

## 근거리사진측량을 이용한 전력구조물의 미소변위 측정기법 Techniques of deformations measurement in Electric Power structure by using Close Range Photogrammetry

김감래\* · 김명배\*\*

Kim, Kam-Lae · Kim, Myung-Bae

### 요 旨

근거리 사진측량의 주요 이점은 비접촉 물체나 복잡한 형상을 측정하는 방법에 있어서 효과적인 측정 방법이라 할 수 있다. 본 논문에서는 근거리 사진측량에 의한 전력 구조물의 미소변위 측정 기법을 개발하였다. 시간 변화에 따른 구조물의 변형을 측정하고자 할 경우, 근거리 사진측량 방법을 통해 절대 변형량을 효율적으로 산출하도록 하였다. 이를 통해 구조물 유지관리 시스템 구축 가능성을 모색할 수 있었다.

### ABSTRACT

One of the often espoused merits of close-range photogrammetry is the effectiveness of the method for measuring non-accessible objects of unusual and complex shape. In this study, techniques of deformation measurement using close-range photogrammetry for electric power structures were developed. Absolute deformation could be found efficiently through close-range photogrammetry in the structure deformation analysis based on time variation. Also, feasibility of the structures management system was presented based on this study.

### 1. 서 론

경제성장에 따른 전력소비량이 극대화되어 전력공급의 효율성, 합리성 및 대규모성을 충족시키고자 하여 수력발전, 화력발전, 원자력 발전 건설 등 각 분야에서 시설물 확충에 노력하고 있다. 또한 에너지 분야의 기술 개발 중 “발전설비 건설기술 개발”의 유지관리면에서 볼때 전력구조물에 대한 안전점검 차원으로서 시설물의 조사 및 시공으로부터 보호관리에 이르기까지 각종 계측이 먼저 실시되어야 하며, 이를 통해 당초 설계의 당위성을 검증하고 데이터를 축적함으로써 이후에 생길 이상현상이나 붕괴위험에 대해 사전에 예측할 수 있어야 하는 등 에너지 자원의 안전한 공급을 위한 시설물 확충에 많은 연구가 이루어져야 한다. 이에 대해 사진측량 방법을 이용한 변위측정 방법은 B. Herret(1954)에 의해 시작된 이후,

J.J. Richason(1968)은 “Grand Canyon Dam에 대한 변형측정<sup>2)</sup>” A.J. Brandenberger(1974)에의 Power Dam에 대한 변형측정,<sup>1)</sup> S.A. Veress와 N.C. Jackson과 J.N. Hatzopoulos(1979)는 “GABION wall에 대한 변형”을 지상사진 측량과 indinometer로 동시에 측정하여 구조물의 내부와 외부에 대한 변형을 도출하였다. 또, S.A. Veress(1981)은 송전탑의 변위측정에서 풍압과 전선의 하중에 의한 변위를 측정 많은 연구가 이루어지고 있으나,<sup>8)</sup> 국내에서는 전력구조물 건설 및 관리에 있어서 구조물 단면에 게이지를 부착하여 변위량을 측정하는 방법등에 반하여 문제점인 구조물 단면 전체의 형상 및 변위량을 구하기 위해 다수의 측정값과 분산적인 측정값에서 연속되는 형상을 측정함에 따른 정도상의 문제, 측정시의 과의 인력 및 소요시간 과다에 따른 문제, 측정값의 검증에서의 문제, 구조물 관리 및 보수 결정 여부 및 안전성 진단상의 문제등이 존재하고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제들을 해결할 수 있는 방법으로 사진

\*명지대학교 토목공학과 교수

\*\*명지대학교 토목공학과 박사과정 수료

촬영을 할 수 있는 장소만 허락된다면 피사체에 접촉하지 않고 짧은 시간내에 촬영할 수 있고, 또한 반복촬영이 가능하며, 필름을 영구히 보존함으로써 필요한 경우에 재사용이 가능한 근거리 사진측량 방법을 이용한 3차원 측량 시스템을 개발하였으며, 3차원 측량에 따른 자료 획득 과정에서의 측량에서 결과 도출에 이르기까지 On-Line System 구축을 통한 효율성 높은 관리시스템을 구축하였다.

## 2. 근거리사진측량 방법을 이용한 구조물의 3차원 측정시스템

전력구조물의 변형측정 또는 3차원 측정시스템의 개발을 위해서는 다량의 데이터를 신속 정확하게 획득할 수 있어야 하며, 복잡한 구조물의 정밀해석이나 순간 변형측정을 요하는 경우에는 수회 촬영된 사진이 이용되며, 이를 동시에 해석하여야 한다. 따라서 종래의 컴퓨터에 의한 좌표측정과 입력방법을 다양하고 그림 1에서와 같이 측정데이터를 직접 컴퓨터 프로그램에 직접 입력할 수 있도록 컴퓨터의 baud rate과 데이터 전송형태를 파악, 데이터 처리 과정에서 온라인화하여 데이터 입력과정에서 발생하는 과오를 제거함은 물론 신속한 자료획득을 꾀한다.

안전진단을 위해서 구조물 내부의 상대(Local)변위에 따른 절대 변형량을 산출하기 위한 기준계와 기준점을 포함한 측정망을 사진측량과 동시에 정밀측량하여 각 단계별로 얻어진 최종 3차원 좌표를 변환하여 도출할 수 있도록 구성된 절대변형 측정기법의 기본원리는 다음과 같다.

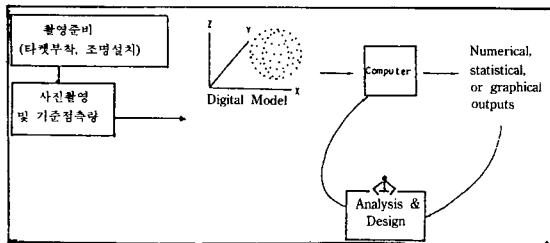


그림 1. 3차원 측량시스템의 On-Line System 체계

### 2.1 변형해석 이론

#### 2.1.1 공선 조건식의 기본 원리

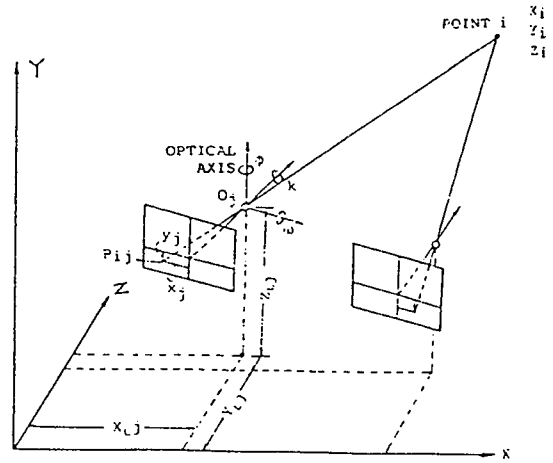


그림 2. 상좌표와 공간좌표와의 관계

임의 2개의 상호 관련된 3차원 좌표간의 관계는 투영변환 방정식에 의해 표현된다. Matrix 형태로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = sm \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 공선조건식으로 표현하면,

$$X_n = -f \frac{m_{11}(X_N - X_L) + m_{12}(Y_N - Y_L) + m_{13}(Z_N - Z_L)}{m_{31}(X_N - X_L) + m_{32}(Y_N - Y_L) + m_{33}(Z_N - Z_L)} \quad (2)$$

$$Y_n = -f \frac{m_{21}(X_N - X_L) + m_{22}(Y_N - Y_L) + m_{23}(Z_N - Z_L)}{m_{31}(X_N - X_L) + m_{32}(Y_N - Y_L) + m_{33}(Z_N - Z_L)} \quad (3)$$

Taylor 이론에 의해 식 (2), 식 (3)를 선형화하면

$$f_1 = 0 = px_n + q_f \quad (4)$$

$$f_2 = 0 = py_n + rf \quad (5)$$

여기서,

$$p = m_{31}(X_N - X_L) + m_{32}(Y_N - Y_L) + m_{33}(Z_N - Z_L)$$

$$q = m_{11}(X_N - X_L) + m_{12}(Y_N - Y_L) + m_{13}(Z_N - Z_L)$$

$$r = m_{21}(X_N - X_L) + m_{22}(Y_N - Y_L) + m_{23}(Z_N - Z_L)$$

식 (4), 식 (5)를 선형화하여 행렬식으로 표현하면

$$v_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \text{관측된 잔차의 vector} \quad (\text{점 } n \text{의 상좌표})$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{\delta f_1}{\delta \omega}\right)_0 d\omega + \left(\frac{\delta f_1}{\delta \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\delta f_1}{\delta \kappa}\right)_0 d\kappa + \left(\frac{\delta f_1}{\delta X_L}\right)_0 dX_L + \left(\frac{\delta f_1}{\delta Y_L}\right)_0 dY_L + \left(\frac{\delta f_1}{\delta Z_L}\right)_0 dZ_L \\ \left(\frac{\delta f_2}{\delta \omega}\right)_0 d\omega + \left(\frac{\delta f_2}{\delta \phi}\right)_0 d\phi + \left(\frac{\delta f_2}{\delta \kappa}\right)_0 d\kappa + \left(\frac{\delta f_2}{\delta X_L}\right)_0 dX_L + \left(\frac{\delta f_2}{\delta Y_L}\right)_0 dY_L + \left(\frac{\delta f_2}{\delta Z_L}\right)_0 dZ_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$l = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \text{측점 } N \text{의 관측된 상좌표}$$

$$X' = [\Delta\omega \Delta\phi \Delta\kappa \Delta X_L \Delta Y_L \Delta Z_L] \\ = \text{transposed unknown parameter matrix}$$

이다. 또한, 관측값의 잔차와 컴퓨터의 최적값은 Gaussian condition에 의해 계산된다.

$$\phi = V'PV = \text{minimum}$$

윗 식을 최소자승법을 이용하여 풀어 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\hat{X} = (A'PA)^{-1}A'PL \quad (7)$$

여기서 A'는 A의 전치행렬이고, P는 관측값의 추정 분산값의 역수인 경중률 행렬이다. 즉,

$$P_i = \sigma_0^2 / \sigma_i^2 \quad (8)$$

단위 경중률의 표준오차는

$$\hat{\sigma}_0 = \left( \frac{V'PV}{n-u} \right)^{1/2} \quad (9)$$

이고, 여기서 n-u는 각각 관측 수와 변수의 수이다.

관측값의 잔차 V는

$$V = (I - A(A'PA)^{-1}A')L \quad (10)$$

이며, 잔차의 분산-공분산 행렬은 다음의 식 (11)과 같다.

$$\hat{\Sigma}_{VV} = (P^{-1} - A(A'PA)^{-1}A')\sigma_0^2 \quad (11)$$

또한 미지 변수의 경중률 계수행렬은 다음의 식 (12)와 같이 표시된다.

$$\hat{Q}_{xx} = (A'PA)^{-1} \quad (12)$$

여기서, 다시 공선조건식인 식 (2), 식 (3)은 새로운 미지수 즉, dx, dy, dz를 계산하는데 사용된다. 이 값들은 지상점 P의 대상물 공간좌표 X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub>, Z<sub>p</sub>에 대한 초기근사값에 적용되는 보정값이다. 식 (6)을 변형시

켜 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{xP} = a_{14}dX_P + a_{15}dY_P + a_{16}dZ_P + (f_1)_0 \quad (13)$$

$$V_{yP} = a_{24}dX_P + a_{25}dY_P + a_{26}dZ_P + (f_2)_0 \quad (14)$$

식 (13)와 식 (14)로부터 각 사진이 2개의 방정식을 형성한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 입체쌍인 4개의 방정식이 구성되고, 반면에 미지수는 3개이다. 따라서 X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub>, Z<sub>p</sub>는 최소제곱법을 이용하여 구할 수 있다.

$$X_P = k_{P1}X_{P1} + X_{L1} \quad (15)$$

$$Y_P = k_{P1}Y_{P1} + Y_{L1} \quad (16)$$

$$Z_P = k_{P1}Z_{P1} + Z_{L1} \quad \text{photo \#1(왼쪽 사진)} \quad (17)$$

그리고

$$X_P = k_{P2}X_{P2} + X_{L2} \quad (18)$$

$$Y_P = k_{P2}Y_{P2} + Y_{L2} \quad (19)$$

$$Z_P = k_{P2}Z_{P2} + Z_{L2} \quad \text{photo \#2(오른쪽 사진)} \quad (20)$$

만일 식 (15)와 식 (18)이 같고, 식 (16)과 식 (19)가 같다면, k<sub>P2</sub>에 대한 해는

$$k_{P2} = \frac{y_{P1}(X_{L2} - X_{L1}) - x_{P1}(Y_{L2} - Y_{L1})}{x_{P1}y_{P2} - x_{P2}y_{P1}} \quad (21)$$

k<sub>P2</sub>를 식 (18), 식 (19), 식 (20)에 대입하면 X<sub>p</sub>, Y<sub>p</sub> 및 Z<sub>p</sub>의 초기 근사값을 계산할 수 있으며, 동일한 방법으로 각 점에 대하여 반복계산하면 근사해를 얻을 수 있다.

Q = N<sup>-1</sup>은 분산-공분산 행렬로서 대상점좌표의 표준오차를 구할 수 있다.

X, Y, Z의 표준오차는

$$S_x = S_0 \sqrt{n_{11}^{-1}} \quad (22)$$

여기서

$$S_0 = \sqrt{\frac{V'PV}{n_{11}^{-1}}}$$

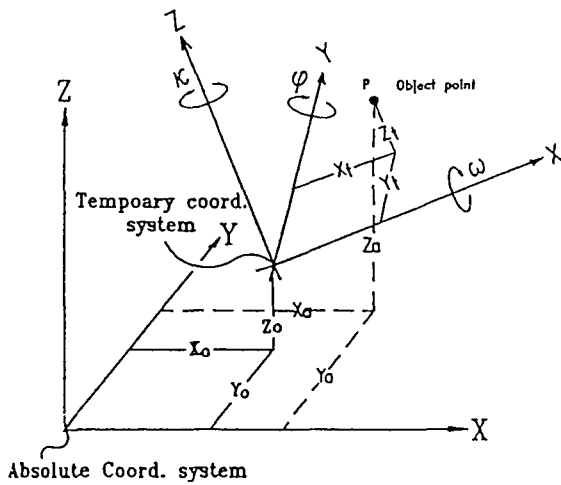


그림 3. 절대좌표계와 임시좌표계

이고, m은 관측수, n은 미지수의 갯수이다.

### 2.1.2 절대변형량 산출기법

#### (1) 절대좌표계의 설정

근거리 사진측량 방법에서 촬영에 들어가기 전 가장 기본적인 사항은 좌표계의 설정이다. 일반적으로 기준점에 대한 기선 방향을 X축으로 잡고 피사체 방향을 Z축, 연직상향을 Y축으로 잡는다(그림 3). 일반측량에서는 1회 측정으로 완료되기 때문에 문제가 없으나, 변형측정일 경우에는 일정기간을 주기적으로 반복 촬영하기 때문에 절대좌표계의 설정이 중요하다. 측정 주기가 단시간 경우에는 카메라를 그대로 유지하면 절대좌표계가 불변하므로 무관하나 전역구조물과 같이 장기간에 걸친 측정을 필요로 할 때에는 기준점에 대한 삼각측량시 기선이 불변이라고 가정할 수 없으므로 절대좌표계가 변한다. 결국 좌표계가 3차원으로 회전하기 때문에 2단계, 3단계, 4단계 촬영시의 기준점 좌표계를 1단계 촬영시의 좌표계로 3차원 역회전으로 변환 값을 구하여야 하고 이를 위해서는 다음의 과정을 거쳐야 한다.

1) 좌표계의 scale factor 결정( $\lambda$ )

2) 서로 직교하는 3축에 대한 회전각 결정( $\omega, \phi, \kappa$ )

3) 동일 축을 따라 이동한 양의 결정( $X_0, Y_0, Z_0$ )

이들 7개의 인자를 구하기 위해서는 측정대상인 구조물로 인한 변에 무관한 안정된 장소에 최소 3점 이상의 기준점을 정하고 매 측정단계마다 기준점의 삼각측량과 함께 정밀 측정하여 3차원 좌표를 구하

여야 한다. 1차 측정시의 성과와 2차 측정시의 성과를 비교함으로써 변형량을 구하게 된다. 또한 다수의 기준점을 선정하여 최소자승법을 이용할 수도 있으나, 어느 한 좌표축을 고정한다면 유일해 방법으로도 정확한 성과를 얻을 수 있다.

절대좌표계로 변환 후의 좌표는 임시좌표계로부터

$$\bar{X}_r = \lambda [R]x_r + x_0$$

7개의 미지수 매개변수를 구하기 위해서는 절대좌표계와 임시좌표계에서 결정된 최소 3점 이상의 기준점좌표가 필요하며, 기본 좌표계는 그림 3과 같다.

#### (2) 절대변형량 산출기법

각 좌표계에 대한 7개의 미지 매개변수  $\lambda, \omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$ 가 계산되면 각 기준점 좌표값을 트립조정 방법을 이용하여 오차 조정을 하고 각 미지점의 3차원좌표를 원기준좌표계로 변환한다. 결국 각 단계별로 변환된 미지점의 최종 3차원좌표를 비교해 절대변형량을 산출한다. 절대 변형량 산출에 대한 기본 흐름도는 다음의 그림 4와 같다.

#### 2.1.3 촬영기법에 따른 오차모델

근거리사진측량 방법을 이용한 변형측정을 위해서는 구조물의 크기와 중요성에 따라서 소오의 정확도를 요구하게 된다. 그러므로 변형측정의 계획을 수립하기 위해서는 여러가지 복합적인 요소들을 결정해야 한다.

- 촬영기법 : Normal Case
- 조정기법 : Strip Adjustment
- 촬영거리
- 사진매수
- 중복도
- 잉여 관측수
- 기준점 수와 배치
- Camera : Metric
- Film : Vinyl Film

근거리 사진측량 방법의 평가방법을 공식화하기 위해서는 두 구성요소를 설정하는 매개변수들과 정확도 사이의 수학적 관계가 성립되어야 하며, 이의 적합성 여부를 판단하기 위해 실험이 수반되어야 한다.

본 연구에서 사용된 직각 촬영방법의 기본 알고리즘을 고찰하여 오차의 일반식을 도출해 보고자 한다.

그림 5로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

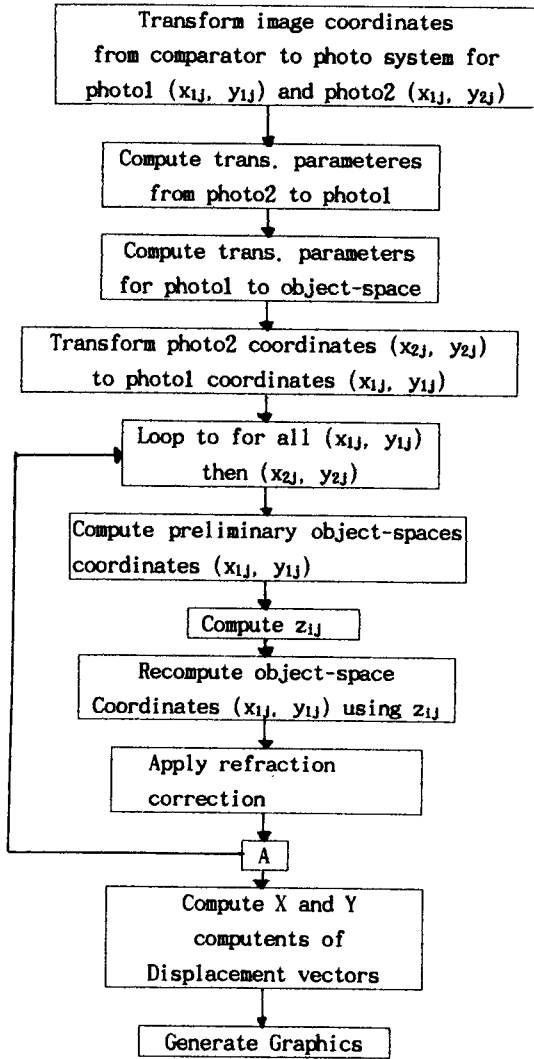


그림 4. 근거리사진측량방법의 해석단계

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{X}{Z} c_1 \\
 x_2 &= \frac{X-B}{Z} c_2 \\
 y_1 &= \frac{Y}{Z} c_1 \\
 y_2 &= \frac{Y}{Z} c_2
 \end{aligned} \tag{23}$$

위 식 (23)로부터 측정공간좌표에 대한 일반식은 다음의 식 (24)와 같다.

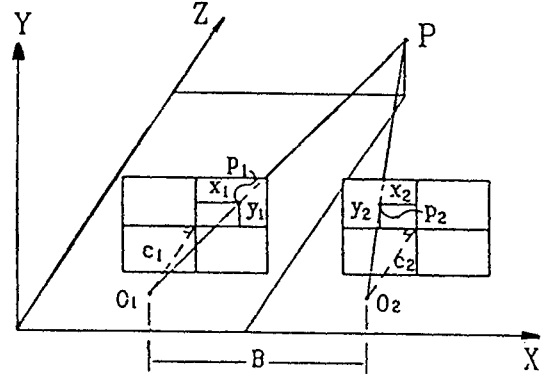


그림 5. 직각 수평 촬영방법

$$\begin{aligned}
 X &= B \frac{c_2 x_1}{c_2 x_1 - c_1 x_2} \\
 Y &= Z \frac{y_1 + y_2}{c_1 + c_2} \\
 Z &= X \frac{c_1 - c_2}{x_1 - x_2} + B \frac{c_2}{x_1 - x_2}
 \end{aligned} \tag{24}$$

가장 일반적인 경우( $c_1 = c_2 = c$ )라면 식 (24)은 다음의 식 (25)으로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 X &= B \frac{x_1}{x_1 - x_2} \\
 Y &= Z \frac{y_1 + y_2}{2c} \\
 Z &= B \frac{c}{x_1 - x_2}
 \end{aligned} \tag{25}$$

$m_{x1}, m_{y1}, m_{x2}, m_{y2}$ 를 사진좌표의 표준오차라 할 때  $m_{x1} = m_{x2} = m_x, m_{y1} = m_{y2} = m_y$ 라 가정하여 유도된 대상물 공간좌표의 표준오차  $m_x, m_y, m_z$ 는 다음의 식 (26)와 같다.

$$\begin{aligned}
 m_x &= \frac{Z}{c} m_x \\
 m_y &= \frac{Z}{c} m_y \\
 m_z &= \sqrt{2} \frac{Z}{C} \frac{Z}{B} m_x
 \end{aligned} \tag{26}$$

대상물 공간에서 중앙점  $X=B/2, Y=0$ 인 경우에는 다음의 식 (27)와 같다.

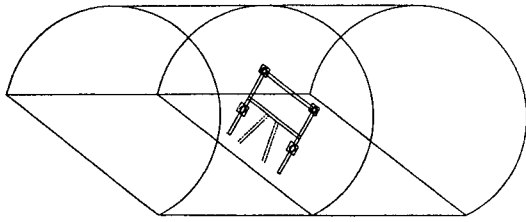


그림 6. 촬영구간에서의 라이트 구성

$$\begin{aligned}
 m_x &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{Z}{c} m_x \\
 m_y &= \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{Z}{c} m_y \\
 m_z &= \sqrt{2} \frac{Z}{C} \frac{Z}{B} m_x
 \end{aligned}
 \quad (27)$$

결국 직각수평촬영에서는 촬영거리 Z를 최소로 하고 기선 B를 최대로 함으로써 좌표의 오차가 최소로 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 Z는 렌즈초점 거리, 심도 및 format 크기 등의 함수인 반면, B는 사진축척, format 크기, 중복도 등의 함수이다. 이들 요소들은 직각 수평촬영으로 얻을 수 있는 대상물 공간좌표의 정확도를 제한한다. 그러므로 이들 값들을 적절히 조합하여야 한다. 동일조건, 동일 피사체일 경우는 수렴촬영기법을 도입함으로써 측정점까지의 거리의 감소와 기선장의 증가를 가져올 수 있다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험

본 연구에서는 보다 효율적인 전력구조물의 미소변위 측정기법의 개발을 위하여 전력시설을 설치하기 위해 굴착중인 전력공동구내의 대피구간으로 만들어 놓은 터널구간을 선정하여 전력구조물 형상에 대한 정밀 측량 또는 사진촬영을 실시할 수 있도록 함은 물론 공사작업에 지장을 주지 않도록 하였으며, 또한 대상지역은 지름이 3m 정도의 대피구간으로 이미 지반내의 수렴이 완료된 상태이므로 변위가 발생되지 않는 구간이지만, 본 연구의 목적이 미소변위 측정기법의 개발과 함께 실제 현장측량에서 결과도출에 이르기까지 On-Line System의 구축시스템을 마련하기에 부합되어 대상지역으로 선정하였다.

사진촬영을 위하여 500 W 스포트라이트 4개를 촬

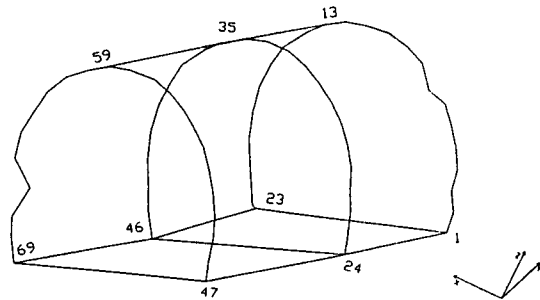


그림 7. 촬영대상지역에 설치된 타겟 배열

영대상구역에 비출 수 있도록 그림 6과 같이 앵글을 이용한 라이트 지지대를 구성하여 4개의 스포트라이트를 비추도록 하여 사진촬영시 충분한 조도가 확보되도록 하였다.

#### 3.1.1 기준점 측량

근거리 사진측량방법을 이용하여 우리가 측정하고자 하는 미지 지점의 3차원 절대좌표를 구하기 위해서는 적어도 3점 이상의 3차원 기지점 좌표를 측정하여야 하므로, 본 연구에서는 3차원 측량시스템인 MONMOS를 이용하여 기준점 3점과 체크 포인트 11점을 측정하였으며, 근거리사진측량에 의한 해석에 있어서 정확도를 확인할 수 있도록 측정점 69점을 선정하여 MONMOS에서 이용되는 부착 반사 프리즘 타겟을 가로 40 cm, 세로 30 cm 간격으로 그림 7에서와 같이 부착하여 정밀측량을 실시하였으며, 동시에 근거리사진측량용 카메라인 Metric P31 camera를 이용하여 중중복도 60% 이상, 횡중복도 30% 이상의 중중복도를 주고, 기선길이 1.2 m 및 촬영대상과의 거리를 1.8 m 정도 되도록 카메라를 설치하였으며, 이때 P31 카메라에 의해 촬영시 사용된 필름은 Kodak PLUS-X pan Film이다.

기준점 측량에 사용된 3차원 측량시스템 MONMOS는 토탈스테이션 NET2와 콘트롤터미널 SPR4C, 그리고 반사프리즘 타겟으로 구성되어 있으며, 토탈스테이션 NET2로 반사프리즘 타겟을 시준 측량하고 데이터를 SDR4C로 연산,  $\pm(1 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm/D})$ 의 거리정도 및 기계상의 기움을 X, Y, Z 방향으로부터 보정이 가능한 자동2축 보정장치가 내장되어 있고, 지반의 강도나 진동에 의한 수평오차를 감지하여 자동적으로 보정하여 준다.

#### 3.1.2 ON-LINE SYSTEM 구축

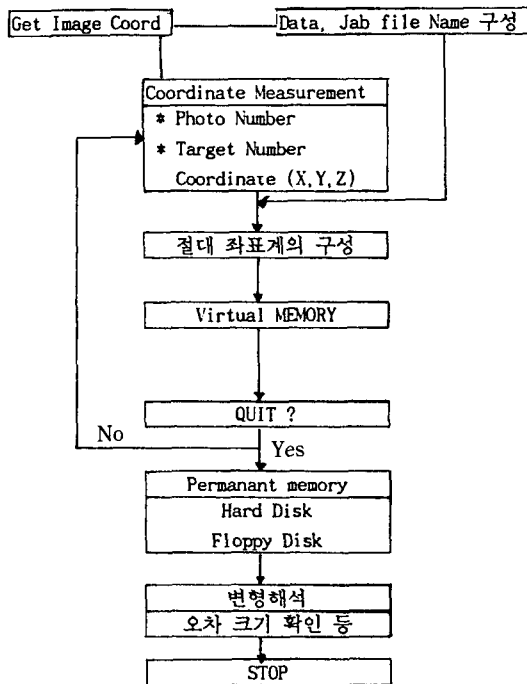


그림 8. 데이터 처리의 온라인화

전력구조물은 구조물의 순간 및 절대변형량을 측정하여, 이의 신속한 해석과 함께 처리가 이루어져야 할 필요가 있다. 종래의 방법에는 터널 구조물의 변형측정에 K-Type의 계측 장비를 이용하여 터널내의 내공변위를 측정하고 레벨을 이용하여 천단변위를 측정하여 계산 처리 하였으나, 본 연구에서는 근거리사진측량을 이용하여 해석함으로써 오차분석의 문제를 해결하고 자료 처리에서의 합리적인 해결 방법을 모색하였다. 사진촬영에 의해 얻어진 상좌표를 절대좌표로 해석하기 위해 컴퓨터로 읽혀진 좌표를 프린터로 출력하여 출력된 자료를 컴퓨터에 입력시킴으로서 Data file을 형성하는 등 시간적 손실을 물론 입력과정에서의 오차를 발생시켜 과대오차를 발생시키는 원인이 되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 이들 과대오차를 소거하기 위하여 해석도화기에 의해 얻어진 사진좌표인 상좌표를 직접 퍼스널 컴퓨터에 직접 전송할 수 있도록 수치독취 과정에서의 baud rate와 데이터 전송 형태를 파악하여 아스키파일로 구성하고 Job.bat 화일을 만들어 기준점좌표와 상좌표등 스트립조정 방법에서 필요로 하는 데이터 파일을 구성 해석함으로써 우리가 얻고자 하는 절대좌표값의 산출

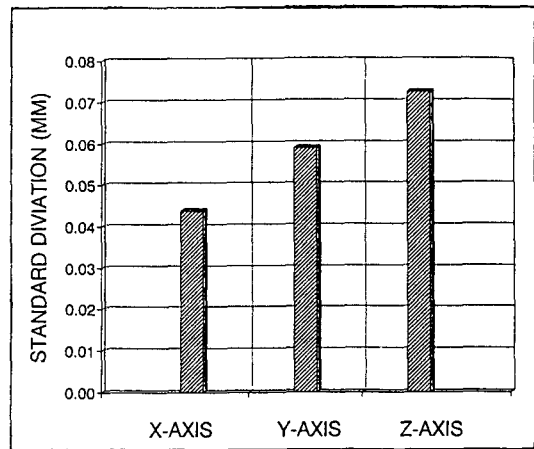


그림 9. 표준편차의 비교

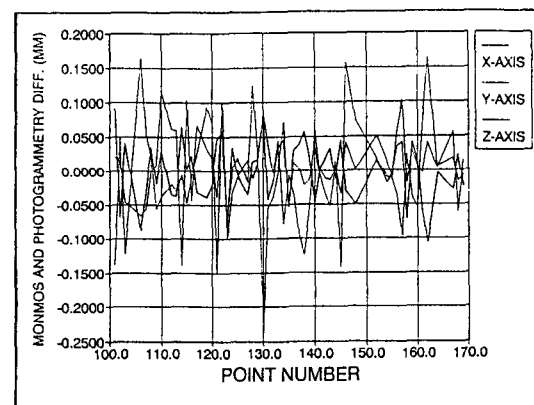


그림 10. 측량 방법상의 좌표차 비교

및 분석자료를 얻도록 하였다. 도화기 상에서 얻어진 상좌표를 절대좌표로 환산하여 분석하기 위해서는 각 사진에서 촬영되어 얻은 사진에 대해 스트립으로 구성하였으며 스트립으로 구성된 사진좌표를 절대좌표로 해석하도록 스트립조정 과정에 알맞은 사진좌표로 구성하였다. 또, 스트립조정 좌표상의 각좌표의 분석을 위해 데이터 베이스 처리가 이루어지도록 각 점에서의 오차 및 표준편차를 결정하여 각 점의 구성 요소에 대한 특성값을 얻을 수 있도록 하였다.

### 3.1.3 절대값의 산출

사진촬영에서 미지점에 대한 절대값을 산출하기 위해서는 11모델의 사진촬영을 하여 얻어진 상좌표를 절대좌표계로 변환하여야 한다. 여기서 각 측정점에 대해 절대좌표값으로 변환하기 위해서는 기준점에

표 1. 3차원 측량시스템과 사진 측량시스템의 비교

(단위 : mm)

NO	사 진 측 량			MONMOS			ΔX	ΔY	ΔZ
	X	Y	Z	X	Y	Z			
101	0.092	0.021	-0.137	0	0	0	0.092	0.021	0.137
102	42.761	290.545	-77.881	42.829	290.53	-77.929	-0.068	0.015	0.048
103	-45.795	583.34	-113.375	-45.836	583.385	-113.254	0.041	-0.045	-0.121
106	52.428	1446.593	-25.493	52.516	1446.659	-25.656	-0.088	-0.006	0.163
107	66.37	1712.584	82.761	66.398	1712.64	82.706	-0.028	-0.056	0.055
108	-49.4	1985.512	267.329	-49.436	1985.511	267.307	0.036	0.001	0.022
109	57.838	2219.684	463.989	57.856	2219.676	464.045	-0.018	0.008	-0.056
110	67.868	2418.143	717.631	67.839	2418.026	717.668	0.029	0.117	-0.037
112	61.273	2635.59	1396.959	61.309	2635.529	1396.978	-0.036	0.061	-0.019
113	40.329	2652.385	1722.265	40.364	2652.326	1722.294	-0.037	0.059	0.029
114	51.344	2569.412	2084.686	51.279	2569.551	2084.692	0.065	-0.139	-0.006
115	81.624	2429.396	2376.022	81.622	2429.292	2376.069	0.002	0.104	-0.047
116	20.935	2194.32	2729.64	20.912	2194.364	2729.646	0.023	-0.004	-0.006
117	15.926	1933.131	2930.688	15.957	1933.064	2930.664	-0.031	0.067	0.024
119	37.507	1286.078	3232.76	37.546	1286.045	3232.666	-0.039	0.033	0.094
120	11.161	896.442	3277.105	11.179	896.422	3277.035	-0.018	0.02	0.07
121	30.105	475.952	3269.567	30.058	475.99	3269.715	0.047	-0.038	-0.148
122	15.491	17.528	3214.195	15.433	17.429	3214.095	0.058	0.099	0.1
123	-0.075	-12.261	3140.833	0	-12.16	3140.915	-0.075	-0.101	-0.082
124	-408.166	-5.982	-35.574	-408.201	-5.952	-35.579	0.035	-0.03	0.005
125	-412.872	278.857	-90.847	-412.865	278.864	-90.867	-0.007	-0.007	0.02
127	-405.042	887.148	-116.568	-405.007	887.131	-116.552	-0.035	0.017	-0.016
128	-374.288	1156.171	-109.018	-374.303	1156.181	-109.142	0.015	-0.01	0.124
129	-353.902	1476.475	-24.395	-353.92	1476.463	-24.422	0.018	0.012	0.027
130	-326.627	1720.832	89.063	-326.707	1720.748	89.3	0.08	0.084	-0.237
131	-316.391	1996.323	267.141	-316.349	1996.281	267.196	-0.042	0.042	-0.055
132	-322.913	2223.282	468.322	-322.901	2223.387	468.359	-0.012	-0.004	-0.037
133	-316.637	2425.658	691.935	-316.67	2425.614	691.936	0.033	0.044	-0.001
134	-295.996	2600.443	998.464	-296.042	2600.521	998.393	0.046	-0.078	0.07
135	-309.356	2688.619	1346.621	-309.304	2688.626	1346.675	-0.052	-0.007	-0.054
136	-314.754	2687.849	1705.377	-314.785	2687.884	1705.364	0.031	-0.035	0.013



표 1. 계속

(단위 : mm)

NO	사 진 측 량			MONMOS			ΔX	ΔY	ΔZ
	X	Y	Z	X	Y	Z			
137	-350.908	2587.534	2099.189	-350.946	2587.628	2099.186	0.038	-0.094	0.003
138	-285.208	2460.211	2402.291	-285.266	2460.335	2402.312	0.058	-0.124	-0.021
139	-317.274	2210.302	2773.257	-317.297	2210.358	2773.27	0.023	-0.056	-0.013
140	-303.581	1946.085	2960.517	-303.533	1946.025	2960.479	-0.048	0.06	0.038
141	-309.547	1636.193	3142.821	-309.548	1636.191	3142.826	0.001	0.002	-0.005
142	-305.04	1266.939	3275.377	-305.058	1266.951	3275.412	0.018	-0.012	-0.035
143	-330.389	874.737	3306.236	-330.422	874.75	3306.288	0.033	-0.023	-0.056
144	-345.25	495.886	3276.436	-345.238	495.883	3276.421	-0.012	0.003	0.015
145	-362.4	202.229	3258.167	-362.445	202.263	3258.308	0.045	-0.034	-0.141
146	-403.802	-162.246	3161.111	-403.772	-162.288	3160.953	-0.03	0.042	0.158
148	-816.772	290.707	-82.835	-816.722	290.705	-82.908	-0.05	0.002	0.073
152	-728.082	1511.032	-18.551	-728.098	1510.981	-18.569	0.016	0.005	0.018
154	-652.28	2055.774	309.487	-652.262	2055.758	309.497	-0.018	0.016	-0.01
155	-636.14	2264.905	502.877	-636.135	2264.918	502.888	-0.005	-0.013	-0.011
156	-648.223	2460.733	707.811	-648.257	2460.769	707.755	0.034	-0.036	0.056
157	-628.021	2606.141	986.567	-628.063	2606.238	986.464	0.042	-0.097	0.103
158	-659.128	2693.558	1363.014	-659.057	2693.535	1363.031	-0.071	0.023	-0.017
159	-634.265	2698.146	1741.528	-634.307	2698.186	1741.498	0.042	-0.04	0.03
160	-677.774	2608.783	2074.525	-677.789	2608.837	2074.516	0.015	-0.054	0.009
161	-681.423	2487.905	2401.986	-681.365	2487.84	2401.99	-0.058	0.065	-0.004
162	-665.15	2255.681	2722.802	-665.043	2255.518	2722.761	-0.107	0.163	0.041
164	-656.347	1672.017	3159.304	-656.343	1672.011	3159.3	-0.004	0.006	0.004
167	-653.436	532.788	3290.257	-653.408	532.769	3290.2	-0.028	0.019	0.057
168	-700.027	245.99	3264.493	-700.051	246.005	3264.553	0.024	-0.015	-0.06
169	-732.353	-83.107	3195.549	-732.33	-83.1	3195.533	-0.023	-0.007	0.016

대해 절대기준좌표계가 설정되어야 하며, 이들 절대 기준좌표계로부터 각점의 절대좌표값을 산출함으로써 매 단계별 기준점의 성과와 비교하여 3차원 변환요소를 산출토록 구성하였다. 또, 3차원 측량시스템에 의해 기준점 및 미지점에 대한 3차원 측량이 이루어

졌으며, 이들 측정값과 사진측량에 의해 측정된 3차원 절대좌표값과 상호 비교한 결과 다음의 표 1과 같다.

### 3.1.4 분석

P31 카메라에 의해 촬영하여 얻어진 11조의 사진을 STRIP으로 형성 해석하여 얻어진 좌표값에 대한 표

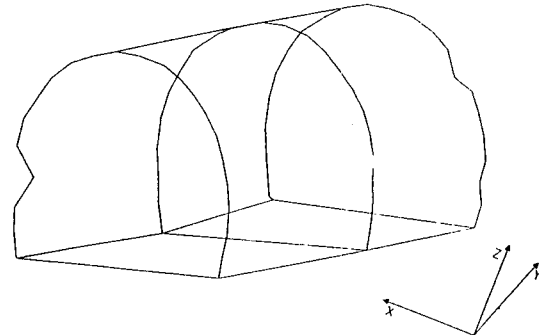
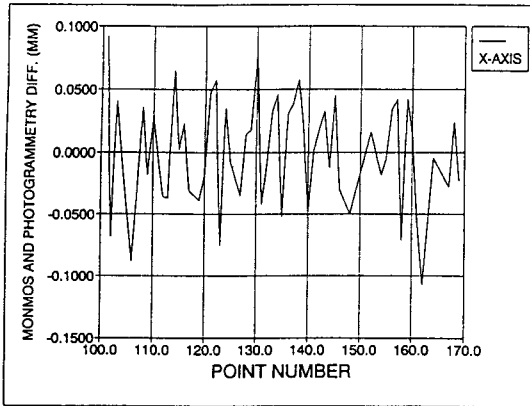


그림 12. 사진측량 성과에 의한 모니터링

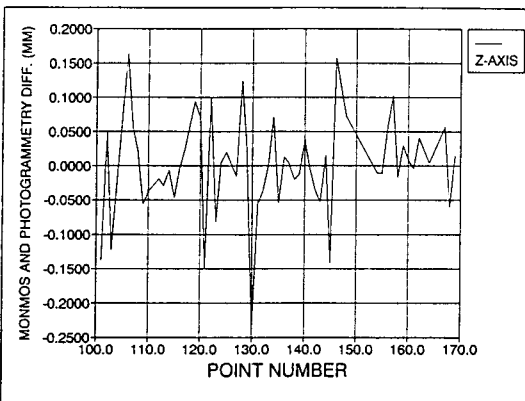
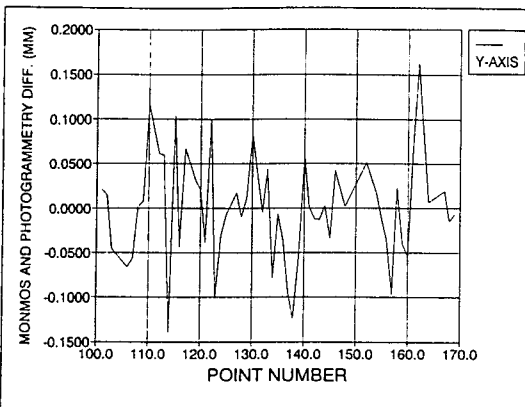


그림 11. 측량 방법에 따른 좌표차 비교

준편차를 계산한 결과, 그림 9에서 보는 바와 같이 X 방향의 표준편차를 0.044 mm, Y 방향의 표준편차를 0.059 mm, Z 방향의 표준편차를 0.072 mm로 나타내고 있어 미소변위를 측정하는데 매우 정확한 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

사진측량에 대한 신뢰성의 검증을 위해  $\pm 0.01$  mm 단위의 최소읽기가 가능한 3차원 측량시스템인 MONMOS에 의해 측정된 좌표값과 비교하여 보면, 그림 10에서 보는 바와 같이 X, Y, Z 방향 모두  $-0.25 \sim +0.15$  mm 범위내의 차이 만큼 발생되고 있음을 알 수 있다. 또 3차원 측정시스템상에서 발생할 수 있는 시준오차 등의 영향을 고려해 볼 때 근거리 사진측량 방법에 대한 신뢰성이 매우 양호함을 알 수 있다.

또 그림 11에서와 같이 X, Y, Z 각각의 방향에 대해 3차원 측량시스템 MONMOS와 근거리 사진측량에 의해 촬영되어 측정된 69점에 대한 차를 계산하여 보면 X 방향은  $\pm 0.1$  mm, Y 방향은  $-0.14 \sim 0.16$  mm, Z 방향은  $-0.25 \sim 0.16$  mm의 범위내의 차를 나타내고 있으며, 이는 표 1과 같다. 사진측량 성과에 대한 값을 모니터링하면 그림 12와 같으며, 만약에 측정된 값이 조밀하게 측정된다면 복잡한 형상이나 비선형의 구조물에 대한 형상 계측이 가능하며, 또 구조물이 시간 경과와 외력에 따른 변형이 발생시 데이터 축적에 따른 형상의 변화에 따른 해석이 가능하다. 본 연구에서는 시간 경과나 외력에 따른 영향을 고려하지 않았으나, 3차원 측량시스템에 의해 측정된 값과 사진측량 방법에 의해 측정된 값을 컴퓨터 화면상에 재현시켜 봄으로써 형상변화에 따른 구조물의 변형상태의 형상재현 가능성을 모색하였다. 또 이런 모든 작업등이 개개의 작업에 의해 이루어지기 때문에 많은 시간적 손실이 생길 우려가 있으며 이의 시간적 손실을 알고 오차를 최소화하기 위하여 그림 8과 같은 과정의 On Line.bat file을 구성하여 측정 데이터에서 모니터링에 이르기까지 컴퓨터에 의해 일괄 처리되도록 구성하여 해석할 수 있도록 하였다.

#### 4. 결 론

근거리사진측량에 의해 전력구조물인 공동구 구간 내를 촬영하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 근접사진측량 방법을 이용하여 전력구조물의 변위량을 측정할 경우 먼저 절대 기준좌표계의 구성이 필요함에 따라, 기준 좌표계의 변화에 따른 해결방법을 모색하였다.

2. 전력구조물에 대한 적용 결과, 오차 발생에 있어 매우 양호한 결과를 얻을 수 있으므로, 복잡한 형상이나 비선형 구조물에 대한 모니터링시 이용 가능성이 충분함을 알 수 있었다.

3. 실제 현장에서 수시로 사진촬영 방법으로부터 절대좌표의 산출, 미소변위량 산출 가능성 모색 및 모니터링을 통한 형상 상태 추정이 가능하였다.

4. 근거리사진측량 방법의 적용을 통해 다수의 측정값 및 연속되는 형상의 해석에 대한 적용 가능성을 확보할 수 있었다.

5. 근거리사진측량의 모든 작업 과정에서의 On-Line system의 구축을 통해 작업상의 과오를 줄일 수 있었다.

#### 감사의 말

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었으며 본 연구를 위해 적극 협조해 주신 충남대 측량연구실과 SOKKIA KOREA에 감사사를 드립니다.

#### 參考文獻

1. Clive S. Fraser. Dimensional Characterization of

a Large Aircraft Structure by Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 5, pp. 539-543, May 1992.

2. Joe T. Richardson. Measured Deformation Behavior of Gral Canyon Dam. Journal of the SURVEYING AND MAPPING DIVISION, ASCE, pp. 149-168, 1968.

3. Louis H. Roehm. Deformation Measurements of Flaming Gorge Dam. Journal of the SURVEYING AND MAPPING DIVISION, ASCE, pp. 33-47, 1968.

4. Carl-Olov. New Technique Developed to Determine the Movements of an Old Masonry Wall as a Result of Piling. XIIIth Congress of the International Society for Photogrammetry HELSINKYM, 1976.

5. Ed. Dauphin, Kennert Torgard. Measurement of Displacement Using the Time-Parallax Method. XIIIth Congress of the International Society for Photogrammetry HELSINKYM, 1976.

6. Kam W. Wong, Alan P. Vonderohe. Photogrammetric Measurement of Displacements Around Tunnels in Sandy Soils. Photogrammetric Engineering, 78-279, pp. 373-388, 1978.

7. S.A. Veress, N.C. Jackson, J.N. Hazopoulos. Analysis of Monitoring the Gabion Wall by Inclinator and Photogrammetry. ASCE Surveying Engineering, pp. 216-237, 1979.

8. S.A. Veress. Measurement of Structure Deformation of Electric Transmitting Towers. FIG XVth International Congress, 604.1/1-9, 1981.

9. Naftel, A.J., J.C. Boot. An Iterative Linear Transformation Algorithm for Solution of the Collinear Equations. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57, No. 7, pp. 923-919, 1991.

10. 土木工事の計測と實際. Tokoyo Kenkyou Co.

11. 日本寫眞測量學會編. 寫眞による3次元測定. 共立出版, pp. 39-105, 1983.