4063	-6.9132	12.9526	0.102 (21)
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	6.6714	8.0455	17.4954	20.3796	0.083







그림 4.18 2차 영상 대상지역 DEM



그림 4.19 Photoscan을 이용한 2차 영상 절취사면 위험도 분석







그림 4.20 2차 채굴량 측정 위치 및 채굴량





#### 4.4.3 3차 영상 분석

2017.09.14 전라남도 고흥 ○○노천 석회석 광산을 대상으로 항공사진촬영을 실 시하였다. 항공사진촬영을 통해 획득한 사진은 총 310장으로 주 대상지역인 광산의 채굴장 및 사면을 대상으로 촬영하였다. 점군 데이터 생성 시 기초가 되는 데이터 인 카메라의 중복도는 채굴장 및 사면에서 모두 9장 이상의 사진이 중복되었다. 촬 영지역에 무관하게 촬영되거나 사진의 품질이 0.5이하로 낮은 7장은 자료 처리 작 업 시 부정확한 결과를 도출하기 때문에 이를 제외한 총 306장의 항공사진을 3D 모델링에 이용하였다. 사진의 중복도 및 카메라의 위치는 다음 그림 4.21과 같다.

항공사진 촬영에 사용된 카메라인 X3의 경우 초점거리는 3.61 mm, 분해능은 4000×3000, Pixel Size는 1.56×1.56 m이다. 사용된 캘리브레이션 계수 및 카메라의 왜곡에 따른 잔상은 다음 표 4.10과 그림 4.22와 같다. 카메라 캘리브레이션을 통해 왜곡도를 줄인 후 측정한 촬영 위치에서의 카메라의 X, Y, Z의 오차는 X(Longitude) 4.50 cm, Y(Latitude) 5.86 cm, Z(Altitude) 1.91 cm로 10 cm 미만이 다. 이는 항공사진 촬영 시 생길 수 있는 오차가 작기 때문에 3차월 모델형성 시 석회석 광산을 정확하게 표현할 수 있게 한다(표 4.11, 그림 4.23). 또한 무인항공기 에 내재되어 있는 GPS의 오차를 줄이기 위해 사용된 지상기준점의 위치 및 오차 는 표 4.12와 그림 4.24와 같다.

실제 지형 정보 중 구조물, 수목 등을 제외한 지형 부분을 표현하는 수치 모형 으로 3차원 좌표 형태로 지형의 기복을 표현한 수치 표고 모형(DEM)은 그림 4.25 와 같다. DEM은 지형학, 지질학, 측량학 등 다양한 분야에서 활용 되고 있다. 측정 된 최저 표고는 30 m, 최대 표고는 123 m이며, 분해능은 27.7 m/pix, 포인트 밀도 는 13 points/m2로 나타났다.

항공사진촬영을 통해 얻은 3D 모델을 이용하여 위험도 분석을 실시하였다. 3D 사면모델의 상단 좌측에 위치한 파란색 줄로 표현한 쐐기파괴 영역과 빨간색 줄로 표현한 사면의 불연속면을 확인 할 수 있다(그림 4.26). 또한 현장의 관리를 위한 하나의 방안으로 무인항공기를 이용하여 채굴량을 조사하였다. 현장에서 발파에 의 한 채굴량은 발파 전과 발파 후의 위치 데이터의 차이를 통해 구하였다. 이를 통해 구한 당일 채굴량은 762.556 m 이다(그림 4.27).









그림 4.22 FC350을 이용한 3차 영상 이미지 잔상(3.61 mm Focal Length)





	Value	Error	F	Сх	Су	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2326.54	0.31	1.00	0.13	-0.05	-0.48	-0.01	-0.38	0.39	-0.12	-0.49	-0.12
Сх	-33.4944	0.067		1.00	-0.13	0.01	-0.01	-0.09	-0.02	0.08	0.47	0.24
Су	-6.17681	0.11			1.00	-0.45	-0.22	0.15	-0.04	0.04	0.12	-0.41
B1	0.700369	0.1				1.00	0.11	-0.04	-0.04	-0.07	0.12	0.19
B2	0.148785	0.072					1.00	-0.06	0.02	-0.04	-0.11	0.22
K1	-0.127475	6.9e-05						1.00	-0.93	0.86	0.24	-0.25
K2	0.105739	0.00013							1.00	-0.94	-0.27	0.01
K3	-0.0134851	8e-05								1.00	0.16	-0.08
P1	0.000183524	1.1e-05									1.00	0.05
P2	0.000131546	8.6e-06										1.00

#### 표 4.10 3차 영상 보정계수 및 상관행렬







그림 4.23 Photoscan에서의 3차 영상 Z 좌표 오차 (Z 오차는 타원의 색으로, X, Y 오차는 타원 모양으로 구별, 추정된 카메라 위치는 검은 점으로 표시)

표 4.11 3차 영상 카메라 위치 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	전체 오차 (cm)
카메라 위치 오차	4.50	5.86	1.91	7.63







그림 4.24 3차 영상 지상기준점 좌표 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	합 (cm)	사진 (pix)
GCP_1	-0.5292	-1.0023	0.6268	1.2952	0.141 (22)
GCP_2	-0.7044	0.6495	-1.5850	1.8521	0.196 (30)
GCP_3	2.9315	-1.6217	-0.3390	3.3673	0.109 (25)
GCP_4	-1.8361	2.4213	1.8057	3.5348	0.088 (6)
ਨੀ- ਪ	1.7847	1.5747	1.2530	2.6898	0.153

표 4.12 3차 영상 지상기준점 좌표 오차











그림 4.26 Photoscan을 이용한 3차 영상 절취사면 위험도 분석







그림 4.27 3차 채굴량 측정 위치 및 채굴량





#### 4.4.4 4차 영상 분석

2017.09.21 전라남도 고흥 ○○노천 석회석 광산을 대상으로 항공사진촬영을 실 시하였다. 항공사진촬영을 통해 획득한 사진은 총 300장으로 주 대상지역인 광산의 채굴장 및 사면을 대상으로 촬영하였다. 점군 데이터 생성 시 기초가 되는 데이터 인 카메라의 중복도는 채굴장 및 사면에서 모두 9장 이상의 사진이 중복되었다. 촬 영지역에 무관하게 촬영되거나 사진의 품질이 0.5이하로 낮은 7장은 자료 처리 작 업 시 부정확한 결과를 도출하기 때문에 이를 제외한 총 294장의 항공사진을 3D 모델링에 이용하였다. 사진의 중복도 및 카메라의 위치는 다음 그림 4.28과 같다.

항공사진 촬영에 사용된 카메라인 X3의 경우 초점거리는 3.61 mm, 분해능은 4000×3000, Pixel Size는 1.56×1.56 m이다. 사용된 캘리브레이션 계수 및 카메라의 왜곡에 따른 잔상은 다음 표 4.13과 그림 4.29와 같다. 카메라 캘리브레이션을 통해 왜곡도를 줄인 후 측정한 촬영 위치에서의 카메라의 X, Y, Z의 오차는 X(Longitude) 9.52 cm, Y(Latitude) 9.47 cm, Z(Altitude) 7.29 cm로 10 cm 미만이 다. 이는 항공사진 촬영 시 생길 수 있는 오차가 작기 때문에 3차월 모델형성 시 석회석 광산을 정확하게 표현할 수 있게 한다(표 4.14, 그림 4.30). 또한 무인항공기 에 내재되어 있는 GPS의 오차를 줄이기 위해 사용된 지상기준점의 위치 및 오차 는 표 4.15와 그림 4.31과 같다.

실제 지형 정보 중 구조물, 수목 등을 제외한 지형 부분을 표현하는 수치 모형 으로 3차원 좌표 형태로 지형의 기복을 표현한 수치 표고 모형(DEM)은 그림 4.32 와 같다. DEM은 지형학, 지질학, 측량학 등 다양한 분야에서 활용 되고 있다. 측정 된 최저 표고는 0 m, 최대 표고는 100 m이며, 분해능은 12.1 m/pix, 포인트 밀도는 68.5 points/m2로 나타났다.

항공사진촬영을 통해 얻은 3D 모델을 이용하여 위험도 분석을 실시하였다. 위 험한 지역 및 파괴가 일어난 부분을 육안을 통해 식별하고, 불연속면의 빈도수 및 간격 등을 Photoscan을 이용하여 확인하였다. 3D 사면모델의 상단 좌측에 위치한 파란색 줄로 표현한 쐐기파괴 영역과 빨간색 줄로 표현한 사면의 불연속면을 확인 할 수 있다(그림 4.33). 현장의 관리를 위한 하나의 방안인 무인항공기를 이용하여 채굴량 산정은 2017.09.21의 경우 현장 상황에 의해 항공사진촬영을 하지 못하여 측정하지 못하였다.







그림 4.28 4차 영상 카메라 위치 및 중복도



그림 4.29 FC350을 이용한 4차 영상 이미지 잔상(3.61 mm Focal Length)






	Value	Error	F	Cx	Су	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2335.28	0.21	1.00	0.13	-0.02	-0.30	0.05	-0.36	0.52	-0.13	-0.62	-0.22
Сх	-32.5289	0.035		1.00	-0.16	-0.01	0.04	-0.28	0.06	-0.03	0.37	0.36
Су	-8.3541	0.05			1.00	-0.22	-0.18	0.20	-0.03	0.07	0.08	-0.40
B1	1.12554	0.052				1.00	0.04	-0.04	-0.02	-0.07	0.05	0.06
B2	0.447555	0.04					1.00	-0.09	0.05	-0.05	-0.07	0.22
K1	-0.128971	4e-05						1.00	-0.85	0.82	0.27	-0.37
K2	0.107622	7.1e-05							1.00	-0.90	-0.37	-0.04
K3	-0.0140202	4e-05								1.00	0.16	-0.14
P1	2.77527e-06	6e-06									1.00	0.12
P2	0.000437139	4e-06										1.00

표 4.13 4차 영상 보정계수 및 상관행렬







그림 4.30 Photoscan에서의 4차 영상 Z 좌표 오차 (Z 오차는 타원의 색으로, X, Y 오차는 타원 모양으로 구별, 추정된 카메라 위치는 검은 점으로 표시)

표 4.14 4차 영상 카메라 위치 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	전체 오차 (cm)
카메라 위치 오차	9.52	9.47	7.29	15.28









그림 4.31 4차 영상 지상기준점 좌표 오차

	X 오차 (cm)	Y 오차 (cm)	Z 오차 (cm)	합 (cm)	사진 (pix)
GCP_1	11.2555	-3.7678	4.1329	12.5683	0.053 (17)
GCP_2	0.3572	-8.5813	-22.6511	24.2248	0.134 (25)
GCP_3	4.6257	-6.4592	12.7651	15.0354	0.102 (24)
GCP_4	17.0769	-15.8023	5.8149	23.9822	0.155 (19)
하. 日	10.4861	9.7374	13.4807	19.6597	0.119

표 4.15 4차 영상 지상기준점 좌표 오차







그림 4.32 4차 영상 대상지역 DEM



그림 4.33 Photoscan을 이용한 4차 영상 절취사면 위험도 분석







## 5. 결론

본 연구는 제 4차 산업과 융합된 기술로서 무인항공기인 드론을 이용하여 OO 노천 석회석 광산의 절취사면 안정성 평가를 위한 최적의 모니터링 기법을 제시하 는데 있다. 이를 위하여, 현장조사를 통해 측정된 불연속면 자료를 기존의 방법과 수치해석적 방법을 이용하여 분석하였다. 또한 DJI Inspire 1 V2 무인항공기를 이 용하여 획득한 4차분의 촬영된 영상을 Agisoft사의 Photoscan을 통해 3차원 영상 분석을 실시하여 모니터링, 사면안정해석, 위험도 분석, 채굴량 분석 등을 각각 실 시하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

대상지역 절취사면에서 측정된 45개의 불연속면 자료를 이용하여 평사투영법에 의해 검토한 결과, 평면파괴는 2개에서, 쐐기파괴는 167개의 교차선이 존재하는 것 으로 나타나 파괴 가능성이 있은 것으로 나타났다. 반면, 전도파괴의 경우 파괴영 역에 속한 불연속면의 수가 존재하지 않아 안정한 것으로 나타났다. 따라서 파괴 가능성이 있는 평면파괴와 쐐기파괴에 대한 주기적인 관찰이 필요하다고 판단된다.

평사투영해석 결과에 근거하여 평면파괴와 쐐기파괴에 대한 한계평형법에 의한 검토을 실시한 결과, 평면파괴의 경우 Case 1의 건기와 우기 시 안전율은 0.992와 0.875, Case 2에서는 건기 시 0.762, 우기 시 0.622로 나타나 두 지점 모두에서 불 안정한 것으로 나타났다. 쐐기파괴의 경우 Case 1의 건기 및 우기 시 안전율은 7.857과 7.337로 안정한 반면 Case 2에서는 건기 시 0.764, 우기 시 0.666로 불안정 한 것으로 나타났다. 결과적으로 파괴가 있을 것으로 예상되는 평면파괴와 쐐기파 괴 지점에 대한 주기적인 관찰이 필요하다고 판단된다.

모니터링, 사면안정, 위험도 분석, 채굴량 분석의 기초자료로 활용하기 위해 3 차원 영상 모델링에 의한 해석모델을 만들어 강도감소법으로 검토한 결과 굴착된 최종 사면의 안전율은 3.21로 안정한 상태를 나타냈다. 사면활동 형상을 예측하기 위해 최대 전단 변형률(<sub>max</sub>)을 확인한 결과 최대값은 8.89467e-004, 최소값은 2.05580e-007로 사면 하단부에 집중되는 것으로 나타났다. 또한 전체 변위는 사면 하단의 1/3 지점에서 최대 2.4 cm로 사면 아래쪽에서 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

무인항공기를 이용한 3차원 영상분석에 의한 모니터링, 사면안정 분석, 위험도 분석, 채굴량 분석을 실시하였다. 총 4차례의 영상촬영에서 지상기준점 오차는 1차 에서 X축 11.7194 cm, Y축 9.0804 cm, Z축 15.8320 cm, 2차에서 X축 6.6714 cm,

- 66 -





Y축 8.0455 cm, Z축 17.4954 cm, 3차에서 X축 1.7847 cm, Y축 1.5747 cm, Z축 1.2530 cm, 그리고 4차에서 X축 10.4861 cm, Y축 9.7374 cm, Z축 13.4807 cm로 나타났다. 즉, 지상기준점 오차는 3차 모니터링에서 가장 작음을 보였으며, 그 오차는 일반적으로 지상기준점에 사용되는 평균 10 cm의 허용가능 범위 내 오차로 3번째 영상촬영 모니터링 방법이 위험도 분석이나 채굴량 분석 등에 있어 가장 적절하다 고 판단된다. 3차원 사면 모델을 분석하여 위험도 분석을 실시한 결과, 1~4차 촬영된 영상으로부터 절리 발달 상태를 육안으로 확인 가능한 것으로 나타났다. 발파 전과 후의 지형변화 차이를 확인하여 채굴량 분석을 실시한 결과 1차 채굴량 982.975 , 2차 채굴량 1100.9  $m^3$ , 3차 채굴량 762.556  $m^3$ 으로 계산되어 모니터링 을 통한 단계별 정량적 채굴량 분석이 가능한 것으로 나타났다.

결론적으로 무인항공기의 주기적인 모니터링을 통하여 OO노천 석회석 광산 절 취사면에 대한 안정성 평가는 가능한 것으로 나타났다. 무인항공기의 현장 모니터 링을 통하여 3D 모델링, DEM, 정사영상, 위험도 분석, 채굴량 분석 등이 가능하고, 기존의 사면안정 해석 방법들과의 비교 및 분석을 통해 보다 효율적인 안정성 평 가가 가능할 것으로 판단된다. 향후 본 연구의 결과는 현장 접근이 어려운 환경에 서의 자료획득이나 단계적인 채굴량 분석과 채굴 계획 등에 유용하게 활용될 것으 로 기대된다. 아울러, 무인항공기 기술은 지질구조 분석, 국토 모니터링, 자연재해 모니터링, 광산재해 모니터링, 광산복원 설계 등의 분야에도 활용성이 클 것으로 기대된다.





## 참 고 문 헌

국토지리정보원, 2013, 항공사진측량 작업규정 개정, 11.

- 김덕인, 송영선, 김기홍, 김창우, 2014, 무인항공기의 국토모니터링분야 적용을 위한 연구. 한국측량학회지, 32, 1, 29-38.
- 김민규, 정갑용, 김종배, 윤희천, 2010, 풍수해 모니터링을 위한 UAV 적용성 분석. 한국측량학회지, 28, 6, 655-662.
- 김종우, 김민식, 김평기, 노승재, 박 찬, 조영도, 박삼규, 2012, 제천지역 석회암의 역 학적 특성에 관한 연구. 터널과 지하공간, 22, 5, 354-364.
- 박계순, 조성준, 성낙훈, 임형래, 김정호 (2010) 무인비행선을 이용한 3차원 항공 자력탐사. 한국지구물리탐사학회 2010년도 학술대회 초록집, p.149-150.
- 박홍기, 2014, 무인항공사진을 이용한 저수지 방재 모니터링.

한국지형공간정보학회지, 22, 4, 143-149.

- 우림텍, 2016, Photoscan Professional User Guide, 14
- 이성재, 최요순, 2015a, 보급형 회전익 무인항공기(드론)를 이용한 소규모 노천광산 지형측량. 터널과 지하공간, 25, 5, 462-469.
- 이성재, 최요순, 2015b, 고정익 무인항공기(드론)를 이용한 노천광산 지형측량 기술의 현장실증. 터널과 지하공간, 25, 6, 527-533.
- 이성재, 최요순, 2016, 고정익 무인항공기(드론)과 보급형 회전익 무인항공기를 이 용한 지형측량 결과의 비교. 터널과 지하공간, 26, 1, 24-31.
- 이수암, 김태정, 김재인, 김민철, 장휘정, 2015, UAV 영상을 활용한 수변구조물의 DSM 생성 및 정확도 분석. 대한원격탐사학회지, 31, 2, 183-191.
- 장선웅, 이성규, 윤홍주, 2011, 무인 항공사진 촬영을 이용한 해안표착물 탐지. 2011 년도 해양환경안전학회 춘계학술발표회, p.7-9.
- 정성혁, 임형민, 이재기, 2010, 무인항공 사진측량을 이용한 3D 공간정보 취득. 한 국측량학회지, 28, 1, 161-167.
- Cryderman, C., Bill Mah, S. and Shuflertoski, A., 2014, Evaluation of UAV Photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations, GEOMATICA, 68, 4, 309–317.

Googlemap, 2017, 연구지역 OO노천 석회석 광산 위성사진, Retrieved from





https://www.google.co.kr/maps.

- Gross, H., Thoennessen, U., Hansen, W.V., 2005, 3D modeling of urban structures, IAPRS, Vienna, Austria, Vol. XXXVI Part 3/W24, pp. 137–142.
- Jordan, B.R., 2015, A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education. GSA Today, 25, 7, 50-51.
- Costa, F.G., Ueyama, J., Braun, T., Pessin, G., Osorio, F.S. and Vargas, P.A., 2012, The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, p.5045–5048.
- ISRM, 1977, Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Rin. Sci. & Geomech. Abstr., 15, 319–368.
- Rau, J., Jhan, J., Lob, C. and Linb, Y.. 2011, Landslide mapping using imagery acquired by a fixed-wing UAV. ISPRS – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXXVIII-1/C22, p.195–200.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. and Sarazzi, D., 2011, UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current status and future perspectives – Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci. XXVIII–1/C22, p.1–7.
- Wich, S. and Koh, L., 2012, Conservation drones: the use of unmanned aerial vehicles by ecologists. GIM Int. 26, 29–33.

