

사진측량용 이동식 표정판을 이용한 모형지반 변형량 측정 The Deformation Measurement of Simulated Ground using Movable Orientation Board for Photogrammetry

이효성¹⁾

Lee, Hyo Seong

Abstract

Digital close-range photogrammetric technique can measure and describe 3D geometric form from 2D image. This technique is a growing applicability in the field of sciences. Nevertheless, civil and mechanical field, which need measurements as precise as possible, use expensive measuring instruments in general. In addition there are occasions for analysis by means of visual method, since appropriate measuring instruments have been not yet available. This study therefore developed digital close-range photogrammetric technique with a movable orientation board to quickly measure deformation before and after destruction from simulated ground model of reinforced-soil wall. Then the results are compared with the measurements obtained using digital theodolite.

Keywords : Digital photogrammetry, Measuring instrument, Simulated ground, Orientation board

초 록

수치사진측량은 사진상에 나타난 대상물의 2차원적 형상으로부터 3차원적 기하형상을 측정하고 묘사하는 기술로서 여러 과학 분야에서 그 활용가능성이 증대되고 있다. 그럼에도 불구하고 정밀을 요하는 건설·기계분야에서 수치사진측량 방법 대신 값비싼 계측장비를 이용하는 경우가 많고, 마땅한 계측장비가 없어 시각적인 방법으로 분석하는 경우도 발생한다. 따라서 본 연구에서는 보강토 옹벽 실내모형 시험 장치의 모형옹벽 파괴전과 파괴 후에 대한 모형지반 변형량을 빠르게 측정하기 위해 이동식 표정판을 이용한 수치근접사진측량기법을 개발하였다. 그리고 그 측정 결과값들은 각측정기로 획득한 결과값과 비교하였다.

핵심어 : 수치사진측량, 계측장비, 모형지반, 표정판

1. 서 론

건설 구조물로 널리 사용되는 보강토 옹벽은 토압뿐만 아니라 지진 등의 동적하중에 대한 저항력이 큰 것으로 밝혀져 있다(이인모, 2002). 보강토 옹벽의 안정성에 대한 중요 요소는 사용 보강재의 포설길이와 연직간격이라 볼 수 있다(주재우 등, 2004; 김성태, 2005). 주재우 등(2004)과 김성태(2005)는 보강토 옹벽의 경제적 설계를 위해 보강옹벽모형시험 장치를 이용하여 똑같은 높이를 갖는 보강토 옹벽에 있어서, 보강재 길이와 연직간격을 바꾸어 가며 자립상태가 되는 조건을 찾는 실험을 실시하

였다. 이때 보강토 옹벽내부의 거동모습과 파괴형상은 저속 단사진 촬영방법을 통해 관찰하였다. 그러나 이 방법은 보강옹벽 모형시험 장치 내에 모형지반의 파괴전·후에 대한 이동경로를 시각적으로만 분석하였기 때문에 보강재의 길이와 간격에 따른 정량적 변형량에 대한 조사는 이루어지지 못했다. 만일 보강재의 파괴 전·후에 대한 변형량도 측정된다면 보강재 길이와 간격은 보다 정확하게 설계되어질 수 있을 것이다. 변형량을 측정하기 위해 선 토털스테이션(Total Station)이나 레이저 측정장비를 활용할 수 있겠으나 이들 장비들은 기계 셋업(Set-up) 시간, 측정시간과 비용이 다소 소요될 뿐만 아니라 수치

1) 연결저자·정희원·순천대학교 공과대학 토목환경공학부 조교수(E-mail:hslee@sunchon.ac.kr)

자료만을 제공하므로 시각적 분석을 동시에 할 수 없다.

따라서 이러한 문제점을 보완할 수 있는 대안적 계측방법으로 수치근접사진측량방법을 제안할 수 있다. 수치근접사진측량은 사진측량의 기본원리를 이용하여 사진상에 나타난 대상물의 2차원적 기하형상으로부터 3차원 형상을 측정하고 묘사하는 기술로서 다양한 분야에 활용되고 있다(Mikhail 등, 2001). 최근에는 토목·건설분야에서 자연상태의 암석, 지반이나 인공구조물 안전진단을 위한 변형 모니터링분야 등에 값비싼 계측장비를 대체하고 자동화 할 수 있다는 장점 때문에 그 활용가능성이 증대되고 있다. 이와 관련하여, Jessell 등(1995)은 필름용 카메라로 암석표면의 수치표고모델을 작성하고, 표면 거칠기의 이방성을 측정한 후, 레이저 프로파일러 측정결과와 비교한 결과 큰 차이가 없음을 제시하였다. Merel 등(1998)은 P32 카메라를 이용하여 약 2.4m 높이에서 주기적으로 반복 촬영한 흙 표면의 수치영상을 DSR14 해석도화기로 분석하여 흙 표면의 거칠기 변화를 모니터링 하였다. Lascelles 등(2002)은 강우로 인한 지면의 침식작용과 육지에서의 골짜기 형성에 관한 모의실험을 위해, 수치근접사진측량기법을 이용하여 가상의 강우 발생 전과 발생 후의 지면에 대한 수치표고모델을 분석하고, 소규모 지역에 대한 지면변화 양상을 파악하였다. Lee 등(2004)은 Rolleiflex 6006 측정용 카메라와 DCS 420 디지털 카메라로부터 촬영된 입체영상을 이용하여 암석의 표면 거칠기를 제시하고, 이들 결과를 레이저 프로파일러로부터 획득한 거칠기 값과 비교하여 제안기법의 신뢰성을 확보하였다.

이진덕 등(1996)은 스틸비디오 카메라를 이용한 비전 측정시스템으로 콘크리트 사일로 지지구조물의 변형을 높은 정밀도로 모니터링 하였다. 신봉호 등(1997)은 윈도우 환경의 수치영상분석시스템을 구축한 후, DCS 200 디지털 카메라를 사용하여 하중변화에 의한 모의교량의 순간거동을 파악하였다. 강준목 등(2000)은 CCD 카메라를 이용한 순간동기입체영상 획득시스템을 구축하였으며, 이로부터 콘크리트 공시체의 하중변화에 따른 변위량을 알아낸 후, 휨 변형량을 해석하였다. 한중근 등(2007)은 수치영상을 이용한 3차원 자동화 비주얼모니터링시스템을 개발하였으며, 이로부터 콘크리트 벽면의 강제변위와 보강토 옹벽블록의 변위계측 실험을 실시하였다. 그리고 실험결과를 토털스테이션의 측정결과와 비교하여 개발한 시스템의 활용 가능성을 확인하였다. 이효성 등

(2008)은 모형옹벽 파괴전과 파괴 후에 대한 모형지반 변형량을 최대오차 3mm 이내로 측정하였다.

그러나 기존연구 사례에서는 촬영 카메라의 내부표정 요소(Interior Orientation Parameters; IOPs)와 외부표정 요소(Exterior Orientation Parameters; EOPs)를 획득하기 위해 대상물 전면에 딱지점을 부착한 후, 각측정기 또는 토털스테이션 등으로 기준점 측량을 실시해야만 하기 때문에 측정시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 기준점 측량을 하지 않고, 대상물의 3차원 위치를 빠르게 획득하는 방법은 이미 V-STARs라고 하는 산업사진측량 시스템이 개발되어 활용되고 있다(Dold, 1998; Macklin 등, 1998 정성혁 등, 2005). 이 시스템은 측정용 카메라, 좌표계 설정용 Auto Bar, 축척 결정용 Scale Bar, 처리 소프트웨어, 여러 종류의 기준점 타겟, 비접촉 대상물 분석용 Pro-Spot 등으로 구성되어 있으므로(Fraser, 1997), 이들을 모두 구입하여 사용하기에는 경제적으로 부담이 될 수 있다.

본 연구는 저가의 비측정용 카메라를 이용하여 현장관측 시간을 단축하고, 작업의 효율을 높이기 위해 자체 제작한 이동식 표정판을 이용한 사진측량 방법을 제안하고자 한다. 특히 이 방법은 근거리 사진측량에서 접촉이 불가능한 대상물의 위치정보를 획득하는데 용이하게 사용될 수 있을 것이다. 이 방법으로 보강토 옹벽 실내모형 시험장치의 모형지반 변형량을 측정한 후, 각 측정기에 의한 관측값과 비교하여, 적용방법의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 측량방법

이동식 표정판을 이용하여 대상물의 3차원 위치를 획득하기 위해선 우선적으로 동종 카메라 2대가 필요하며, 이 동종 카메라가 촬영할 때 흔들림이 없고, 거의 동시에 촬영이 되도록 리모트 컨트롤이 가능해야만 한다. 다행히 최근에 판매되는 카메라는 대부분 리모트 컨트롤이 가능하다. 이러한 조건으로 모형지반 변형량을 측정하기 위한 순서는 다음과 같다.

첫 번째, 측정하고자 하는 실내모형 시험장치 앞에 표정판(이것은 일정한 간격으로 타겟이 설치되어 있으며, 타겟은 높낮이가 각각 다르게 분포되도록 하였고, 설치된 타겟들의 간격과 높이는 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정해 두었다)을 세운 후, 두 개의 카메라를 이용하여 원격

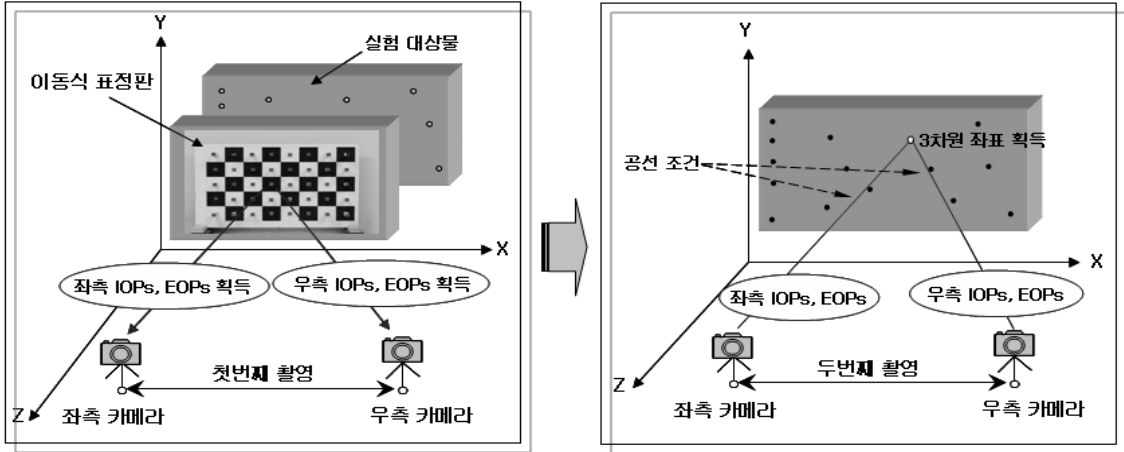


그림 1. 이동식 표정판을 이용한 카메라의 IOPs와 EOPs 획득모습(좌측그림), 획득한 IOPs와 EOPs로부터 대상물의 3차원 위치 추출 개념도(우측그림)

으로 동시 촬영한다(그림 1의 좌측그림). 여기서, 표정판을 제거하더라도 실내모형 시험장치가 영상에 들어오도록 해야만 한다. 촬영한 표정판 영상을 이용하여 촬영 당시 좌·우측 카메라의 IOPs와 EOPs를 구한다. 만일 촬영 전에 카메라를 자체검정 하였으면 그 결과에 의한 IOPs를 이용하면 된다. 자체검정 방법은 식 (1)에 보느냐와 같이, 카메라 렌즈중심과 사진 상의 점, 대상점이 일직선상에 있다는 공선조건과 IOPs를 조합한 확장 공선조건식을 기본으로 한다(오재홍 등, 2006). 이 식에서 최소제곱법을 이용한 번들조정 기법으로 IOPs와 EOPs를 동시에 획득할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x - x_o + \Delta x &= -f \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Y - Y_o) + m_{13}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)} \\
 y - y_o + \Delta y &= -f \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Y - Y_o) + m_{23}(Z - Z_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Y - Y_o) + m_{33}(Z - Z_o)}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x, y 는 임의 점의 영상좌표, x_o, y_o 는 주점변위량, $\Delta x, \Delta y$ 는 렌즈왜곡 보정량(본 연구에서는 방사왜곡 보정량 까지만 고려), X_o, Y_o, Z_o 는 카메라 렌즈중심의 3차원 위치, X, Y, Z 는 대상물에서 임의 점의 3차원 위치, f 는 초점거리이다. 그리고 $m_{11} \dots m_{33}$ 은 X, Y, Z 3축에 대한 자세(ω, ϕ, κ)가 포함되어 있는 회전행렬 요소이다.

두 번째, 표정판을 제거하고 실내모형 시험장치(모형지

반 변형진)를 대상으로 두 번째 촬영을 한다. 이때 주의할 점은 처음 촬영할 당시의 카메라 상태를 그대로 유지하도록 한 후, 원격으로만 촬영해야 한다(그림 1의 우측그림).

세 번째, 실내모형 시험장치에서 모형지반을 강제 변형시킨 후, 카메라는 첫 번째 촬영상태를 계속 유지시키면서 원격으로 촬영한다. 이렇게 수집한 영상과 첫 번째 과정에서 구한 IOPs와 EOPs를 이용하여, 표정판 좌표계 기준의 모형지반 변형 전·후에 대한 3차원 좌표를 획득한다(그림 1의 우측그림). 3차원 좌표 계산방법은 IOPs, EOPs와 좌·우 영상의 동일점을 이용하여 공간교차이론을 적용한다. 공간교차이론은 중복된 좌·우 영상에서 임의의 동일점을 찾았을 경우, 그때의 좌·우 카메라 투영 중심에 의하여 두 개의 직선(또는 공선)이 형성된다는 원리에 근거한다(Moffitt 등, 1980). 그림 1(우측 그림)에서 이론적으로는 두 공선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 EOPs를 결정할 때와 좌·우 영상의 동일지점(또는 매칭위치) 결정에서 피할 수 없는 오차들로 인하여 두 공선은 서로 $d = [d_x \ d_y \ d_z]^T$ 만큼 교차하지 않는다. 따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단 거리인 벡터 $\kappa \cdot d$ 를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 3차원 위치를 계산한다. 이는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} + \lambda \cdot M^T \cdot \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ -f \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \kappa \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, λ 는 그림 1(우측그림)에서 좌측카메라 렌즈중심으로부터 영상 면까지의 벡터와 렌즈중심으로부터 대상 면까지의 벡터 비, κ 는 최단 거리 d 에 대한 방향벡터 \vec{d} 의 스칼라(Scalar), M^T 는 회전행렬의 전치행렬이다.

이 방법은 근사적인 방법이지만 실용적인 면에서 가장 많이 사용된다. 정확한 해를 구하기 위하여 공선조건식을 이용한 최소제곱법을 사용하기도 하지만, 이것은 계산시간이 많이 소요되고, 반복계산을 요구하므로 주로 셋 이상의 직선을 교차시킬 때 사용한다.

물론 이 작업은 야외작업이나 외부영향(바람, 진동 등)이 많은 경우, 촬영자가 인식 못하는 상황에서 카메라의 위치와 회전이 미소하게 이동될 수 있으므로 장시간 소요되는 측정에는 적합하지 않을 수 있다. 따라서 실내관측이나 빠른 작업이 요구되는 현장관측에 있어서만 효과적일 수 있을 것이라 판단한다.

3. 적용실험과 비교분석

3.1 실험장비

본 연구에서 사용한 실내모형 시험 장치는 가로×세로×폭이 각각 500×260×50mm의 크기로서 직경이 각각 1.6mm와 3.0mm의 소형 알루미늄 봉을 일정 중량비로 포설하여 모형지반으로 활용하였고, 옹벽(또는 벽체)은 높이 24cm의 나무막대를 이용하였다(그림 2, 그림 3). 그리고 보강재로는 비교적 인장강도가 큰 한지를 사용하였다. 시험 장치에서 모형벽체와 보강재는 왼쪽 잠금장치를 풀면 보강재 길이나 연직 포설간격 등 포설조건에 따라서 자립하기도 하고 파괴되기도 하지만 본 실험에서는 모형지반 파괴시 변형량 측정을 위한 것이므로 자동적으로 파괴현상이 일어나도록 설치하였다.

사용된 표정판의 크기는 가로 80cm×세로 50cm이며, 평판과 같은 재질의 나무위에 10cm 간격의 격자무늬와 높이가 다른 나무막대기를 일정한 간격(대략 10cm)으로 설치하여 타겟으로 사용하였다(그림 4). 실험에 사용된 카메라는 CCD 크기가 가로 23.6mm×세로 15.8mm(한화소 크기: 0.006mm)인 NIKON D200 디지털 카메라 2대를 이용하였으며, 3,872×2,592 화소와 초점거리 85mm에서 원경 촬영하였다.

3.2 카메라 자체검정

두 카메라의 IOPs를 결정하기 위해, 두 카메라 각각에

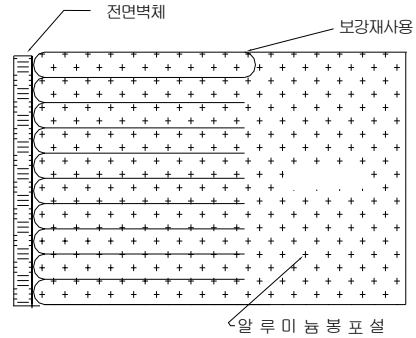


그림 2. 보강옹벽, 보강재와 지반으로 구성된 실내모형 시험장치

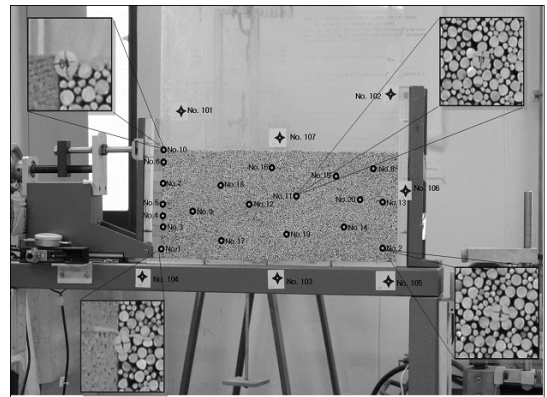


그림 3. 모형시험 장치에 부착한 기준점 배치도

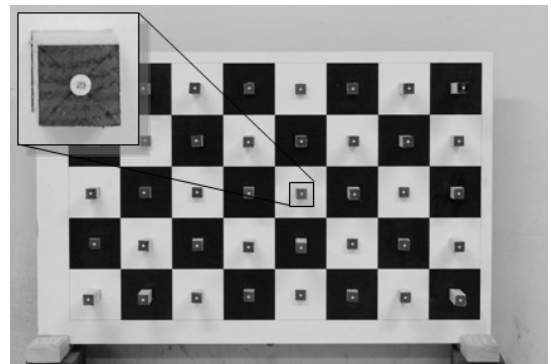


그림 4. 표정판과 타겟의 확대모습

대하여 9방향(좌측에서 상/중/하, 중앙에서 상/중/하, 우측에서 상/중/하)에서 초점거리 85mm로 표정판의 중복사진을 획득하였다(그림 5). 촬영기선은 1.20m, 촬영거리는 약 2.7m로 하였다. 좌표축은 표정판의 좌측 맨 하단 타겟을 기준으로 좌·우방향이 X축, 카메라 촬영방향이 Z축, XZ 평면과 직각방향이 Y축이 되도록 설정하였다.



그림 5. 두 카메라의 자체검정 실험

표 1. 표정판으로 9방향에서 촬영하여 구한 IOPs

카메라	초점거리	칼럼방향 주점변위량	라인방향 주점변위량	방사왜곡계수 (K_1)
카메라 1	92.68mm	0.33화소	1.03화소	-0.000138
카메라 2	92.55mm	1.17화소	0.85화소	-0.000138

표 2. 표정판으로 구한 IOPs와 EOPs의 위치결정 정확도
(단위: mm)

카메라	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z
카메라 1	±0.38	±0.23	±0.32
카메라 2	±0.39	±0.22	±0.32

표정판 영상내의 타겟 중 영상좌표 취득이 양호한 17 점만을 이용하여 확장 공선조건식(식 1)에 근거한 번들조 정으로 두 카메라에 대한 IOPs(초점거리, 주점 변위량, 방사 왜곡량의 첫 번째 계수 값)를 결정하였다(표 1). 두 카메라의 IOPs와 9방향에 대한 EOPs를 이용하여 17점을 제외한 나머지 12점의 타겟 위치 계산결과를 표 2에 나 타내었다.

특히, 표 1에서 초점거리는 두 카메라 모두 85mm에 고 정시키고 촬영하였으나 자체검정 결과 거의 8mm 정도의 차이를 보였다. 이는 사용한 렌즈가 고정식 렌즈가 아닌 줌렌즈 방식이기 때문에 초점거리를 인위적으로 고정시 키더라도 실제 촬영당시의 초점거리와는 다소 차이가 있 는 것으로 판단된다. 그리고 제원이 동일한 두 카메라를 사용하였기 때문에 자체검정에 의한 IOPs(표 1)뿐만 아 니라 위치결정 정확도 결과도 유사하게 나타났다. 그러나 촬영거리가 대략 2.7m이고 초점거리가 93mm이면 적어도 위치오차는 영상에서 한 화소 실제크기(0.006mm×2700 mm/93mm)인 0.2mm 이내이어야 하나 표 2의 결과는 한

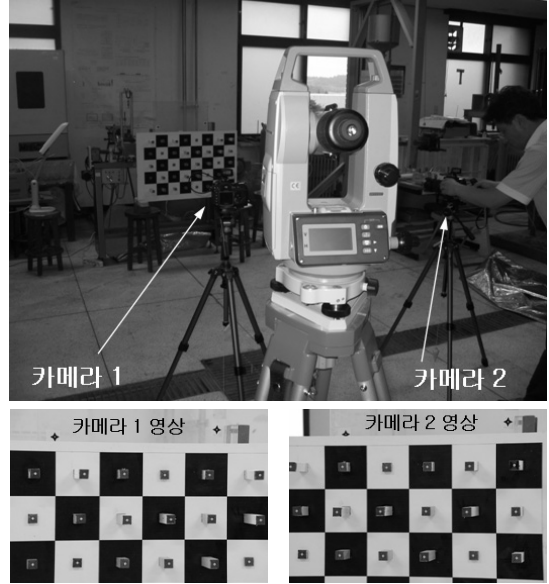


그림 6. 시험장치 앞의 표정판 촬영모습과 획득한 좌, 우 카메라 영상

화소 이상의 위치오차를 보이고 있다. 이는 그림 4에서 보는바와 같이 표정판에 10cm 간격으로 설치된 타겟의 정 중앙을 정확하게 표시하고 있지 못함으로 인한 측정오 차에 기인하는 것으로 판단된다.

3.3 모형지반 변형량 측정

모형지반 변형량의 신속한 측정을 위해, 먼저 실내모형 시험장치 앞에 설치한 표정판을 대상으로 두 대의 카메라 를 이용하여 수렴 촬영에 의한 입체영상을 획득하였다(그림 6). 다음으로 표정판을 걷어내고, 두 카메라는 그대로 둔 상태에서 모형지반 변형 전·후 각각에 대한 입체영 상을 획득하였다(그림 7). 이때 카메라의 흔들림을 방지 하고, 변형 전·후 입체영상의 동일한 외부표정요소를 획 득할 수 있도록 무선 리모터 컨트롤로 촬영하였다. 촬영 은 자체검정 때와 같은 촬영기선과 거리를 유지하였고, 좌표축도 같은 방법으로 설정하였다. 그리고 표정판을 이 용한 모형지반 변형량 관측의 정확도를 알아보기 위해, 포설된 알루미늄 봉(모형지반)에 20점, 시험장치 주변에 7점의 타겟(또는 측점)을 설치하였고(그림 3), 모형지반 변형 전·후 각각에 대한 27점의 3차원 위치는 데오돌라 이트(DT5S 각측정기)를 이용한 삼각측량 원리로 구하였 다(그림 6). 단 그림 3에서 보는바와 같이 시험장치 주변 별표모양의 7개 기준점은 변형되지 않으므로 한번만 관

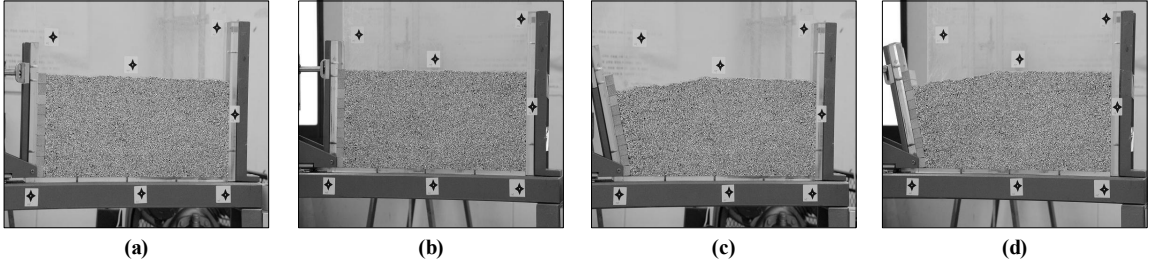
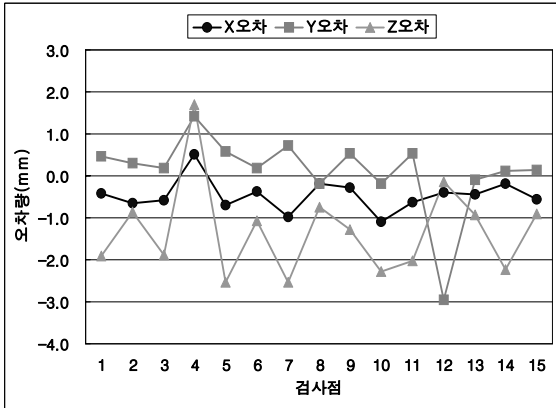
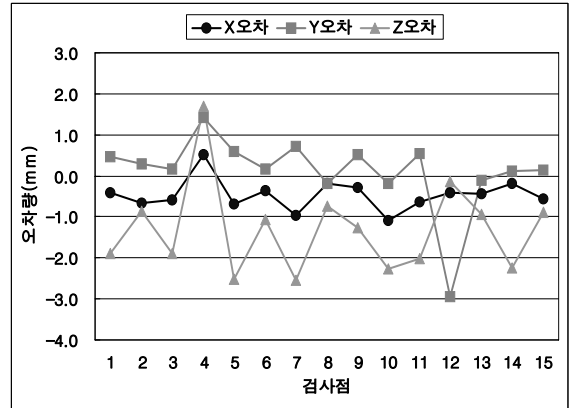


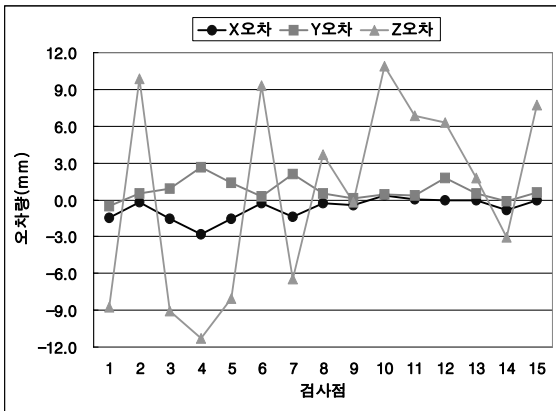
그림 7. 모형지반 변형전의 좌우 입체영상(a, b)과 모형 보강토와 옹벽 파괴에 의한 모형지반 변형후의 좌우 입체영상(c, d)



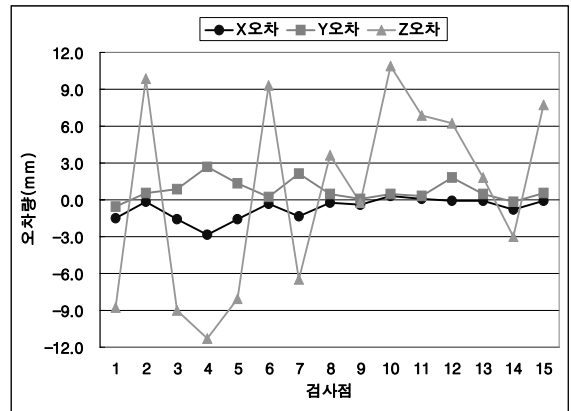
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

그림 8. 모형지반내 설치된 15개 검사점의 변형 전·후 차이(변형량)를 Case별 사진측량으로 획득하여 각측정기로 획득한 변형량과 상호 비교한 결과

측하였으며, 이 기준점은 표정판의 측정 정확도 비교를 위한 평가용 표정요소를 구하는데 사용되어 질 것이다.

실험결과 분석은 4가지 경우로 나누어 수행하였다. 첫 번째는 시험장치 주변 7개 기준점을 이용하여 모형지반 변형 전·후에 대한 영상 IOPs와 EOPs를 획득한 경우(이하 Case 1), 두 번째는 첫 번째 방법에서 사용한 7개

기준점을 이용하여 EOPs만을 획득하고, IOPs는 표정판을 이용하여 2대 카메라 각각에 대해 자체검정한 결과를 사용한 경우(이하 Case 2), 세 번째는 첫 번째 방법에서 사용한 7개 기준점 대신 표정판을 이용하여 IOPs와 EOPs를 획득한 경우(이하 Case 3), 네 번째는 표정판을 이용하여 EOPs만을 획득하고, IOPs는 표정판으로 자체

표 3. 각측정기로 획득한 변형량을 기준으로 Case별 변형량에 대한 평균제곱근오차 (단위: mm)

분석방법	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
3방향 RMSE				
X	±0.59	±0.64	±1.10	±1.05
Y	±0.92	±0.90	±1.13	±1.15
Z	±1.69	±1.73	±7.61	±7.73

검정한 결과를 사용한 경우(이하 Case 4)이다. 이들 4가지 경우로부터 모형지반 내에 설치된 15점들(여기서, 모형지반 내에 설치된 20점 중 과대측정오차가 발생한 5점은 제외하였다)의 변형량을 구한 후, 각측정기에 의한 실측값과 비교하였다(그림 8).

비교 결과, 변들조정으로 EOPs만을 구하고 IOPs는 자체검정에 의한 결과 값을 사용한 경우(Case2, 4)와 EOPs, IOPs를 동시에 변들조정으로 구한 경우(Case1, 3)의 결과 차이는 거의 없다는 것을 알 수 있다(표 3). 그림 8에서 Case1과 Case2, Case3과 Case4를 검사점 별로 비교해보더라도 Case1, 3의 오차경향성과 Case2, 4의 오차경향성이 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 표정판과 같이 충분한 기준점이 확보된다면, 표정판과 대상물 영상을 이용하여 자체점정 작업을 별도로 수행하지 않더라도 자체검정을 별도로 수행한 결과와 큰 차이가 없다는 것을 파악할 수 있다.

그리고 Case 1, 2의 경우, X, Y방향보다 Z방향(촬영방향)의 오차가 약간 크게 나타난 것을 알 수 있다. 그 원인으로서는 시험장치 주변에 부착된 7개 기준점의 배치가 평면적(X, Y방향)으로는 골고루 분포되는 반면에 촬영방향에 대해선 평면적 분포만큼 배치시킬 수 없고(그림 3), 촬영기선에 비해 촬영거리가 상대적으로 길기 때문인 것으로 판단한다. 따라서 이로부터 결정된 외부표정요소는 위치결정 정확도에 있어서 직접적인 영향을 주는 것으로 판단되어진다. 한편 Case 1, 2의 결과에 비해 Case 3, 4의 Z좌표 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 그 원인으로 먼저, 시험장치 주변에 부착한 7개 기준점 타겟에 비해 표정판 타겟 표시방법의 불명확성으로 인한 타겟 영상좌표와 3차원 위치의 측정오차에 기인한 것으로 판단된다. 다음으로, 촬영당시의 표정판 위치가 실내모형 시험장치 주변에 설치된 7개 기준점의 3차원 좌표축과 일치하지 않음에 따라 좌표축 변위에 의한 세부 축 벡터 편차도 원인인 것으로 판단된다. 따라서 두 번째 원인분석을 위해, 각 Case 별 표정요소를 표 4에 나타낸 후, 그 차이 값들을 분석해 보았다.

표 4는 각 Case 별 카메라 1, 2의 EOPs와 초점거리를 나타낸 것이며, 이로부터 변형량 측정오차가 상대적으로 적은 Case 1, 2에 대한 카메라 1, 2의 표정요소(EOPs, 초점거리) 차이와 Case 3, 4 표정요소 차이의 차이 값(이하

표 4. Case 별 카메라 1, 2 표정요소와 차이 값, Case 1 표정요소 차이 값과 Case 3 표정요소 차이 값의 이중차, Case 2 표정요소 차이 값과 Case 4 표정요소 차이 값의 이중차

분석방법	표정요소	ω (rad)	ϕ (rad)	κ (rad)	X_o (cm)	Y_o (cm)	Z_o (cm)	f (mm)
Case 1	카메라 1	-0.02413	-0.23241	0.00770	139.59	207.92	255.56	94.72
	카메라 2	-0.01870	0.21333	0.00346	261.05	205.14	254.50	96.29
	차이 값(DP1)	-0.00543	-0.44574	0.00427	-121.46	2.78	1.06	-1.58
Case 2	카메라 1	-0.02464	-0.22695	0.00780	142.91	207.87	263.35	92.60
	카메라 2	-0.01877	0.20852	0.00352	258.82	205.07	258.44	92.47
	차이 값(DP2)	-0.00587	-0.43547	0.00428	-115.91	2.79	4.91	0.13
Case 3	카메라 1	-0.02215	-0.16676	0.00404	-10.80	41.27	264.75	102.63
	카메라 2	-0.01007	0.19066	-0.00024	99.29	36.37	267.18	104.19
	차이 값(DP3)	-0.01208	-0.35742	0.00428	-110.09	4.90	-2.44	-1.56
Case 4	카메라 1	-0.02469	-0.14760	0.00406	-1.39	41.16	236.65	92.60
	카메라 2	-0.01437	0.17580	-0.00028	89.39	36.99	234.86	92.47
	차이 값(DP4)	-0.01032	-0.32340	0.00434	-90.78	4.18	1.79	0.13
이중차 1(DP1-DP3)		0.00665	-0.08832	-0.00001	-11.37	-2.11	3.50	-0.02
이중차 2(DP2-DP4)		0.00445	-0.11207	-0.00006	-25.13	-1.38	3.12	0.00

이중차)을 나타낸 것이다. 여기서, 3방향 좌표축 중 X축에서 이중차 값(각각 약 -11cm, -25cm)이 가장 크게 발생하였으며, 이로 인한 3축 회전요소 중 Y축 회전요소(ϕ)의 이중차 값(각각 -0.08832rad, -0.11207rad)이 가장 크게 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이, 시험장치 좌표축 대비 표정판 좌표축 중 X 좌표축 변위가 가장 크게 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 초점거리(f)의 경우, 표정 판으로 IOPs와 EOPs를 한꺼번에 결정한 Case 3에서 자체검정 결과 값(Case 2, 4)과 많은 차이를 보이고 있다. 이 또한 X축의 위치에 따라 촬영벡터가 달라질 수 있으므로 f 결과 값(카메라 1, 2 각각 102.63mm, 104.19mm)도 X축 변위가 크게 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 식(2)에서 Z좌표(촬영방향)를 결정하는 주요요소는 ϕ 와 f 이므로(Moffitt, 1980), Case 3, 4에 대한 Z좌표의 상대적 큰 오차가 X축 변위에 따른 ϕ 와 f 편차에 의한 것으로 판단된다.

결론적으로 NIKON D200 디지털 비측정용 카메라로 약 2.7m 거리에서 기준점 측량을 하지 않고 표정판만으로 보강토 옹벽 실내모형 시험장치의 모형지반 변형량을 수치근접사진측량으로 측정할 결과, 평면위치는 $\pm 1\text{mm}$ 내외, 촬영방향의 위치는 $\pm 8\text{mm}$ 범위내외에서 측정할 수 있었다. 만일 표정판을 보다 정밀하게 제작하면 실험결과의 정확도도 향상될 것이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자체 제작한 이동식 표정판만으로 카메라의 외부표정요소를 결정할 수 있는 수치근접사진측량 기법을 개발하였다. 제한한 방법으로 보강토옹벽 실내모형 시험장치의 모형옹벽 파괴 전·후에 대한 모형지반 변형량을 신속하게 측정할 수 있었다. 그 결과, 모형지반의 평면위치 변형량은 $\pm 1\text{mm}$ 내외, 촬영방향의 변형량은 $\pm 8\text{mm}$ 범위내외에서 측정할 수 있었다. 향후, 표정판 타겟 설치와 측정에 있어서 보완이 이루어진다면 보다 정확한 측정이 이루어 질 것이라 판단된다. 또한 이 방법으로 근거리 사진측량에서 접촉이 불가능한 대상물의 위치정보를 획득하는데 용이하게 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

강준목, 배연성, 주영은, 엄대용 (2000), CCD 영상획득 시스템

에 의한 피사체의 변위 측정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 18권, 제 1호, pp. 25-32.

김성태 (2005), 보강재의 길이와 간격을 고려한 보강토옹벽의 한계파괴조건 연구, 순천대학교 석사학위논문.

신봉호, 엄재구, 양승용, 송왕재 (1997), 구조물의 변형측정을 위한 수치영상의 정확도 향상, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 19권 제 3-4호, pp. 677-685.

오재홍, 이창노, 어양담 (2006), 비측정용 디지털 카메라의 효율적인 자체 검정을 위한 대상지 구성, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 24권, 제 3호, pp. 281-288.

이인모 (2002), 토질역학의 원리, 새론, pp. 417-477.

이진덕, Fraser, C. S. (1996), 비전측정시스템을 이용한 구조물의 변형 모니터링, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 16권, 제 3-4호, pp. 343-350.

이효성, 주재우, 정재성, 안기원 (2008), 수치근접사진측량을 이용한 모형지반 거동량 측정, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제 24권, 제 2호, pp. 59-65.

주재우, 김성태, 김재영, 장용채, 조삼덕 (2004), 사진촬영을 통한 보강토옹벽의 파괴조건 연구, 2004 춘계학술대회논문집, 한국지반공학회.

정성혁, 이재기 (2005), 산업사진측량기법에 의한 교량 강박스더 정밀측정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 23권, 제 1호, pp. 69-76.

한중근, 홍기권, 김영석, 조삼덕, 광기석 (2007), 수치사진영상을 이용한 자동변위계측시스템의 개발과 적용, 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제 23권, 제 5호, pp. 53-62.

Butler, J. B. and Lane, S. N. (1998), Assessment of DEM quality for characterizing surface roughness using close range digital photogrammetry. *Photogrammetric Record*, Vol. 16, No. 92, pp. 271-291.

Dold, J. (1998), The role of a digital intelligent camera in automating industrial photogrammetry, *Photogrammetric Record*, Vol. 16, No. 92, pp. 199-212.

Forlani, G., Guzzetti, F., Pinto, L. (1996), Reconstruction of the deformation surface of CFER panels, *IAPRS*, Vol. 31, B5, pp. 209-214.

Fraser, C. S. and Shortis M. R. (1995), Metric exploitation of still video imagery, *Photogrammetric Record*, Vol. 15, No. 85, pp. 107-122.

Fraser, C. S. (1997), Innovations in automation for vision metrology systems, *Photogrammetric Record*, Vol. 15, No. 90, pp. 901-911.

Jessell, M. W., Cox, S. J. D., Schwarze, P. and Power. W. (1995), The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique. *Geological Society of London Special Publication*, Vol. 92, pp. 27-37.

Lascelles, B., David, F. M., Parsons, T. and Boardman, J. (2002), Automated digital photogrammetry: a valuable tool for small-scale geomorphological research for the non-photogrammetrist?, *Transaction in GIS*, Vol. 6, No.1, pp. 5-15.

Lee, H. S. and Ahn, K. W (2004), A prototype of digital photogrammetric algorithm for estimating roughness of rock surface, *Geosciences Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 333-341.

- Macklin, B., Brade, R., Hurd, F., Mills, S. F., Sanders, S., Stokes, R. and Tait, J. (1998), Engineering a remote survey of jet's divertor structure under conditions of restricted access using digital photogrammetry, *Photogrammetric Record*, Vol. 16, No. 92, pp. 213-223.
- Merel, A. P. and Farres, P. J. (1998), The monitoring of soil surface development using analytical photogrammetry. *Photogrammetric Record*, Vol. 16, No. 92, pp. 331-345.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S. and McGlone, J. C. (2001), *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 247-275.
- Moffitt, F. H. and Mikhail, E. M. (1980), *Photogrammetry*, 3rd ed., Happer & Row, New York. pp. 442-445.

(접수일 2008. 5. 2, 심사일 2008. 6. 10, 심사완료일 2008. 6. 26)