

차량탐재 암반비탈면 절리조사시스템 개발에 관한 연구

김종훈, 김기석((주)희송지오택)
김재동(강원대학교), 이승호(상지대학교)
김용수(한국시설안전기술공단)
천성열((주)이산)
김동민((주)한국종합기술)

1. 서언

본 연구는 국내에서 다양하게 제시되고 있는 급경사지 위험 관리 방안의 한가지로 위험 인공, 자연비탈면에 대한 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발의 일환으로 진행 중인 유지관리 조사차량[김용수, 2007; 이승호, 2006] 개발중 디지털 영상을 이용한 암반 비탈면 절리구조 조사 시스템 개발에 관한 것이다. 개발시스템은 크게 정지영상 및 동영상 획득 및 분석시스템으로 구분된다. 전자는 암반비탈면 안정해석에 중요한 절리구조의 지질 통계학적 처리 결과를 얻기 위한 도구이며, 후자는 비탈면의 유지관리 일상점검시 요구되는 육안판정 보조 도구로 활용하기 위한 것이다.

개발시스템은 전체 유지관리 시스템의 효율적인 운영을 위해 유지관리 조사 차량에 탑재 코자 하였으며, 차량내에서 차량외부에 장착한 영상장비들을 원격 조작할 수 있도록 구성하고자 하였다. 또한 현장에서 획득한 영상자료와 절리 방향성 또는 누수상태 등과 같은 중간 처리 및 분석 결과들은 실시간으로 원격지로 전송함으로써 신속한 의사결정이 이루어질 수 있도록 구성하고자 하였다.

고정밀 디지털 정지영상을 이용한 암반비탈면 절리구조의 조사 기법은 카메라의 촬영방향이 차량위 고정된 위치에서 상하좌우 회전이 이루어지므로 기존의 수직수평스테레오 사진 측량기법에 새로운 알고리즘을 개발하였다. 또한 비탈면의 높이를 고려하여 촬영높이도 조절할 수 있도록 카메라 승강 장치의 도입 필요성을 분석하고 적용성도 검토하였다. 디지털 동영상을 이용한 일상점검 수준의 모니터링 시스템은 일반 방송용 SD급 화질을 유지할 수 있도록 하였으며, 특정 개소의 정확한 양태를 확인하기 위해 확대 및 축소 기능을 탑재하였으며 일반적인 동영상 획득과정을 차량내부에서 모두 원격 조절할 수 있도록 구성하였다. 또한 차량내에서 다양한 영상처리 및 편집이 가능하도록 영상편집기를 장착하여 필요시, 즉 위험이 감지되었을 때 신속한 대처방안을 수립할 수 있도록 원격지 의사결정기구에 자료를 전송할 수 있도록 구성하였다.

본 연구를 통해 얻어진 연구 성과는 인력중심의 절리조사 및 일상점검 방식에서 첨단장비를 이용한 효율적이고 신속한 방식으로 전환할 수 있게 해주며 이로 인해 고정식 모니터링 시스템에 비해 경제성면에서 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 디

디지털 영상을 이용한 시각인지 결과들은 신속한 의사결정에 따른 예경보시스템의 구축에도 기여할 것으로 판단된다.

2. 차량탐재 절리조사 시스템 적용 환경 분석

디지털 영상을 이용한 차량탐재 절리조사 시스템의 촬영거리는 도로의 현황, 비탈면의 높이, 사진기 초점거리 등에 영향을 받는다. 도로 현황에 따라 사진촬영거리의 적정수준은 결정할 수 있는데, 강원도 지역의 기존 국도의 대부분은 2차선 왕복도로로 구성되어 있으며, 신설되거나 확장되는 지역에 있어서는 4차선 왕복도로로 구성되어 있다. 최대촬영거리는 실제 도로현황 보다는 도로설계기준에서 제시하는 도로횡단면도와 도로폭을 참조하여 산정하였다. 왜냐하면 신설되거나 확장이설되는 도로는 기존 도로에 비해 다소 도로폭이 넓기 때문이다. 도로횡단면의 기본 구성도와 도로폭 설계기준을 참조하였을 때, 최대 촬영거리는 조사차량의 진행방향을 기준으로 비탈면이 우측에 존재할 경우와 좌측에 존재할 경우, 왕복 2차선인지 왕복 4차선인지에 따라 표 1, 2와 같다.

표 1. 왕복2차선의 경우 최대 촬영거리

구 분	차선의 폭(m)	배수로 (m)	여유폭 (m)	비탈면과 거리(m)
우측에 위치	1.5 (3.0/2)	1.0	0.5	3.0
좌측에 위치	4.5 ((3.0/2)+ 3.0)	1.0	0.5	6.0

* 일반도로 기준: 차선의 폭 3.0m, 배수로 폭 1.0m, 여유폭 50cm 기준

표 2. 왕복 4차선의 경우 최대 촬영거리

구 분	차선의 폭(m)	배수로 (m)	여유폭 (m)	비탈면과 거리 (m)
우측에 위치	1.75 (3.5/2)	1.0	0.5	3.25
좌측에 위치	10.75 ((3.5/2)+ 9.0)	1.0	0.5	12.25

* 일반도로 기준 차선의 폭 3.5m, 배수로 폭 1.0m, 여유폭 50cm 기준

이때의 촬영거리는 실제로 도로폭만을 기준으로 삼은 것이며 비탈면의 높이 또는 경사에 따라 촬영거리는 증대된다. 특히 카메라를 상향으로 촬영하게 되면 촬영거리는 더 증가하게 된다. 그러나 이는 카메라가 도로하단에 위치할 경우이고 촬영높이가 증대되게 되면 수평촬영이 가능하므로 비탈면과의 거리는 상기 표에서 나타낸 거리를 크게 벗어나지 않을 것으로 판단된다.

적정 촬영 높이는 촬영대상이 되는 비탈면의 높이와 경사에 의해 결정할 수 있다. 강원도 지역에 분포하는 비탈면의 현황은 표 3과 같다[이승호, 2006]. 표 3에 나타낸 바와 같이, 비탈면 높이가 20m 이내에 해당하는 비탈면들이 전체 비율에 약 64%를 차지하고 비탈면 경사가 44~70°가 전체 비율의 약 67%를 차지하고 있어 비탈면기울기 1:0.7, 비탈면높이 20m를 기준으로 촬영거리에 대한 적정 초점거리와 수평사진촬영 기준으로 필요한 승강높이는 그림 1과 같이 예상할 수 있다.

표 3. 강원도 지역 인공비탈면 분포 현황(강릉 9개소, 정선 5개소, 홍천 12개소 국도중 총 4,609개 절토비탈면 대상)

비탈면높이(m)	분포율(%)	수량(개소)	비탈면경사	분포율(%)	수량(개소)
10m 미만	22.9	1,059	40° 미만	5.2	240
10~20m	41.2	1,901	40~45°	8.9	412
20~30m	19.5	903	44~55°	31.3	1,445
30~40m	8.7	404	55~65°	27.3	1,262
40~50m	4.1	191	65~70°	9.2	426
50m 이상	3.2	151	70° 이상	17.8	824

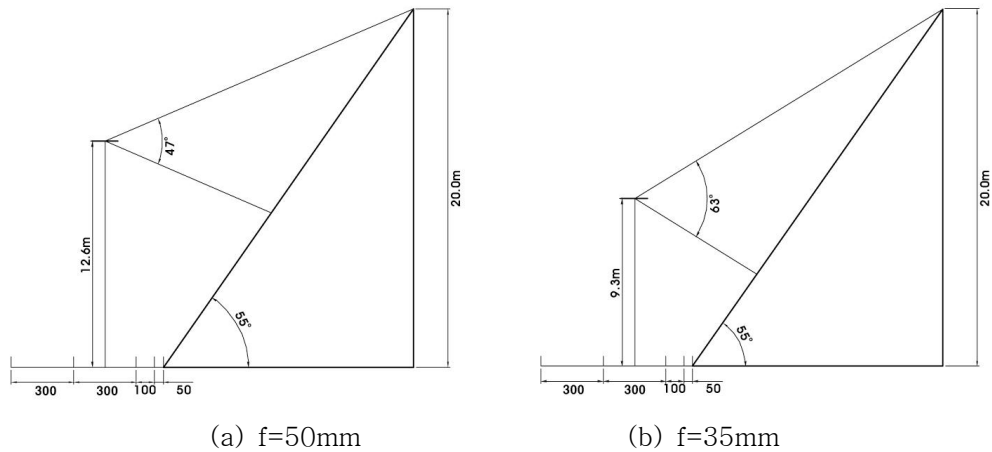


그림 1. 카메라 초점거리에 의한 화각별 승강장치의 높이

3. 차량탐재 절리조사 시스템 구축

3.1 정지영상 카메라의 매개변수 결정 알고리즘

사진영상을 이용하여 절리구조의 기하학적 특성을 파악하기 위해서는 공간상에 절리구조의 3차원적 분포 특성을 파악하여야만 한다. 3차원적 특성은 공간좌표의 도출을 통해 가능하며, 2차원 사진영상으로부터 3차원 공간좌표를 도출하기 위해서는 카메라의 매개변수 결정이 요구된다. 카메라 매개변수는 내부매개변수와 외부매개변수로 구분된다. 전자는 영상 주점과 초점거리로 구성되고 후자는 회전각과 전이벡터로 구성된다[김재동 외, 2003]. 카메라 매개변수는 다양한 방법들을 통해 결정된다[김종훈, 2002]. 본 연구에서 카메라 매개변수의 결정은 카메라가 고정식으로 조사차량에 탑재되는 특성으로 인해 기존의 매개변수 결정 방식과는 다른 방법을 개발하여 적용하였다.

내부매개변수인 카메라의 초점거리와 영상주점은 제조사 사양에 따라 결정하였다. 특히 초점거리는 상기 차량탐재 절리조사 시스템 환경 구축에서 검토한 바와 같이, 강원도 지역의 비탈면과 도로 현황을 고려하여 최적 촬영거리에 적합한 고정 초점거리를 선정하여 적용하고자 하였다. 외부매개변수인 회전각은 고정식 촬영시스템을 구성하는 관계로 그림 2와

같이 카메라 촬영방향에 따라 카메라 베이스(CB)와 승강장치 사이에 카메라의 회전에 의해 발생한다. 회전각은 카메라가 설치되는 카메라베이스(CB)에 그림 3과 같은 디지털 경사계를 부착하여 결정하고자 하였다. 디지털 경사계의 세부 사양은 표 4와 같다.

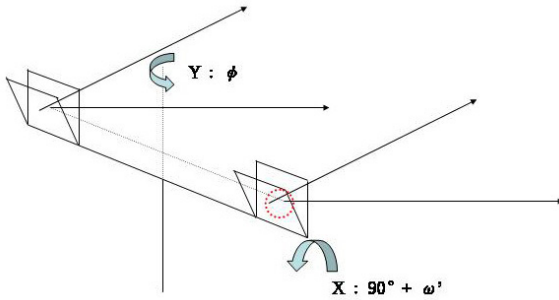


그림 2. 카메라 촬영 방향에 따른 회전각의 변화

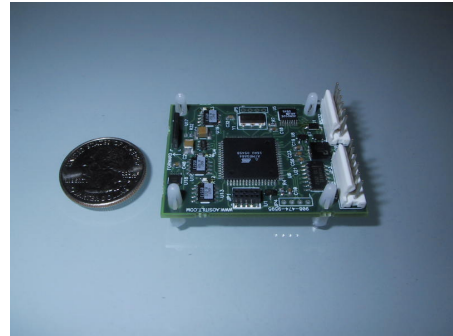


그림 3. 디지털 경사계

표 4. 디지털 경사계의 세부 사양(EZ-Compass-3A-360, Advanced Orientation Systems, Inc. USA)

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

외부매개변수인 전이벡터 성분인 각각의 카메라의 중심투영점의 위치는 카메라의 회전축을 중심으로 좌우 거리를 기준으로 결정하게 된다. 그러나 촬영방향에 따라 회전축에 의해 촬영방향이 좌우로 변화하거나 상하로 변화시 각각의 중심투영점의 거리는 변화하게 된다. 그림 4는 이러한 촬영방향의 상하, 좌우 회전에 따른 회전각의 변화와 그에 따른 중심투영점의 위치를 나타낸 것이다.

상하회전에 의한 카메라의 중심투영점의 위치 변화는 그림 4(a)와 같이, X축의 회전에 의해 발생하며 X축 회전에 의해 발생하는 회전각은 ω 이다. 촬영방향이 정확히 수평을 이루고 있을 때 X축은 이미 90° 도 회전한 상태이므로 이 값에 상향 촬영시 $+\omega'$, 하향 촬영시 $-\omega'$ 만큼을 더해주면 된다. 회전축과 카메라 중심투영점 사이에는 높이(l)의 차이가 존재할 때, $\pm\omega'$ 만큼 회전후 카메라 중심투영점의 Z 성분의 값은 식(1)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_Z = l \times \cos(\pm \omega') \quad (1)$$

좌우회전에 의한 카메라의 중심투영점의 위치 변화는 그림 4(b)와 같이, Y축 회전에 의해 발생한다. 이때 회전각은 ϕ 가 된다. 일반적으로 회전을 담당하는 기계적인 부분에서 상하회전축과 좌우회전축이 동일선상에 존재하지 않는 경우가 대부분이므로 회전축 사이에는 이격거리가 d 만큼 존재할 것이다. 그림 4(b)와 같이 좌우회전을 하게 되면 카메라의 중심투영점의 X, Y 성분은 $CB(O'P_L$ 또는 $O'P_R$ 사이의 거리)와 $b(\pm\omega'$ 회전에 의한 중심투영점의 Y 성분으로써 그림 4(b)의 OO' 길이로써 그림 4(a)의 OO' 와는 길이가 다를 수 있음)에 의해 결정된다.

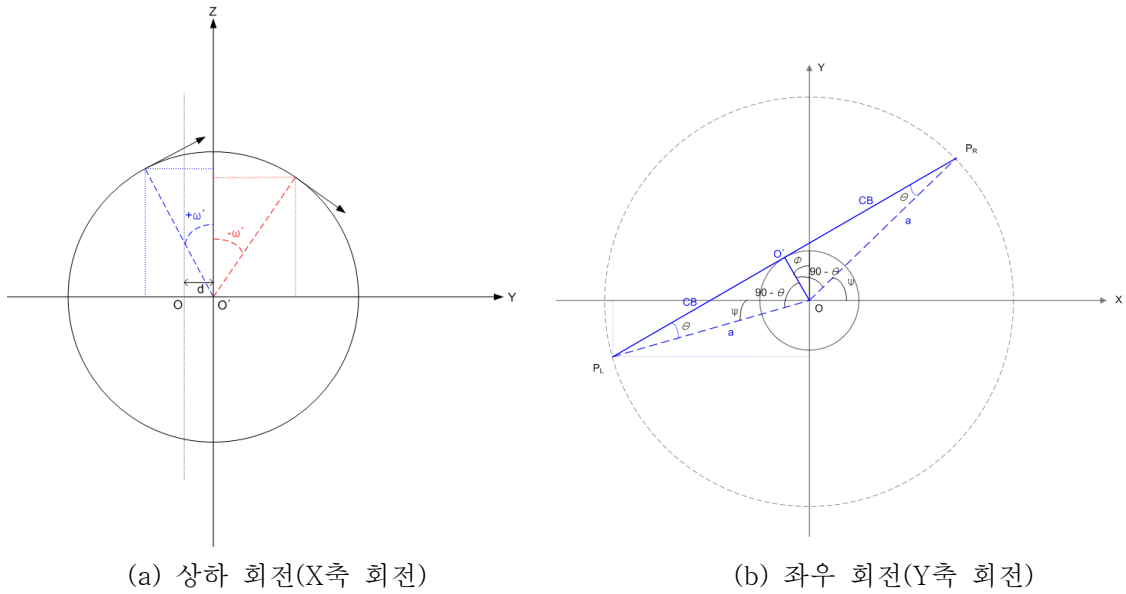


그림 4. 촬영방향에 따른 회전각 및 중심투영점의 변화

그림 4(b)에서 $\triangle OO'P_L$ 과 $\triangle OO'P_R$ 에서 a 를 결정하고 a 와 X축 사이의 각의 사잇각인 ψ 를 결정하면 각각의 카메라의 중심투영점의 X, Y 성분을 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{L,X} &= a \times \cos \Psi_L & \text{and} & & P_{R,X} &= a \times \cos \Psi_R \\ P_{L,Y} &= a \times \sin \Psi_L & & & P_{R,Y} &= a \times \sin \Psi_R \end{aligned} \quad (2)$$

촬영지점이 경사진 경우, 즉 차량이 정차한 지점이 비탈진 경우에는 카메라베이스(CB)는 수평이 아니고 기울어지므로 촬영방향을 조절하기 전에 초기 상태의 중심투영점을 결정할 필요가 있다. 이는 외부매개변수 회전각 κ 에 의해 결정할 수 있다. 그림 5와 같이 CB가 기울어진 경우에 초기 중심투영점은 식(3), (4)와 같이 결정할 수 있다. 식(3)은 κ 가 (+)회전인 경우이고 식(4)는 (-)회전인 경우에 해당한다.

$$P_L' = \begin{cases} X_{PL}' = -(CB \times \cos \kappa) \\ Y_{PL}' = d \\ Z_{PL}' = l - (CB \times \sin \kappa) \end{cases}, \quad P_R' = \begin{cases} X_{PR}' = (CB \times \cos \kappa) \\ Y_{PR}' = d \\ Z_{PR}' = l + (CB \times \sin \kappa) \end{cases} \quad (3)$$

$$P_L' = \begin{cases} X_{PL}' = -(CB \times \cos \kappa) \\ Y_{PL}' = d \\ Z_{PL}' = l + (CB \times \sin \kappa) \end{cases}, \quad P_R' = \begin{cases} X_{PR}' = (CB \times \cos \kappa) \\ Y_{PR}' = d \\ Z_{PR}' = l - (CB \times \sin \kappa) \end{cases} \quad (4)$$

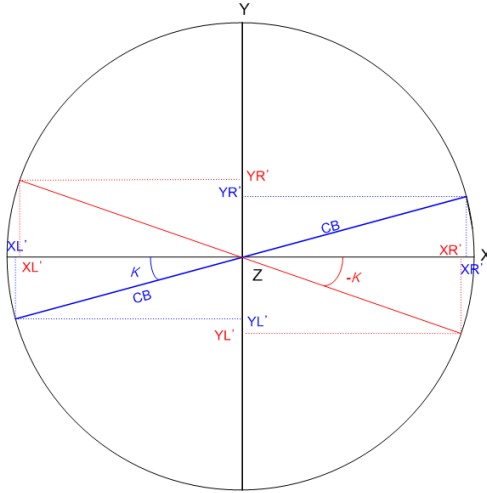


그림 5. κ 회전에 의한 초기 중심투영점

3.2 지상용 독립 운영 시스템 개발

차량탐재 시스템을 구성하기 전에 지상용 독립 운영 시스템을 개발하여 개발 알고리즘과 구성 시스템의 현장 적용성을 검토하였다. 독립운영시스템은 크게 삼각대, 카메라시스템, 촬영제어장치로 구성된다.

삼각대는 카메라 시스템과 촬영제어장치의 일부분인 팬틸트 드라이브(PTZ)와 카메라베이스(CB)를 지지하고 고정시켜주는 장치로 적용하였다. 카메라시스템은 정지영상시스템과 동영상시스템으로 구분된다. 정지영상시스템은 고해상 일안리플렉스(SLR) 방식의 카메라를 채용하여 절리구조 분석에 효율성을 높이고자 하였다. 연구에 적용한 정지영상 카메라는 천이 백만화소급의 해상도(4272×2848픽셀, 픽셀유효크기 7.4 μ m)를 가지는 상용 SLR디지털카메라를 적용하였다. 동영상시스템은 비탈면의 기존 육안 모니터링을 충족하기 위해 일반 SD 급 방송 수준의 화질인 해상도 720×480픽셀, 30fps, 10배줌의 칼라 CCTV 카메라와 촬영한 동영상의 화질손실 없이 저장할 수 있는 디지털 비디오 레코더(DVR)를 채용하였다. 촬영방향을 제어하기 위한 제어장치는 상하좌우 촬영방향을 구동시켜주는 PTZ와 PTZ를 조절하는 조절장치 및 조절장치의 제어신호를 구동신호로 변환해주고 전원을 공급하는 리시버로 구성된다. 제어장치중 조절장치는 카메라의 촬영방향 및 동영상 촬영과 관련된 모든 부분-녹화시작, 줌인, 줌아웃, 녹화종료, DVR 제어 등-기능을 선택 수행할 수 있다. 정지영상은 컴퓨터시스템에서 원격으로 촬영과 관련된 모든 기능을 제어할 수 있는 기본제공 소프트

웨어를 이용하여 얻을 수 있도록 구성하였다. 그림 6은 이와 같이 구성된 독립 운영시스템의 현장 적용 전경을 나타낸 것이다.



그림 6. 지상용 독립 운영시스템의 구성

독립운영시스템을 이용하여 암반 절리구조의 방향을 측정한 결과와 클리노컴퍼스를 이용하여 측정한 결과의 비교를 통해 개발알고리즘 및 시스템의 현장적용성을 분석하였다. 비교 결과는 그림 7과 같다. 2차원 영상을 이용하여 3차원 공간상의 절리면을 구성하는 공간좌표의 계산과 절리면 방향 계산은 김재동 외[2003]가 제안한 방식에 의해 산정하였다. 비교 결과 클리노컴퍼스에 의한 수작업 측정과 개발 알고리즘에 의해 구성된 시스템으로부터의 결과 사이에는 경사방향의 경우 최대 6°, 최소 1°의 차이가 나타났고 경사각의 경우 최대 4°, 최소 1°정도의 차이가 나타났다. 이러한 결과는 수작업 측정의 오차와 클리노컴퍼스의 기계오차를 고려해볼 때 허용할만한 수준인 것으로 판단된다.

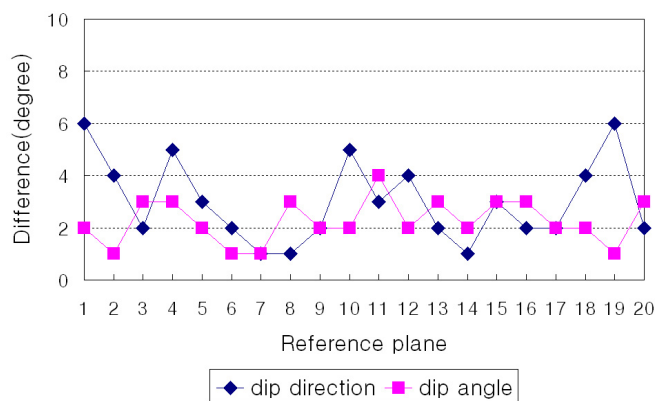


그림 7. 기준 절리면 방향의 측정값 사이의 차이

향후 이러한 오차 수준은 장치의 차량탑재시 카메라의 중심과 회전축 사이의 거리나 높이 등과 같은 기하학적 정보를 정확히 확보하고 이를 토대로 장치를 설치하여 최소화할 수

있을 것으로 예상된다.

3.3 차량탑재 운영 시스템 개발

본 연구는 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 조사 차량 개발과 관련하여 비탈면의 영상 관련 자료 수집 및 이를 통해 현장에서 즉각적으로 비탈면의 상태를 정성적, 정량적으로 확보하기 위함을 대상으로 하고 있다. 이를 위해 개발한 차량탑재 암반비탈면 절리조사시스템은 그림 8과 같다. 그림 8과 같이 강원도 지역의 도로 및 비탈면 분포 현황에 따라 대절토비탈면 및 비탈면 높이를 고려하여 촬영높이를 확보하기 위해 촬영시스템의 승강장치를 장착하였다. 승강장치는 카메라시스템과 PTZ, 카메라베이스 등의 무게, 적정 촬영높이, 강성 등을 고려하여 선정하였다.



(a) 조사차량 전경



(b) 카메라시스템



(c) PC 및 리시버



(d) 촬영조절장치 및 모니터

그림 8. 개발한 차량탑재 암반비탈면 절리조사시스템

4. 결론

현재까지 수행한 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 차량에 고정식으로 탑재한 디지털 영상 촬영시스템을 이용하여 암반비탈면의 절리구

조의 기하학적 특성을 파악하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘은 촬영방향을 원격조절하고 그에 따라 카메라의 외부매개변수인 회전각과 중심투영점을 디지털경사계를 통해 결정하는 방식으로 구성하였다.

- (2) 차량탑재후 개발 알고리즘의 검증과 이를 구현한 시스템의 현장적용성은 지상용 독립운영시스템을 통해 검증하였다. 검증결과, 절리 방향 산정시 오차수준은 수작업에 의한 기준 절리면에 대한 측정결과에 비교하여 기존 연구에서 보고된 오차수준보다 다소 낮은 결과로 나타나 개발시스템의 타당성을 확인하였다.
- (3) 비탈면의 일상점검에서 육안 판정을 위한 보조 도구로서 디지털 동영상 촬영시스템을 구성하였다. 시스템은 비탈면의 보호공 시설의 상태 및 낙석 여부 등과 같이 실시간으로 비탈면 상태를 확인할 수 있는 일종의 모니터링 시스템이며 얻어진 결과들은 의사결정기구에 현장의 비탈면 상태를 실시간으로 전송함으로써 신속한 대처방안을 수립할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

향후 연구 내용으로는 현장에서 얻어진 결과들의 원격지 의사결정기구로의 전송과 관련된 통신 문제와 차량내 결과 분석의 효율성 향상에 초점을 두고 진행해 갈 예정이다. 또한 조사차량의 실제 현장 적용시 발생하는 다양한 조건들의 반영, 조사 결과의 정밀도와 정확도 향상도 병행할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신사업(강원권역)의 일환인 ‘낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발(05지역혁신 B02-01)’의 연구비로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김용수, 양상호, 정수정, 2007, 낙석재해 방지를 위한 현장정보 수집차량 개발방안에 관한 연구, 2007년도 지반공학회 춘계학술발표회 논문집, 1249-1258.
2. 김재동, 김종훈 2003, 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석방법, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.3, 486-493.
3. 김종훈, 2002, 암반절리의 기하학적 특성 분석을 위한 디지털 사진측량기법의 개발, 강원대학교 공학박사 학위논문, 176p.
4. 이승호, 2006, 낙석 및 산사태 방지를 위한 차세대 신기술 개발, 2005년도 강원권 지역특성화연구개발사업 제1차년도 중간보고서, 653p.