

지반공학에서의 수치영상기법의 활용 Application of Digital Photogrammetry Technique in Geotechnical Engineering

한중근¹⁾, Jung-Geun Han, 홍기권²⁾, Ki-Kwon Hong, 조삼덕³⁾, Sam-Deok Cho, 이광우⁴⁾, Kwang-Wu Lee

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang University

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University

³⁾ 한국건설기술연구원 국토지반연구부 수석연구원, Researcher Fellow, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

⁴⁾ 한국건설기술연구원 국토지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : Recently a number of research has been performed for the combination of new high technologies in order to find the solutions for various problems in civil engineering research field. Various high-tech measuring instruments have been applied to the geotechnical engineering field, and many attempts have also been performed for the more accurate measurements. Especially, the researches using image on the digital photogrammetry technique are gradually extending nowadays. The computer program developed using the digital photogrammetry technique and the case studies are explained and presented in this paper. Therefore, it could be considered that not only the measurement with high-accuracy but the disaster prevention should be available through the practical use of digital photogrammetry technique. The applicability would also be increased in the measurement of both the geotechnical engineering field as well as other research fields.

Keywords : Digital Photogrammetry, Visual Monitoring System, Application, Measurement

1. 서론

지반공학과 관련한 구조물 및 지반의 안정성을 위한 방법으로는 해석에 의한 방법과 각종 실내·외 실험 등에 의한 계측결과를 이용하는 방법이 사용되고 있다. 계측결과를 이용하는 방법은 정밀한 측정값이 요구되기 때문에 많은 계측기들이 사용되고 있으며, 측정대상 매체가 되는 기초지반, 사면 및 각종 구조물들의 변동상황을 계측결과를 이용하여 파악함으로써 각각의 안정성 평가 및 유지관리를 위한 근거자료로 활용하게 된다. 하지만 정밀도 향상을 위하여 측정센서를 자동화하여 이용하는 방법은 고비용, 설치 및 유지관리의 문제점을 수반하고, 측정대상의 전체적인 거동을 계측하기에는 어려움이 따른다.

최근 들어 건설과 관련된 모든 분야에 있어서 문제해결을 위한 방법 중 하나로 각종 첨단기술과의 융합을 통해 해결하고자 하는 연구들이 많이 이루어지고 있다. 특히, 우리나라는 IT와 관련한 기술 및 시설이 세계 최고수준을 보유하고 있어 이와 관련한 연구개발에 큰 도움이 되고 있는 것이 사실이다. 따라서 앞서 언급한바와 같이 지반공학 분야에서도 계측 및 유지관리 등을 위한 기술이 가지고 있는 문제점들을 해결하기 위하여 여러 가지 합리적이고 정밀한 계측방법들이 적용되고 있다. 이 중 영상을 활용한 이미지센싱 기술, 즉 수치영상기법의 적용에 대한 연구도 활발히 수행되어져 왔다(강준목, 1992; 한

중근 외, 2001, 2003, 2005). 그중에서도 옹벽, 교량 및 댐과 같은 지반구조물 및 사면 등의 변위계측 기술개발을 위한 많은 실험적 연구들이 수행되었다.

이에 본 논문에서는 기존에 수행되었던 관련 기술들의 동향을 분석하고 수치영상기법을 활용하여 개발된 프로그램과 이를 적용한 사례들을 제시하고 지반공학에서의 향후 적용범위 등을 고찰해보고자 한다.

2. 국내외 기술동향 및 수치영상기법 이론

2.1 국내외 기술동향

1990년대 초, 필름을 스캔한 영상 분석기법의 효용 가능성이 제기되면서 다양한 분야에서의 활용방안을 제시하기 위한 많은 연구가 수행되었고, 보다 정확도가 높은 영상분석기법 구축, 알고리즘의 개발 및 실시간 분석을 위한 실용화에 대한 연구가 다수 수행되었다(Wong and El-Hakim, 1990). 또한 수치사진계측의 산업현장적용(C.S. Fraser, 1991; C.S. Fraser and M.R. Shortis, 1998)을 위하여 수치영상을 이용한 3차원 위치측정에 관한 연구를 시작으로 대상물 공간에서의 위치결정을 위해 CCD 카메라를 이용하기도 하였다(Gruen A., 1992).

최근에는 기존의 연구를 바탕으로 하는 독립적 수행 프로그램을 시각적 분석 및 연계 분석이 가능한 환경으로 변환·구축하여 통합·관리하고자 하는 관심이 증대되고 있다. 특히, 수치영상을 통한 3차원 데이터 획득의 자동화를 이용하여 동체 움직임, 산업에서의 자동화 측정 등의 활용방안이 연구된 바 있다(Marsha Jo Hannah, 1989; Lee et al., 2006).

현재 국내에서의 수치영상계측을 통한 각종 구조물의 안정해석 및 평가는 최첨단 장비를 활용하여 사면의 활동계측(한중근 외, 2001, 2003), 구조물의 최적화 변위계측(배상호, 2000; 강준목 외, 1995, 1999), 댐의 모니터링(박운용 외, 2001; 한중근 외, 2005) 등에 적극적으로 사용되고 있다. 그러나 대부분의 시스템들은 정밀도에도 불구하고 실시간 계측이 대부분 불가능한 단점을 가지고 있어 실제 현장에서의 적용성에는 많은 문제점들이 내포되어 있다고 할 수 있다. 특히, 영상을 이용한 계측방법 중 소프트웨어 사진측량(softcopy photogrammetry)은 사진촬영과 도해, 해석과정을 거치면서 많은 시간이 소요되고 있어 많은 연구결과에도 불구하고 정밀도에 비해 빠른 측정을 요구하는 계측기로서 활용되기에 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 지반공학 분야에서 다루는 터널갱구부, 성토시 지반침하, 사면의 변형상태 그리고 지반구조물의 변형 등을 지속적으로 관찰하고 위험시기 등을 현장조건 및 시공상황에 따라 지속적으로 예측하기에는 부족한 점도 있어 점차 디지털 영상을 이용한 실시간 계측의 필요성이 증가하고 있는 실정이다.

2.2 수치영상기법의 이론적 배경

사진측량은 그림 1에서 보는바와 같이 2차원 공간상의 점 $O_1(x_1, y_1)$, $O_2(x_2, y_2)$ 로 표현되는 입체사진을 토대로 하여 광학적 또는 수학적방법으로 O_1 , O_2 에 상응하는 3차원공간의 점 $P(X, Y, Z)$ 로 재현하는 방법으로서, 2차원 공간에 시간(t)을 추가한 점 $p(x, y, t)$ 로부터 4차원측량에 의해 점 $P(X, Y, Z, T)$ 를 구할 수 있게 된다(Wolf, 2000). 사진의 실측을 통해 최종적으로 얻어지는 결과물까지의 알고리즘은 그 단계가 복잡하고 다양하지만 다음과 같은 과정을 통해 가능하게 된다.

피사체의 공간좌표(X_A, Y_A, Z_A)를 계산하기 위한 시차방정식은 그림 2의 닳음삼각형꼴에서 삼각형 Lom과 LOM으로부터 $X_A/Y_A = x_a/f$ 이므로 식(1)이 된다.

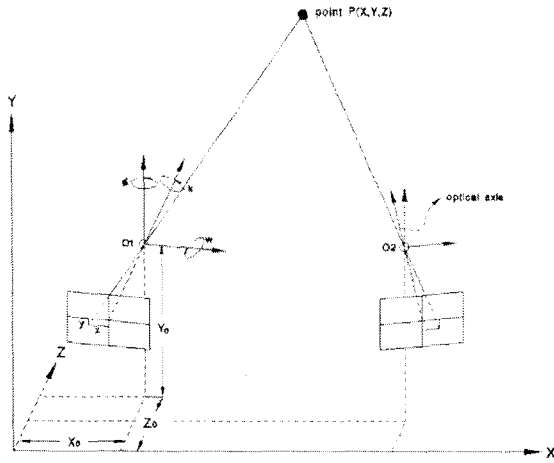


그림 1. 공선조건의 기하학적 관계

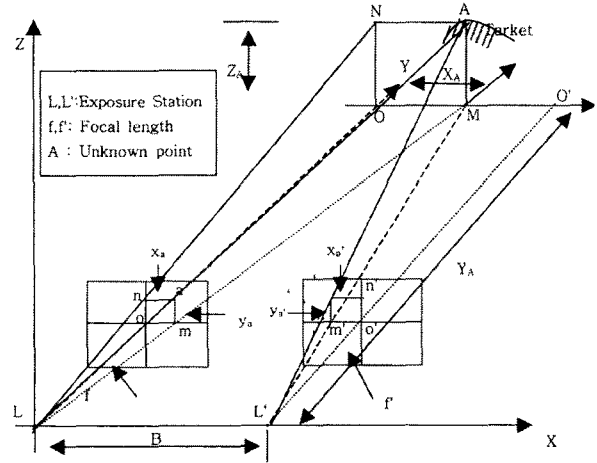


그림 2. 지상사진 사진측량의 기하학적 개념도

또한 닦음삼각형 L'o'm'과 L'O'M에서 $(B - X_A)/Y_A = -x'_a/f'$ 이므로 식(2)가 된다.

$$X_A = \frac{x_a}{f} Y_A \quad (1)$$

$$X_A = B + \frac{x'_a}{f'} Y_A \quad (2)$$

식(1)과 (2)로부터 시차차이 $p_a = x_a - x'_a$ 를 대입하면(여기서, $f = f'$),

$$Y_A = \frac{Bf}{p_a} \quad (3)$$

가 되며 식(3)을 식(1)에 대입하면 식(4)가 된다.

$$X_A = \frac{Bx_a}{p_a} \quad (4)$$

한편, 닦음삼각형 Lon과 LON으로부터 식(5)가 된다.

$$\frac{Z_A}{Y_A} = \frac{y_a}{f} \quad (5)$$

식(3)을 식(5)에 대입하면,

$$Z_A = \frac{By_a}{p_a} \quad (6)$$

가 된다. 여기서, 지상사진의 입체상으로부터 측정된 시차(parallax)를 가지고 식(3), 식(4) 및 식(6)으로부터 입체의 점들에 대한 피사체 공간좌표 X, Y, Z를 산출할 수 있다.

한편, 해석사진 측정은 대상점과 상점, 상점과 노출점, 노출점과 대상점 상호간의 관계인 식(7)과 식(8)을 이용한다.

이 공선조건식(collinearity condition equation)으로 정의하며, 계측값과 미지값 사이의 공선조건 상관 관계를 이용한다. 이는 모든 상점들이 동일평면상에 놓이며 피사체의 한 점(N), 대상물의 상응하는 한 점(n), 그리고 투영중심(o)이 동일직선상에 존재하는 것으로서, 그림 2의 관계를 수학적으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} x = x_i - x_p &= -f \frac{A(X_N - X_L) + B(Z_N - Z_L) + C(Y_N - Y_L)}{D(X_N - X_L) + E(Z_N - Z_L) + F(Y_N - Y_L)} \\ y = y_i - y_p &= -f \frac{A'(X_N - X_L) + B'(Z_N - Z_L) + C'(Y_N - Y_L)}{D(X_N - X_L) + E(Z_N - Z_L) + F(Y_N - Y_L)} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, X_L, Y_L, Z_L : 피사체 공간에서 투영중심의 위치
 x_a, y_p, f : 상공간에서 투영중심의 위치
 $A, B, C, D, E, F, A', B', C'$: 직교행렬의 변환 요소
 x_i, y_i : 상좌표
 f : 투영중심에서 상면까지의 거리(초점거리)
 x, y : 사진좌표

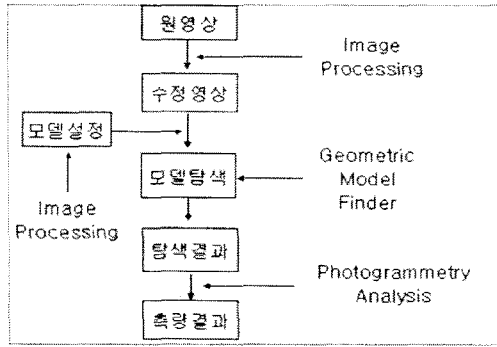
A, B, C, D, E, F, A', B', C'의 9개 변환요소는 피사체의 공간좌표에 대한 상공간 좌표계의 각표정을 규정짓는다. 특히, A, B, C는 x축의 x, y, z방향 여현을 나타내며, A', B', C'와 D, E, F는 각각 y, z축의 X, Y, Z방향 여현을 나타낸다. 이들 방향 여현을 이용하여 회전각, 표정점의 좌표, 9개의 미지수를 포함한 비선형방정식을 Taylor급수로 전개하여 선형화하고, 선형화된 공선조건식을 이용하여 초기좌표에서 증분변위 수치값을 얻게 된다(Kraus, 1997).

3. 수치영상기법을 활용한 프로그램

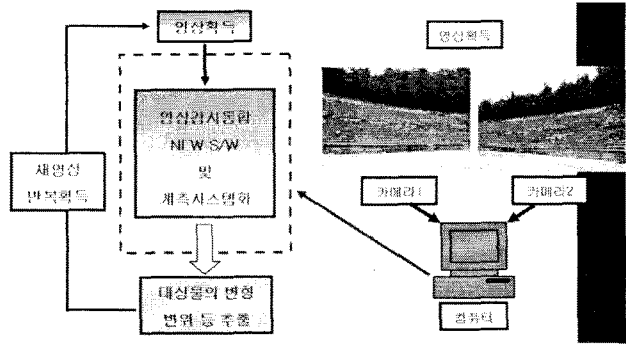
3.1 Visual Monitoring System의 개요

소프트카피 사진계측은 앞서 언급한 바와 같이 현장에서 계측된 각종 변형 및 변화에 대하여 즉각적인 대처가 어려워지기 때문에 재해위험 발생을 예측하거나 대처하기에는 실질적으로 적용하기 어려운 단점이 있다. 따라서 영상획득에서 각종 구조물의 변화벡터를 추출하는 과정을 통합하면 구조물의 발생 변위 및 변형 등을 쉽게 계측할 수 있게 된다. 이를 위해 영상획득에서부터 좌표생성, 변화벡터의 추출 과정을 일시에 자동으로 해결하는 통합 소프트웨어가 개발된바 있고, 그 과정은 그림 3에서 보는바와 같다. 개발된 프로그램은 Delphi를 이용한 Windows기반으로 제작되었다. 해석과정은 크게 Image processing, Geometric model finder, Photogrammetry analysis의 순서로 구분할 수 있다. Image processing은 여러 장치를 통하여 영상을 재가공하거나 정보를 추출하고, Geometric model finder는 앞서 수정된 영상의 패턴을 인식하여 시스템에서 필요로 하는 자료만을 추출하는 역할을 한다. 그리고 Photogrammetry analysis는 2장에서 설명된 바와 같이 3차원 좌표생성 메카니즘으로서 2차원 공간상의 점으로 표현되는 입체사진을 토대로 하여 광학적·수학적 방법으로 3차원 공간의 점으로 재현하는 과정이다.

VMS(Visual Monitoring System)의 변위계측 정밀도는 영상 획득용 CCD 카메라 혹은 디지털 카메라의 화소수와 밀접한 관계를 가지고 있다. 즉, 화소수가 높은 고품질 카메라를 사용하여 획득한 영상을 분석하면 보다 정밀한 계측결과를 얻을 수 있다. 또한 본 시스템은 적용 현장의 조건 및 요구 계측정밀도에 따라 영상획득 수단(CCD 혹은 디지털 카메라)의 경제성을 고려하여 선택적으로 활용할 수 있는 장점을 가진다.

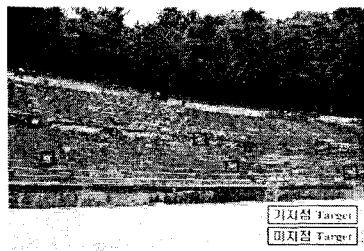


(a) 해석개념도

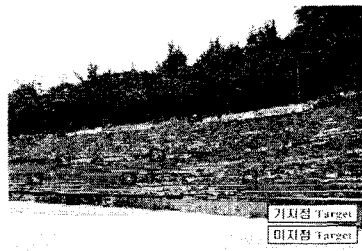


(b) 통합 s/w을 이용한 계측흐름도

그림 3. 통합 s/w의 해석 흐름도 및 예



(a) 좌측영상



(b) 우측영상

그림 4. 기지점 및 미지점이 포함된 획득영상

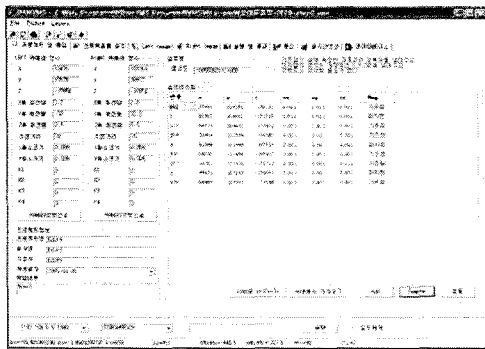


그림 5. 프로그램의 초기 화면

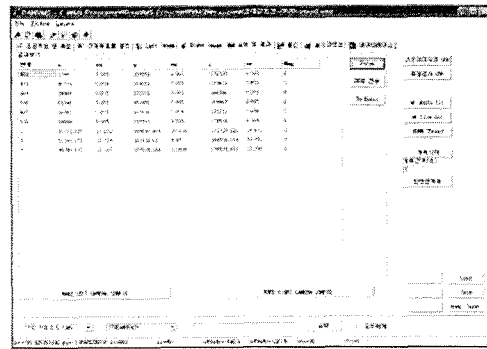


그림 6. 3차원 좌표의 해석결과 화면

수치영상기법을 활용한 VMS는 대상물에 대한 정보의 획득과 이전에 획득된 정보와의 비교를 통해 대상물의 안정성여부를 즉각 판단할 수 있는 실시간 모니터링 시스템이다.

먼저, 그림 4와 같이 대상구조물의 좌우에서 각각 기지점과 미지점이 포함된 중복영상을 획득한다. 획득된 영상은 모델탐색이 용이하도록 그레이영상화하고 잡음제거를 위해 Image processing 작업을 수행하게 된다. 그리고 생성된 수정영상과 찾고자 하는 모델에 대한 이미지를 가지고 Geometric model finder를 이용해 영상에서 미지점의 모델위치를 파악하게 된다. 마지막으로 모델탐색과정에 의해서 얻어진 결과, 디지털카메라의 위치·회전 등에 대한 기본정보 및 렌즈에 대한 정보를 이용하여 수치영상기법을 활용한 사진측량해석모델을 이용하여 앞서 찾아낸 모델의 공간상의 위치를 결정하게 된다. 간단히 정리하면 그림 4에서 보는바와 같이 좌·우측 기본영상을 획득하고, 해석에 필요한 카메라의 기본정보 및 기지점의 측량값 등을 그림 5와 같이 설정하면 그림 6에 나타난 바와 같이 알고자하는 미지점의 최종 3차원 좌표값이 구하여진다. 또한 반복된 사진영상의 좌표처리는 초기에 설정된 그림 4의 기준좌표값을 비교하여 가상 생성되도록 하며, 기지점의 측점에 대한 오차를 산정하게 된다.

3.2 System의 영상데이터 분석 소프트웨어

영상데이터 분석 소프트웨어에는 Data Transfer Socket Module과 Database Transfer Module이 포함되어 있어, 영상획득장치(CCD 카메라, 디지털 카메라 등)로부터 영상과 정보를 제공받아 영상데이터를 분석하는 기능을 가지고 있다.

본 소프트웨어에서는 영상계측에 필요한 초기 측정좌표 및 기지점, 미지점 설정 등 영상데이터 분석에 필요한 모든 작업의 수행이 가능하며, 영상획득장치의 사양에 따라 원격지에서 제어 가능하다. 영상데이터 분석 소프트웨어의 주요 구성화면은 다음과 같다.

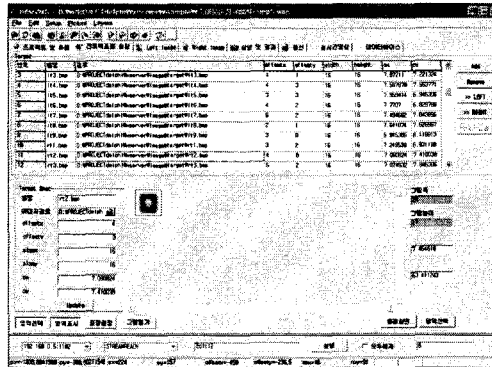


그림 7. 측정점 설정 화면

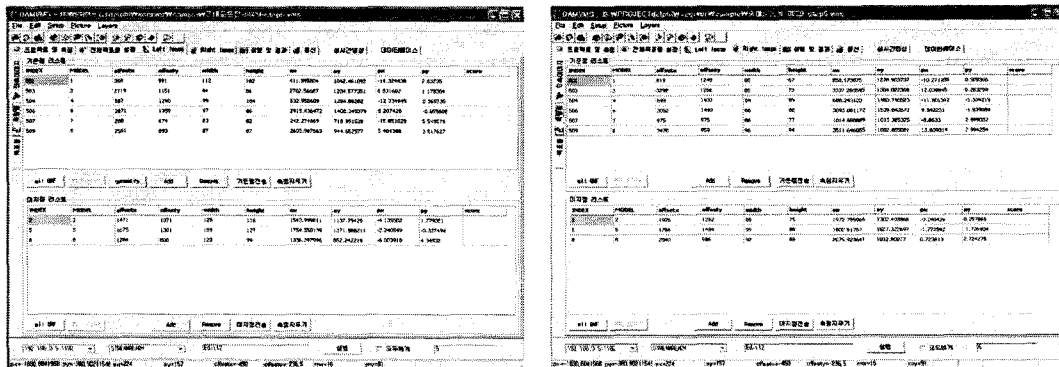


그림 8. 측량점 및 목표물 설정 화면

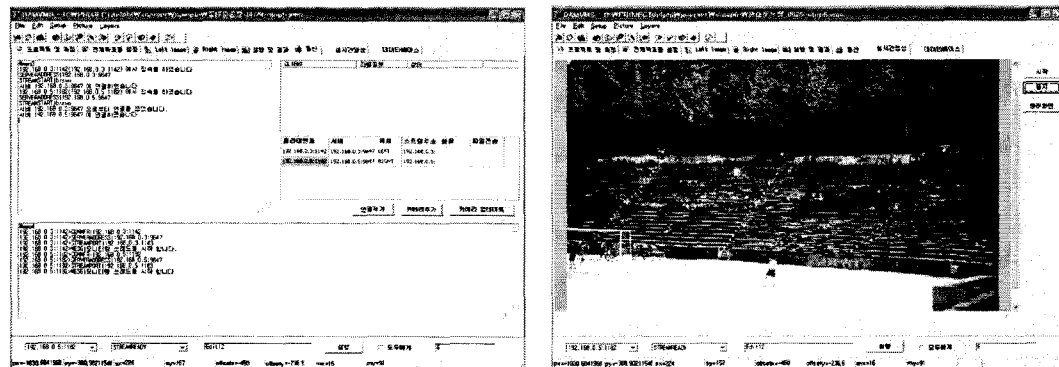


그림 9. 카메라 제어 및 영상획득 화면

상기의 그림들은 영상데이터를 분석하기 위하여 초기값을 설정하는 화면이다. 여기에서는 3.1절에서 설명한 바와 같이 측량된 결과, 카메라에 대한 기본정보, 설치정보, 측량점 및 목표물을 설정하여 영상

획득장치에서 기본적인 영상을 분석할 수 있는 자료를 설정하고 제어한다. 그림 9의 좌측은 영상획득장치를 직접 제어할 수 있는 기능을 보여주고 있는 화면으로서 영상획득장치, 즉 카메라의 밝기와 세트 속도 등을 직접 제어할 수 있다. 우측의 그림은 직접 영상획득 장치를 제어하여 영상을 획득할 수 있는 기능을 보여주고 있다. 이와 같이 고해상도를 가지는 영상획득장치를 사용한다면 원격지에서도 직접 모든 기능을 수행할 수 있다.

따라서 그림 4와 그림 5의 측점에 대한 초기화를 실시하면 그림 7과 그림 8은 자동으로 수행될 수 있으며 측정시간 간격에 따라 그림 6에서 보는바와 같이 계측결과값이 측정된다. 또한 그림 9와 같이 카메라의 원격제어를 통해 수요자의 요구에 따라 영상표현이 가능하게 된다.

4. 실·내외 실험 적용 사례

4.1 미소변위계측을 위한 용접부재 변형계측의 적용

실내실험의 적용성을 확인하기 위하여 그림 13과 같이 강재의 인장시험을 통한 부재의 미소변형계측에 앞서 설명한 VMS를 적용하여 실험을 실시하였다. 강재의 미소변형계측을 위해서는 부재에 Strain gage 및 LVDT를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 LVDT의 경우 미소변형계측에는 정밀도 및 기계근접에 따른 진동물체들에 의한 문제점이 나타난다.

따라서 LVDT 등과 같은 기존 계측기를 이용한 계측방법의 문제점을 해결하고자 3차원 수치영상기법을 활용하여 개발된 VMS를 용접부재의 변형계측에 적용하였다. 부재변형을 위해 인장시험기(MTS-810)를 사용하였으며 시스템의 적용성 및 신뢰성 판단을 위해 VMS와 시험기의 자동계측을 동시에 실시하여 부재의 설치된 계측지점의 변형률을 비교·분석하였다. 실험을 위한 용접부재의 제원은 그림 11에서 보는바와 같고, 부재의 변형률 계측을 위한 측점의 위치는 그림 12에 나타내었다.

한편, 실험은 인장시험기의 한계하중인 250kN이 될 때까지 0.01mm/sec의 변형률제어로 실시하였다.

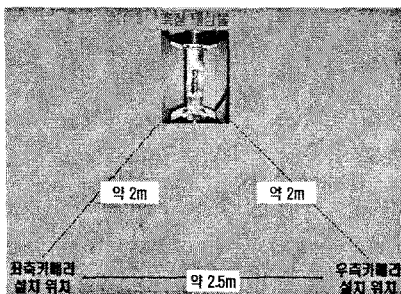


그림 10. 실내실험 배치도

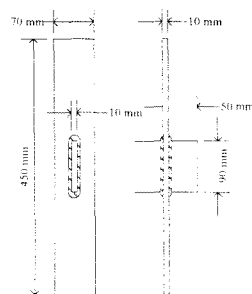


그림 11. 부재 제원

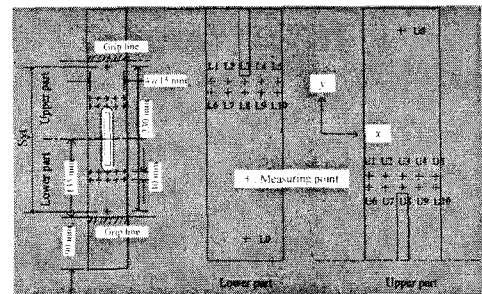


그림 12. 용접부재의 계측지점

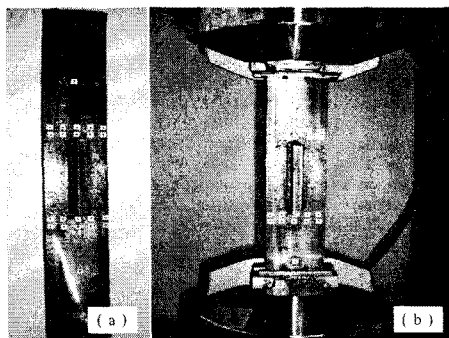


그림 13. 용접부재 및 실험 전경

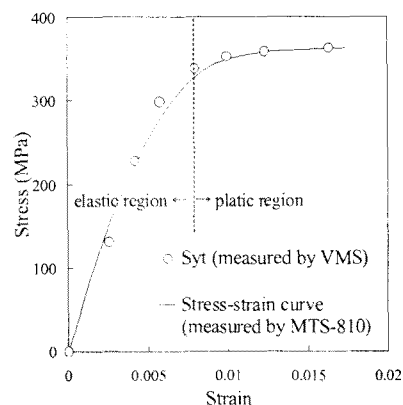


그림 14. 부재의 변형률 비교

VMS와 인장시험기의 계측결과를 이용하여 각각 용접부재의 변형률을 비교한 결과, 그림 14에서 보는바와 같이 각 계측단계의 VMS 해석결과에서 약 90%~98%의 신뢰성을 보였고, VMS의 발생오차는 인장시험기의 허용오차범위 안에 드는 것으로 확인되었다.

4.2 보강토 변위계측을 위한 적용

4.2.1 실험개요

블록식보강토옹벽의 거동을 원격지에서 감시할 수 있고 옹벽구조물의 변형거동을 실시간 계측하기 위한 현장적용성을 검증하기 위해 3차원 수치영상기법을 활용하여 보강토옹벽 실내 강제변위실험을 실시하였다. 실험은 하중재하에 의한 수직변위계측 3회, 임의의 수평변위계측 2회, 수직·수평 동시변위계측 1회로 총 6회 실시하였다. 실험과정은 그림 16과 같이 블록을 3단으로 쌓고 그림 17과 같이 타겟을 설치한 후 기지점 및 미지점에 대하여 표 1과 같은 사양을 가진 토탈스테이션과 VMS를 이용하여 각각 계측을 실시하였다. 이때 기지점의 경우 변위가 발생하지 않아야 한다. 변위는 연직하중을 3~5ton 으로 변화시키면서 수직변위를 발생시켰으며, 수평변위는 블록 하단의 침하유도를 위한 매트를 움직여 임의의 양만큼 발생시켰다. 이렇게 각 사례별로 변위를 발생시킨 후 앞서 언급한 계측작업을 반복 수행하였고, 실험과정은 그림 18에서 보는바와 같다.

표 1. 토탈스테이션의 성능

구분			SET510
망원경 배율			30x
측각부	최소표시(선택가능)	H&V	1"/5" 선택 가능
	정도(ISO 12857-2 1997)	H&V	5"
자동 보정 장치			자동 2축 경사 보정 장치, 작동 범위:±3'(±55mgon)
측거부	측정범위	반사시트	120m
	정도	유리 프리즘	±(2 + 2ppm X D)mm
		반사시트	±(4 + 3ppm X D)mm

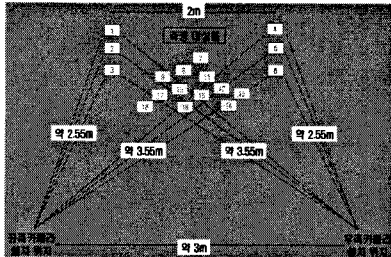


그림 15. 실내실험 배치도

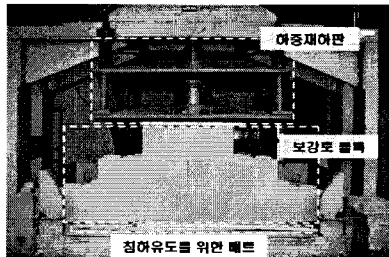


그림 16. 계측대상물 전경

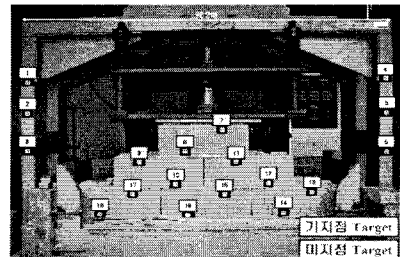


그림 17. 타겟 설치

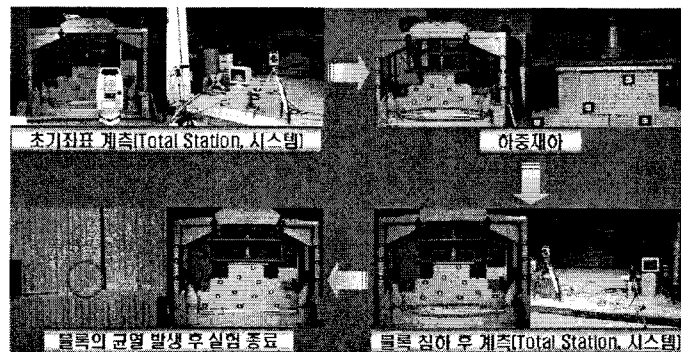


그림 18. 실험과정

4.2.2 실험결과 분석

표 2. 발생변위에 대한 각 측정점의 사진계측 값과 토탈스테이션 측정값의 비교

CASE	STA.	사진 측량 변위량 (mm)	토탈 스테이션 변위량 (mm)	차 이 (mm)	CASE	STA.	사진 측량 변위량 (mm)	토탈 스테이션 변위량 (mm)	차 이 (mm)
CASE1 3ton 하중재하	7	12.891	11.045	1.846	CASE4 임의의 수평변위 (i)	7	22.587	21.954	0.633
	8	13.164	12.083	1.081		8	22.762	22.472	0.290
	9	12.221	12.083	0.138		9	23.792	24.739	-0.947
	10	12.362	12.042	0.320		10	22.710	24.352	-1.642
	11	11.955	11.000	0.955		11	21.886	21.401	0.486
	12	11.894	12.042	-0.147		12	21.410	20.616	0.794
	14	12.182	12.083	0.099		14	20.807	21.260	-0.453
	16	11.706	13.077	-1.370		16	22.029	21.471	0.558
	17	13.742	14.000	-0.258		17	18.788	19.723	-0.935
CASE2 4ton 하중재하	7	17.657	16.062	1.594	CASE5 임의의 수평변위 (ii)	7	31.478	30.676	0.802
	8	17.560	17.000	0.560		8	31.350	31.209	0.141
	9	17.169	17.000	0.169		9	32.599	32.311	0.288
	10	17.439	17.029	0.410		10	31.609	32.342	-0.733
	11	16.767	16.031	0.736		11	31.379	30.545	0.834
	12	17.251	17.029	0.222		12	30.593	29.883	0.710
	14	17.058	17.146	-0.089		14	30.712	31.257	-0.545
	16	16.476	17.059	-0.583		16	31.430	31.385	0.045
	17	19.199	19.053	0.147		17	30.385	30.480	-0.095
CASE3 5ton 하중재하	7	23.852	22.023	1.829	CASE6 임의의 수평변위 후 4ton 하중재하	7	37.526	35.679	1.847
	8	24.034	23.022	1.012		8	37.360	35.958	1.402
	9	22.800	22.023	0.777		9	38.185	37.283	0.902
	10	23.483	23.022	0.461		10	37.744	36.892	0.852
	11	23.576	22.000	1.576		11	37.274	35.511	1.763
	12	23.867	23.043	0.824		12	37.277	35.917	1.361
	14	23.649	22.204	1.445		14	40.373	38.288	2.085
	16	24.303	24.021	0.282		16	38.214	37.229	0.985
	17	23.988	24.083	-0.095		17	36.165	36.401	-0.235

표 2에서 보는바와 같이 VMS와 토탈스테이션을 이용하여 얻은 측정값을 비교한 결과, 마지점 9개에 대한 발생변위의 계측차는 0.045~2.085mm의 차이를 나타내었으며, 산정된 사진측량해석 오차범위는 0mm~2.11mm로서 시스템의 신뢰성을 확인하였다.

4.3 시스템의 적용성 판단을 위한 현장실험 - 교량계측 사례

VMS의 성능 및 현장 적용성 평가를 위해 충청북도 옥천군 소재의 서화천교(폐교량)를 대상으로 현장 실험을 실시하였다. 실험 대상 교량인 서화천교는 총연장 190m 6경간 왕복2차선으로 이루어져있으며 Steel Box Girder와 PC Beam으로 구성된 복합교이다. 이중 Steel Box Girder구간은 총연장 100m 3경간이며 PC Beam구간은 총연장 90m 3경간으로 나누어져 있다. 본 실험은 Steel Box Girder 구간에서 수행되었고 Steel Box의 복부판 및 상·하부플랜지, 종리브판 등 모든 강재는 10mm의 두께를 가진 SWS41(SM400) 강재가 사용되었다. 실험내용은 정적 및 활하중 상태에서 Steel Box Girder의 보수보강시 절단 및 용접에 의한 변위를 확인할 수 있도록 계획되었다.



그림 19. 서화천교 전경

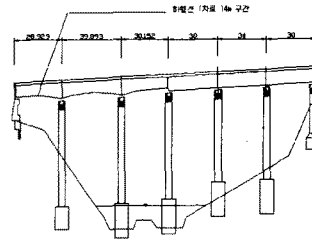


그림 20. 실험위치

(1) 실험 순서

① 실험위치의 측점(기지점 및 미지점) 부착

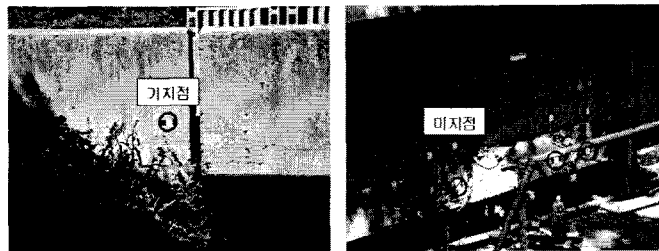


그림 21. 측점 부착 전경

② 계측결과와의 비교를 위한 LVDT 설치 및 측점의 좌표획득을 위한 측량

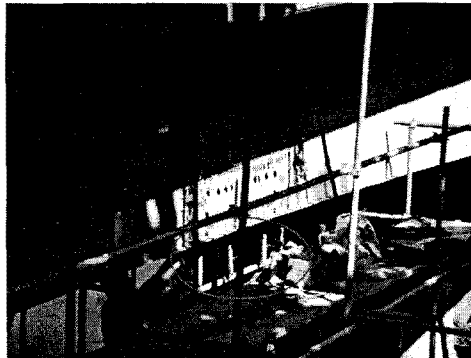


그림 22. LVDT 설치

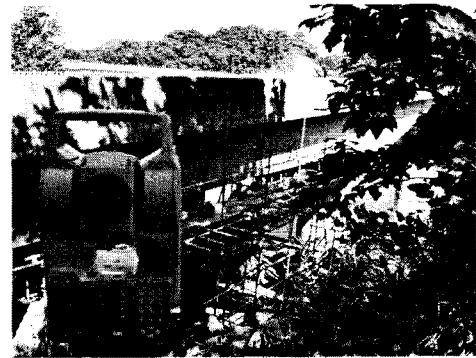
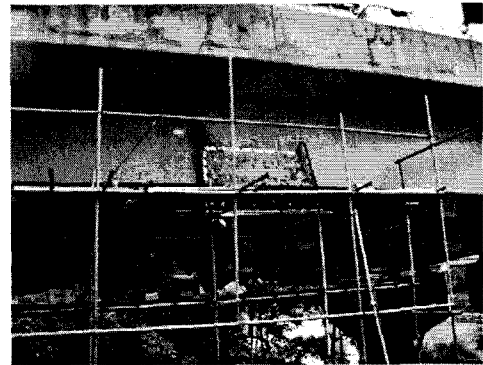
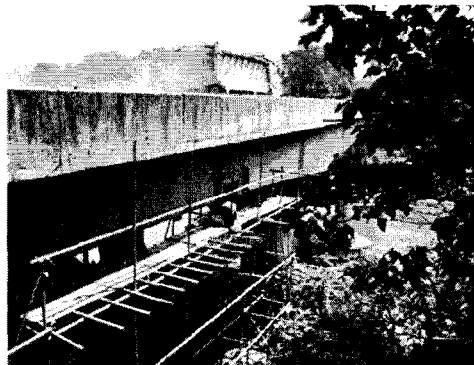


그림 23. 토탈스테이션 계측

③ 하중재하(정적하중 및 활하중) 및 좌·우측 이미지 획득



(a) 활하중 시 좌측 이미지 획득 (b) 정적하중 시 우측 이미지 획득

그림 24. 하중재하 시 좌·우측 이미지 획득 예

(2) 하중조건

덤프트럭(15ton)을 이용하여 하중재하를 실시하였으며, 정하중재하 실험에서는 각각 1경간 1차선 및 2차선의 1/2지점과 1/4지점에 재하 하였고, 활하중재하 실험에서의 하중재하 형태는 1경간 2차선 구간에 재하 하였다.

이미지 촬영은 상용화된 디지털카메라를 이용하였고, 프로그램 해석의 편리함을 위해 카메라 2대의 위치를 반사 측점을 기준으로 약 90도 각도로 설치하고 이미지 촬영을 실시하였다. 그러나 이미지 출력 결과 상용 디지털카메라의 특성상 빛(역광)에 의해 반사 측점의 확인이 불가능할 정도로 번짐 현상이 발생하여 해석이 불가능 하였다. 또한 주변지형이 수목으로 우거지고 촬영 대상물에 설치된 비계 및 동바리에 의해 측점의 정확한 이미지촬영이 어려웠으며, 예상치 못한 경우에 의해 이미지 획득에 있어서 문제가 발생되었다. 따라서 대형구조물 및 야외실험에서 측점에 대한 영상획득 시 발생할 수 있는 문제점을 충분히 고려하고 이를 반영한 실험이 계획되어야 한다.

4.4 대형구조물의 변위계측을 위한 적용

4.4.1 Simulation 개요

댐과 같은 대형구조물에 대한 실시간 변위 또는 변형계측과 같은 현장 활용성을 검증하기 위해 현장 simulation을 실시하였다. 계측대상은 댐, 대규모사면 등과 같은 대부분의 대형구조물이 벽면형태로 구성되어 있는 것을 감안하여 콘크리트시멘트로 시공된 OO대학교 내 운동장스탠드를 대상으로 하였다. 측정대상위치는 그림 25와 같이 측정으로부터 각각 약 76m~97m 떨어진 위치에 영상획득장비인 CCD 카메라 2대를 87.9m 이격시켜 원격제어로 측정하였고, 측정대상물의 측점은 총 9개(기지점 6개, 미지점 3개)의 타겟을 설치하였다. 이때 타겟 1, 4, 7번과 3, 6, 9번을 기지점으로 설정하였고, 타겟 2, 5, 8번을 미지점으로 설정하였다. 변위측정을 위해서는 구조물의 변위가 발생되어야 하지만 실제로 대형구조물의 변위는 적은 양이 발생되므로 미지점 3개(측점 : 2, 5, 8번)를 그림 26과 같이 최초 타겟위치로부터 각각 좌·우로 9cm, 상·하로 5cm 강제변위를 발생시켜 미지점 1개의 측점에 대하여 각 4회(STEP 1~4)의 발생변위를 측정하였다. Simulation 절차는 그림 27과 같이 시스템 및 CCD 카메라를 원격설치하고, 대상물에 측점이 되는 타겟을 설치 후 도탈스테이션을 이용하여 기지점과 미지점 및 카메라의 3차원위치를 획득하였다. 이러한 과정이 끝나면 대상측점에 대하여 설치된 CCD 카메라를 이용하여 그림 28과 같이 좌·우측의 이미지를 획득하고, 발생된 변위영상을 연속적으로 측정하여 변위벡터량을 산정하였다.

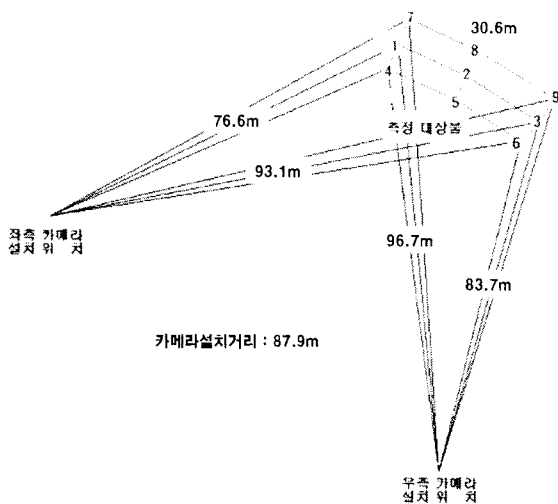


그림 25. 야외실험 배치도

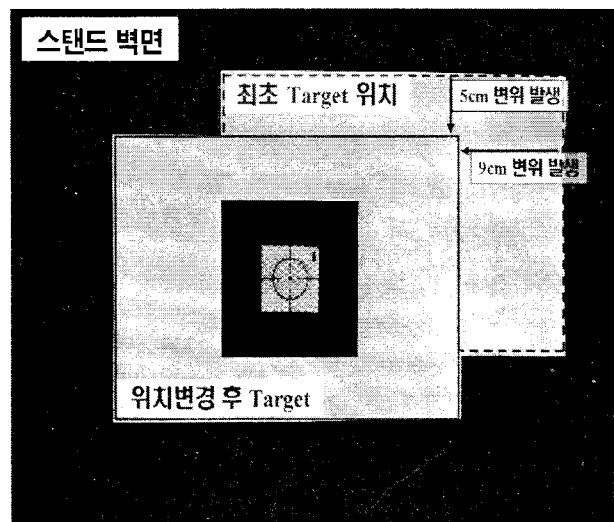
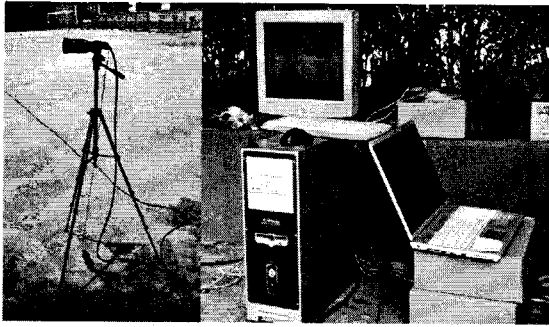
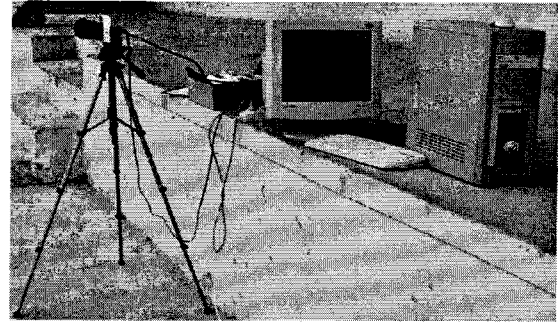


그림 26. 타겟의 강제변위 발생정도

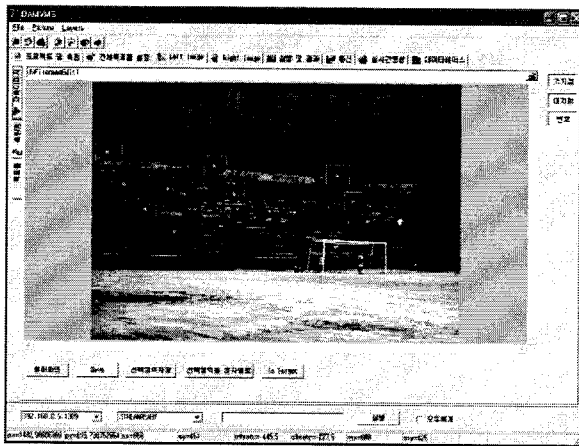


(a) 좌측 카메라 및 시스템

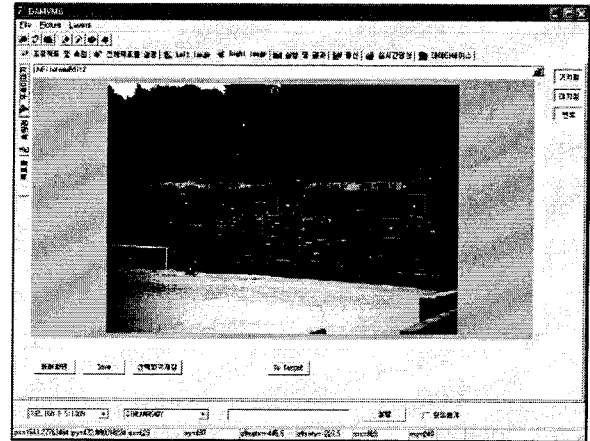


(b) 우측 카메라 및 시스템

그림 27. 카메라 및 시스템 전경



(a) 좌측영상



(b) 우측영상

그림 28. 측정대상물에 대한 좌우측 획득영상

4.4.2 Simulation 결과 분석

초기 획득영상에 대한 기지점과 미지점의 좌표는 토달스테이션의 좌표값과 거의 동일하게 측정되었다. 측정점의 강제발생변위에 대하여 토달스테이션과 VMS를 이용한 이미지 계측결과를 비교한 결과, 발생변위측점에 대한 오차는 0.325mm~10.436mm로 다소 불규칙적인 차이를 나타내었지만 카메라 화소수와 대상물의 실제거리를 고려하여 산정된 사진측량해석의 오차범위는 0mm~10.978mm로서 개발된 시스템의 정밀도에는 큰 이상이 없음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 수치영상기법의 국내·외 관련 연구기술과 이를 활용한 프로그램 개발 및 적용 사례를 통하여 지반공학 분야에서의 이미지센싱 기술이 계측 또는 모니터링 분야에 활용되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 보다 정밀하고 높은 신뢰성을 요구하는 계측 및 모니터링 분야에 적용하기 위해서는 카메라의 화소수, 줌 렌즈 등 측정기계에 의한 계측오차를 줄일 수 있는 방안과 실시간 모니터링이 될 수 있는 자동화 시스템의 상용화에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 할 것으로 판단된다.

한편, 다양한 분야에서 활발히 응용되고 있는 이미지센싱 원리는 영상처리기술 및 영상획득매체의 급속한 발전으로 인하여 빠르게 연구되어지고 있다. 따라서 이를 적용함으로써 향후 지반공학적 관점에서의 미소변위부터 자연재해의 모니터링까지 수많은 정보들을 이미지로부터 추출하여 보다 정확하게 정량화함으로써 계측뿐만 아니라 국가재해 예방에 대처가 가능할 것으로 사료되며, 지반공학뿐만 아니라 다른 분야에서도 적용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2004년도 건설기술기반구축사업(과제번호 : 04기반구축 A06-01)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강준목(1992), 지상사진측량에 의한 구조물변형의 최적해석에 관한 연구-최종보고서, 한국과학재단.
2. 강준목, 배상호, 송승호(1999), “윈도우 시스템체계를 이용한 수치사진기법 구축”, 대한토목학회 논문집, 제19권, 제III-2호, pp.325~334.
3. 강준목, 윤희천, 배상호(1995), “교량의 안전진단을 위한 3차원 변형해석에 관한 연구”, 한국측지학회, 13(1), pp.69~76.
4. 박운용, 김진수, 이인수(2001), “GPS를 이용한 불안정 댐의 모니터링”, 대한토목학회 논문집, 21(3-D), pp.383~392.
5. 배상호(2000), 구조물변위 해석을 위한 수치사진측량의 키포넨트 개발, 충남대학교 박사학위논문.
6. 한중근, 배상호, 오다영(2001), “사면의 지표변위계측을 위한 사진측량기법의 적용”, 한국환경복원녹화기술학회, 제4권, 제3호, pp.10~18.
7. 한중근, 송영석(2003), “사면안정해석을 위한 사진측량을 이용한 사면변위계측시스템”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제4호, pp.23~32.
8. 한중근, 정영웅, 홍기권, 조삼덕, 김영석(2006), “보강토옹벽 변위계측을 위한 비주얼모니터링시스템의 적용”, 2006 한국지반공학회 가을 학술발표회.
9. 한중근, 조삼덕, 강명진, 홍기권(2005), “Dam 계측을 위한 비주얼 모니터링 System 개발”, 중앙대학교 기술과학연구소 논문집, 제35-1집, pp.81~89.
10. 한중근, 홍기권, 김영석, 조삼덕, 박기석(2007), “수치사진영상을 이용한 자동 변위계측시스템의 개발과 적용”, 한국지반공학회 논문집, 제23권, 제5호, pp.53~62.
11. 한중근, 홍기권, 박기석, 조삼덕(2005), “댐 계측용 비주얼 모니터링 시스템의 Simulation 평가”, 2005년도 대한토목학회 정기학술대회.
12. 한중근, 홍기권, 정영웅, 김영석(2006), “실시간 댐 변위계측을 위한 비주얼모니터링시스템의 현장 적용성 평가”, 2006년도 대한토목학회 정기학술대회.
13. C.S. Fraser(1991), “A resume of some industrial applications of photogrammetry”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
14. C.S. Fraser and M.R. Shortis(1998), “State of the Art of 3D Measurement Systems for Industrial and Engineering Applications”, *21st International Congress of FIG*.
15. Gruen A.(1992), “Recent advances of photogrammetry in robot vision”, *Journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol.47, pp.307~323.
16. Karl Kraus(1997), *Photogrammetry*, Vol.1,2, 4th Edition, Dümmler/Bonn.
17. Marsha Jo Hannah(1989), “A system for digital stereo image matching”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp.1765~1770.
18. Paul R. Wolf(2000), *Element of Photogrammetry with Application in GIS*, 3rd edition
19. Soo Cheol Lee, Een Jun Hwang and Jung Geun Han(2006), “Efficient Image Retrieval Based on Minimal Spatial Relationships”, *Journal of Information Science and Engineering*, Vol.22, pp. 447~459.
20. Wong and El-Hakim(1990), “Working group V/1: digital and real-time close-range photogrammetry”, *Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, SPIE Proceedings*, Vol.1395.