

# 디지털 영상 계측 기술의 영향인자에 따른 정밀도 분석

## Analysis of Digital Vision Measurement Resolution by Influence Parameters

김 광 염<sup>1</sup> Kim, Kwang-Yeom

김 창 용<sup>2</sup> Kim, Chang-Yong

이 승 도<sup>3</sup> Lee, Seung-Do

이 정 인<sup>4</sup> Lee, Chung-In

### Abstract

This study has reviewed the applicability of displacement measurement by using a digital vision technique based on typical photogrammetric methods. In this study, a series of experimental measurements have been performed in order to improve the accuracy of digital vision measurement by establishing criteria of factors of various vision measurements. It is found that the digital vision measurement tends to show higher accuracy as the image size (resolution) and the focal length become larger and the distance to an object becomes closer. It is also observed that measurement error decreases with processing as many images as possible in various angles. Applicability on high-resolution displacement measurement is proved by applying the digital vision measurement developed in this study to a large scale loading test of concrete lining.

### 요 지

디지털 영상을 이용하여 대상체의 입체모형을 생성하는 전통적인 사진 측량 방법을 활용한 계측의 적용성을 살펴 보았다. 본 연구에서는 디지털 영상을 이용한 계측의 적용성을 향상시키기 위한 방안을 마련하고자 실험을 통해 다양한 영향 인자의 설정에 따른 정밀도와 정확도를 분석하였다. 디지털 영상 계측은 획득된 이미지의 해상도가 클수록, 대상체에서 가까울수록, 초점거리가 클수록 보다 좋은 계측 결과를 나타내었다. 또한, 다양한 각도에서 가능한 여러장의 이미지를 획득하여 처리할 경우 계측 오차를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 디지털 영상계측의 정밀도는 계측대상과 측정조건에 따라 크게 좌우될 수 있다. 디지털 영상계측을 실험용 라이닝 재하실험의 시험편 변위측정에 적용해 봄으로써 정밀 변위 계측분야에 활용성을 파악하였다.

**Keywords :** Digital vision measurement, Measurement error, Measurement of displacement

### 1. 서 론

디지털 영상정보를 활용한 계측은 보정된 카메라를 사용하여 전기적 신호의 이미지를 획득하는 작업과 획득된 이미지의 정확한 위치를 결정하는 것을 포함하는

이미지 처리과정, 처리된 이미지 데이터로부터 2차원 혹은 3차원 상의 다양한 처리과정을 포함하게 된다.

지반공학 분야에서 디지털 영상계측의 활용은 주로 암반의 불연속면을 측정하는 것을 중심으로 연구되어 왔다. 이러한 연구들은 대부분 입체사진측량학의 원리를

1 정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구원 (Member, Researcher, Underground Structure Research Div. Korea Institute of Construction Technology, kimky@kict.re.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 책임연구원 (Member, Researcher fellow, Underground Structure Research Div. Korea Institute of Construction Technology)

3 정희원, 삼성물산 건설부문 토목ENG팀 과장 (Member, Manager, Civil Engrg. Team, Samsung Corporation)

4 정희원, 서울대학교 명예교수(Member, Emeritus Prof., Seoul National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이용하여 암반 절리면의 입체모델을 만들어 절리면의 방향성을 찾아내는 방법(Ohnishi et al., 2004; 김재동과 김중훈, 2003; Feng, 2001; Gaich, 2000; 류동우 등, 2000; 황상기, 2000)에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 최근에는 디지털 영상으로부터 만들어진 입체모델의 시간에 따른 변화양상을 이용해 변위를 계산하는 방법도 활용되고 있다. 사면의 변위계측시스템에 적용한 사례(한준근과 송영석, 2003), 터널의 상대변위 측정에 적용한 사례(정성혁과 이재기, 2004), 불연속 암반에서의 굴착에 의한 블록해석(Ohnishi, 2004)등이 대표적인 사례이다.

디지털 영상 이미지의 3차원 적인 분석은 이미지 상의 명확한 지점(explicit point)의 계측과 대상의 입체화(stereopsis)를 통해 이루어진다. 이러한 3차원적인 이미지 분석은 동일 대상에 대한 서로 다른 방향에서 측정된 이미지에서의 정합점(matching point) 결정, 3차원 포인트 생성(3D reconstruction), 그리고 대상면의 활성화를 위한 삼각면화(triangulation)의 절차를 통해 이루어진다(유복모와 Schenk, 2001). 두 방향에서 획득한 동일 대상체의 이미지를 통해 정합점을 찾고 카메라의 외부 표정(external orientation) 인자를 결정하면 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

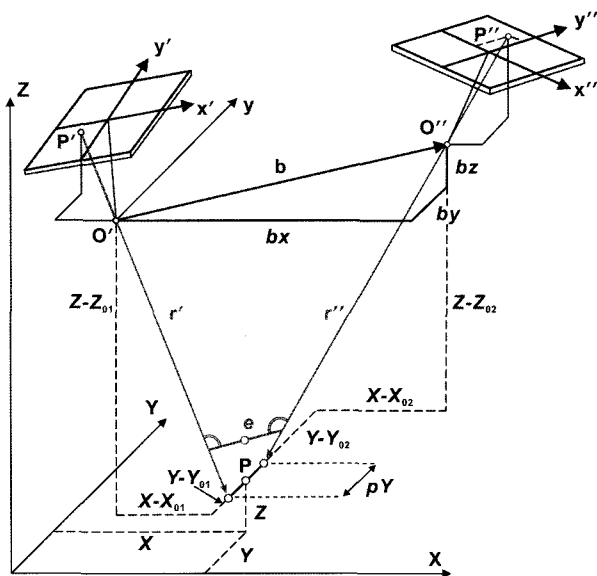


Fig. 1. Principle of 3D-reconstruction by using spatial intersection, homologous points and known interior and exterior orientations of the cameras

$O'$  과  $O''$  을 통과한 선이다. 공간상의 두선  $r'$  과  $r''$  의 교차점이  $P$ 로 3차원 공간상에 위치하게 된다. 두 선이 정확히 한 점에서 일치하지 않는 것은 카메라 외부표정과 이미지 측정에서 생기는 오차에 기인하게 된다. 이럴 경우 두 선의 가장 가까운 거리의 중심점을 최종 3차원 공간상의 점으로 재구성 하게 된다.

디지털 영상을 활용한 계측이 다양한 분야에서 시도되고 있으나 디지털 영상 계측의 이미지 획득 조건에 따른 정밀도 등에 대한 기초 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 실험을 통해 디지털 영상을 이용한 계측방법의 영향인자에 대한 계측 민감도를 분석하고 이를 통해 정밀도 향상방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법 및 구성

디지털 영상 계측의 정밀도를 알아보기 위하여 다양한 조건에서의 실험을 수행하였다. 본 연구에서 다루고자 하는 3차원 입체 모델구성을 통한 변위 계측은 획득된 이미지의 촬영조건과 품질에 영향을 받게 된다. 일반적으로 디지털 영상정보의 품질에 영향을 미치는 대표적인 인자들을 살펴보면 Table 1과 같다.

디지털 영상계측의 정밀도는 이미지의 해상도와 직접적으로 관련이 높다는 것이 많은 연구에 의해 나타나 있다. 최근 고해상도 디지털 카메라의 핵심 부품은 CCD(charge coupled devices)이다. CCD는 CID(charge injection device) 또는 CMOS(complementary metal oxide semiconductor) 등의 다른 센서와 비교해 가격이 저렴하고 노이즈가 적게 발생하며 측정범위가 넓고 신뢰도가 좋다는 장점이 있다. CCD는 기존의 아날로그식 카메라의 필름에 해당하는 센서이다. 디지털 영상 계측의 정밀도는 대상물의 크기와 화소수에 따라 정밀도가 결정되므로 화

Table 1. Typical influence parameters for digital vision

Parameter	Effect
type of light	shape & color of object
focal length	distance between lens and sensor
image size	number of pixels for expression of object
diaphragm (amount of acquired light)	adjustment of amount of light into lens
white balance	correction of color distortion due to type of light
ISO	how fast camera get light

소수가 큰 카메라를 선정하는 것이 유리하다. 특히, 측정 대상물의 크기가 큰 경우에는 가능한 하나의 영상에 많은 화소수를 포함하는 것이 분석의 정확도를 높일 수 있다. 본 실험에서는 Nikon사의 D2X기종을 사용하였다. Nikon D2X 및 사용된 렌즈의 제원은 Table 2~3과 같다. D2X기종은 최대해상도 4,288 x 2,848(픽셀)로서 측정 대상 크기에 따른 이론적 계측 오차범위는 0.23 (mm/m) 정도이다. 서브픽셀(sub-pixel)등의 기법을 이용하면 이러한 오차범위를 줄이는 것이 가능하다.

본 실험에서는 여러 가지 영향인자 중 초점거리, 이미지 크기, ISO 감도와 3차원 입체 모델을 위한 디지털 이미지 개수, 측정거리 등에 대한 정확도 분석을 수행하였다. 디지털 영상 계측의 정확도는 일반적인 계측의 오차 분석에 사용되는 방법을 사용하였다. 정확도는 실제 값과 측정된 값의 오차를 측정함으로써 구해진다. 정밀도는 반복적으로 측정을 수행하였을 때 계측값 사이의 오차를 측정하여 표현할 수 있다. 참오차(true error)는 참값(true value)과의 차이를 의미한다. 그러나, 일반적으로 참값을 알 수 없는 경우는 가장 참값에 근사한 값(계측값의 평균값을 주로 사용)과의 차이를 의미하는 잔류오차를 사용하게 된다.

계측을 위한 디지털 카메라의 캘리브레이션의 정확도를 실험하기 위해 3차원 실험공간을 만들고 카메라 외부 표정을 위한 기준점과 길이변화가 없도록 제작된

고정밀 표준 스케일바(scale bar)를 사용하였다. 3차원 실험공간에서 디지털 영상을 측정 후 입체모델을 만들고 기준이 되는 두 지점에 대한 거리를 측정하는 방식으로 실험을 수행하였다. Fig. 2는 3차원 입체모델을 구성하기 위한 실험공간의 배치를 나타내고 있다.

본 실험의 절차는 다음과 같다.

- 렌즈 초점거리별 디지털 카메라의 내부 변수 결정
- 6m 거리에서 ISO 감도를 100, 200, 400, 800, 1600 까지 변화시키면서 각각의 경우에 이미지 크기를 4,288x2,848 화소의 경우와 2,144x1,424의 두가지

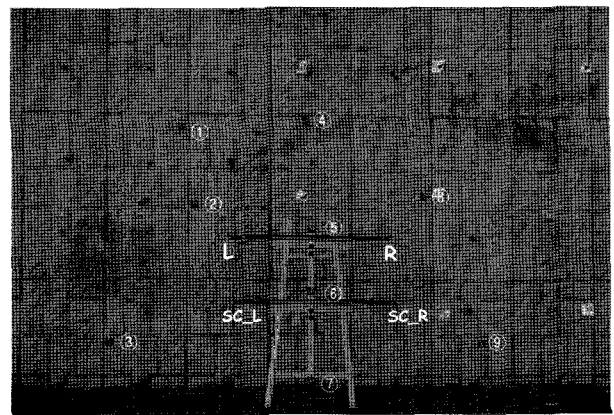


Fig. 2. Basic arrangement for field test to determine the accuracy of digital vision measurement (①~⑨) : coded target for control points, L-R : scale bar for measurement, SC\_L-SC\_R : standard scale bar

Table 2. Specification of high resolution digital camera (Nikon D2X)

Image Sensor(CCD)	Size : 23.7 x 15.7mm
Record Format	JPEG(Exif Ver. 2.1), RAW / DCF, DPOF
Max. Image Size	4,288 x 2,848(pixels)
Image quality mode	JPEG(fine / normal / basic), TIFF
Area of Coverage(mm)	38~155
Color Mode	sRGB, Adobe RGB, sYCC
Shutter Speed	30 ~ 1/8,000 sec, Bulb
Minimum Focal Length	General : 30cm, Macro : 2cm
ISO	100 ~ 800
Size/Weight	156x158x80mm/1.2kg

Table 3. Specification of lens for D2X (Nikkor AF-S DX ED 17-55mm F2.8G (IF) )

Focal Length	17mm - 55mm
Angle of View	28° ~ 79°
Lens Iris	F/2.8
Lens Scale Factor	1/5
Minimum Distance to Object	0.36m
Filter Diameter	77mm
Size(Diameter x Length)/Weight)	85.5x110.5mm/755g

경우에 대해서 이미지 획득

- 렌즈 초점거리별(28mm, 35mm, 55mm) 3장에서 6장까지 한 장씩 처리 사진수를 증가시켜 각각 각 세트마다 10회씩 반복 수행
- 상기의 조건에 대해 측정위치를 4m, 6m, 8m, 10m 까지 2m 씩 변화시켜 측정
- 각각의 모든 경우에 3차원 입체모형을 만든 후 기준 스케일바의 길이를 입력하여 실제 좌표계의 좌표값으로 변경시킨 후 측정대상 스케일바(L-R)의 길이를 측정

### 3. 디지털 영상계측 영향인자 분석 결과

#### 3.1 이미지 크기와 ISO 감도에 따른 정확도 측정 결과

측정 시험 공간과의 6m 거리를 유지한 상태로 각도를 변경시키며 5장의 이미지를 획득하였다. 초점거리는 24mm로 고정시켰으며, 각각의 위치에서 이미지 크기 비교군으로 large format(4,288×2,848 pixels)의 경우와 small format(2,144×1,424 pixels)의 두 가지 경우에 대해 이미지를 획득하였으며, ISO는 100, 200, 400, 800, 1,600까지 점진적으로 변화시켰다. Fig. 3은 5장의 이미지 측정위치와 입체공간으로 재구성된 기준점(coded target, control point) 및 스케일 바의 측정 중심점에 대한 평면도와 정면도를 나타낸다. ISO 감도를 변화시키는 것은 노이즈의 생성에 따른 계측의 정밀도 파악이 목적이며, 획득 이미지 크기를 변화시키는 것은 이미지 상의 원하는 계측 지점을 표현하는 픽셀수에 따른 영향을 살펴보기 위함이다. Fig. 4는 이미지 크기에 따른 이미지 상의 계측 지점을 표현하는 픽셀수의 변화양상을 나타내고 있다.

Fig. 5는 구성된 입체공간 좌표계에서 각각의 경우에

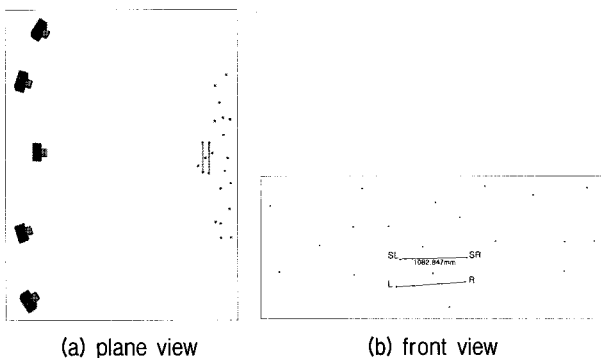


Fig. 3. 3D reconstruction of the test field. 20 points are used for the exterior orientations

스케일바(L-R)의 길이를 측정한 결과이다. ISO에 따른 계측 정확도는 이미지 크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. large format의 경우에는 ISO 변화에 따른 RMS 오차가 0.28mm 이었으나, small format의 경우에는 6.6mm의 RMS 오차가 발생하였다. 즉, 이미지 크기가 클수록 ISO에 증가로 인한 노이즈 발생의 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

이미지 크기에 따른 계측결과의 정밀도를 확인하기 위해 ISO를 변화시켜 측정된 값의 평균값과 실제 스케일바의 크기와의 차이(참오차)를 비교해 보았다. 본 실험에서 측정한 스케일바는 1,099.174mm의 정밀한 길이를 가지고 있다. large format의 경우는 0.12mm의 참오차가 발생하였으며, small format의 경우는 1.36mm의 참오차가 발생하였다. large format과 small format의 이미지는 크기가 가로와 세로 각각 2배, 픽셀수는 4배의 차이가 나는 반면에 참오차는 10배 이상 차이가 발생하였다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 이미지 크기가 큰 경우는 스케일바의 타겟 중심점을 원형으로 충분히 표시할 만큼 픽셀 수가 표현되어 타겟의 중심점을 마킹하는 것이 용이하지만, 이미지 크기가 작은 경우는 스케일바의 타겟의 지름을 표시하는 픽셀수가 4개로서 중심점을 잡는 부분에서 오차가 크게 발생한 것으로 판단된다. 디지털 영상을 통한 계측에서 측정대상을 충분히 표현할 수 있는 이미지 크기를 확보하는 것이 중요함을 알 수 있다.

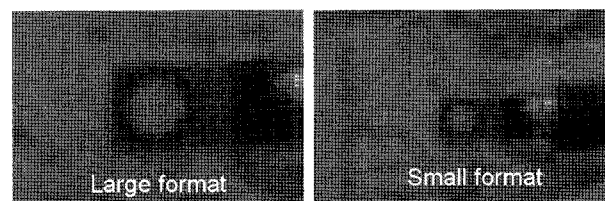


Fig. 4. Comparison of number of pixels for representing a target at two different image sizes

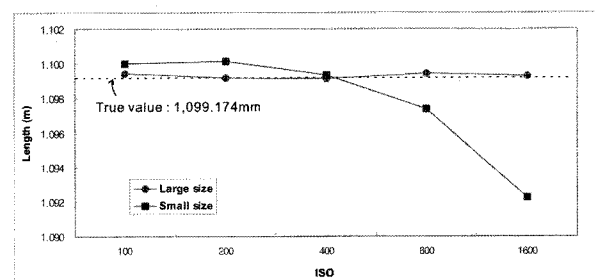


Fig. 5. Comparison of length measurement of scale bar depending on ISO & image size

### 3.2 초점거리, 측정거리, 처리 이미지 수에 따른 계측 결과

초점거리는 렌즈에서 센서까지의 거리로서 값이 작을수록 이미지가 넓은 화각을 가지게 된다. 본 실험에서 사용한 렌즈는 17mm~55mm까지 변화 가능한 렌즈이다. 초점거리는 28mm, 35mm, 55mm의 3가지 경우에 대해 촬영대상의 이미지를 획득하였다. 측정거리는 4m, 6m, 8m, 10m로 점차 증가시켰으며, 각각의 거리에서 초점거리마다 총 3장에서 6장까지의 사진을 각각 10회씩 반복하여 이미지를 획득하였다. 매 회당 측정위치를 조

금씩 다르게 하여 반복수행에 대한 오차를 확인 할 수 있도록 실험을 수행하였다. Fig. 6은 측정 위치 변화를 나타내고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 초점거리별, 3차원 입체모델의 구성에 이용된 이미지 수에 따른 스케일바의 측정결과를 비교한 것이다. 초점거리가 커질수록 RMS 오차가 작아지고 측정값과 실제 스케일바 길이와의 오차가 작아짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 초점거리가 작을수록 측정화각이 커짐에 따라 바깥부분에서의 왜곡에 의한 추가적인 오차가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

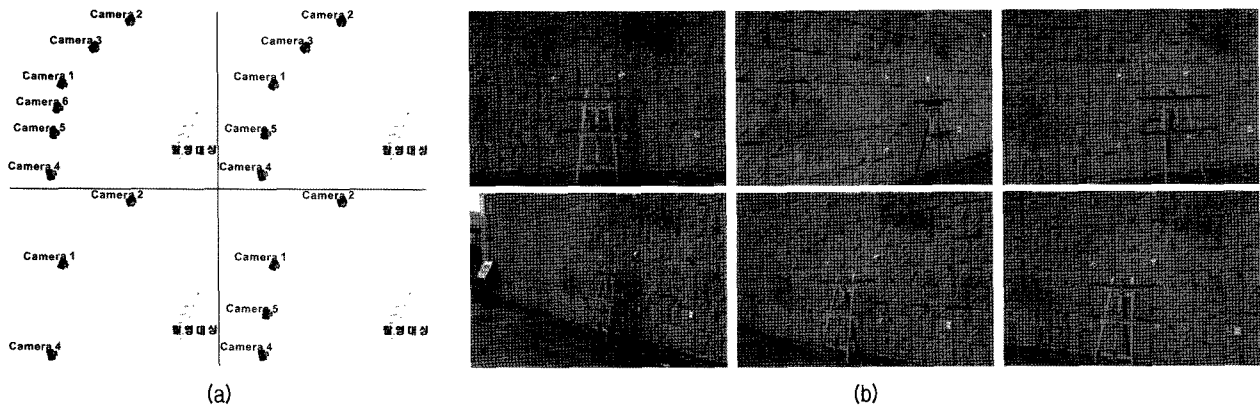


Fig. 6. (a) Camera position depending on the number of images for 3D-model  
(b) Variation of angle of view at 4m away with 28mm focal length

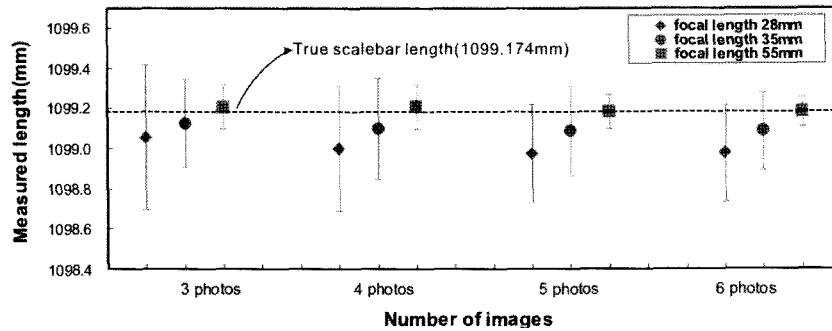


Fig. 7. Results of length measurement of scale bar depending on focal length and the number of images used for 3D

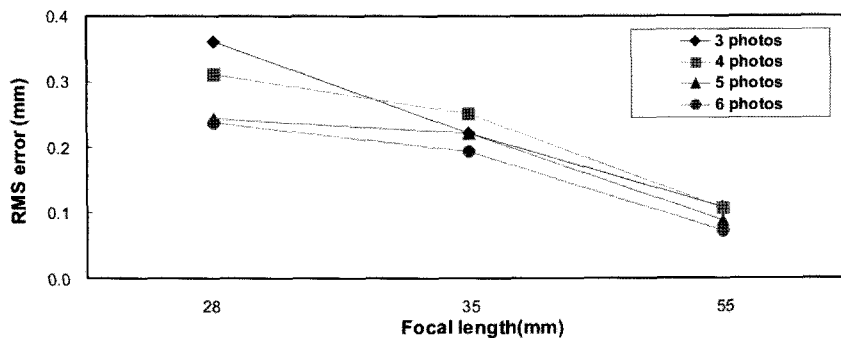


Fig. 8. RMS error of length measurement of scale bar depending on focal length and the number of images used for 3D

3D 입체모델 생성에 사용된 이미지의 수가 증가함에 따라 RMS 오차가 줄어드는 경향을 나타내었다. 이미지 수의 증가에 따라 줄어드는 오차는 5장 이상일 경우에는 크게 줄지 않고 수렴하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 측정거리에 따른 초점거리별 RMS 오차를 비교한 것이다. 처리 이미지 개수가 6장인 경우에 대해서만 결과를 도시하였다. 측정된 오차 값들 간의 RMS 오차 계산 결과 측정거리가 증가함에 따라 오차가 급격히 증가됨을 알 수 있다. Fig. 9(a)는 정밀도를 확인하기 위한 측정값의 RMS 잔류오차를 나타낸 것이며, Fig. 9(b)는 스케일바의 실제 값과 비교한 정확도 분석을 위한 RMS 참오차 값을 나타낸 것이다. 초점거리 55mm

의 경우에는 참오차와 잔류오차의 RMS값이 거의 비슷하게 나타났으며, 초점거리가 작을수록 참오차 값이 커짐을 알 수 있다.

이상의 결과를 토대로 본 실험 중 가장 좋은 결과를 나타낸 55mm 초점거리로 6장의 이미지를 획득하여 분석하였을 때를 최적의 조건이라 가정했을 때, 디지털 영상을 통한 계측의 정확도와 정밀도를 대상체의 크기와 측정거리 등의 기하조건을 고려하여 계산하기 위하여 Fig. 10과 같이 각 측정거리에 따른 이미지상의 실제 폭을 구하였다. Fig. 11은 측정거리에 따라 측정된 스케일바의 길이 변화를 나타내고 있다. 측정거리가 멀어지면 이미지에 나타나는 대상의 실제 크기는 초점거리가 일

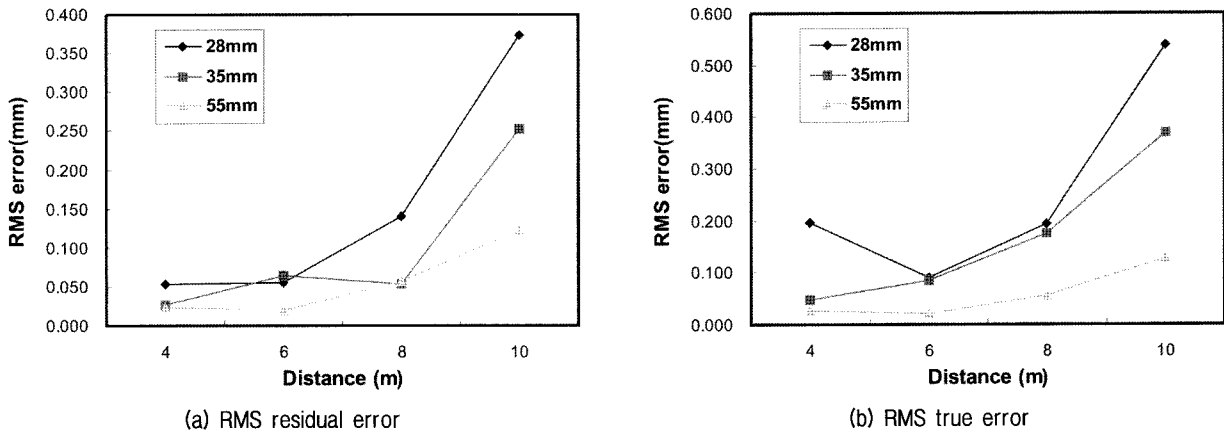


Fig. 9. RMS error of length measurement of scale bar depending on working distance

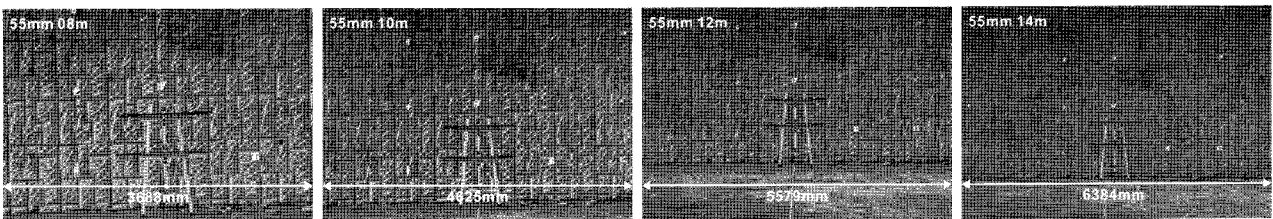


Fig. 10. Image width in world coordinate system depending on the distance to object (focal length = 55, number of images = 6)

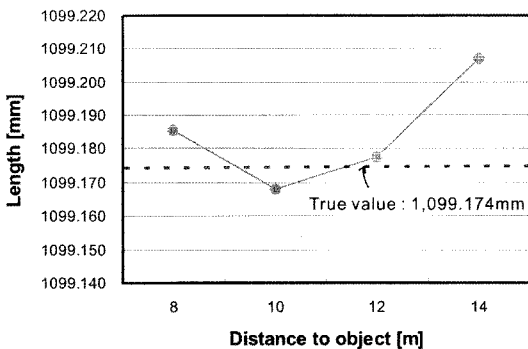


Fig. 11. Measured length of scale bar depending on the distance to object (focal length = 55, number of images = 6)

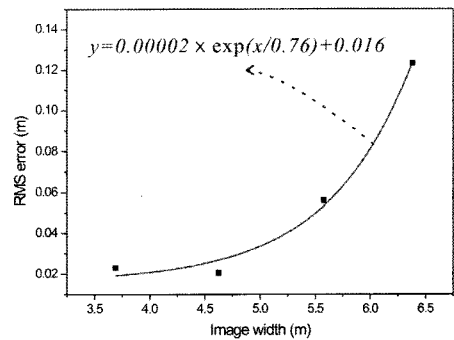


Fig. 12. Determination of the accuracy and precision of image width

정하다는 가정 하에 점점 커지게 된다. 이미지 상의 대상체의 폭과 각각의 경우에 계산된 오차들을 기준으로 계산된 정확도와 정밀도는 Fig. 12와 같은 관계를 가지게 된다. 즉, 대상체에 포함하는 영역이 커질수록 3차원 영상계측의 정확도와 정밀도는 지수함수적으로 커지게 된다. 원하는 정확도 수준에서 디지털 영상 계측을 수행하기 위해서는 이러한 관계를 이용하여 적절한 대상체의 크기를 결정해야 할 것이다.

#### 4. 실대형 라이닝 재하실험의 변위 측정

디지털 영상을 활용한 3차원 터널 내공변위 측정 가능성 및 정밀도를 확인하기 위해 실대형 라이닝 실험과정에 라이닝의 변위를 영상정보를 통해 획득하고 이를 하중 재하장치 컨트롤러에서 획득된 변위와 비교하였다. 디지털 영상 계측 시스템을 활용하여 Fig. 13과 같이 변위를 측정하였다. 8개의 Code 타겟과 1/1000mm 정밀도의 스케일바를 사용하였다. 실대형 실험에 사용되는 상부 가압기와 수평방향의 가압기에 LVDT가 내장되어 시료 천단부 상단 및 수평방향의 시료 변형을 측정하게 하였다. 상부 가압기와 수평방향의 가압기의 작용하중을 컨트롤러에서 확인할 수 있으며, 수평방향의 가압기의 경우 컨트롤러에 입력된 일정강성으로 제어가 가능하다.

변위제어를 통해 일정시간 동안 하중을 재하하면서 약 5분 간격으로 가압지점에서의 시편의 변위를 획득하였다. 영상정보를 통해 3차원 좌표를 획득하기 위해서는 최소 2개의 영상 이미지가 필요하기 때문에 각각의 경우에 좌우 측 2장의 사진을 이용하여 3차원 모델링을 수행하였으며, 반력시스템의 고정점을 기준으로 하여 시험편의 상대적 위치변화를 통해 변위를 구하였다. 본 실험에서 스테레오 이미지 획득의 방법은 동일 카메라를 이동하여 측정하는 것과 성능이 같은 두 카메라를 사전에 배치하여 동시에 계측하는 방법이 있다. 전자의 경우 카메라의 이동 시간 동안 재하가 이루어질 경우 두 이미지 상의 시험편의 변위 발생량에 차이가 생기기 때문에 정확한 계측이 어렵다. 후자의 경우는 두개의 카메라가 동일한 사양이라 할지라도 출고시부터 각 제품 렌즈의 캘리브레이션 결과가 동일하게 나타나는 것이 불가능하기 때문에 본 실험과 같은 정밀 계측에 사용되기 어렵다. 따라서 본 실험에서는 전자의 실험효과검증을 위해 스테레오 이미지를 동일한 카메라를 이동하여 측정하였으며, 카메라 이동시 소요되는 시간(5~10

초)동안에 발생하는 변위로 인한 오차요인의 경우 이미지 획득시간 동안 재하를 잠시 중지함으로써 변위가 더 이상 발생하지 않는다는 가정하에 재하가 중지된 동안의 시간이력에 따른 변위발생은 고려하지 않았다.

Fig. 14와 Table 4는 영상정보를 통해 계산된 변위와 하중가압장치 내부의 LVDT에서 계산된 변위를 비교한 것이다. 이미지 스케일 정밀도가 0.01(mm/pixel)이었으며, 최대 오차는 0.76mm, 평균 오차는 0.42mm, 분산은

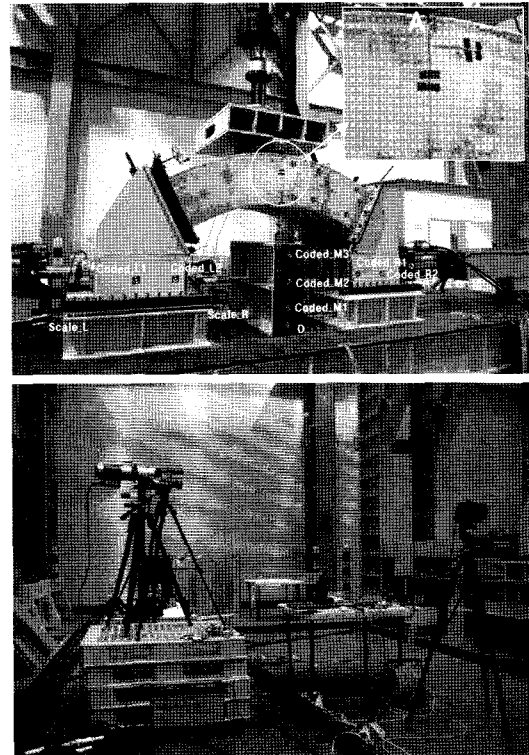


Fig. 13. Displacement monitoring using a digital vision system

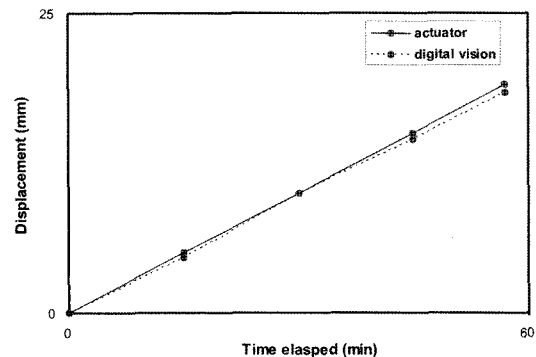


Fig. 14. Displacement of specimen measured by digital vision and actuator

Table 4. Precision of 3D digital vision monitoring

Resolution (mm/pixel)	Max. error (mm)	Mean error (mm)	Variance (mm)
0.01	0.76	0.42	0.06

0.06mm로 나타났다. 이와 같은 오차는 다양한 기계적 오차, 수행과정 오차 등 다양한 원인에 의해 영향 받을 수 있다. 영상정보의 정밀도에 따른 오차만 고려하였을 때, 대상체 크기에 대한 이미지 해상도를 높인다면 계측 정밀도를 높일 수 있을 것이라 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 디지털 영상 계측의 적용성을 살펴보기 위하여 다양한 영향 인자들에 대한 계측 결과의 민감도 분석을 수행하였으며, 실험용 라이닝 시험의 변위 측정에 적용해 보았다. 연구에서 나타난 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 카메라 내부 요소에 의한 디지털 영상 계측의 민감도를 분석한 결과 이미지 크기가 클수록 픽셀수가 증가하여 계측 정밀도가 증가하였다. 또한 ISO의 증가로 인한 노이즈 발생 계측 정밀도에 미치는 영향은 이미지 크기가 클수록 작아졌다. 즉, 해상도가 높은 카메라를 사용할수록 디지털 영상 계측의 정밀도를 증가시킬 수 있다.
- 초점거리, 측정거리, 입체모형을 만들기 위해 처리된 이미지 수에 따른 디지털 영상 계측의 정밀도를 분석하였다. 초점거리가 작을수록 측정화각이 커짐에 따라 이미지 외곽부에서의 왜곡에 의한 오차 발생으로 인해 정밀도가 낮게 나타났다. 입체 모델 생성에 사용된 이미지 수가 증가함에 따라 계측 오차가 감소하다가 5장 이상일 경우는 수렴하는 경향을 보였다. 또한, 이미지를 측정된 거리가 증가할수록 계측 오차는 크게 증가하는 경향을 나타냈다.
- 같은 해상도의 이미지에서 이미지 전체 크기에 대한 측정 대상의 크기에 따라 디지털 영상 계측의 정확도와 정밀도가 결정되어진다. 즉, 다른 조건이 동일할 경우 측정된 이미지 상에 계측 대상의 영역이 커질수록 3차원 영상계측의 정확도와 정밀도는 지수함수적으로 커지게 된다. 원하는 정확도 수준에서 디지털 영상 계측을 수행하기 위해서는 이러한 관계를 이용하여 이미지 상의 대상체의 크기를 적절하게 결정해야 한다.
- 라이닝 재하실험에서 시험편의 변위 측정에 디지털 영상계측기법을 적용한 결과 이미지 스케일 정밀도가 0.01(mm/pixel)인 경우에 LVDT와 계측결과와

비교한 계측 변위의 최대 오차는 0.76mm, 평균 오차는 0.42mm, 분산은 0.06mm로 나타났으며, 정밀 변위 계측 실험 등에도 활용도가 높을 것으로 확인되었다.

- 본 연구에서는 디지털 영상 계측의 오차원인에 대해 카메라 내부 인자들과 측정된 이미지의 크기, 처리된 이미지 수 등에 대해서만 다루었다. 하지만 연구 결과 중 ISO감도에 따른 영향이 실제 이미지 해상도가 크지 않은 경우 계측 정밀도에 영향을 주는 것으로 나타났듯이, 획득된 이미지의 품질(노이즈 정도 등)에 영향을 줄 수 있는 측정 환경(대기 중 먼지 농도 등)에 따른 영향도 다소 있을 것이다. 하지만 이러한 경우 이미지의 해상도를 높임으로써 측정환경에 따른 오차의 증가를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 산학연공동연구사업과 삼성물산(주) 건설부문에서 지원한 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 연구에 협조 해 주신 관계자분들께 감사의 말씀 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김재동, 김종훈 (2003), 수렴다중촬영기법을 이용한 새로운 절리 방향 해석방법, *한국암반공학회논문집*, 제13권 제6호, pp.486-494.
2. 류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동 (2000), 화상처리 및 입체 사진 측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, *한국암반공학회논문집*, 제10권 제3호, pp.329-343.
3. 유복모, Schenk, T. (2001), *현대디지털사진측량학*, 문운당.
4. 정성혁, 이재기 (2004), 산업사진측량을 이용한 터널의 천단 및 내공변위 관측, *한국측량학회논문집*, 제22권 제3호, pp.209-215.
5. 한중근, 송영석 (2003), 사면안정해석을 위한 사진측량을 이용한 사면변위계측시스템, *한국지반공학학회논문집*, 제19권 제4호, pp.23-32.
6. 황상기 (2000), 암반 불연속면 배열을 측정하는 원격 영상측량기, *한국지반공학회 가을학술발표회논문집*, pp.697-704.
7. 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.
8. Gaich, A. (2000), *Panoramic Vision for Geotechnical Analyses in Tunnelling*, Ph.D. Thesis, Graz University of Technology, Austria.
9. 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.

(접수일자 2007. 11. 23, 심사완료일 2007. 12. 26)