

문화재와 지상시설물의 정밀점검을 위한  
지상사진의 최적촬영조건 설정  
Establishment of Optimum Photo Condition for  
the Accurate Monitoring of Cultural Assets and  
Ground Facilities using Terrestrial Photographs

孫 德 在\*  
Sohn, Duk-Jae

요 旨

지상사진측량은 항공사진측량에 비하여 촬영위치를 비교적 자유로이 선정할 수 있고, 대상물에 대한 촬영체계의 기하학적인 요소로부터 대상점 위치결정의 정확도를 사전에 예측하므로써 요구하는 정확도를 만족시킬 수 있는 최적 촬영체계를 설계할 수 있다.

문화재조사와 정밀 시설물점검에 많이 이용되는 수렴사진의 경우, 최적촬영조건에 대한 기존의 이론적 또는 실험적 연구는 기본적으로 평면형인 대상물의 정면중앙에 대하여 좌우대칭인 위치에서 수렴촬영하는 경우가 대부분이다. 그러나 대상물 주위의 제약조건에 의하여 정면에서 촬영하기 곤란하거나, 충분한 수렴각을 확보하기 곤란한 경우가 많으며, 대상물 형태 또한 단일평면만으로 해석하기 곤란한 경우도 많다.

따라서, 본 연구에서는 여러가지 평면이 조합된 형태의 대상물에 대한 지상수렴사진의 정확도 변화 양상을 고찰하므로써, 최적촬영조건을 도출하고자 한다. 본 연구의 결과 촬영방향, 수렴각 변화는 물론 대상물 형태에 대한 정확도 분석이 가능하여, 시설물측량, 문화재조사 및 복원, 정밀기기설치, 변형측량 등 정밀관측을 요하는 대상물에 대한 수렴사진 촬영체계의 설계에 효과적으로 이용될 것으로 사료된다.

ABSTRACT

The terrestrial photogrammetry has the relative convenience of selecting the site of photo station in contrast with the aerial photogrammetry, and the flexibility in accuracy prediction of object point positioning. So it has the advantage in designing optimum photo taking system which can fulfill the required accuracy.

For the convergent photos which are frequently used for the monitoring of cultural assets and ground facilities, almost all of the traditional studies for the optimum photo condition, both in theoretical or experimental, are basically depend on the symmetrical configuration at the normal direction to the center of the object.

However, in many cases the surroundings of the object do not allow the normal photo direction or sufficient convergent angle, even more the object features are not always be seen as one panel like planar.

In this paper, the accuracy variation of convergent photos for the multi-planar objects, which are composed by some orthogonal planes, are investigated to establish the optimum photo condition. The results of the accuracy analysis for the photo direction, convergent angle, as well as the object feature are expected to be utilized in system design of geometric configuration of convergent photos, which are adequate for the accurate monitoring of the objects, such as cultural assets, facilities, precision instruments, deformation surveying, etc.

\*서남대학교 토목공학과 교수

## 1. 서 론

문화재조사 및 복원, 시설물측량, 선박, 항공기, 자동차의 설치 및 점검 등과 같은 다양한 분야에 있어서 지상사진측량은 높은 정확성과 기록성 및 재현성의 특징을 가지므로써 그 효용성이 크게 인식되고 있으며, 국내에서도 사찰, 성벽, 주요 석조문화재, 시대별 석탑의 조형비분석, 구조물 내부 해석 등에 관한 연구에 많이 이용되어 왔다.<sup>1-4)</sup>

지상시설물을 조사, 관측하기 위한 지상사진 측량의 정확도를 최대로 향상시키기 위해서는 기본적으로 자료수집체계와 자료처리체계 양면에 걸쳐 면밀한 사전설계가 필요하다.<sup>5,6)</sup> 자료수집체계(data acquisition system)에서는 크게 보아서 사진기 및 필름의 성능에 관련되는 물리적 특성(physical characteristics)과, 대상물과 촬영점, 또는 촬영점과 촬영점간의 상대적 위치관계에 대한 특성을 반영하는 기하학적 형태구성(geometric configuration)의 두 가지가 주요한 요소가 되며, 자료처리체계(data reduction system)는 촬영된 사진으로부터 얻어진 상좌표로부터 절대 좌표를 얻기 위한 것으로, 최근에는 가장 높은 정확도를 얻을 수 있는 해석적 방법이 널리 이용되고 있다.<sup>7)</sup>

해석사진측량은 정밀좌표관측기 및 정밀입체도화기로 관측한 상좌표로부터 사진크기, 배열 및 초점거리 등에 구애받지 않고 광속을 해석적으로 재현하여 입체모델을 구성하는 것이 가능하므로 측량용, 비측량용 사진기에 의한 영상으로부터 지형도 제작은 물론 공학, CAD/CAM, 건물 및 문화재조사, 의학, 군사적 이용면에 이르기까지 다양한 응용가능성을 보여주고 있다.

또한 기하학적 형태구성을 좌우하는 촬영방법에 있어서는, 촬영방향의 설정이 용이하고, 이용가능한 입체모델의 범위를 최대로 할 수 있는 수렴사진촬영(convergent case photo) 방법이 편각평행사진(tilted parallel case)이나 직교수직사진(normal case)에 비하여 정확도면에서도 양호한 결과를 나타낸다.<sup>7,9)</sup> 따라서 문화재와 시설물의 정밀조사관측에서는 대규모 시설물에 대한 근접촬영이나 지상사진의 블럭조정의 경우와 같이 직교수직사진을 택하여야 할 경우 이외에는 가능한 수렴사진촬영을 이용하는 것이 바람직하다.

이러한 지상수렴사진의 경우, 지금까지 수렴각에 따른 정확도 변화에 대한 실험분석과 이론적 예측모델에 대하여 다수의 연구가 이루어져 왔으나,<sup>9-12)</sup> 이들 연구는 기본적으로 평면형 대상물 정면중앙방향에 대하여 좌우대칭인 위치에서 촬영하는 경우가 대부분이며, 또한 대상물의 형태와 대상점의 분포는 크게 고려하지 않고, 대상물과 촬영점 위치의 기하학적 관계와 사진기의 특성을 위주로 분석하는 것이 대부분이다. 이러한 연구동향에 따라 최적촬영체계의 설계를 위한 실험 및 이론적 연구의 필요성이 대두되어 왔으며, 단일평면형에 대해서는 수렴각 뿐만 아니라 촬영방향까지 고려한 좌표결정 정확도의 실험적 분석과 이론적 예측모델의 개발이 이루어진 바 있다.<sup>13)</sup>

그런데 문화재와 시설물의 정밀조사에서 종종 대상물의 형태가 단일평면을 기준으로 하는 단순기복 분포 이외에도 여러가지 평면이나 원통 등이 조합된 형태를 나타내는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 자료처리체계로는 해석적 방법중에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있는 번들조정법을 이용하고, 자료수집체계로는 대상물과 촬영점간의 기하학적 형태의 영향을 분석하기 위하여 단일평면에 대한 연구에 이어서 두 평면, 또는 세 평면이 조합된 대상물에 대하여 수렴각과 촬영방향을 고려한 정확도분석에 대하여 고찰하였다.

## 2. 수렴촬영체계의 설계를 위한 좌표해석이론

본 연구에서 자료처리체계는 현재 해석적 방법 중 가장 정확하고 널리 이용되는 번들조정법에 의하고, 각 표정점에 대한 삼차원 공간위치좌표(X, Y, Z)와 이에 대한 정확도를 분석한다.

### 2.1 Bundle 조정법

외부표정요소와 대상 공간좌표(X, Y, Z)에 대한 공선조건식을 전개하여 선형화한 번들조정법에서 사진 i, 관측점 j에 대한 잔차벡터  $V_{ij}$ , 계수행렬  $B_{ij}$ , 정오차보정항  $\delta_i$ , 외부표정요소의 보정량  $\delta_j$ 일 때, 다음 함수관계를 가진다.

$$V_{ij} + \dot{B}_{ij} \delta_i + \ddot{B}_{ij} \delta_j = F_{ij} \quad (1)$$

또한, 상좌표요소  $v_i$ 와 대상점좌표에 대한 관측방정식은 다음과 같고,

$$\begin{aligned} \dot{v}_i - \delta_i &= f_i \\ \ddot{v}_i - \ddot{\delta}_i &= \ddot{f}_i \end{aligned} \quad (2)$$

각 상점에 대한 방정식과 사진기 변수, 대상점좌표에 대한 식들은 다음과 같이 경중용행렬  $W$ 를 고려하여 최소제곱해에 의한 정규방정식을 구하여 결합시킨다.

$$\delta = (B^T W B)^{-1} B^T W f = N^{-1} t \quad (3)$$

## 2.2 Bundle 조정법에 의한 좌표오차산정

최소제곱법에 의하여 조정계산의 해가 수렴된 후, 결과값에 포함된 잔류오차의 행렬  $V$ 와 자유도  $f = n_0 - n_u$ 에 대하여 경중용의 분산추정값은 다음과 같고,

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{S}{f} = \frac{V^T W V}{n_0 - n_u} \quad (4)$$

조정된 외부표정요소의 오차는 축약정규방정식의 계수행렬이  $M$ 일 때, 다음과 같이 구해진다.

$$M_{\delta\delta}^T = \hat{\sigma}_0^2 M \quad (5)$$

따라서, 축점의 분산-공분산행렬  $M^T$ 는 지상기준점 보정벡터의 계수행렬  $\beta$ , 정규방정식의 계수행렬  $N$ 에 대한 행렬  $Q_j = \ddot{N}_j^{-1} \ddot{N}_j^T$ 일 때 다음과 같다.<sup>13)</sup>

$$M^T = \sigma_0^2 [(\beta^T W \beta)^{-1} + Q_j M Q_j^T] \quad (6)$$

이 때, 관측점의 오차는 그 점의 기하학적 상관도와 사진의 외부표정요소로 구분되며, 위 식의 제1항은 기하학적 강도와 관련된 오차이고, 제2항은 외부표정 오차이다.

## 3. 촬영실험과 분석

문화재와 지상시설물의 정밀점검을 위한 지상사진의 최적촬영조건 설정을 위해서는 촬영방향 뿐만 아니라 연구대상물의 형태를 고려한 정확도 분석이 필요하다. 문화재와 지상시설물에 대한 정밀관측 및 점검이 필요한 경우 촬영대상물은 건물, 교량, 탑 등과 같은 평면형 뿐만 아니라 굴뚝, 냉각용 탑, 첨성대와 같은 원통형구조물; 아치형 터널, 돔(dome) 내부와 같은 오목면; 항공기, 선박, 자동차 등과 같은 임의형 구조물 등도 있으나, 이들에 대한 정밀관측의 경우 대부분 원거리에서 대상물 전체를 한두 장의 모델로

촬영하기보다는 가능한 촬영거리를 짧게 하고 수렴 사진 또는 수직사진으로 중복촬영하는 입체적인 촬영관측망을 구성하여 해석하는 것이 바람직하다. 이러한 경우 각각의 단일 사진상에 촬영된 대상물 영상은 일견 복잡한 형태를 이루고 있는 것처럼 보일지라도 근본적으로는 하나의 평면을 기준으로 한 기복분포이거나, 직교하는 두개의 평면을 기준으로 한 기복분포, 또는 직교하는 세개의 평면을 기준으로 한 기복분포로 볼 수 있다.

특히 건물벽면이나 교량의 측면, 석탑, 마애불상, 또는 촬영고도에 비하여 지형기복이 크지 않은 일반적인 항공사진이나 인공위성영상, SLAR 또는 SPOT과 같은 경사, 입체영상에서 지표면은 단일평면형 분포인 것으로 볼 수 있으며, 불가피하게 건물이나 탑의 모서리 부분, 또는 평탄한 지면과 건물 등의 수직시설물을 한 장의 사진으로 촬영하여 해석해야 하는 경우에는 두 평면을 기준으로 한 분포로 볼 수 있다. 한편, 건물천장의 모서리 부분, 돔형 내부에 그려진 벽화, 안테나 등을 한 모델로 해석해야 할 경우는 최소한 세 평면을 기준으로 한 분포로 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 경우의 정밀좌표 해석과 촬영체계의 설계를 위하여 실험촬영 대상물의 형태를 일반적인 문화재와 시설물의 관측에서 접하게 되는 대표적인 형태, 즉 단일평면, 두 평면, 세 평면의 3가지로 상정하였으며, 특정한 형태의 실제 문화재나 시설물의 모형을 대상으로 촬영분석하는 것보다 대상물의 기본적인 형태구성에 따른 촬영체계의 설계에 주안점을 두었다. 따라서 본 연구에서는 단일평면에 관한 연구<sup>7,13)</sup>에 이어서 두 평면과 세 평면으로 이루어진 형태의 대상물을 제작하여 이에 대한 실험촬영 및 분석을 실시하였다.

또한, 본 연구에서는 지상사진의 최적촬영조건 설계에 필요한 제반 물리적, 기하학적 요소 중 기존의 연구성과와 중복되는 부분, 즉 독립모델법, DLT, Bundle 조정법, 자체검정, 부가매개변수도입, 다중사진 해석 등 자료처리체계에 관련된 부분과, 렌즈수차, 필름변형, 표정점의 크기, 수, 배치문제, 측량용, 비측량용 사진기의 특성비교, 단일 모델, 다중 모델 등 자료수집체계에 관련된 부분은 배제하고, 지상시설물과 문화재 관측시 수시로 접하게 되는 촬영조건의 기하학적 관계에 초점을 두어 촬영실험을 계획하고

연구를 진행하였다.

### 3.1 촬영계획과 기준점측량

본 연구에서는 지상사진측량에서 가장 많이 접하게 되는 다양한 형태의 평면이 조합된 대상물에 대한 최적 촬영조건을 도출하기 위하여 다음과 같은 촬영 실험을 계획하였다.

첫째, 촬영대상물로서 단일평면 이외에 두 평면, 세 평면이 조합된 대상물을 제작하여 촬영하고, 기준점 및 표정점은 대상물의 심도와 형태를 고려하여 균등하게 배치한다.

둘째, 촬영기법은 측면사진의 경우에도 최대의 피복면적을 얻을 수 있으며, 관측결과를 동일한 조건에서 비교할 수 있도록 촬영거리를 일정하게 유지하고, 촬영방향은 대상물 중심방향을 향한다.

셋째, 본 연구의 선행 연구<sup>7,13)</sup>와 결과비교를 위하여 촬영사진기, 필름, 대상물표지(target)의 크기와 모양, 상좌표관측기 등은 동일한 것을 사용하였다.

#### 3.1.1 단일평면(1 PANEL)

대상물 중심에 대하여 촬영거리  $D_p=2.5$  m를 유지하면서, 촬영점을  $-45^\circ$  방향으로부터  $+85^\circ$ 까지  $5^\circ$  간격으로 원호상으로 배치하고, 대상물의 크기는 촬영거리에 대한 초점심도를 고려하여 가능한 최대 크기인  $100\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 로 하고, 표정점은  $25\text{ cm}$  간격의 격자형으로  $25$ 점을, 그 사이에  $8$ 점을 원형으로 배치하여 총  $33$ 점을 균등하게 분포시켰다.<sup>7,13)</sup>

촬영점 및 대상물 표정점의 절대좌표는 거리  $D_c=4.0$  m, 기선길이  $2.0$  m에서  $1''$  읽기 데오돌라이트 WILD T-2를 사용하여 기준점측량을 실시하였다.

#### 3.1.2 두 평면(2 PANEL)

촬영거리는 단일평면과 마찬가지로  $2.5$  m로 하고, 대상물은  $50\text{ cm}\times 100\text{ cm}$  크기의 두 평면이 직교하는 형태로 제작하였다. 대상물의 표정점은 단일평면과 마찬가지로  $25$ 점은 격자형으로,  $8$ 점은 원형으로, 총  $33$ 점을 균등하게 배치하였다. 또한 기준점측량도 동일한 조건에서 비교하기 위하여 단일평면의 경우와 같게 하였다.

절대좌표의 X축은 두 평면중 오른쪽 평면방향으로, Y축은 수직방향으로, Z축은 다른 하나의 평면방향으로 하였으며, 촬영점은 그림 1과 같이  $5^\circ$  방향으로부터  $85^\circ$  방향까지  $5^\circ$  간격의 원호상으로 배치하였다.

#### 3.1.3 세 평면(3 PANEL)

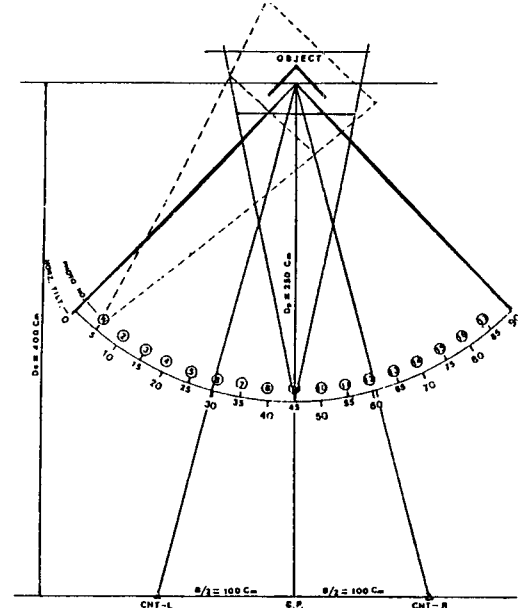


그림 1. 촬영점배치와 기준점측량위치(2 PANEL)

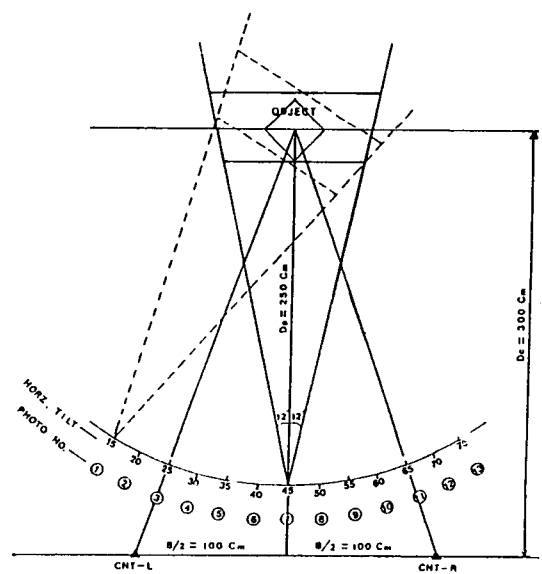


그림 2. 촬영점배치와 기준점측량위치(3 PANEL)

촬영거리는 마찬가지로  $2.5$  m로 하고, 대상물은  $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$  크기의 세 평면이 직교하는 형태로 제작하였다. 대상물의 표정점은 그림 4와 같이 균등하게 분포시켰으며, 기준점측량은 역시 단일평면과 두 평면의 경우와 동일하게 하였다.

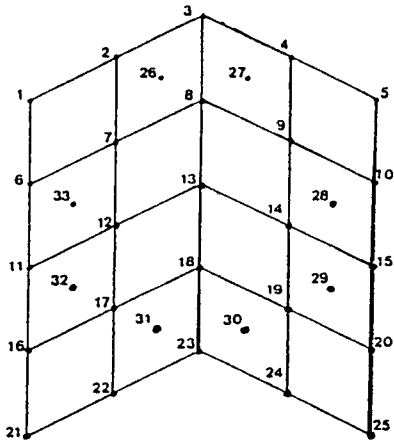


그림 3. 대상물형태와 표정점배치(2 PANEL)

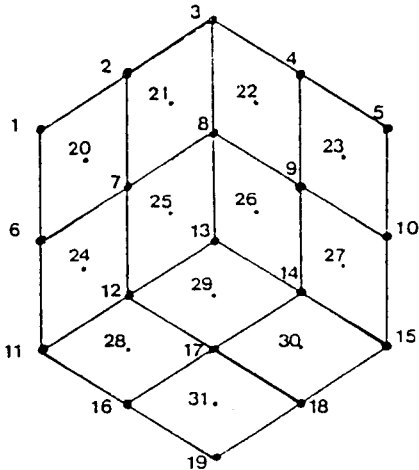


그림 4. 대상물형태와 표정점배치(3 PANEL)

절대좌표의 세 축은 각각 세 평면의 방향으로 하였으며, 촬영점은 XY 평면을 기준으로 하여 15°부터 75°까지 5° 간격으로 배치하였다.

### 3.2 관측실험결과와 분석

#### 3.2.1 단일평면(1 PANEL)

그림 5는 촬영방향각( $\tau$ )과 수렴각( $\theta$ )의 증가에 따른 위치오차( $S_p$ )의 값을 나타내는 그림이다. 각 수렴각에 대한 공간위치 표준오차( $S_p$ )의 최소값과 최대값을 비교하면  $\theta=10^\circ\sim30^\circ$ 까지 크게 감소하는 경향을 보이다가, 그 이후 완만하게 변화하여  $\theta=50^\circ\sim60^\circ$ 부터는 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다. 또한 정면으로부터  $\tau=30^\circ$  부근까지는 수렴각이 증가할

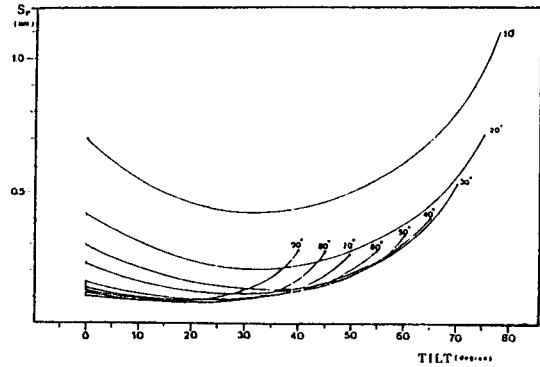


그림 5. 촬영방향과 수렴각변화에 따른 공간위치의 표준오차(1 PANEL)

수록  $S_p$  값이 감소하나, 그 이상 측면으로 갈수록 오히려 수렴각이 증가하면  $S_p$  값이 증가하여 정확도가 감소할수도 있음을 보여준다.<sup>7,13)</sup>

#### 3.2.2 두 평면(2 PANEL)

그림 6(a)는 촬영방향각의 변화에 따른 각 수렴각에서의 X 좌표의 표준오차( $S_x$ )를 나타낸 그림으로, 촬영방향각이 증가함에 따라 모든 수렴각에서 정확도가 저하되었으며, 수렴각  $\theta=10^\circ$ 인 경우 촬영방향각  $\tau=10^\circ$ 에서 0.262 mm이고, 점점 증가하여  $\tau=80^\circ$ 에서 최대값 0.864 mm를 나타내었다. 촬영방향각  $\tau=45^\circ$ 이고 수렴각이  $\theta=80^\circ$ 일 때  $S_p=0.123$  mm(상대오차 1/20,300)로 정확도가 가장 좋았으며, 대체적으로  $\theta=10^\circ$ 에서  $30^\circ$ 까지는 촬영방향각이 증가함에 따라 오차가 크게 되어 정확도가 급격히 저하되나,  $\theta=40^\circ\sim80^\circ$ 까지는 정확도가 1/10,000~1/20,000 내외로 증가하는 양상이 거의 비슷하게 된다.

따라서 X 좌표의 경우, 촬영방향각  $\tau$ 를 작게, 수렴각  $\theta$ 를 크게 할수록 정확도를 향상시키는 조건이 됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 확인하기 위하여 수렴각을 변화시켜 촬영방향각의 X축 오차를 나타낸 경우의 경향을 분석한 결과, 촬영방향 변화분석에서 최대정확도를 나타내는  $\tau=30^\circ\sim65^\circ$ 까지의 변화에 있어서 수렴각 증가에 따라 모든 경우에서 정확도가 향상됨을 나타내었으므로, 두 평면에서 X축의 표준오차는  $\tau=30^\circ\sim60^\circ$  부근에서 수렴각을 크게 하여 촬영하는 것이 최적임을 확인할 수 있었다.

그림 6(b)는 촬영방향각 변화에 대한 각 수렴각에서의 Y 좌표의 표준오차( $S_y$ )를 나타낸 그림으로,  $S_y$ 는 대체로 0.1 mm(1/25,000) 내외의 거의 일정한 값을

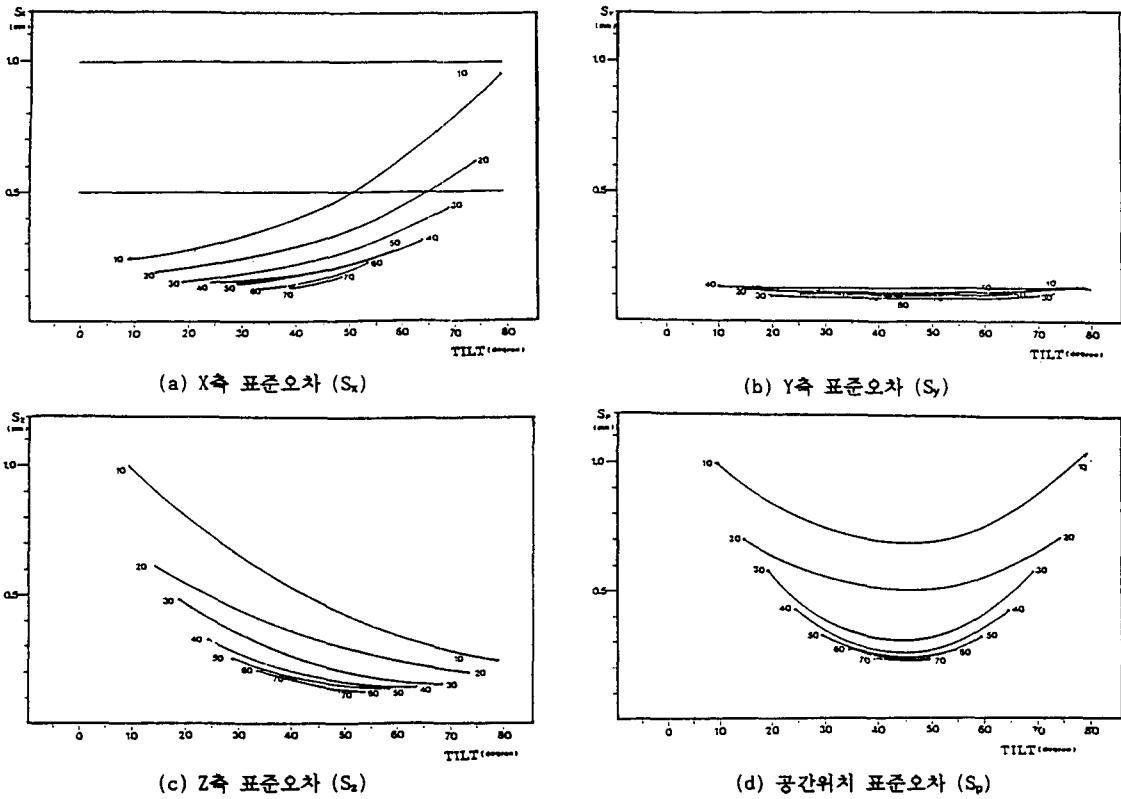


그림 6. 촬영방향과 수렴각변화에 대한 오차분포(2 PANEL)

나타내어 Y축의 정확도는 촬영방향이나 수렴각의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

그림 6(c)는 촬영방향각의 변화에 따른 각 수렴각에서의 Z축 표준오차( $S_z$ )를 나타낸 그림으로 대체적으로 X 좌표 오차와 대칭적인 분포를 보임을 알 수 있다. 또한 전 수렴각에서 촬영방향각이 증가함에 따라 오차가 감소되어 정확도가 향상되는 경향을 보였으며,  $\theta=10^\circ$ 인 경우  $\tau=10^\circ$ 에서 1.152 mm로 최대,  $\tau=80^\circ$ 에서 0.183 mm로 최소값을 나타내었다.  $\theta=10^\circ\sim 30^\circ$ 인 경우에는 촬영방향각이 증가함에 따라 오차가 급격히 감소하다가,  $\theta=40^\circ\sim 80^\circ$ 에서는 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 수렴각이 증가함에 따라 최대방향각에서 정확도가 향상됨을 알 수 있다.

그림 6(d)는 촬영방향각의 변화에 따른 각 수렴각에서의 위치오차를 나타낸 그림으로, 모든 수렴각에서  $\tau=45^\circ$  부근을 중심으로 대칭형태로 오차가 감소하다가 다시 증가함을 알 수 있다.  $\theta=10^\circ\sim 20^\circ$ 에서는 정확도향상이 완만하나,  $\theta=30^\circ$  이상에서는 정확도

향상이 뚜렷하며,  $\theta=40^\circ$  이상에서는 거의 유사한 정확도 향상을 보임을 알 수 있다. 또한  $\tau=45^\circ$  부근인 경우  $\theta=10^\circ\sim 30^\circ$ 까지는 최대 정확도가 1/4,000~1/6,000 정도임에 비하여  $\theta=40^\circ$  이상에서는 1/10,000 이상으로 크게 향상되었으며,  $\tau=45^\circ$ ,  $\theta=80^\circ$ 인 경우에  $S_p=0.197$  mm, 상대정확도 1/12,700로 최대의 정확도를 나타내었다. 따라서 공간위치좌표의 최대 정확도를 얻기 위해서는 대상물 중심점면방향을 기준으로 하여 좌우 사진의 수렴각을 크게 할 수록 좋으나, 수렴각  $\theta=40^\circ$  이상이면 1/10,000 내외의 양호한 정확도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 대상물이 두 평면인 경우 Y 좌표오차는 촬영방향이나 수렴각의 변화에 큰 영향없이 일정하게 비하여, X 좌표는 촬영방향각을 작게, 수렴각을 크게 할수록, Z 좌표는 수렴각과 촬영방향각을 크게 할수록 정확도가 향상되며, X 좌표오차와 Z 좌표오차는 서로 대칭적 분포를 보임을 알 수 있다.

또한, X 좌표와 Z 좌표는 수렴각  $40^\circ$  이상이면

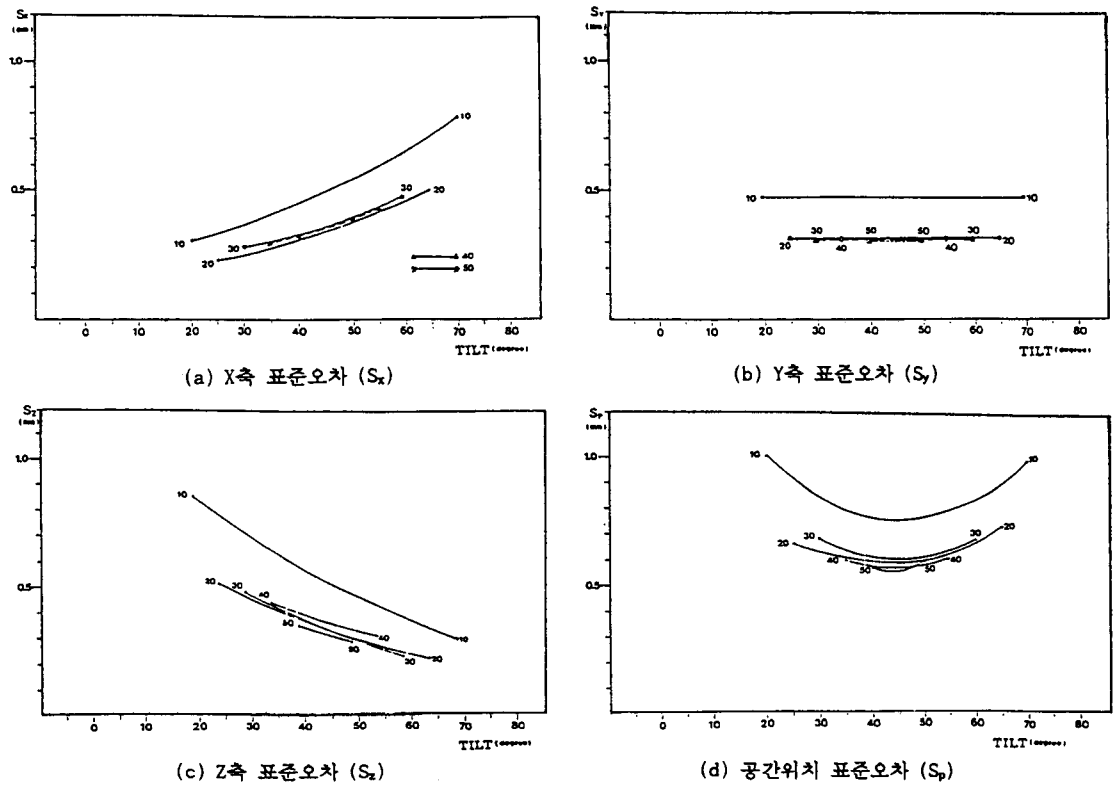


그림 7. 촬영방향과 수렴각변화에 대한 오차분포(3 PANEL)

비교적 양호한 정확도를 얻을 수 있으며, 공간위치 좌표의 경우 대상물 중앙방향을 기준으로 하여 수렴각을 크게 할 수록 좋으나, 수렴각을 40° 이상으로 하면 양호한 정확도를 얻을 수 있다.

3.2.3 세 평면(3 PANEL)

그림 7(a)는 세 평면인 경우의 수렴각과 촬영방향의 변화에 대한 X 좌표의 표준오차를 분석한 것이다. 수렴각  $\theta=10^\circ$ 인 경우 촬영방향각  $\tau=20^\circ$ 에서  $S_x=0.325\text{ mm}(1/2,800)$ 이고, 촬영방향각이 커짐에 따라 점점 증가하여  $\tau=70^\circ$ 에서 최대값  $0.878\text{ mm}(1/7,700)$ 를 나타내었다. 또한 수렴각이 20°, 30°, 40°, 50°인 경우에도 촬영방향각이 증가할 수록  $S_x$ 가 증가하는 비슷한 경향을 보이고 있다. 그림에서 X 방향 표준오차가 가장 작은 수렴각은 20°로 나타나고 있으나, 전체적인 변화양상을 분석해 볼 때, 수렴각이 10°인 경우 오차가 크게 나타나고,  $\theta=20^\circ\sim 50^\circ$ 의 수렴각에서는 최소  $0.213\text{ mm}(1/11,700)$ , 최대  $0.453\text{ mm}(1/5,500)$  범위의 비슷한 경향을 나타내었다. 따라서 X 방향 표준오차의 변화경향을 보면, 방향각이 커질

수록 오차가 증가되며, 수렴각은 20°~50° 범위일 때 1/5,000에서 1/10,000 사이의 정확도를 보임을 알 수 있다.

그림 7(b)에서 Y 좌표의 표준오차는 촬영방향각에 거의 무관한 경향을 보이고 있으며, 수렴각에 대해서는  $\theta=10^\circ$ 일 때  $0.45\text{ mm}(1/5,600)$  내외로 상대적으로 큰 오차를 보이며,  $\theta=20^\circ\sim 50^\circ$ 에서는  $0.3\text{ mm}(1/8,300)$  내외의 작은 오차를 나타내고 있다.

그림 7(c)에서 Z 좌표 오차를 분석해 보면, 전반적으로 X 방향 오차와 반대로 촬영방향각이 증가함에 따라 오차가 감소하는 특징을 보이고 있다. 또한 수렴각 변화에 대해서는 X축 오차와 마찬가지로  $\theta=10^\circ$ 인 경우 최소  $0.274\text{ mm}(1/9,100)$ , 최대  $0.916\text{ mm}(1/2,700)$ 으로 가장 큰 오차를 나타내고,  $\theta=20^\circ\sim 50^\circ$ 에서는  $0.2\text{ mm}(1/12,500)$ 에서  $0.5\text{ mm}(1/5,000)$  내외의 거의 비슷한 정확도를 나타냄을 알 수 있다.

그림 7(d)는 3차원 공간위치 표준오차의 변화경향을 알아보기 위하여 X, Y, Z 좌표오차를 동시에 고려한  $S_p$ 를 분석한 것이다. 촬영방향각 변화에 대해서는 전

표 1. 촬영방향과 수렴각변화에 대한  
표준오차(2 PANEL)

수렴각 $\theta(^{\circ})$	촬영 방향 $\tau(^{\circ})$	표 준 오 차 (mm)			
		S <sub>X</sub>	S <sub>Y</sub>	S <sub>Z</sub>	S <sub>P</sub>
10	10	.2616	.1510	1.1519	1.1908
	15	.2334	.1330	.8006	.8476
	20	.2833	.1244	.7483	.8133
	25	.3510	.1450	.8010	.8864
	30	.4510	.1310	.6530	.8043
	35	.4530	.1110	.6510	.8008
	40	.3530	.1410	.5010	.6288
	45	.4812	.1084	.4864	.6962
	50	.5110	.1110	.4610	.6971
	55	.7010	.1450	.5110	.8795
	60	.5538	.0625	.4001	.6861
	65	.7389	.1973	.3451	.8390
	70	.7152	.0954	.2234	.7553
	75	.7391	.1190	.2127	.7818
80	.8638	.1381	.1833	.8968	
20	15	.1815	.1208	.6111	.6488
	20	.1910	.1201	.5201	.5669
	25	.2852	.1406	.5676	.6524
	30	.3210	.1314	.5362	.6405
	35	.3192	.1190	.4433	.5616
	40	.2110	.1201	.3201	.4017
	45	.4493	.1393	.4419	.6476
	50	.3815	.1141	.3225	.5150
	55	.4297	.1259	.3214	.5539
	60	.4831	.1208	.2896	.5778
	65	.4450	.0818	.1735	.4846
	70	.5678	.1416	.2445	.6360
	75	.7010	.0831	.1266	.7172
	30	20	.1810	.1163	.5972
25		.2167	.1278	.4015	.4747
30		.1881	.0978	.2849	.3561
35		.2151	.0998	.2894	.3750
40		.1739	.0781	.2041	.2810
45		.2501	.1001	.2510	.3682
50		.2603	.1357	.2110	.3615
55		.3023	.1054	.2253	.3922
60		.3451	.1222	.2237	.4303
65		.3811	.1219	.1995	.4479
70	.4810	.0774	.1189	.5015	

표 1. 계속

수렴각 $\theta(^{\circ})$	촬영 방향 $\tau(^{\circ})$	표 준 오 차 (mm)			
		S <sub>X</sub>	S <sub>Y</sub>	S <sub>Z</sub>	S <sub>P</sub>
40	25	.1610	.1301	.3916	.4837
	30	.1789	.1100	.2636	.3374
	35	.1608	.0927	.2130	.2829
	40	.1967	.1004	.2160	.3093
	45	.1592	.0791	.1613	.2404
	50	.2111	.1113	.1903	.3053
	55	.2701	.1392	.1958	.3615
	60	.2762	.1138	.1860	.3523
65	.2906	.1170	.1721	.3579	
50	30	.1684	.1146	.2333	.3099
	35	.1803	.1147	.2220	.3083
	40	.1557	.0942	.1758	.2531
	45	.1755	.0990	.1770	.2683
	50	.1714	.0928	.1537	.2483
	55	.2450	.1103	.1405	.3032
	60	.3178	.1051	.1513	.3673
60	35	.1638	.1132	.1592	.2789
	40	.1306	.0864	.1430	.2121
	45	.1683	.1026	.1610	.2545
	50	.1803	.0951	.1403	.2475
	55	.2301	.1053	.1485	.2914
70	40	.1308	.1233	.1855	.2605
	45	.1512	.1028	.1517	.2377
	50	.1713	.0994	.1347	.2375
80	45	.1229	.0881	.1265	.1974

반적으로 좌측면  $\tau=20^{\circ}$ 에서 큰 오차를 보이고 차츰 감소하여 중앙방향  $\tau=40^{\circ}\sim 50^{\circ}$  부근에서 최소값을 나타내며, 다시 증가하여 우측면 방향으로 갈 수록 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다.

또한 수렴각  $\theta=10^{\circ}$ 인 경우 최소 0.796 mm(1/3,100), 최대 1.119 mm(1/2,200)으로 가장 큰 오차를 나타내고 있으며,  $\theta=20^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 에서 다소 차이는 있으나 0.6 mm(1/4,200) 내외의 거의 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 대상물이 세 평면인 경우, 두 평면과 마찬가지로 Y 좌표 오차는 거의 일정한 분포를 보이고, X 좌표 오차와 Z 좌표 오차는 대칭적 분포를 보인다. 또한, 촬영방향은 대상물 중앙방향을 중심으로 하고,



표 2. 촬영방향과 수렴각변화에 대한 표준오차(3 PANEL)

수렴각 $\theta(^{\circ})$	촬영 방향 $\tau(^{\circ})$	표 준 오 차 (mm)			
		$S_x$	$S_y$	$S_z$	$S_p$
10	20	.3248	.5207	.9176	1.1166
	25	.2979	.4025	.6175	.7997
	30	.3651	.4145	.6543	.8618
	35	.4935	.4949	.7014	.9967
	40	.7291	.6181	.8399	1.2809
	45	.5617	.4589	.5750	.9312
	50	.6130	.4651	.5289	.9401
	55	.5755	.3823	.3877	.7976
	60	.8810	.5569	.4996	1.1621
	65	.6404	.3889	.2744	.8028
20	70	.8780	.5124	.3243	1.0735
	25	.1426	.3165	.3368	.4861
	30	.2845	.3254	.4630	.6370
	35	.3056	.3007	.4159	.6009
	40	.4140	.3679	.4847	.7401
	45	.5762	.4590	.5722	.9386
	50	.4125	.3147	.3460	.6273
	55	.4334	.3127	.2969	.6144
30	60	.4622	.3061	.2585	.6153
	65	.3724	.2380	.1736	.4772
	30	.3158	.3357	.4978	.6813
	35	.3072	.3117	.4137	.6052
	40	.3263	.2920	.3676	.5744
	45	.3751	.3095	.3665	.6118
	50	.4535	.3468	.3720	.6845
40	55	.4218	.3101	.2983	.6054
	60	.3845	.2751	.2398	.5322
	35	.3357	.3282	.4360	.6428
	40	.3192	.3010	.3575	.5680
	45	.3112	.2654	.2979	.5075
50	50	.4256	.3412	.3590	.6551
	55	.4586	.3464	.3413	.6707
	40	.3095	.2857	.3427	.5442
50	45	.3740	.3359	.3650	.5227
	50	.3223	.2677	.2805	.5352

수렴각을 20° 이상으로 하면 공간위치의 정확도를 높게 할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 대상물형태와 촬영방향에 대한 분석

대상물 관측점 각각에 대한 절대오차를 최소로 하기 위해서는 많은 수의 대상점에 대한 해석, 기준점분포, 다중사진해석, 수직방향 촬영각의 고려, 대상물 형태 요소의 세분화에 의한 조합 등에 대하여 보다 상세한 연구가 시행되어야 하나, 이에 대해서는 대부분 기존의 많은 연구결과를 참조할 수 있고, 본 연구의 결과를 바탕으로 하는 추후 계속 연구과제로 할 수 있으므로, 본 연구에서는 우선 대상물의 형태와 촬영방향, 수렴각의 변화에 따른 오차분포의 특성을 해석하기 위하여 촬영거리에 대한 상대정확도의 분포선을 비교분석하였다.

그림 5, 6, 7을 비교해 보면 단일평면(1P)과 두 평면(2P)의 경우에는 수렴각  $\theta=10^{\circ}$ 로부터 수렴각이 증가함에 따라 점차 오차가 감소하는데 비하여, 세 평면(3P)의 경우에는  $\theta=10^{\circ}$ 일 때 큰 오차를 보이나,  $\theta=20^{\circ}$  이상에서는 거의 일치하는 경향을 보인다. 또한 전반적으로 볼 때,  $\theta=10^{\circ}$ 일 때 큰 오차를 보이고,  $\theta=30^{\circ}\sim 40^{\circ}$  이상이 되면 거의 일치하는 양상을 보임을 알 수 있다.

그림 8은 최소수렴각  $\theta=10^{\circ}$ 일 때 대상물형태와 촬영방향의 변화에 대한 각 좌표별 표준오차의 분포를 비교한 그림이다. X 좌표오차( $S_x$ )의 경우, 촬영방향각  $\tau$ 가 커짐에 따라 전반적으로 오차가 크게 증가함을 알 수 있다. 1P인 경우 최소 0.627 mm(1/40,000)에서 최대 1.277 mm(1/2,000)까지 오차가 급격하게 커지는데 비하여, 2P와 3P의 경우에는 1/10,000~1/2,500 범위내에서 상대적으로 완만하게 변화함을 알 수 있다.

Y 좌표오차( $S_y$ )의 경우에는 대체적으로 촬영방향각  $\tau$ 와 무관하게 일정한 오차분포를 보임을 알 수 있다. 즉, 2P의 경우 0.12 mm(1/20,800) 내외, 3P의 경우 0.45 mm(1/5,600) 내외의 일정한 값을 나타낸다. 다만, 1P의 경우에는 최소  $\tau=60^{\circ}$  부근까지 0.065 mm(1/38,000) 내외로 일정하다가, 그 이상 외측부분에서는 0.19 mm(1/13,200)까지 약간 증가하는 형태를 보인다.

Z 좌표오차( $S_z$ )의 경우에는 X 좌표와는 반대로  $\tau$ 가 증가함에 따라 전반적으로 오차가 크게 감소함을 알 수 있다. 1P의 경우 대략 0.7 mm(1/3,600)에서 0.2 mm(1/12,500)까지 비교적 완만히 감소하는데 비하여 2P와 3P의 경우에는 거의 일치하면서 대략 1.0 mm(1/2,500)~0.25 mm(1/10,000) 사이에서 보다 빠르게 변

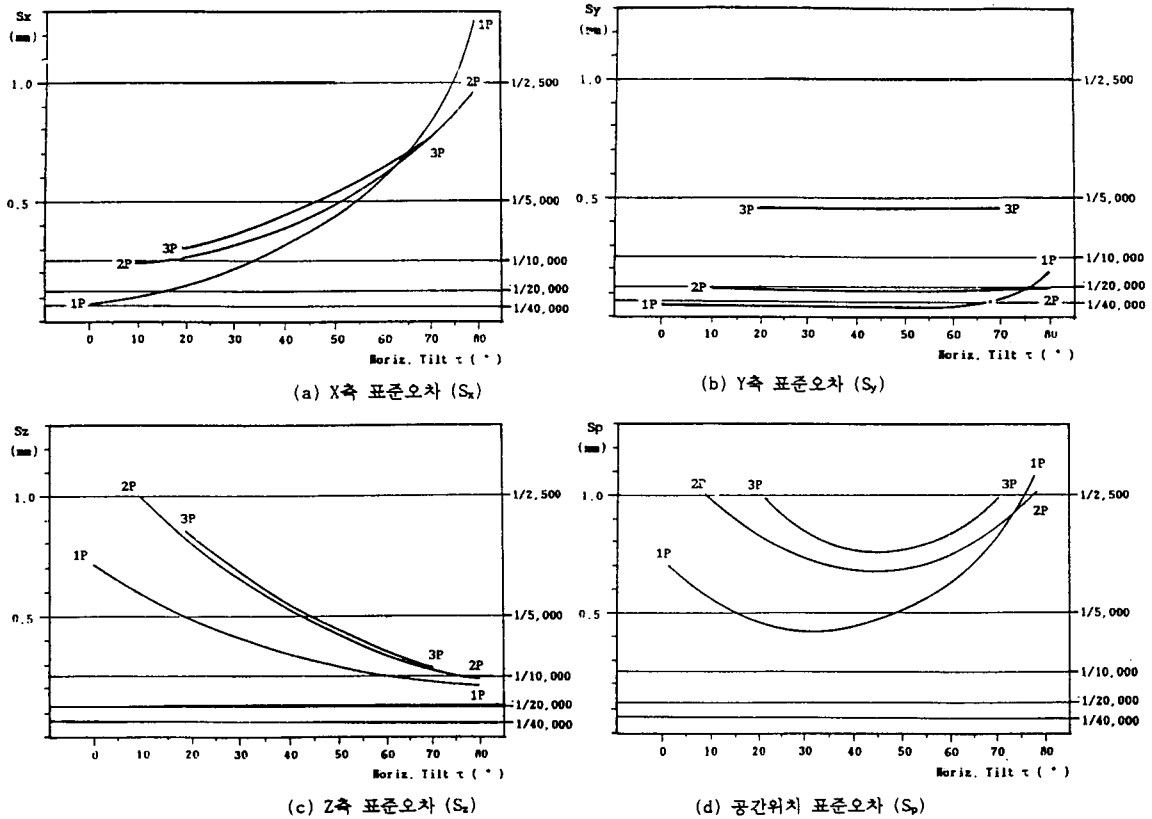


그림 8. 대상물형태와 촬영방향변화에 대한 오차분포( $\theta=10^\circ$ )

화합을 알 수 있다.

공간위치좌표의 오차( $S_p$ )를 보면 전반적으로  $\tau$ 가 증가함에 따라서 오차가 감소하다가 다시 증가하는 분포를 보인다. 2P와 3P의 경우에는 대상물의 중앙( $\tau=45^\circ$ ) 부근에서 각각 0.7 mm(1/3,600) 및 0.8 mm(1/3,100) 내외의 최소오차를 보이며, 1P의 경우에는  $\tau=30^\circ$  부근에서 0.45 mm(1/5,600) 정도의 최소오차를 나타냄을 알 수 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이,  $\theta=10^\circ$ 인 경우에 대상물 형태별 오차분포특성을 보면, Y 좌표오차는 촬영방향과 거의 무관한 반면에, X 좌표오차와 Z 좌표오차는 거의 대칭적 분포를 보이며 각기 정면방향 측, 우측면(XY 평면)에 대해서는  $\tau=0^\circ$ , 좌측면(ZY 평면)에 대해서는  $\tau=90^\circ$  방향에 가까울 수록 좋은 정확도를 나타내는 것을 알 수 있다.

이것은 본 연구에서  $\theta=10^\circ$ 가 최소 수렴각으로서, 직교수직사진의 경우와 가장 유사한 경우로서, 정면방향의 평면좌표의 정확도가 매우 좋고, 측면부분의

좌표오차의 영향을 가장 적게 받는 경우일 것으로 생각할 수 있다.

그림 9는 수렴각  $\theta=30^\circ$  이상일 때 대상물형태와 촬영방향의 변화에 대한 각 좌표별 표준오차의 분포를 비교한 그림이다. X 좌표오차( $S_x$ )의 경우,  $\theta=10^\circ$ 에서와 마찬가지로 촬영방향각  $\tau$ 가 커짐에 따라 전반적으로 오차가 증가하나, 그 변화폭은 크지 않으며, 대상물 형태별로도 정확도 차이가 있음을 알 수 있다.

1P의 경우  $\tau=30^\circ$  부근까지 0.06 mm(1/41,700) 내외로 일정하다가, 그 이상 외측으로 가면 수렴각에 따라서 약간씩 오차가 커지는 경향을 보이며, 2P의 경우에는 최소 0.16 mm(1/15,600)부터 최대 0.29 mm(1/8,600)까지, 3P의 경우에는 0.31 mm(1/8,100)부터 0.45 mm(1/5,600)까지 완만히 증가하는 양상을 보인다. 각 대상물 형태에 대한 최소값을 비교해 보면, 1P의 경우 0.06 mm(1/41,700) 내외, 2P의 경우 0.16 mm(1/15,600) 내외, 3P의 경우에는 0.31 mm(1/8,100) 내외의 값을 나타내어 대략 5.1:1.9:1의 비율을 보인다.

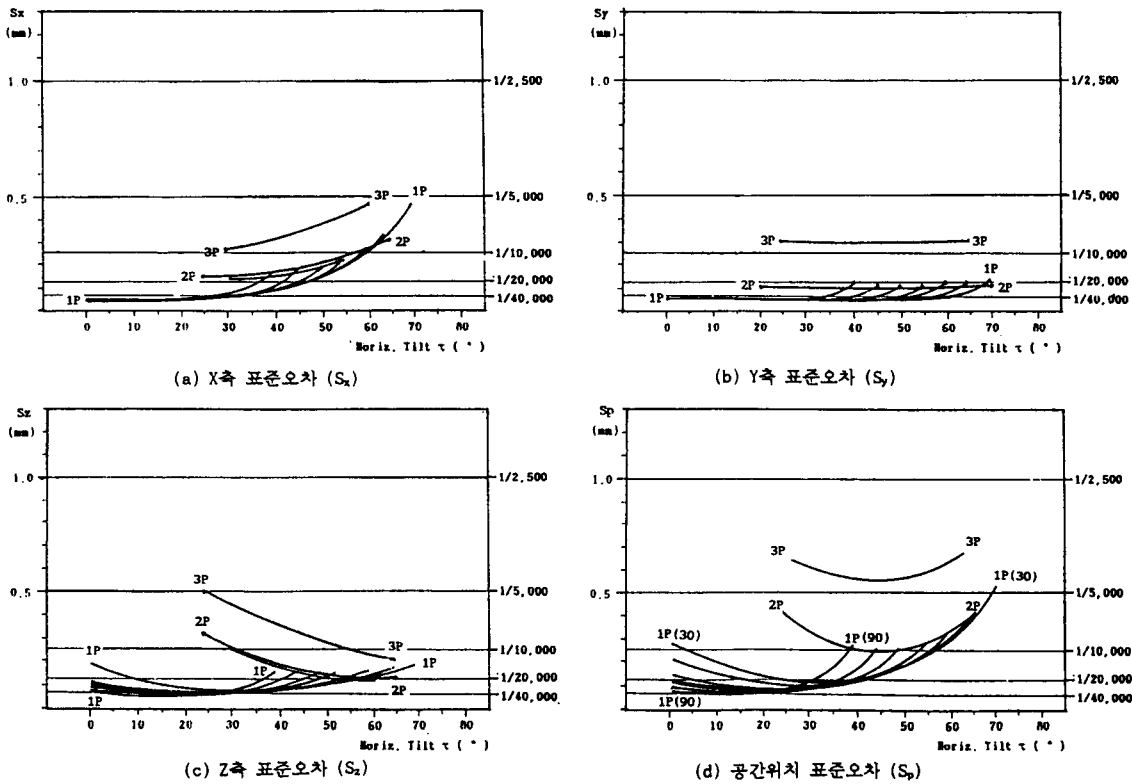


그림 9. 대상물형태와 촬영방향변화에 대한 오차분포( $\theta=30^\circ$  이상)

Y 좌표오차( $S_y$ )의 분포는 대체적으로 촬영방향과 무관하게 일정한 경향을 보인다. 즉, 2P의 경우에는 약 0.1 mm(1/25,000) 내외, 3P의 경우는 약 0.3 mm(1/8,300) 내외의 일정한 값을 나타낸다. 다만, 역시 1P의 경우에는  $\tau=30^\circ$ 까지 0.06 mm(1/41,700) 내외로 일정한 값을 보이다가 각 수렴각에 대해서 끝부분이 0.12 mm(1/20,800) 내외로 약간씩 증가하는 경향을 보인다. 각 대상물 형태에 대한 최소값을 비교해 보면, 1P의 경우  $\tau=0^\circ\sim 30^\circ$ 에서 0.055 mm(1/45,000) 내외, 2P의 경우 0.1 mm(1/25,000) 내외, 3P의 경우에는 0.3 mm(1/8,300) 내외의 값을 나타내어 대략 5.4:3.0:1의 비율을 보인다.

Z 좌표오차( $S_z$ )의 분포를 보면, 대체적으로  $\tau$ 가 증가함에 따라 오차가 감소하는 경향을 보이지만, 1P의 경우에는 수렴각이 커질수록 오히려 오차가 증가하는 역전현상을 나타내는 특징을 보인다. 즉,  $\theta=30^\circ$ 보다 작을 때는 2P, 3P와 같은 경향을 보이나,  $\theta=40^\circ$ 에서 대칭적인 모양을 보이고, 수렴각이 이보다 커지면

오히려 오차가 증가하게 된다.

이것은 1P의 경우 Z 좌표가 단일평면(XY 평면)에 수직인 방향, 즉 XY 평면에 대한 표고방향인데 비하여, 2P, 3P의 경우에는 대상물이 두 평면 또는 세 평면으로 조합되어 Z 좌표가 표고방향이 아니라 다른 평면방향이 되므로, 이로 인한 대상물 형태의 조합 효과를 반영하는 것으로 볼 수 있다.

한편, 각 대상물 형태에 대한 Z 좌표의 최소값을 비교해 보면, 1P의 경우에는  $\theta=90^\circ$ ,  $\tau=5^\circ$ 에서 0.06 mm(1/41,700) 내외, 2P의 경우에는  $\tau=60^\circ$  부근에서 0.13 mm(1/19,200) 내외, 3P의 경우에는 0.25 mm(1/10,000) 내외의 값을 나타내어 대략 4.2:1.9:1의 비율을 보인다.

공간위치좌표의 오차( $S_p$ )의 분포를 보면, 2P와 3P가 대상물 중앙( $\tau=45^\circ$ ) 부근에 대하여 대칭적 모양을 보이는데 비하여, 역시 1P는 대략  $\tau=30^\circ$ 로부터 수렴각이 커질수록 점차 정면쪽( $\tau=0^\circ$ )으로 이동하면서 최소값을 보이는 형태이며, 촬영방향각이 커질수록

오차가 커지는 역전현상을 나타낸다. 각 대상물 형태에 대한 최소값을 비교해 보면, 1P의 경우에는  $\theta=90^\circ$ ,  $\tau=5^\circ$ 에서 0.06 mm(1/41,700) 내외,  $\theta=30^\circ$ ,  $\tau=25^\circ$ 에서 0.17 mm(1/14,700) 내외이며, 2P의 경우에는  $\tau=45^\circ$  부근에서 0.25 mm(1/10,000) 내외, 3P의 경우에는 역시  $\tau=45^\circ$  부근에서 0.55 mm(1/4,500) 내외의 값을 나타내어 대략 9.3:2.2:1의 비율을 보인다.

따라서, 문화재와 시설물의 정밀관측을 위해서는 가능한 단일 평면으로 해석하는 것이 바람직하지만, 단일 평면에 비하여 두 평면은 1/4 정도, 세 평면은 1/9 정도의 정확도를 가지므로, 촬영조건이 불가피한 경우나, 답사관측 등에는 두 평면 또는 세 평면을 동시촬영 및 해석하는 방법도 충분히 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 각 대상물에 대하여 촬영방향과 수렴각을 변화시킨 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Y 좌표오차는 촬영방향과 무관하게 거의 일정한 분포를 보이나, 단일 평면의 경우 외측부분에서 오차가 약간 증가하는 특성을 나타낸다. 또한 단일 평면과 두 평면에 비하여 세 평면의 경우 큰 오차를 나타낸다.

2. X 좌표오차와 Z 좌표오차는 거의 대칭적 분포를 보인다. 다만, 단일 평면의 Z 좌표는 대체적으로 수렴각이 커질수록 정확도가 향상되나, 촬영방향에 대한 오차분포경향이 반대로 되는 역전현상을 나타낸다. 또한 수렴각  $10^\circ$ 일 때 두 평면과 세 평면은 거의 일치하는 경향을 보이나, 수렴각이 커질수록 정확도의 차이가 커진다.

3. 단일 평면과 두 평면의 경우에는 수렴각  $10^\circ$ 로부터 점차 커질수록 오차가 감소하는데 비하여, 세 평면의 경우에는 수렴각  $10^\circ$ 일 때 큰 오차를 보이나,  $20^\circ$  이상에서는 거의 일치하는 경향을 보인다. 또한 전반적으로 볼 때, 수렴각  $10^\circ$ 일 때 큰 오차를 보이고,  $30^\circ\sim 40^\circ$  이상이 되면 거의 일치하는 양상을 보인다.

4. 공간위치좌표의 경우, 단일 평면에서 촬영방향각을  $30^\circ$  이하로 작게 할수록, 수렴각을 크게 할수록 정확도가 향상되는데 비하여, 두 평면과 세 평면에서는 대상물 중앙방향에 대하여 수렴각을  $30^\circ\sim 40^\circ$

이상으로 하면 양호한 정확도를 얻을 수 있다.

5. 최소정확도값을 비교하면, 단일 평면에서 1/40,000 이상, 두 평면에서 1/10,000~1/25,000, 세 평면에서 1/4,500~1/10,000 정도의 값을 나타내며, 세 평면을 기준으로 했을 때 X 좌표, Y 좌표, Z 좌표는 두 평면이 2~3배, 단일 평면이 4~5배 높은 정확도를 보이고, 공간위치좌표는 두 평면이 2배, 단일 평면이 9배의 정확도 향상을 보인다.

## 감사의 글

이 논문은 1992년 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구된 것으로, 지원해 주신 한국학술진흥재단과 심사위원께 감사드립니다.

## 參考文獻

1. 유복모, 최철순, 오이균, "사진측량에 의한 우리나라 주요 석탑의 시대별 조형비분석", 한국측지학회지, 제10권 제2호, pp. 73-81, 1992.
2. 충청북도, 중요석조문화재 실측조사보고서. 충청북도청, 1990.
3. 유복모, 김충평, "사진측량에 의한 불국사의 조형비에 관한 연구", 한국정원학회지, 제6권 제1호, 1988.
4. 강원도, 중요석조문화재 실측조사보고서. 강원도청, 1990.
5. Fraser, C.S., "Limiting Error Propagation in Network Design", PE & RS, Vol. 53, No. 5, pp. 487-493, 1987.
6. Marzan, G.T., "Rational Design for Close-Range Photogrammetry", Ph.D. Dissertation, Univ. of Illinois, Urbana, 1976.
7. 유복모, 손덕재, "근거리 사진측량의 촬영방향과 수렴각변화에 따른 삼차원 좌표결정의 정확도 분석", 대한토목학회논문집, 제9권 제4호, pp. 125-133, 1989.
8. Faig, W., H. Moniwa, "Convergent Photos for Close-range", PE, Vol. 39, No. 6, pp. 605-610, 1973.
9. Abdel-Aziz, Y.I., "Expected Accuracy of Convergent Photos", PE, Vol. 40, No. 11, pp. 1341-1346, 1974.
10. Malhotra, R., H. Karara, "High Precision of Stereometric System", Photogrammetric Series No. 28, Civil Engineering Studies, Univ. of Illinois, 1971.
11. Kenefick, J., "Ultra-Precise Analytics", PE, Vol. 37,

- No. 11, pp. 625-634, 1971.
12. Hottier, P., "Accuracy of Close-Range Analytical Restitutions: Practical Experiments and Prediction", PE & RS, Vol. 42, No. 3, pp. 345-375, 1976.
13. 손덕재, 지상사진의 촬영방향과 수렴각변화에 따른 공간좌표해석, 연세대학교 대학원 박사학위논문, 1989.