*The Journal of Engineering Geology, Vol.17, No.4, December*, 2007, pp. 567-576

# 디지털 영상을 이용한 터널 3차원 변위 계측

**김광염[1]* · 김창용[1] · 이승도[2] · 서용석[3] · 이정인[4]**

[1]한국건설기술연구원 지하구조물연구실, [2]삼성물산 건설부문 토목ENG팀,
[3]충북대학교 지구환경과학과, [4]서울대학교

# Measurement of Tunnel 3-D Displacement using Digital Photogrammetry

**Kwang-Yeom Kim[1]*, Chang-Yong Kim[1], Seung-Do Lee[2], Yong-Seok Seo[3], and Chung-In Lee[4]**

[1]Underground Structure Research Div., Korea Institute of Construction Technology
[2]Civil Engineering Team, Samsung Corporation
[3]Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University
[4]Seoul National University

디지털 영상을 통한 터널 내공의 3차원 절대변위 계측의 현장 적용성 검토를 위해 OO터널 현장에 계획된 내공변위 계측단면 상에 위치한 광파 타겟의 변위를 측정하고자 하였다. 디지털 영상 계측을 위한 3차원 입체모델 생성을 위해 측정위치마다 3개의 측선까지의 타겟만 고려하였다. 하나의 입체모델의 생성을 위해서 각 위치에서 3장 이상의 디지털 영상을 획득하여 입체모델을 구성하였으며, 마지막 2개 측선에서의 6개 타겟(천단, 좌우 측벽)을 계속 중첩시켜가며 다음 입체 모델을 구성하여 6개 이상의 정합점이 두 입체모델에서 공유될 수 있도록 하였다. 광파 계측과 디지털 영상계측을 통한 터널 시공 중 암반의 3차원 절대변위 계측 방법을 비교하기 위해 10회에 걸쳐 디지털 영상 계측과 광파 계측을 동일한 구간에 동시에 적용하였다. 각 방법을 사용한 계측에 소요되는 시간과 계측결과를 비교하였다.

**주요어** : 디지털 영상 계측, 3차원 변위, 절대변위, 내공변위

In order to assess the on-site applicability of 3D absolute displacement monitoring of tunnel using digital photogrammetry, the displacement of the optical target placed at the measurement section was investigated, as planned in the OO tunnel construction site. The targets on 3 measurement lines only were considered for each point of measurement for the reconstruction of 3D cubic model for the digital vision monitoring. For each 3D model, 3 or more images have to be obtained at each point. On the last 2 measurement lines, 6 targets (crown, left and right walls) were continuously overlapped to construct 3D models so that 6 or more apices can be shared by 2 3D models. In order to compare the measurement methods of 3D absolute displacements in tunnel excavation, i. e, total station and digital image measurement, both the digital image measurement and optical measurement were conducted for 10 times in the same work section. The time and measurement results of both methods were compared.

**Key words** : digital photogrammetry, 3-D displacement, absolute displacement, convergence

## 서 론

체계적인 변위계측은 터널의 안정성을 확보하기 위한 굴착과 지보방법의 합리적인 결정을 위해 가장 중요한 요소이다. 최근 수십 년 동안 계측 기술은 크게 발전되어 왔으며, 이러한 기술은 터널 시공에도 적용되고 있다. 터널 굴착에 의한 암반의 변위를 측량법에 기초하여 3차원 절대좌표로 측정하는 방법이 도입된 이후로 기존의 계측지점간의 상대거리를 측정하는 방법을 점차 대체하고 있는 실정이다. 3차원 절대변위 계측 데이터가 기존의 상대변위에 비해 상당한 정보를 줄 수 있다는 것이 여러 연구에 의해 알려지면서 3차원 절대변위에

*Corresponding author: kimky@kict.re.kr

대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Barlow, 1986; Steindorfer, 1997; Sellner, 2000). 터널의 내공 변위를 이용하여 굴착 전방의 단층대를 예측하기 위한 시도는 80년대 말부터 지속적으로 연구되고 있다. 터널 축방향으로의 변위의 경향선(trendline)과 영향선(influence line) 등에 대한 분석을 통한 방법(Schubert & Vavrovsky, 1994; Steindorfer, 1997), 반경방향 변위와 진행방향 변위의 비인 벡터방향성(vector orientation)의 변화 추이를 분석하는 방법(Steindorfer, 1997; 김창용, 2003), 변위함수 파라미터(function parameter)를 이용하여 전방의 막장 암반상태 변화를 예측하는 방법(Sellner, 2000; Grossauer, 2001; 김창용 등, 2004) 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

현재 터널의 3차원 변위를 계측하기 위해 주로 광파측정기를 이용한 방법이 사용되고 있다. 하지만 광파 측정기를 이용한 방법은 계측기 자체의 정밀도와 측정시간, 측정자의 수준에 따른 오차 발생 등의 문제가 있다. 본 연구에서는 3차원 절대변위를 보다 빠르고 정밀하게 계측하기 위한 방안으로 디지털 영상 계측의 적용성에 대하여 살펴보았다. 디지털 영상 계측은 1960년대부터 활발히 연구가 진행되어 1970년대부터 산업전반에 걸쳐 정밀측정분야에 응용되기 시작하였으며, 고속도 컴퓨터 및 자동처리, 디지털 영상 계측의 개발로 정확도 및 처리시간에서 크게 발전되어 왔다.

암반공학 분야에서 최근 디지털 영상 계측의 활용은 주로 암반의 불연속면을 측정하는 것을 중심으로 연구되어 왔다. 이러한 연구들은 대부분 입체사진측량학의 원리를 이용하여 암반 절리면의 입체모델을 만들어 절리면의 방향성을 찾아내는 방법(류동우 등, 2000; 황상기, 2000; 김재동 등, 2003; Ohnishi et al., 2004; Gaich, 2004) 과 디지털 이미지로부터 암반의 절리의 궤적을 찾아내는 방법(류동우 등, 2000; 이효석 등, 2003; Gaich, 2000)에 초점을 맞추어 진행되어왔다. 최근에는 디지털 영상으로부터 만들어진 입체모델의 시간에 따른 변화양상을 이용해 변위를 계산하는 방법이 활발히 진행되고 있다. 대표적으로 사면의 변위계측시스템에 적용한 사례(한중근과 송영석, 2003), 터널의 상대변위 측정에 적용한 사례(정성혁, 2003), 불연속 암반에서의 굴착에 의한 거동해석 및 지보설계 반영사례(Ohnishi, 2004)등이 있다.

본 연구에서는 디지털 영상 계측을 통한 3차원 모델 구성 원리를 터널의 3차원 절대 변위 계측에 적용하고자 하였다. 터널에서 현재 주로 사용되고 있는 3차원 절대변위 계측방법인 광파측량기를 사용한 변위 계측방법과 비교 분석을 통해 디지털 영상계측의 현장 적용성을 살펴보았다.

## 디지털 영상 계측 원리

디지털 영상계측은 두 방향 이상에서 획득된 암반의 디지털 이미지로부터 대상체의 3차원 모델을 형성하는 작업에서 시작한다. 이러한 과정은 다음의 단계를 거쳐 이루어진다.

- 이미지 처리에 의한 각각의 이미지에서 서로 대응되는 점의 결정(영상정합 : image matching)
- 카메라 외부표정과 이미지의 공간상 정합점을 이용한 3차원 포인트 생성
- 표면 메쉬를 생성하기 위한 포인트들 사이의 연결(triangulation)

두 방향에서 획득한 동일 대상체의 이미지를 통해 정합점을 찾고 카메라의 외부 표정(external orientation) 인자가 결정되면 3차원 공간 좌표계에 정합점을 위치시킬 수 있다. Fig. 1은 한 쌍의 이미지의 정합점을 3차원 좌표로 변환시키는 원리를 기하학적으로 나타내고 있다. 두 개의 선인 $r'$과 $r''$은 정합점 $P'$, $P''$으로부터 시작하여 카메라의 투영 중심인 $O'$과 $O''$을 통과한 선이다. 공간상의 두선 $r'$과 $r''$의 교차점이 로 3차원 공간상에 위치하게 된다. 두 선이 정확히 한 점에서 일치하지 않

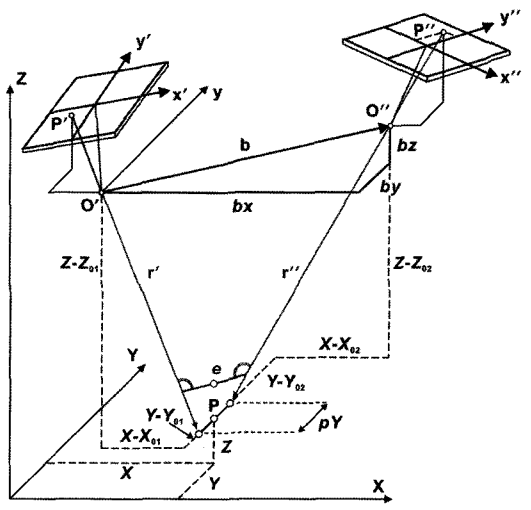



**Fig. 1.** Principle of 3D-reconstruction by using spatial intersection, homologous points and known interior and exterior orientations of the cameras.

는 것은 카메라 외부표정과 이미지 측정에서 생기는 오차에 기인하게 된다. 이럴 경우 두 선의 가장 가까운 거리의 중심점을 최종 3차원 공간상의 점으로 재구성하게 된다.

## 디지털 영상 계측 적용성 평가 실험

### 절대변위 측정 및 계측 정밀도 시험

디지털 영상계측을 활용하여 터널 내에서 3차원 절대변위를 계측하기 위해서는 매 측정시마다 기준점 좌표를 동일한 좌표계로부터 획득하여야 한다. 이를 위해서는 광파 측정기를 이용하여 기준점들의 좌표를 획득하는 것이 불가피하다. 따라서 디지털 영상을 이용한 3차원 입체 모델 생성을 광파 측정기를 이용하여 기준좌표계를 고정시켜서 측정하였을 때 계측의 정밀도에 대하여 살펴보았다. Fig. 2는 실험을 위한 대상체를 나타내고 있다. 터널의 폭을 고려하여 약 10 m의 폭을 가지는 콘크리트 벽에 터널 3차원 변위측정에 사용되는 광반사 타겟을 실제 크기와 같은 100 mm의 직경을 가지는 원형으로 만들어 Fig. 2의 1, 2, 3번 위치에 부착하였다. 측정 거리는 계측 타겟의 설치간격을 고려하여 10 m와 20 m의 두 가지 경우에 대하여 수행하였다.

광파 측정기 자체의 정밀도를 측정하기 위해 10 m 거리와 20 m 거리에서 1, 2, 3번 타겟 사이의 거리를 각 10회 측정하였다. Table 1은 측정결과를 나타내고 있다. 거리가 10 m에서 20 m로 늘어나는 경우에 RMS 오차

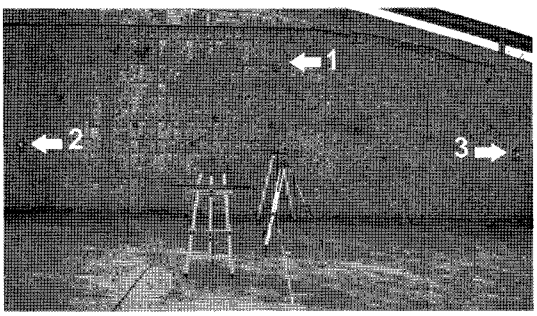
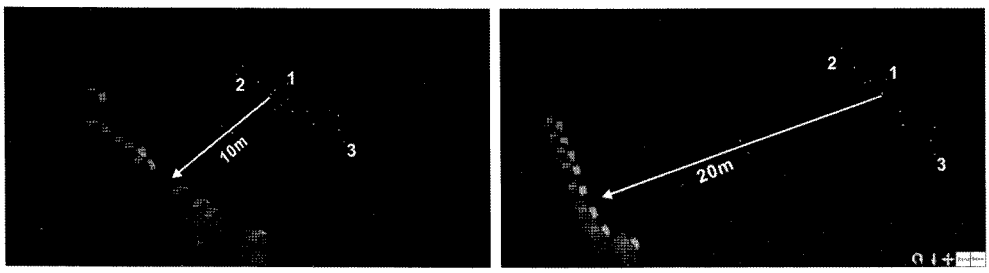



**Fig. 2.** Arrangement for precision evaluation of monitoring using the total station and digital vision.




(a) 10m away from the object (b) 20m away from the object

**Fig. 3.** Arrangement of the camera and targets for digital vision.

**Table 1.** Results of measurement precision of total station.

| | Distance between targets measured at 10 m off | | | Distance between targets measured at 20 m off | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1~3 | 1~2 | 2~3 | 1~3 | 1~2 | 2~3 |
| 1 | 5.835691 | 5.486117 | 10.730545 | 5.832350 | 5.484711 | 10.727212 |
| 2 | 5.834375 | 5.485445 | 10.728449 | 5.831494 | 5.485486 | 10.727133 |
| 3 | 5.835790 | 5.486580 | 10.731141 | 5.832771 | 5.486003 | 10.729021 |
| 4 | 5.833884 | 5.486989 | 10.730563 | 5.832908 | 5.484385 | 10.727455 |
| 5 | 5.834534 | 5.485428 | 10.729938 | 5.832255 | 5.486022 | 10.728176 |
| 6 | 5.835626 | 5.485678 | 10.727253 | 5.831622 | 5.486213 | 10.728038 |
| 7 | 5.836636 | 5.485429 | 10.728030 | 5.833505 | 5.485798 | 10.729252 |
| 8 | 5.835012 | 5.485725 | 10.726959 | 5.832108 | 5.485792 | 10.727429 |
| 9 | 5.834583 | 5.486909 | 10.727413 | 5.832519 | 5.485578 | 10.728656 |
| 10 | 5.834977 | 5.486364 | 10.727926 | 5.830100 | 5.486913 | 10.727175 |
| RMS | 0.0008 | 0.0006 | 0.0016 | 0.0009 | 0.0007 | 0.0008 |

**Table 2.** Results of 3d measurement of scale bar using digital vision and total station.

| | Scale bar left target | | | Scale bar right target | | | length (m) | Deviation from true value (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | x | y | z | x | y | z | | |
| Total station 10 m, Digital vision 10 m | −1.0755 | −0.7655 | −6.7193 | −0.1614 | −0.7930 | −7.3043 | 1.085585 | 0.909 |
| Total station 20 m, Digital vision 10 m | −1.075 | −0.7655 | −6.7188 | −0.1614 | −0.7929 | −7.3038 | 1.085498 | 0.996 |
| Total station 10 m, Digital vision 20 m | 1.1855 | −0.9229 | −10.032 | 2.2707 | −0.9093 | −10.043 | 1.085306 | 1.188 |
| Total station 20 m, Digital vision 20 m | 1.1854 | −0.9229 | −10.031 | 2.2705 | −0.9093 | −10.042 | 1.085219 | 1.275 |

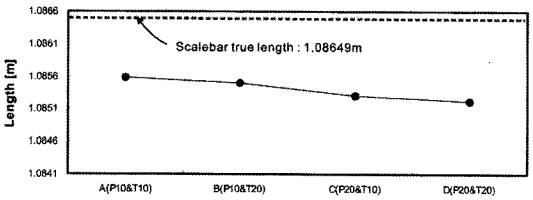



**Fig. 4.** Comparison of measured length and true length of scale bar.

는 큰 차이를 나타내지는 않았다. 가장 큰 RMS 오차는 1.6 mm로 나타났다. 터널에서 3차원 변위 계측에 활용 시 기준점 좌표를 광파 측정기로 측정할 때 이정도의 오차 수준을 감안해야 한다.

디지털 영상과 광파 측정기를 이용한 3차원 계측의 측정 기준은 만들어진 입체 모델 안에서 계산된 스케일 바 길이와 실제 길이와의 차이를 계산하는 방식으로 진행하였다. Fig. 3은 10 m와 20 m 거리에서 측정된 이미지를 통해 생성된 입체 모델을 나타내고 있다. Table 2는 디지털 영상 계측을 10 m와 20 m에서 한 경우에 기준점 좌표를 각각 10 m, 20 m에서 측정한 광파측정기 좌표로 입력하였을 경우에 생성된 입체모델에서 스케일 바의 좌표와 길이를 계산한 것이다. 4가지 경우에 측정된 길이간의 RMS는 0.169 mm로 나타났다. 그러나, 실제 스케일바의 길이와 비교한 각 모델별 길이의 차를 계산하면 0.9~1.3 mm 정도의 오차를 나타냈다(Fig. 4).

### 터널 내 3차원 절대변위 계측 적용 방안

국내의 터널 계측 기준 중 내공변위 계측은 일상적인 시공관리상 반드시 실시해야 할 항목인 '일상계측'에 포함되어 있다. 계측위치 및 배치간격에 대한 기준은 터널의 규모, 지반조건, 시공방법 등을 고려하여 계측목적에 부합되도록 선정하도록 되어 있다. 일상계측의 경우 측선은 20 m 간격을 표준으로 하고 지반조건이 불량한 구간이나 변화가 심한구간에 대해서는 계측간격을 표준간격보다 줄이고 양호한 경우에는 늘여서 측정하도록 되어 있다. Table 3은 국내 OO터널에서 시공 중 막장에서 조사된 암반등급(RMR)과 실제 내공변위 계측 간격과의 관계를 조사하여 나타낸 것이다.

일반적으로 터널에서의 3차원 절대변위 계측은 광파 측정기를 활용한 계측이 주를 이루고 있다. 대부분의 광파 측정기를 사용하는 3차원 절대변위는 광반사 타겟을 터널 굴착면에 부착하여 타겟 중심점의 변위를 측정하는 방식으로 이루어지고 있다(Fig. 5).

디지털 영상 계측에서는 언급한 바와 같이 최소한 3개의 기준점(control points)이 필요하며, 6개 이상 되어

**Fig. 5.** Target arrangement at the tunnel site for 3D displacement monitoring.

**Table 3.** Example of determination of displacement monitoring spacing in OO tunnel.

| Rock mass condition | Very good (RMR 80~100) | Good (RMR 60~80) | Fair (RMR 40~60) | Poor (RMR 20~40) | Very poor (RMR 0~20) |
|---|---|---|---|---|---|
| Spacing (m) | 30 | 20 | 15 | 10 | 5 |

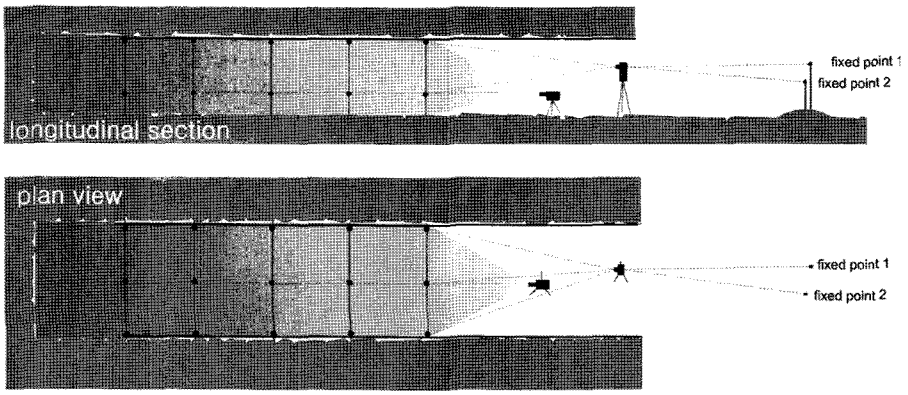



**Fig. 6.** Schematic sketch of a digital vision displacement monitoring.

야 오차를 최소화 할 수 있다(Gaich, 2000). 터널 내에서 디지털 영상 측량 시 광반사 타겟을 기준점으로 사용하여 획득된 이미지의 3차원 입체모델을 구성할 수 있게 된다.

계측을 위한 타겟은 터널의 굴착방향으로 배열이 되기 때문에 이미지 상에는 막장면 방향으로 모든 타겟이 나타나게 된다. 하지만, 영상을 획득하는 장소로부터 타겟이 멀어질수록 이미지 상에 타겟의 형상이 희미하게 나타나기 때문에 오차가 크게 발생할 수가 있다. 따라서 원하는 수준의 정확도로 변위를 계측하기 위해서는 측정지점에 따라 3D 입체모형을 만들기 위해 필요한 기준점 및 변위 계측 점에 대한 기준을 만들어서 계측을 해야만 한다.

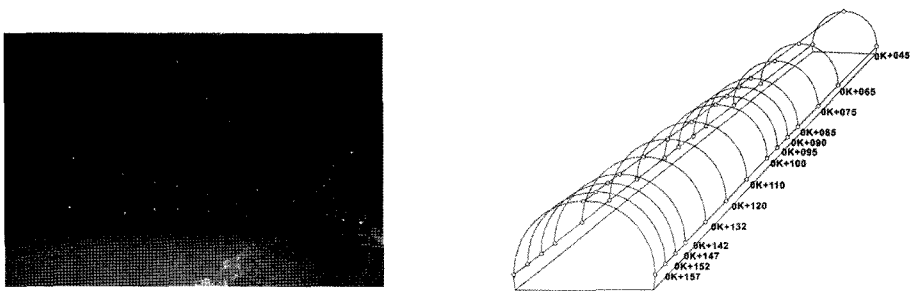
Fig. 6은 터널에서의 디지털 영상 변위 계측의 모식도를 나타낸 것이다. 측정지점부터 타겟까지 최소거리는 디지털 카메라의 초점거리를 통해 계산되어 결정되어지며, 원하는 정확도를 계산하여 각 처리될 측정지점의 범위를 계산하여야 한다. 디지털 카메라는 막장으로 계속 이동해 가며 막장에 제일 가까운 곳에 설치된 측정지점까지의 범위에 도달할 때까지 3D 입체 모델을 계속 생성해 나가게 된다.

## 시공 중 현장 디지털 영상 계측 결과

### 측정 방법

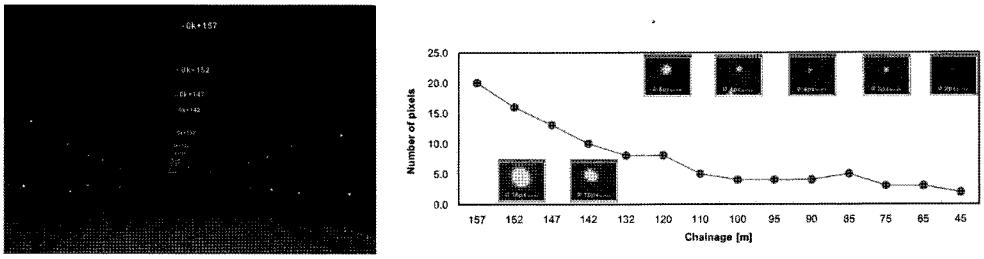
디지털 영상을 통한 터널 내공의 3차원 절대변위 계측의 현장 적용성 검토를 위해 OO터널 현장에 당초 계획된 내공변위 계측단면 상에 위치한 광파 타겟의 변위를 측정하고자 하였으며, 계획된 계측 단면은 Fig. 7과 같다. 본 연구가 수행되기 전 갱구부터 약 50 m 지점(Sta. 0K+112)까지 굴착이 진행되었으며, 광파 타겟은 Sta. 0K+157~Sta. 0K+120까지 설치되어 있었다.

터널 내에서 획득된 디지털 영상 이미지는 횡방향 폭은 짧지만 터널 진행방향으로의 거리는 제한이 없게 된다. 디지털 영상계측의 정밀도는 측정거리가 멀어질수록 감소하게 된다. 대상터널에서 측정된 이미지 상의 각 계측지점별 타겟의 크기를 픽셀수로 표현하면 Fig. 8(b)와 같은 분포를 보인다. 따라서 정밀도를 높이기 위해서는




(a) (b)

**Fig. 7.** 3D displacement measurement section of magu tunnel(Sta. 0K+157~ Sta. 0K+045).




(a) Digital image taken far from the face (b) Target size of each measurement section

**Fig. 8.** Variation of target image size depending on the distance from camera position.

종방향으로 나타나는 계측 지점의 거리를 제한할 필요가 있다. 대상현장의 경우 계측지점간의 거리는 Fig. 7(b)에 나타난바와 같이 최소 5 m에서 최대 20 m 이다. 본 연구에서는 디지털 영상 계측을 위한 3차원 입체모델 생성을 위해 측정위치마다 3개의 측선까지의 타겟만 고려하였다. 하나의 입체모델의 생성을 위해서 각 위치에서 3장 이상의 디지털 영상을 획득하여야 하여 입체모델을 구성하였으며, 마지막 2개 측선에서의 6개 타겟(천단, 좌·우 측벽)을 계속 중첩시켜가며 다음 입체 모델을 구성하여 6개 이상의 정합점이 두 입체모델에서 공유될 수 있도록 하였다(Fig. 9).

터널 전체 노선에서 계측하고자 하는 모든 타겟들에 대한 입체 모델이 완성되면 3차원 절대변위 계측을 위해 동일한 기준점을 통해 입체모델의 좌표계가 형성되어야 한다. 본 연구에서는 광파 계측을 통해 터널 외부의 움직임이 없다고 판단되는 기준점으로부터 좌표계를 형성하고 3개의 타겟 좌표를 계측하였다. 이렇게 측정된 좌표값을 디지털 영상 계측을 통해 만들어진 3차원 입체 모델에 적용함으로써 항상 동일한 좌표계에서 타

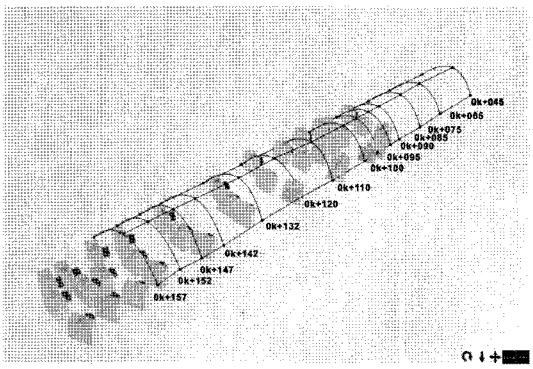



**Fig. 9.** Camera position for digital vision measurement of 3-D displacement of tunnel.

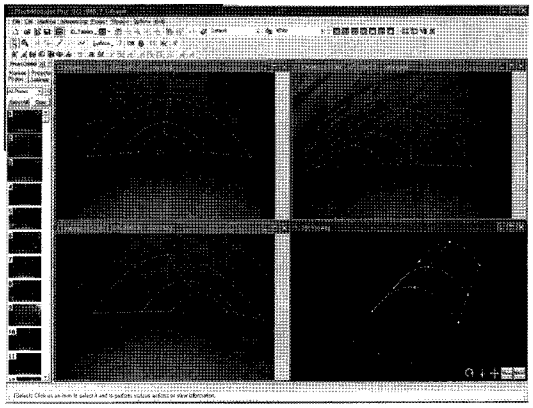
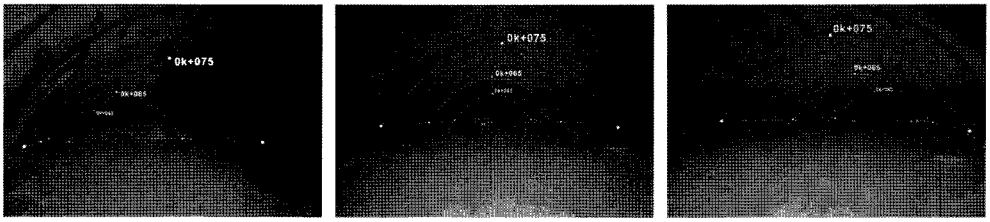


**Fig. 11.** 3D reconstruction of measuring points from images.




(a) (b) (c)

**Fig. 10.** Different view images of same measurement sections(Sta. 0K+075~Sta. 0K+045). (a), (b), (c) are images from left, center and right of tunnel respectively.

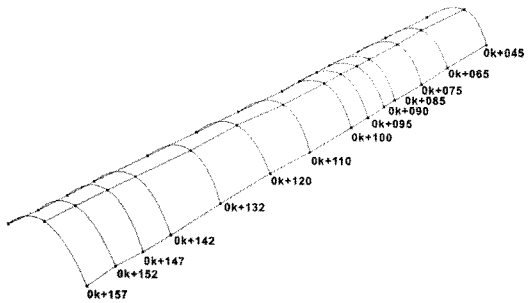



**Fig. 12.** 3D reconstruction of total measuring points by super positioning of each model.

겟들의 변위발생을 3차원적으로 파악할 수 있도록 하였다. Fig. 10은 Sta. 0K+075 Sta. 0K+045구간에서 측정된 서로 다른 세 위치에서 획득된 이미지를 나타내고 있다. 획득된 이미지는 프로그램에서 내·외부 표정 등의 처리를 거쳐 Fig. 11과 같은 하나의 입체모델이 생성된다. 입체모델들을 연결하여 생성시킨 터널 전 구간의 계측타겟의 3차원 입체모델은 Fig. 12에 나타나 있다.

이러한 디지털 영상 계측은 작업 공정에 따라 하루에 1~2회 정도 수행하였으며, 각 계측시마다 구성된 입체모델을 통해 광파타겟의 x, y, z 방향 좌표를 각각 계산하여 각 방향별 변위양상을 파악하였다.

## 디지털 영상계측과 광파계측 결과 비교

12개의 계측지점이 확보된 시점에서 디지털 영상 계측과 광파 계측을 이용한 계측을 동시에 수행하여 천단과 좌우 측벽의 타겟의 *x*(horizontal), *y*(vertical), *z*(longitudinal) 세 좌표성분의 편차를 구하였다(Table 4). Fig. 13에서 나타났듯이 두 방법을 통해 계측된 최대 편차는

**Table 4.** Comparison of 3D displacement of digital vision and total station.

| Section | Crown | | | Left wall | | | Right wall | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 157 | 6.338 | −0.194 | 4.785 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 13.419 | 0.000 | 0.000 |
| 152 | 6.310 | 4.512 | 4.764 | 0.100 | 4.827 | 0.194 | 13.314 | 4.704 | 0.222 |
| 147 | 6.541 | 9.576 | 4.858 | −0.098 | 9.558 | −0.093 | 13.516 | 9.219 | 0.009 |
| 142 | 6.758 | 14.252 | 4.882 | 0.035 | 14.325 | 0.179 | 13.570 | 14.214 | −0.009 |
| 132 | 7.032 | 24.694 | 4.727 | 0.062 | 24.588 | 0.000 | 13.523 | 24.160 | 0.111 |
| 120 | 6.807 | 35.082 | 4.604 | 0.033 | 35.294 | −0.266 | 13.617 | 35.389 | 0.097 |
| 110 | 7.306 | 46.061 | 4.432 | 0.051 | 45.631 | −0.400 | 13.919 | 45.372 | −0.232 |
| 100 | 7.283 | 57.610 | 4.301 | 0.343 | 57.382 | −0.516 | 13.970 | 57.363 | −0.422 |
| 95 | 7.268 | 62.788 | 4.352 | 0.267 | 62.613 | −0.361 | 14.065 | 62.522 | −0.385 |
| 90 | 7.128 | 68.131 | 4.113 | 0.231 | 68.028 | −0.334 | 13.970 | 68.049 | −0.312 |
| 85 | 7.062 | 72.621 | 4.068 | 0.079 | 72.402 | −0.414 | 13.907 | 72.132 | −0.493 |
| 75 | 7.078 | 82.674 | 4.089 | −0.062 | 82.690 | −0.707 | 13.904 | 82.526 | −0.858 |
| 65 | 6.494 | 93.599 | 3.759 | −0.191 | 93.676 | −0.922 | 13.737 | 93.544 | −0.930 |

(a) Digital vision measurement

| Section | Crown | | | Left wall | | | Right wall | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 157 | 6.505 | -0.486 | 5.551 | −0.13 | −0.466 | 0.379 | 13.161 | −1.466 | 0.822 |
| 152 | 5.99 | 3.778 | 6.524 | 0.657 | 3.82 | 0.488 | 13.679 | 4.855 | 2.359 |
| 147 | 6.925 | 9.959 | 5.02 | 0.43 | 8.217 | 0.251 | 13.92 | 9.184 | 2.092 |
| 142 | 7.625 | 12.853 | 7.432 | 0.167 | 12.979 | 3.905 | 15.047 | 14.193 | 3.736 |
| 132 | 7.792 | 24.554 | 6.209 | 1.241 | 23.14 | 2.139 | 14.75 | 23.617 | 0.61 |
| 120 | 8.173 | 34.664 | 4.794 | −0.149 | 35.413 | 1.958 | 13.667 | 35.791 | 2.598 |
| 110 | 7.797 | 45.863 | 5.538 | 0.282 | 44.306 | 2.54 | 14.002 | 44.745 | 1.523 |
| 100 | 8.661 | 56.94 | 5.454 | 0.261 | 56.197 | 1.707 | 15.183 | 57.05 | −0.291 |
| 95 | 6.984 | 63.058 | 5.92 | 1.261 | 61.622 | 1.913 | 15.25 | 61.636 | 1.273 |
| 90 | 7.154 | 68.321 | 3.952 | 0.478 | 67.984 | 0.709 | 13.571 | 67.229 | 1.073 |
| 85 | 6.863 | 72.906 | 5.607 | −0.255 | 71.502 | −0.174 | 15.27 | 71.247 | 0.4 |
| 75 | 7.081 | 83.103 | 5.648 | −0.145 | 83.1 | 0.479 | 13.93 | 81.509 | 2.613 |
| 65 | 6.699 | 93.189 | 7.143 | 1.095 | 93.03 | −0.454 | 14.445 | 93.613 | 1.221 |

(b) Total station measurement

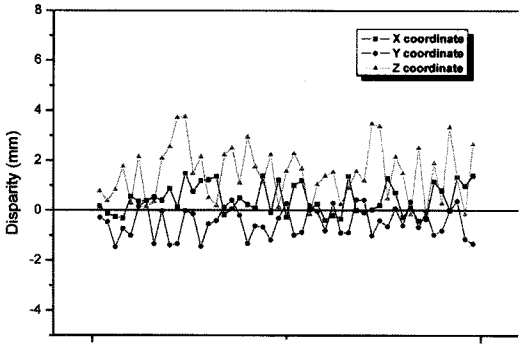



**Fig. 13.** Disparity of 3D coordinates of targets between total station and digital vision.

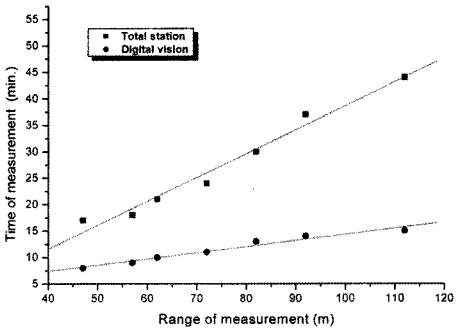



**Fig. 14.** Relationship between time of measurement and range of measurement using total station and digital vision.

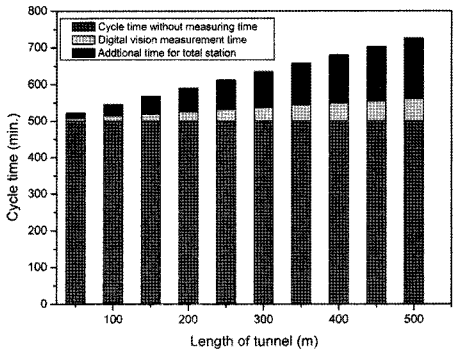



**Fig. 15.** Comparison of cycle time between optical measurement and digital vision measurement.

$z$방향에서 약 3.9 mm 정도로 나타났다. $x$와 $y$의 편차에 비해 $z$방향의 편차가 심하게 나타났으며, 이는 수평, 수직방향에 비해 진행방향으로의 거리 변화가 크기 때문인 것으로 판단된다. 광파 계측 계측과 디지털 영상계측을 비교한 실내시험에서는 두 계측 방법의 편차가 크지 않은 것으로 나타났으나, 본 현장에서의 측정결과는 실내시험에 비해 큰 편차를 나타냈다. 이러한 원인은 측정거리가 실내시험(20 m)에 비해 약 5배 이상 길어졌으며, 터널 내의 작업 여건상 분진과 조명 조건 등에 의해 계측조건이 열악할 수밖에 없기 때문인 것으로 판단된다.

### 디지털 영상계측의 경제성 평가

광파 계측과 디지털 영상계측을 통한 터널 시공 중 암반의 3차원 절대변위 계측 방법을 비교하기 위해 10회에 걸쳐 디지털 영상 계측과 광파 계측을 동일한 구간에 동시에 적용하였다. 각 방법을 사용한 계측에 소요되는 시간과 계측결과를 비교하였다. 계측에 소요되는 시간은 굴착이 진행됨에 따라 측정해야 하는 계측지점의 개수가 늘어나기 때문에 자연히 증가하게 된다. 측정시점에서의 계측지점의 개수에 따른 소요시간은 Table 5와 같다.

광파계측 시 절대변위 계측은 광파 타겟의 거리가 멀어질수록 시준이 힘들어지기 때문에 하나의 타겟 당 소요되는 계측 시간이 길어지게 된다. 디지털 영상계측의 경우 이미지의 처리는 현장에서 이루어지지 않기 때문에 이미지 획득에 소요되는 시간만 발생하게 된다. 광파계측의 경우 계측자의 수준에 따라 시준 결과의 편차가 발생할 수 있으나 디지털 영상계측의 경우 계측자의 수

**Table 5.** Comparison of time of measurement between optical monitoring and digital vision system.

| Measuring date | Number of measuring section | Total station | | Digital vision | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | No. of targets | Time of measurement (min.) | No. of images | Time of measurement (min.) |
| 2006. 6. 20 | 7 | 21 | 17 | 17 | 8 |
| 2006. 6. 21 | 8 | 24 | 18 | 19 | 9 |
| 2006. 6. 22 | 9 | 27 | 21 | 21 | 10 |
| 2006. 6. 26 | 10 | 30 | 24 | 24 | 11 |
| 2006. 6. 29 | 11 | 33 | 30 | 28 | 13 |
| 2006. 7. 06 | 12 | 36 | 37 | 32 | 14 |
| 2006. 7. 14 | 13 | 39 | 44 | 34 | 15 |

준에 큰 영향을 받지 않는다는 차이점이 있다.

광파 계측과 디지털 영상계측의 계측구간에 따른 계측소요시간 비교결과를 통해 디지털 영상계측을 현장에서 도입하였을 경우에 계측시간에 단축에 따른 공기 절감율을 계산해 보았다. 국내 OO 터널의 설계자료 상의 터널 1회 굴진당 cycle time은 3.5 m를 1회 굴진장으로 하는 패턴 I의 경우 1,412분, 1.0 m를 1회 굴진장으로 하는 패턴 V의 경우 686분으로 나타났다. 단위 m당 cycle time은 패턴 I는 403분, 패턴 V는 686분이다. 단위 m당 cycle time을 500분(8.3시간)으로 가정하고, 계측시간이 cycle time에 고려되지 않는 점을 감안하여 광파 계측과 디지털 영상계측의 공기를 Fig. 14의 회귀식을 통해 계산하여 cycle time에 포함시켜 계산해 보았다. Fig. 15는 터널 연장에 따른 cycle time을 계산한 것이다. 빨간 부분은 계측시간을 제외한 cycle time으로 연장에 따라 증가하지 않는 것으로 가정하였다. 녹색부분은 디지털 영상계측을 위해 소요되는 cycle time으로 Fig. 14의 회귀함수를 통해 계산된 값이다. 파란부분은 디지털 영상계측에 소요되는 시간과 광파 계측 계측에 소요되는 시간의 차이로서 광파 계측을 통한 계측을 수행하였을 때 추가로 소요되는 시간을 의미한다. Figure 15를 통해 나타나듯이 터널 연장이 늘어남에 따라 디지털 영상계측을 통한 공기 감소 비율은 점점 커지게 된다. 연장이 50 m 일 경우에는 3%의 공기 절감 효과가 있으나, 연장이 500 m 일 경우에는 18%의 절감효과가 발생하게 됨을 알 수 있다.

## 결 론

본 연구에서는 디지털 영상 측량 기법을 이용한 터널의 3차원 절대 변위 계측의 적용성을 살펴보았으며, 기존의 내공변위 계측방법인 광파 측량과 비교하였다. 3차원 절대변위 계측을 위해 광파 계측을 통하여 기준 좌표점을 설정한 후 디지털 영상 계측을 수행하는 경우의 정밀도를 측정하였다. 표준 길이를 알고 있는 스케일바를 대상 공간 내에 위치시킨 후 입체모델을 생성하여 측정된 스케일바의 길이와 실제 길이를 비교한 결과 0.9~1.3 mm의 오차를 나타냈다. 같은 측정거리에서 광파 계측을 통한 거리 측정의 RMS 오차가 0.6~1.6 mm 임을 고려하면, 디지털 영상 계측을 통한 3차원 절대변위 계측의 정밀도는 광파계측의 정밀도에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

계측을 위한 타겟은 터널의 굴착방향으로 배열이 되기 때문에 이미지 상에는 막장면 방향으로 모든 타겟이 나타나게 된다. 하지만, 영상을 획득하는 장소로부터 타겟이 멀어질수록 이미지 상에 타겟의 형상이 희미하게 나타나기 때문에 오차가 크게 발생할 수가 있다. 따라서 원하는 수준의 정확도로 변위를 계측하기 위해서는 측정지점에 따라 3D 입체모형을 만들기 위해 필요한 기준점 및 변위 계측 점에 대한 기준을 만들어서 계측을 해야만 한다. 아직까지 국내에서는 디지털 영상계측을 이용한 터널 변위 계측의 기준이 전무한 실정이며 향후 이러한 연구결과를 바탕으로 현장에서 효율적으로 디지털 영상 변위계측을 수행하기 위한 다양한 기준들이 마련되어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 산학연공동연구사업의 일환으로 수행되었으며, 삼성건설의 연구비와 현장적용 지원이 있었습니다. 연구에 협조를 해 주신 관계자분들께 진심으로 감사의 말씀 드립니다.

## 참 고 문 헌

김재동, 김종훈, 2003, 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리방향 해석방법, 터널과 지하공간, 한국암반공학회논문집, 제13권 제6호, pp. 486~494.

김창용, 김광염, 홍성완, 배규진, 2003, 터널 내공변위 Function Parameter 결정에 관한 연구, 대한토목학회 추계학술발표회 논문집, pp. 4872~4877.

류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진 측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 한국암반공학회논문집, 제10권 제3호, pp. 329~343.

유복모, Schenk, T., 2001, 현대디지털사진측량학, 문운당.

이효석, 김재동, 김동현, 2003, 영상처리를 이용한 암석 절리 궤적의 추적, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 논문집, 제13권 제5호, pp. 373~388.

정성혁, 이재기, 2004, 산업사진측량을 이용한 터널의 천단 및 내공변위 관측, 한국측량학회논문집, 제22권 제3호, pp. 209~215.

한국건설기술연구원, 2006, Smart 터널 Observation Expert System 개발 연구, 건설교통부 산학연공동연구개발사업 보고서.

한중근, 송영석, 2003, 사면안정해석을 위한 사진측량을 이용한 사면변위계측시스템, 한국지반공학회논문집, 제19권 제4호, pp. 23~32.

황상기, 2000, 암반 불연속면 배열을 측량하는 원격 영상측량기, 한국지반공학회 가을학술발표회논문집, pp. 697~704.

Barlow, J.P., 1986, Interpretation of Tunnel Convergence Measurements, MSc Thesis, Dep. of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.

Feng, Q., 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station, Engineering Geology, Vol 59, No. 1~2, pp. 133~146.
Gaich, A., 2000, Panoramic Vision for Geotechnical Analyses in Tunnelling, Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Austria.
Ohnishi, Y., Miura, S., Ryu, M., 2004, Application of Advanced Precise(Digital) Photogrammetry to Rock Engineering in Japan, Special Lecture of Korean Society of Rock Mechanics Symposium.
Ohnishi, Y., Miura, S., Ryu, M., 2004, Application of Advanced Precise(Digital) Photogrammetry to Rock Engineering in Japan, Special Lecture of Korean Society of Rock Mechanics Symposium.
Schubert, W., Vavrovsky, G.M., 1994, Interpretation of monitoring results, World Tunnelling, pp. 351¢¶356.
Sellner, P., 2000, Prediction of Displacements in Tunnelling, Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Austria.
Slob, S., 2002, An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques, EUROCK 2002, Funchal, Madeira Island, Portugal, pp. 87~94.
Steindorfer, A., Schubert, W., 1997, Application of new methods of monitoring data analysis for short term prediction in tunnelling, Proceedings of the International Symposium on Tunnels for People, pp. 65~70.
中原 博陸, 近久 博志 `筒井 雅行, 松元 和伸, 岡本 厚, 1998, 精密測量による岩盤不連面の測定にする模型, 土木5 3回年次術講演, pp. 778~779.
中原 博陸, 近久 博志 `筒井 雅行, 松元 和伸, 岡本 厚, 1998, 精密測量による岩盤不連面の測定にする模型, 土木5 3回年次術講演, pp. 778~779.

2007년 11월 23일 원고접수, 2007년 12월 12일 게재승인

**김광염**
한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0225
Fax: 031-910-0211
E-mail: kimky@kict.re.kr

**김창용**
한국건설기술연구원 지하구조물연구실
411-712, 경기도 고양시 일산서구 대화동 2311
Tel: 031-910-0224
Fax: 031-910-0211
E-mail: cykim@kict.re.kr

**이승도**
삼성물산 건설부문 토목ENG 팀
463-721 경기도 성남시 분당구 서현동 263 삼성플라자빌딩
Tel: 02-2145-6038
Fax: 02-2145-5555
E-mail: rockeng.lee@samsung.com

**서용석**
충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: ysseo@cub.ac.kr

**이정인**
서울대학교 명예교수
151-742 서울시 관악구 신림동 산 56-1 에너지자원신기술연구소
Tel : 02-880-7221
Fax : 02-871-8938
E-mail : cilee@snu.ac.kr