

## 터널 막장면 고해상도 DEM(Digital Elevation Model) 생성에 관한 연구 A Study on Developing a High-Resolution Digital Elevation Model (DEM) of a Tunnel Face

김광염<sup>1)</sup>, Kwang-Yeom Kim, 김창용<sup>2)</sup>, Chang-Yong Kim, 백승한<sup>3)</sup>, Seung-Han Baek, 홍성완<sup>4)</sup>,  
Sung-Wan Hong, 이승도<sup>5)</sup>, Seung-Do Lee

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Eng. Div., KICT
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Eng. Div., KICT
- 3) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Eng. Div., KICT
- 4) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원, Senior Research Fellow, Geotechnical Eng. Div., KICT
- 5) 삼성물산 건설부문(주) 토목기술팀 과장, Manager, Civil Eng. Technology Team, Civil Div., Samsung Corporation

**SYNOPSIS** : Using high resolution stereoscopic imaging system three digital elevation model of tunnel face is acquired. The images oriented within a given tunnel coordinate system are brought into a stereoscopic vision system enabling three dimensional inspection and evaluation. The possibilities for the prediction ahead and outside of tunnel face have been improved by the digital vision system with 3D model. Interpolated image structures of rock mass between subsequent stereo images will enable to model the rock mass surrounding the opening within a short time at site. The models shall be used as input to numerical simulations on site, comparison of expected and encountered geological conditions, and for the interpretation of geotechnical monitoring results.

**Key words** : Stereoscopic image, Digital elevation model, Digital vision system

### 1. 서 론

터널 시공 중 가장 큰 지반공학적 해석 대상은 막장 전방의 지질구조이다. 지반의 불확실성, 이방성, 불균질성 등으로 야기되는 막장 전방의 지질구조는 예측이 어려울 뿐만 아니라 터널의 안정성에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 기 굴착된 구간에서 얻어지는 계측 정보를 적극적으로 활용한 예측 방안이 필요하다. 이러한 터널 계측을 통해 획득되는 다양한 정보 중 지반의 거동과 관련된 다양한 안정성 평가에 필요한 것 중의 하나가 터널의 막장관찰(face mapping)이다. 하지만 국내 대부분의 막장관찰 작업은 비전문가의 주관적인 견해에 의해 작성되고 있기 때문에 객관성이 결여되고 있다. 따라서 본 연구에서는 막장관찰 작업의 객관화 방안으로서 디지털 영상정보를 활용하여 막장의 3차원 이미지(DEM)를 구성하고 디지털이미지 매핑(image mapping)기술을 적용해 보았다.

본 연구에 사용된 디지털 영상처리를 통한 DEM 생성 기법은 컴퓨터 및 영상처리 기술의 발달과 함께 인공위성과 CCD사진기 등에 의해 대량의 수치영상 데이터를 얻을 수 있게 됨으로써 정밀도와 실용성이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 디지털 이미지 처리는 전통적인 사진분석학과는 데이터 처리과정에서 다소 차이가 있다(그림 1). 디지털 이미지를 활용한 대표적인 연구는 입체사진측량학을 암반면의 방향성 추출 실험(류동우, 2000; Feng 등, 2001; Slob 등, 2002; 김재동 등, 2003), 암반의 3차원 지

반데이터를 획득하여 변위를 계측한 사례(한중근 등, 2003; 정성혁, 2004; Ohnishi 등, 2004 & 2005) 등이 있다. Gaich(2000)는 디지털 파노라마 이미지를 통한 3차원 이미지 획득과 암반내 절리의 길이, 방향 등을 파악하였다.

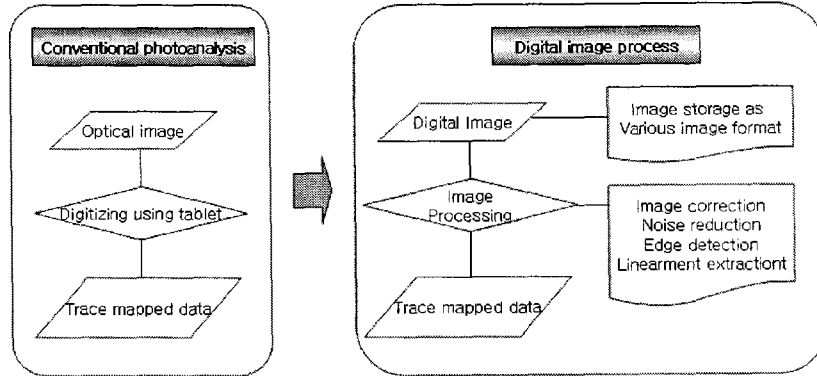


그림 1. 사진분석학과 디지털 이미지 프로세싱 비교

## 2. 영상정보를 이용한 막장 전방 연약대/파쇄대 구조 예측

### 2.1 막장 디지털 이미지로부터 연약대 구조 예측 기술

암반의 구조와 그로 인해 발생하는 특성들과 관련된 암반의 평가와 터널 시공에 적용은 암반의 특성 분류를 위해 획득된 데이터에 의존하게 된다. 일반적인 터널 시공중 이와 같은 평가의 신뢰도를 높이기 위한 획득된 자료의 수준은 현장에서 근무하는 지질전문가의 수준과 능력에 크게 좌우된다. 하지만, 이 또한 객관적으로 평가되긴 어렵다. 지질전문가의 수행 작업 중 가장 중요한 것은 터널 막장의 육안관찰과 이를 통한 암반분류이나 시간과 접근에 있어서 상당히 제약을 받게 된다. 터널 막장 평가에 있어서 중요한 것은 암석의 경계를 발견하기 위한 색상정보와 길이, 면적, 공간 방향성 등의 파악을 위한 3차원 모델 구성 등이다.

그림 2는 막장면의 관찰 정보가 어떻게 나타나는지 좋은 예를 보여주고 있다. 왼쪽의 그림은 막장으로부터 획득된 디지털 영상 이미지이며, 오른쪽은 이미지로부터 유추할 수 있는 적절한 지반공학적 파라미터들이다. 실제 시공중에는 이러한 정보들이 매 굴착마다 이루어질 수 있다. 이렇게 지속적인 이미지의 획득과 지반공학적 분석을 통하여 암반에 대한 3차원 모델이 얻어질 수 있다(그림 3).

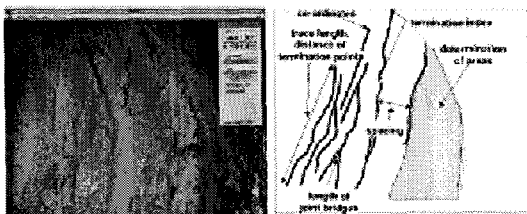


그림 2. 터널 막장으로부터 획득된 영상 이미지와 지반공학적 marking

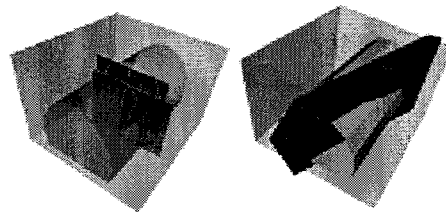


그림 3. 두 개의 연속된 막장 이미지로부터 단층대의 재구성

그림 3의 오른쪽 그림은 두 개의 연속된 막장 이미지 분석을 통한 지반공학적 구조를 터널 주변의 암반속으로 외삽하여 예측한 모델을 보여주고 있다. 이러한 3차원 모델은 향후 굴착시 발생할 수 있는 지반 거동의 예측 모델을 제공함으로써 지반공학적 해석 및 시공 중 의사결정 등에 유용하게 활용될 수

있다. 특히, 국내와 같이 막장의 mapping에 대한 구체적인 기준 및 숙련된 전문가가 없는 상황에서는 이러한 디지털 이미지 정보가 객관적인 막장 상태 평가를 위한 자료로 활용되어져야 할 것이다.

## 2.2 막장 영상 이미지 처리 과정

그림 4는 터널에서 막장이미지 획득부터 분석 과정을 보여주고 있다. 흰색 상자의 작업은 실제 작업내용을 나타내며, 회색 상자의 내용은 결과를 나타낸다. 다음은, 각각의 작업에 대한 간단한 설명이다.

■ Visual data acquisition : 영상정보 시스템에서 가장 중요한 부분은 자료 획득이다. 기록되지 않은 영상정보는 어떠한 시스템 내에서도 활용이 불가능하다. 터널 현장에서 활용하기 위해서 영상정보는 몇가지 중요한 조건(시간적, 공간적, 촬영 조건, 이미지 크기, 이미지 색보정 등)을 만족시켜야 한다.

■ Geometric camera calibration : 이것은 카메라 내부의 왜곡을 보정하기 위한 것으로서 이상적인 카메라 원점과 실제 카메라 사이의 편차를 보정하는 것이다.

■ Radiometric camera calibration : 이 작업은 관찰된 대상안의 색상을 가능한 실제와 같게 조정하는 작업이다.

■ Absolute camera orientation : 이것은 외부 보정요소를 의미한다. 즉, 3차원 공간상에서 카메라의 위치를 결정하는 작업이다. 이러한 위치 정보와 카메라의 투시 방향을 통해 대상 물체의 3차원 공간상에 좌표가 획득되어 진다.

■ Relative camera orientation : 상대적인 카메라 방향성은 두 개의 외부 카메라 보정요소들 사이의 변환과정을 의미한다(예를 들어, 한 개 또는 두 대의 카메라로부터 획득된 서로 다른 이미지). 한 대의 카메라로부터 절대적인 위치를 획득한 후 같은 작업과정을 거쳐서 두 번째 이미지의 위치를 결정 할 수 있다.

■ Interactive monoscopic image analysis : 지질전문가들은 지반공학적 상황을 평가하는데 있어서, 그들의 경험을 사용하여 이미지에서 적절한 구조를 마킹하게 된다.

■ Automatic monoscopic image analysis : 암반의 불연속면에 대한 자동 추출은 지속적인 계산(edge detection)과 다각직선에 대한 적절한 픽셀로의 연결(edge following)을 통해 이루어진다.

■ Interactive stereoscopic image analysis : 한 장의 사진으로 평가할 수 없는 지반공학적 상황이 종종 발생하며 이럴 경우에는 두 장 이상의 이미지를 통하여 평가를 해야한다.

■ Automatic stereoscopic image analysis : 이미지 정보로부터 자동으로 계산된 3차원 정보를 획득하는 것을 의미한다. 이러한 과정을 통하여 터널 막장면에 대한 3차원 메쉬를 생성하게 된다.

■ Texture mapping : 한 장의 이미지로부터 획득된 불연속면 맵과 두장 이상의 이미지로부터 생성된 3차원 메쉬 모델을 결합하여 3차원의 모델을 만들 수 있다.

이러한 상기의 과정을 통하여 터널 시공에서의 지반공학적 분석의 객관화가 가능해질 수 있다.

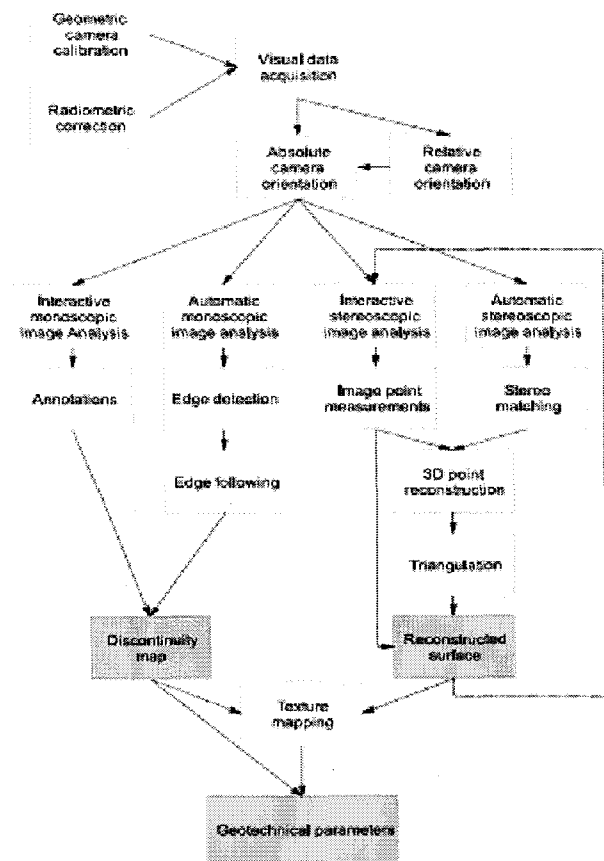


그림 4. 터널 막장 이미지 획득 및 분석 과정

## 2.3 디지털 영상정보를 활용한 3차원 DEM 생성 원리

디지털 영상정보로부터 터널 막장면의 3차원 모델을 구성하기 위해서는 기본적으로 서로 다른 위치에서 대상체를 촬영한 2개 이상의 이미지가 필요하다. 이렇게 획득된 이미지들을 통해 동일한 지점을 마킹하고 카메라의 내부와 외부 표정을 통해 3차원 이미지를 획득하게 된다.

이러한 과정은 크게 절취면 표면의 기준점(GCP: Ground Control Point)을 사용하여 표정인자의 계산을 수행하고, 표정인자를 이용하여 사진을 정렬하는 방법과 카메라의 위치를 정확히 epipolar image의 위치로 맞추어 한 축으로만 투영중심점을 위치이동 시켜 계산하는 방법이 있다.

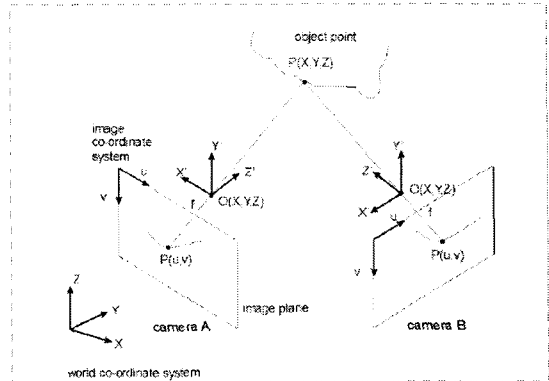


그림 5. 두 개의 이미지로부터 공간좌표 생성

표정을 이용한 일반 입체사진의 모델은 표정인자를 구하기 위하여 적어도 3개 이상의 정확한 기준점을 현장에서 측정하여야 하는 번거로움이 있는 반면에 본 기법은 입체사진을 정확히 계산된 위치에서 획득할 필요가 없는 장점이 있다. 또한 항공사진을 이용한 입체시 연구 분야에서 개발된 검증된 상용 S/W들이 있어서 이들을 이용할 경우 상대적으로 쉬운 모델을 구할 수 있다. 반면 epipolar image로 계획된 입체사진의 모델은 카메라의 배열을 정확한 평행선으로 맞춰야 하는 불편이 있는 반면에 표정인자의 획득을 위하여 터널 막장면에 기준점을 측정해야 하는 불편이 없다는 장점이 있다. 본 연구에서는 터널 막장면 영상정보 획득 과정에서 소요되는 시간이 시공 cycle time에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 막장면에 기준점을 부착하여 표정인자를 계산하는 방식을 적용하였다.

## 3. 최적 막장 이미지 획득을 위한 실내실험

분석대상인 터널은 일반 사면에 비해 작업환경에서 많은 차이가 있다. 가장 큰 차이는 작업공간과 시간상의 제약과 영상 확보를 위한 충분한 광량을 확보하기 힘들다는 것이다. 즉, 짧은 시간 동안에 분석을 위한 최적의 영상을 획득하기 위해서는 주어진 환경에서 최적의 영상정보 획득을 위한 촬영조건 및 획득된 정보의 보정작업이 필수적이다. 본 실내시험에서는 터널 조명에 따른 민감도 분석을 통해 다양한 현장의 조명 조건하에 분석된 영상들의 최적화 방안에 대한 연구를 수행하였다.

### 3.1 실험 과정

#### ① 카메라 및 렌즈

기본적으로 사진 계측은 대상물의 크기와 화소수에 따라 정확도가 결정되므로 화소수가 큰 카메라를 선정하는 것이 유리하다. 특히, 터널 막장면과 같이 대상물의 크기가 큰 경우에는 가능한 하나의 영상에 많은 화소수를 포함하는 것이 분석의 정확도를 높일 수 있다. 본 시험에서는 Nikon 시리즈 중 최고 화소수를 가지고 있는 D2X기종을 사용하였다. Nikon D2X는 유효 화소수 1,240만 화소, 셔터스피드 30-1/8,000초, ISO 100-800의 제원을 가지고 있으며, 사용렌즈인 니콘 AF-S DX ED 17-55mm F2.8G(IF)는 초점거리 17-55mm, 렌즈 밝기 F/2.8, 필터구경 77mm이다.

#### ② 기준점을 위한 코드 타겟(coded target)과 Point Cloud

본 연구에서 사용한 target은 광반사 타겟인 코드 타겟(coded target) (50mm×50mm)을 사용하였다. 또한, 프로젝션 타겟을 생성하기 위하여 Point-Cloud 타겟 프로젝터(Pro-spot)를 이용하였다. Pro-Spot은 촬영 카메라와 유/무선으로 동조되어 촬영시 플래쉬의 작동과 동시에 대상물에 타겟을 투

사하며, 레이저로 천공된 슬라이드(point slide)의 종류에 따라 6,000~23,000개의 원형 타겟을 생성한다. 본 연구에서는 23,000개를 사용하였다.

### ③ 모형막장

현재 실내 테스트에서 수행하고 있는 테스트 모델은 1m×1m 크기의 가상 암반체이다. 가상 암반체는 돌출된 절리면 Set 두 개와 막장 안으로 들어가 있는 절리군 Set 하나로 구성하였다. 그림 6은 본 실내 시험을 위해 제작된 모형 막장이다. 모형막장은 향후 3D 모델링에 의한 막장 정량적 평가시 활용하기 위하여 서로 다른 주향 경사를 가진 인공절리군(Joint Set)을 I-III 까지 가진 형태로 제작하였다.

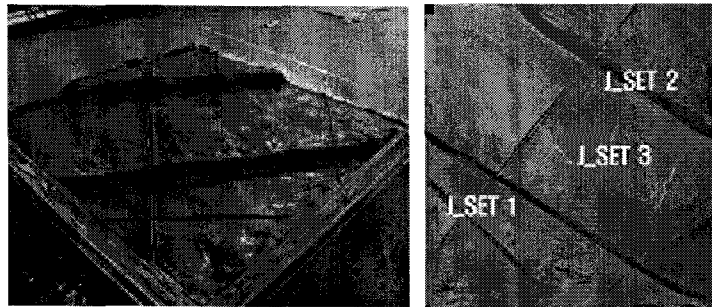


그림 6. 제작된 모형막장과 실험을 위한 세팅

### ④ 색보정을 위한 그레이카드(Grey card)와 표준색지

다양한 조도 및 조리개 수치에 의해 촬영하여 획득된 이미지에 대한 색보정을 위해서 노출 18%의 FOTOWAND 4964 그레이카드를 사용하였다. 그레이카드는 RGB값이 동일하며, 명도에 따른 고유 값을 갖게 된다. 그레이카드를 통해 촬영된 이미지를 보정하는 방법은 대상체 촬영사진에 그레이카드를 포함 되도록 하여 그레이카드에 대한 RGB값을 맞추는 방식으로 진행된다. RGB값을 맞추어 노출 및 명도 보정이 끝나게 되면 사진에 있는 표준색지<sup>1)</sup>를 이용하여 보정된 결과를 확인 하게 된다.

### ⑤ 사용 조명

본 실험에서 사용된 조명은 메탈 조명(400W)로서 조도 측정 장비를 통해 막장에서의 조도를 체크하여 변화시켰다. 사용된 조도는 52, 92, 200, 292, 392, 498, 588, 814, 1050 (lux)의 9개였다. 조도 범위 결정은 실제 현장을 답사하여 막장 관찰시 사용되는 조명 환경하에 조도(70~150 lux)를 측정 한 후 결정하였다.

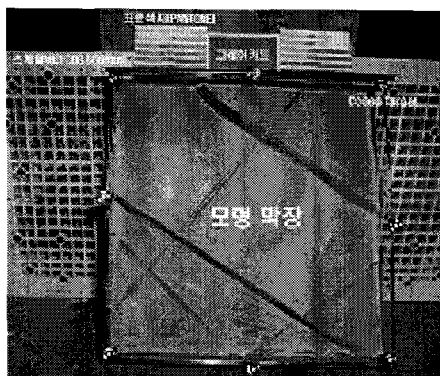


그림 7. 색보정을 위한 촬영 대상 세팅 모습

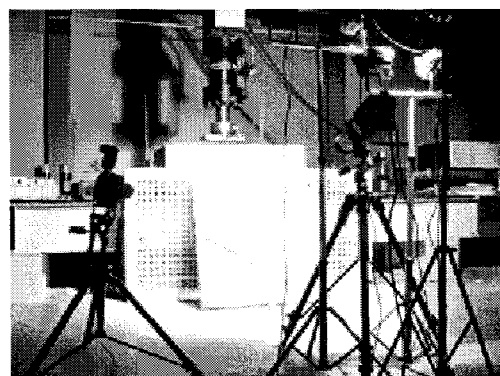


그림 8. 조도 세팅 후 촬영 장면

1) PANTONE solid chips matte - matte paper : 전세계 표준으로 널리 활용되고 있는 표준 색지로서 고유의 RGB 값에 대한 정보가 있어 색상 비교에 활용되고 있음

### 3.2 실험 결과

본 실험에서는 조명의 밝기(lux)에 따라 획득된 영상 정보의 색상이 얼마나 차이가 생기는지를 확인하여, 터널 현장에서 이미지 획득을 위한 최적 조도를 알아보고자 하였다. 조도에 따른 영향만을 보기 위하여 카메라 세팅은 고정시킨 후 촬영하였다. 촬영모드는 프로그램(자동)으로 하였으며, 초점거리는 26mm, ISO 100, 화이트밸런스는 형광모드로 맞추어 놓고 촬영하였다.

조도별 노출 및 명도 보정 후에 표준색지 값을 비교한 결과를 그림 9에 나타내었다. RGB 값에 의한 각각의 편차가 크게 나타났기 때문에 표준색지에 가장 가깝게 접근하는 조도를 확인하였다. 실험 결과 292 (lux)에서 표준색지 값과 가장 근접하게 나타났으며, 52 (lux)에서는 보정이 어려운 것으로 나타났다. 즉, 현장에서의 조명의 밝기가 적어도 100 (lux)이상은 되어야 영상정보를 통한 정확한 색상의 보정이 가능할 것으로 판단된다. 정확한 색보정은 매 막장마다 변화하는 조도 조건에 따라 획득된 이미지의 색상 편차를 줄이고 서로 다른 막장의 사진으로부터 동일한 암석 구간의 경계 등을 확인하기 위해서 중요한 정보로 활용 될 것이다. 292 (lux)에서 측정된 두 장의 디지털 이미지를 통해 3차원 DEM 모델을 구성해 보았다(그림 10). 사용된 프로그램은 캐나다의 EOS system inc.에서 개발한 PhotoModeler Pro 5.2이다.

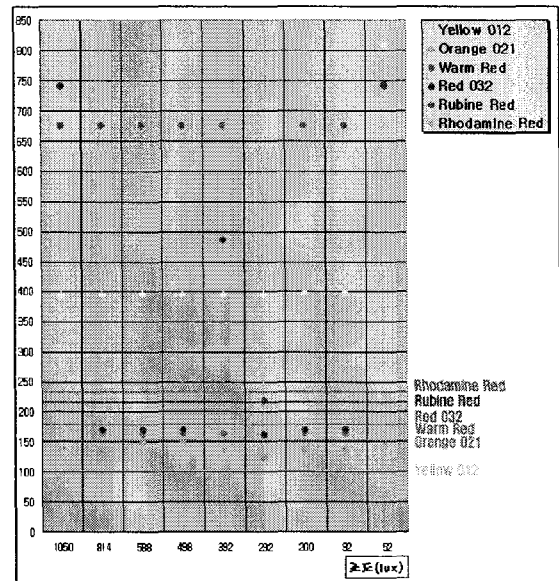


그림 9. 조도에 따른 색보정 결과

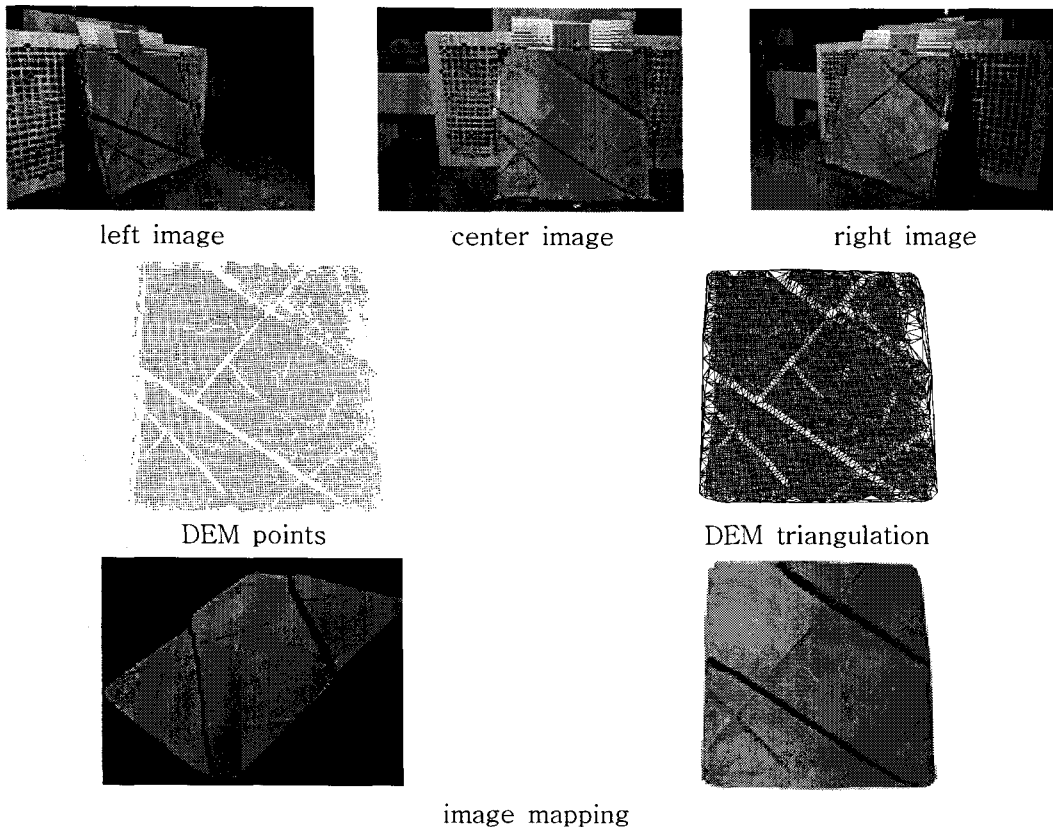


그림 10. 조도에 따른 색보정 결과

#### 4. 시공 중 터널현장 적용

사진측량을 이용한 절취면의 면 구조 배열 및 3차원 모델의 가능성을 확인하기 위하여 경남 김해시 OO 터널 현장의 막장부분을 대상으로 3차원 이미지 생성을 수행하였다. 국부적인 모델이 아닌 막장 전 단면에 대한 3차원 DEM을 생성하였다. 실제 터널에서는 좌우 카메라 설치 각도가 제한적이고 조명 역시 충분한 조도를 확보하기에는 부족한 부분이 많기 때문에 사면이나 실내 시험보다 정밀한 DEM을 생성하는 것이 까다롭다. 본 실험에서는 가능한 막장에서 약 1D정도 떨어진 지점에서 양쪽 측벽 부근에 카메라를 설치하여 이미지를 획득하였으며, 막장전체의 이미지를 획득하기 위해 카메라의 초점거리는 17mm의 광각으로 세팅하였다. 그림 11은 양 측벽에서 측정된 막장면 디지털 이미지이다.

기준점 GCP는 총 9개를 막장 하단부에 설치하였으며, 스케일 보정을 위한 스케일바(L : 1082.847mm)를 설치하였다. 앞 절의 모형막장 3차원 모델링과 마찬가지로 기준점을 활용하여 3차원 모델링을 수행하였다. 총 생성한 DEM 절점수는 10,925개이며, 이러한 DEM points를 삼각화(triangulation)를 통해 면을 생성하였다. 그림 12는 생성된 DEM부터 면을 생성하고 최종적으로 막장 이미지를 mapping한 결과를 보여주고 있다.

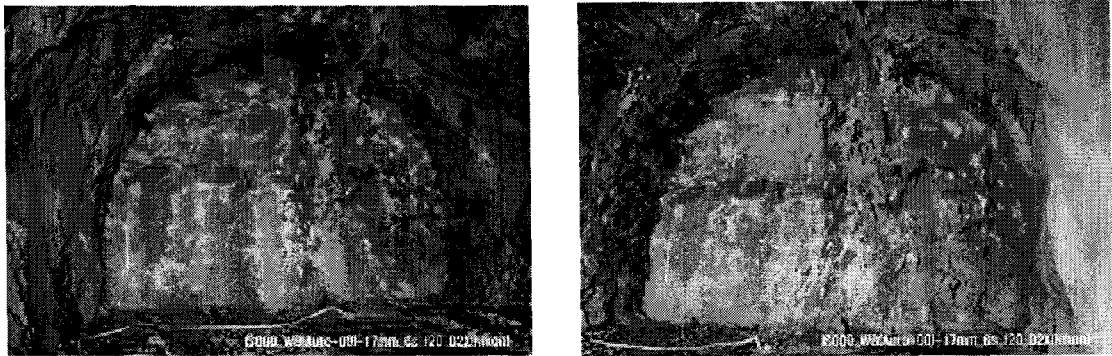


그림 11. OO터널 현장 막장면 좌우측 이미지

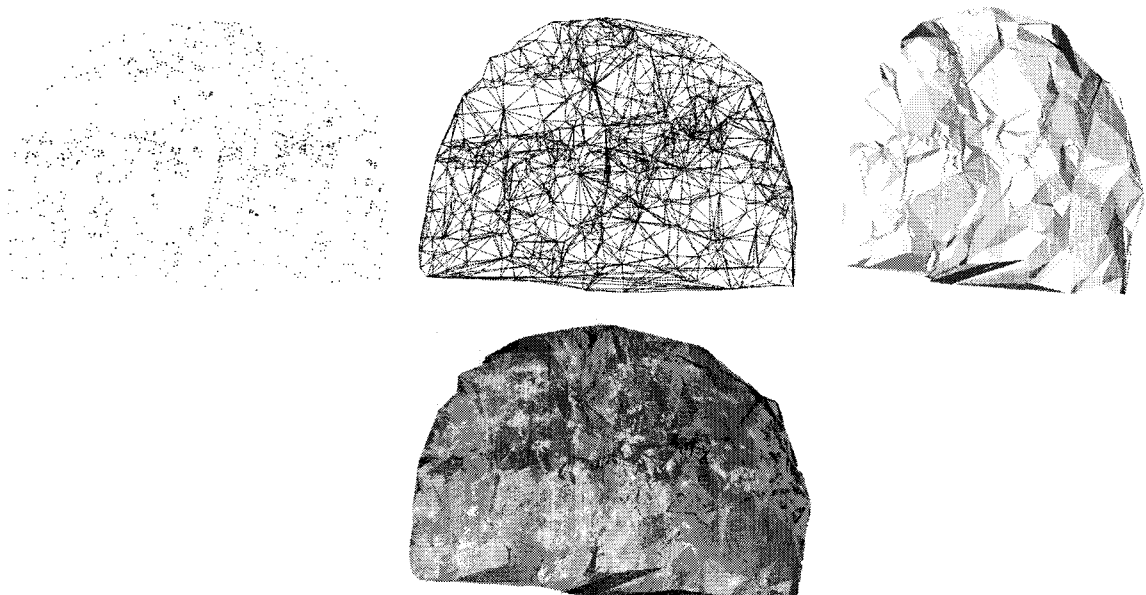


그림 12. OO터널 막장면 DEM으로부터 3차원 면생성 과정

## 4. 결 론

본 연구에서는 터널 시공중 막장관찰을 보다 정량적으로 수행하기 위한 기초연구로서 디지털 영상정보를 활용한 터널 막장면 3차원 이미지 생성을 수행하였다. 이를 통해 전방의 지질구조를 예측하는 방법론으로 영상정보를 활용할 수 있을 것이다. 일반적인 터널 시공중 이와 같은 평가의 신뢰도를 높이기 위한 획득된 자료의 수준은 현장에서 근무하는 지질전문가의 수준과 능력에 크게 좌우된다. 하지만, 이 또한 객관적으로 평가되긴 어렵다. 지질전문가의 수행 작업 중 가장 중요한 것은 터널 막장의 육안관찰과 이를 통한 암반분류이나 시간과 접근에 있어서 상당히 제약을 받게 된다. 따라서, 영상정보를 활용하여 굴착 전 지반의 3차원 모델 예측이 가능하다면 지반공학적 해석 및 시공 중 의사결정 등에 유용하게 활용 될 수 있다. 특히, 국내와 같이 막장의 mapping에 대한 구체적인 기준 및 숙련된 전문가가 없는 상황에서는 이러한 디지털 이미지 정보가 객관적인 막장 상태 평가를 위한 자료로 활용되어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통기술혁신사업중 산학연공동연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한, 현장을 제공해준 삼성물산(주)에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김재동 외, 2003, 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석 방법, 터널과 지하공간, 13.6, 486-494.
2. 류동우 외, 2000, 화사처리 및 입체사진 측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 10.3, 329-343.
3. 유복모 외, 1998, CCD사진기를 이용한 근거리사진측량의 실시간 처리에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 18.3-3, 317-327.
4. 이효성 외, 2002, 수치근접사진측량과 레이저 프로파일러를 이용한 암석 절리면의 표면 거칠기 정밀 측정. 한국측량학회 추계학술발표 논문집, 93-98.
5. 정창엽 외, 2003, 3D laser scanning 및 수치사진 측량을 이용한 암반사면의 DEM 추출 기법, 터널과 지하공간, 13.3, 207-214.
6. Feng, Q., 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station, Engineering Geology, 59(1-2), 133-146.
7. Gaich, A., 2000, Panoramic Vision for Geotechnical Analyses in Tunnelling, doctoral thesis(TU-Graz).
8. Kraus, K., 1997, Photogrammetry, Vol.1, No.2, 4th Edition, Dumlmler/Bonn.
9. Slob, S., 2002, An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques, EUROCK 2002, Funchal, Madeira Island, Portugal, 87-94.
10. Wolf, R., 2000, Element of Photogrammetry with Application in GIS, 3rd edition.