

## 구조물의 촬영 방법별 최적화에 관한 연구 A Study on the Optimization of Close-range Photogrammetry for Structures

김감래\* · 김명배\*\*

Kim, Kam-Lae · Kim, Myung-Bae

### 要 旨

각종 구조물의 노후화에 따른 안전 진단 방법의 일환으로 각종 측정이 이루어지고 있으나 이들 구조물의 변형량 측정방법에 있어서 정확도와 신뢰성 및 가시성의 문제가 노출되고 있어 이의 해결 방법의 마련이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이에 부합되는 시스템의 마련을 위하여 근거리 사진 측량 방법을 적용해 봄으로서 구조물의 변형 측정 정확도와 신뢰성 및 가시성을 확보할 수 있는 시스템을 마련하고자 한다. 그의 일환으로 수평 직각 촬영 방법과 경사 촬영 방법으로 구조물의 형태의 대표적 모형인 평면, 곡면 모델을 제작하여 적용해 석함으로써 촬영 방법에 따른 정확도 향상 및 가시성등을 높이는 최적의 시스템을 구축하였고, 그에 따른 실제 구조물의 변형량측정에 이용될 수 있도록 하였다.

### ABSTRACT

We have various methods of measurement for a safety diagnosis of outworn structure, but these methods to find a variation of structure are not convincible with its exactness and confidence. We have to lay out a scheme for a solution of these problems and improve a visibility of result. In this study, we studied a optimized solution for close-range photogrammetry to offer the more reliable method compare to conventional method and to improve its confidens and visibility of output. For obtaining these effects, we manufactured the plane models and curved surface ones each divided into two types, normal case and oblique case. In this way, we got a optimum solution to increase a confidence level and visibility of photogrammetry. And actually, this study will be a good way to measure a variation of structures.

### 1. 서 론

1960년대 이후 경제개발 5개년 계획이 시작된 이후 건설되어 왔던 구조물들이 30여년이 지난 오늘날에 이르러 노후화 되어 안전성 확보 차원에서의 조치가 이루어져야 할 필요가 있다. 이때 시설물의 올바른 안전성 확보가 이루어지기 위해서는 시설물의 조사시공으로부터 보호 관리에 이르기까지 각종 측정이 실시되어야 하며, 이를 통해 당초 설계의 당위성을 검증하고 데이터를 축적함으로써 오랜 시간이 경과함에 따른 이상 현상이나 붕괴 위험에 대해 사전에 예측할 수 있어야

한다.

최근에는 각분야에서 각종 구조물에 대한 안전성 여부의 진단이 이루어지고 있다. 구조물의 안전 진단 방법에는 구조 해석적인 방법, 정적·동적재하시험을 통한 구조물의 변위량 측정 및 콘크리트의 내구성 조사 등 여러 방법이 있으며, 이중 구조물의 변위량 측정 목적은 구조물의 내구성, 응력, 하중 내력 상태를 체크하는데 절대적인 기본 값으로 적용되므로 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 여러 방법 즉, 게이지를 이용하여 측정하는 방법, 3차원 측정기를 이용하여 측정하는 방법 등이 이용되고 있으나 이들 방법에 의한 측정에 있어서 게이지 부착에 따른 인적 위험 요인 발생 및 데이터획득에서의 정확도, 신뢰도 등의 문제, 3차원

\*명지대학교 토목공학과 교수

\*\*명지대학교 토목공학과 박사 과정 수료

측정에 있어서 현장 제어로 시간 과다 소비에 따른 경제적 손실 등 많은 문제점들이 제기되고 있기 때문에 이러한 문제의 해결 방법이 먼저 모색되어야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 근거리 사진 측량 방법을 이용하여 구조물의 변형량을 측정할 수 있는 시스템 마련을 위한 기초로 촬영 방법 즉, 직각 수평 촬영 방법과 경사촬영방법 등의 촬영에 있어서 구조물의 대표적인 형태인 평면, 곡면 모양의 모델을 제작·적용함으로써 촬영 방법별 최적 해석 시스템을 구축함으로써 구조물의 안전성 여부 확인의 기초를 이루게 함을 목적으로 한다.

## 2. 촬영 방법의 최적화

구조물에 대한 변형량의 측정을 위해서는 변형량산출에 따른 측정 정확도에 따라 변형량을 산출하여야 하는데, 이때 사진 측량 방법을 이용한 경우의 정확도는 촬영 방법, 기준점의 수, 사진 매수, 중복도 및 미지점의 수에 따라 다르게 나타나며, 또 카메라의 초점거리가 클수록 기선 길이가 길수록 정확도가 좋아지므로 카메라의 위치에 기인된 오차를 조정하여야 한다.

특히, 표정점의 좌표값을 1/100,000 정도까지 얻으려면 다음과 같은 관측과 측량이 이루어져야 한다.

- 기선길이 측정오차 0.01 m
- 각( $\omega, \phi, K$ ) 측정오차  $\leq \pm 5''$
- 사진 관측 오차  $\leq \pm 6 \mu\text{m}$

따라서 각 촬영 방법 및 여러 가지 복합적인 요소들을 고려하여 최적의 해석 시스템을 구축하였다.

일반적으로 근거리 사진 측량 방법에서의 촬영 방법은 직각 촬영, 편각 촬영, 수렴 촬영 등의 3가지 방법이 있으며, 이외에 경사 사진 촬영 방법이 있다. 본 연구에서는 직각 촬영 방법과 경사 사진 촬영 방법에 따른 구조물변형량측정을 위한 최적 시스템을 구축하는데 국한하였으며, 이때 최적 시스템의 구축을 위해 평면 모델과 곡률 반경 1.4 m인 곡면 모델을 제작하여 각 촬영 방법별 촬영 거리 및 기선 길이를 다르게 하여 촬영을 실시하였으며, 이중 경사 사진 측량에서는 경사 사진 촬영 결과에 따른 해석의 난점인 X축, Y축의 사진 축척 변화에 대해 축척 변화에 따른 일반화를 시켜 해석이 직각 촬영 방법에 의해 촬영된 결과를 해석하는 바

와 같이 구성하였으며, 해석시 기준 점수를 변화시키면서 최적의 결과가 얻어지도록 하였다.

### 2.1 직각 수평 촬영의 해석

내부 표정 요소를 고려한 임의점 P의 공간 위치를 결정하는 일반식은

$$\begin{bmatrix} X_1 - X_{01} \\ Y_1 - Y_{01} \\ Z_1 - Z_{01} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_1 - \Delta x_1 \\ f \\ z_1 - \Delta z_1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

이고, 투영 중심 (O)의 좌표는

$$\begin{aligned} X' &= X_0 + \Delta X \\ Y' &= Y_0 + \Delta Y \\ Z' &= Y_0 + \Delta Z \end{aligned} \quad (2-2)$$

이다.

또 임의 피사체에 대한 관측 방정식은

$$V = AX - L \quad (2-3)$$

정규 방정식은

$$\begin{aligned} A^TAX - A^TL &= 0 \\ X &= (A^TA)^{-1}A^TL \end{aligned} \quad (2-4)$$

단위경중률에 대한 표준오차와 좌표에 대한 표준오차는

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^TV}{n-u}} \quad (2-5)$$

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{Q_{xx}} \quad (2-6)$$

여기서 n은 관측값의 수, u는 미지수

### 2.2 경사 사진의 해석

경사 사진은 촬영 범위가 넓고 접근하기 불가능한 대상물 측정이 가능할 뿐 아니라 수직 사진의 경우처럼 대상물과 촬영 방향이 정확히 수직을 유지하여야 하는 조건이 필요 없으므로 촬영이 수월하다. 그러나 그림 1에서 보는바와 같이 사진 축척이 사진 화면에서 다르게 나타나므로 수치적 분석이 어렵다.

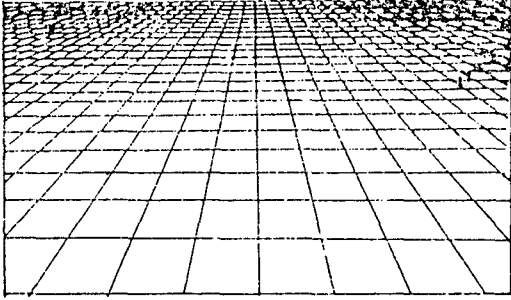


그림 1. 경사 사진의 축척 변화

각 축방향의 축척은

$$S_x = \frac{y_a \cos \theta}{H - h}$$

$$S_y = \frac{y_a \cos^2 \theta}{f(H - h)} \quad (2-7)$$

이다.

경사사진은 축척이 일정하지 않으므로 경사와 축척을 바로 수정하여 축척을 동일시켜서 수직사진으로 변환시켜야 한다.

이때 경사사진좌표계와 수직사진좌표계의 관계를 나타내면 그림 2와 같다.

두 평면 사이의 관계는 이동 요소( $x'_i, y'_i$ )와 회전 요소( $S, \alpha$ )에 따라 다음의 투영변환식이 얻어진다.

$$X = \frac{a_1 X + b_1 y + d_1'}{a_3 X + b_3 y + 1} \quad (2-8)$$

$$Y = \frac{a_2 X + b_2 y + d_2'}{a_3 X + b_3 y + 1}$$

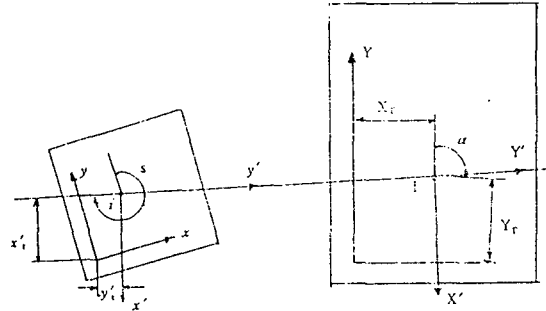
식 (2-8)은 다음식 (2-9)과 같이 선형화 된다.

$$[J][\Delta] = [f] \quad (2-9)$$

또 선형화된 투영변환식을 행렬식으로 나타내면 다음식(2-10)과 같다.

$$[A][X] = [\rho] \quad (2-10)$$

투영 변환 계수  $[X]$ 는 4개의 기준점만 있으면 구할 수 있지만  $N$ 개점( $N > 4$ )이 사용되면 최소제곱법에 의해 계산된다.



(a) 경사 사진면

(b) 수직화된 사진면

그림 2. 경사사진과 수직화된 사진좌표계

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8	15	22	29	36	1	6	11	16	21	26	31	36	41	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	9	16	23	30	37	2	7	12	17	22	27	32	37	42	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	10	17	24	31	38	3	8	13	18	23	28	33	38	43	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	11	18	25	32	39	4	9	14	19	24	29	34	39	44	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	12	19	26	33	40	5	10	15	20	25	30	35	40	45	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	13	20	27	34	41										
0	0	0	0	0	0										
7	14	21	28	35	42										
0	0	0	0	0	0										

(A) 평면 모델

(B) 곡면 모델

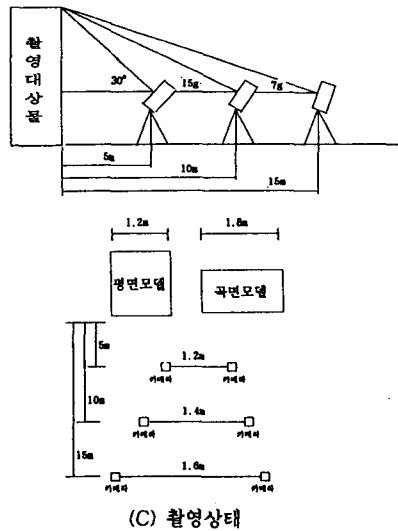


그림 3. 모델 형상별 측정점배열 및 촬영상태

$$[X] = \left[ \sum_{n=1}^N (A^T A)_n \right]^{-1} \left[ \sum_{n=1}^N (A^T \rho)_n \right] \quad (2-11)$$

계산된 미지 계수들은 두 평면 사이의 투영 관계를 결정시켜 주므로 경사 사진 좌표를 수직 사진 좌표로

변환시키는데 이용되고, 투영변환식은 해석적 편위수정의 기본식이 된다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험

본 연구에서는 촬영 방법 즉, 직각 수평 촬영 방법과 경사 촬영 방법에 의해 촬영을 실시하였으며, 대상물에 대해 모델별 소요의 정확도를 얻기 위해 대상물과의 촬영 거리를 5 m, 10 m, 15 m로 하여 촬영하였다. 이때 기선 길이는 사진해석시 최적의 결과를 얻을 수 있는 중복도 70%에 올 수 있도록 하였고, 경사 촬영인 경우 연직각이 각각 30°, 15°, 7°의 경사를 이루도록 한 후 촬영을 실시하였다. 또 구조물의 변형량을 측정하고자 할 경우 대상물인 구조물의 형태가 다양한 관계로 대표적인 형태인 평면 모델과 곡률 반경이 1.4 m인 곡면 모델을 구성하여 촬영 방법별, 촬영 거리를 달리하여 촬영을 실시하였다. 이때 근거리 사진 측량 방법에서의 해석에 대한 타당성과 정확도를 비교하기 위해 0.1초독 3차원 정밀 측량기인 MONMOS에 의해 그림 3과 같이 20 cm간격으로 격자로 구성된 각모델의 미지점에 대

해 정밀 측량을 실시하였으며, 이때 측정점의 수는 평면 모델인 경우 총42점, 곡면 모델은 총45점을 모델에 부착하였으며, 소요의 정확도를 얻기 위해 기준점 수를 평면 모델인 경우 5개, 9개, 12개, 곡면 모델인 경우 5개, 9개를 선정하여 최적의 해석 결과를 얻을 수 있도록 기준점망을 각각에 대해 구성하여 어느 조건에서 최적의 결과를 얻을 수 있는가를 판단하도록 하였다.

본 연구에서 사용된 근거리용 사진 측량용 카메라는 P31측정용 카메라이고, 촬영에 사용된 필름은 Kodak PLUS-X pan film이며, 측정점에 대한 타켓 크기는 3 cm×3 cm 인 정사각형의 형태를 이용하였다. 이때 0.1초독 3차원정밀측량기에 의해 정밀측량된 좌표는 임의지점에서 기계를 세우고 타켓점에 대해 임의의 축을 구성하여 측정하였으며, 이를 다시 카메라의 촬영축과 일치시키기 위해 3차원 회전변환시퀀스로서 좌표축이 일치되도록 하였다. 좌표축은 카메라의 기선방향이 X축, 카메라와 대상물과의 방향을 Z축으로 취하였다.

#### 3.2 분석

##### 3.2.1 촬영 방법에 따른 정확도 분석

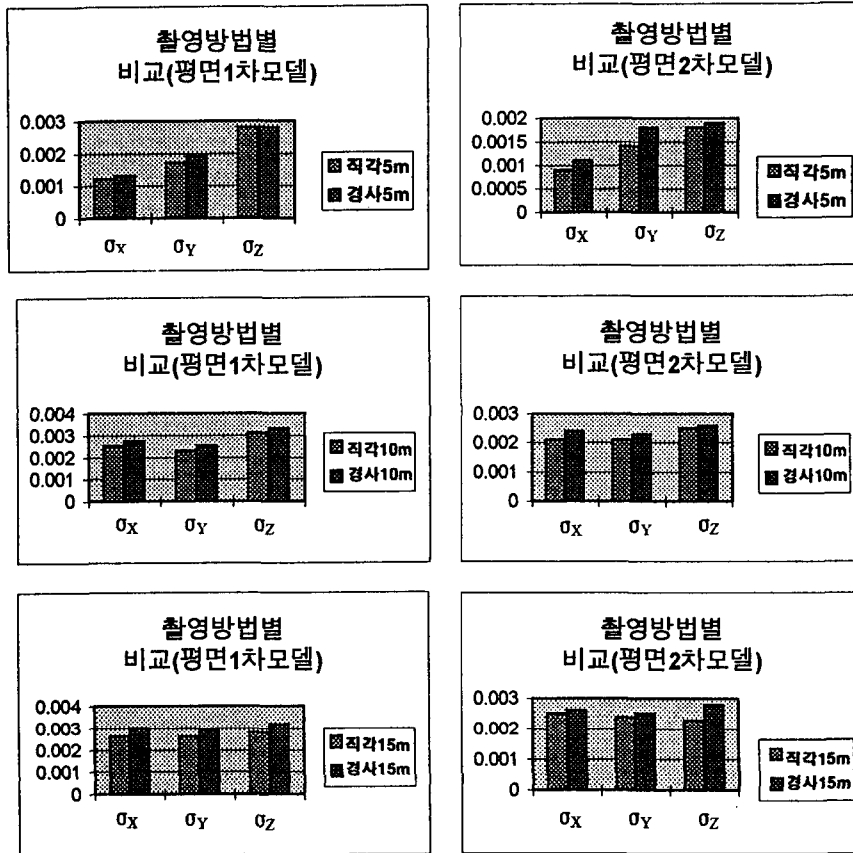
평면 모델과 곡면 모델에 대해 직각 수평 촬영 방법

표 1. 근거리 사진 측량에 의한 절대좌표값의 표준편차(평면 모델)

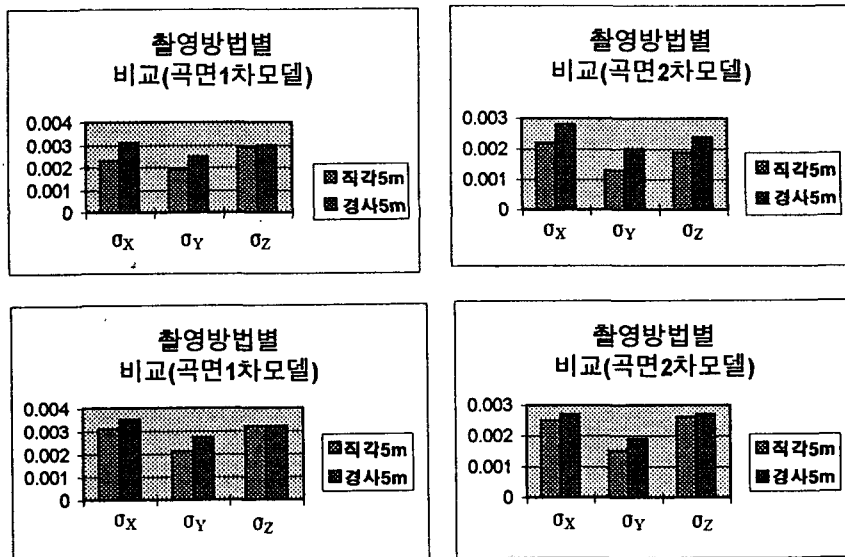
비 고	평 면 모 델											
	직 각 촬 영						경 사 촬 영					
	5 m		10 m		15 m		5 m		10 m		15 m	
조 정	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차
$\sigma_X$	0.0012	0.0009	0.0025	0.0021	0.0026	0.0025	0.0013	0.0011	0.0027	0.0024	0.0030	0.0026
$\sigma_Y$	0.0017	0.0014	0.0023	0.0021	0.0026	0.0024	0.0019	0.0018	0.0025	0.0023	0.0029	0.0025
$\sigma_Z$	0.0028	0.0018	0.0031	0.0025	0.0028	0.0023	0.0028	0.0019	0.0033	0.0026	0.0032	0.0028

표 2. 근거리 사진 측량에 의한 절대좌표값의 표준편차(곡면 모델)

비 고	곡 면 모 델							
	직 각 촬 영				경 사 촬 영			
	5 m		10 m		5 m		10 m	
조 정	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차
$\sigma_X$	0.0023	0.0023	0.0031	0.0025	0.0031	0.0023	0.0035	0.0027
$\sigma_Y$	0.0019	0.0013	0.0021	0.0015	0.0025	0.0020	0.0027	0.0019
$\sigma_Z$	0.0029	0.0019	0.0032	0.0026	0.0030	0.0024	0.0032	0.0027

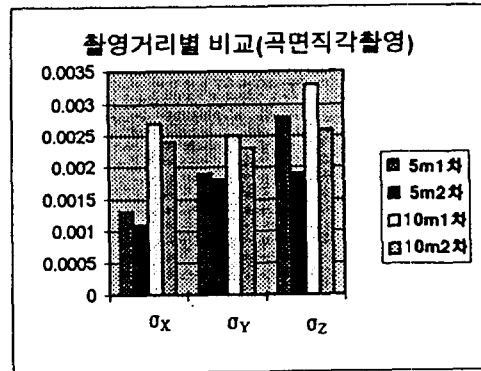
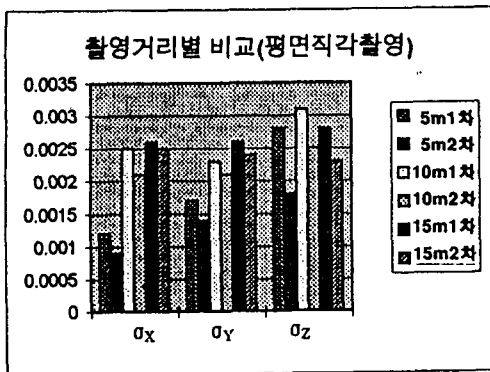


(A) 평면 모델에서의 촬영 방법별 표준편차

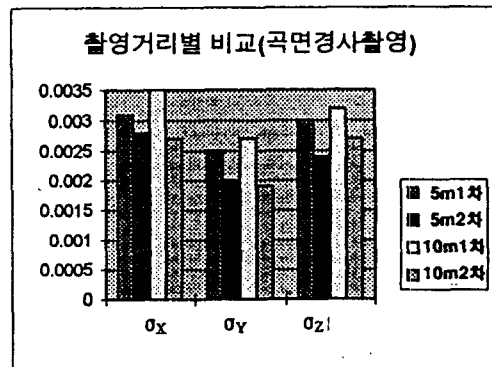
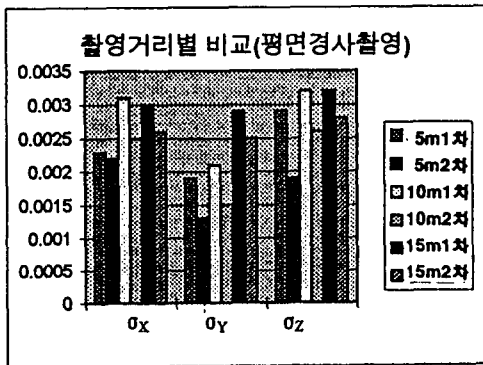


(B) 곡면 모델에서의 촬영 방법별 표준편차

그림 4. 촬영 방법에 따른 표준편차



가)평면 모델 나)곡면 모델  
(A) 직각 수평 촬영 방법에서의 표준편차



가)평면 모델 나)곡면 모델  
(B) 경사 촬영에서의 표준편차

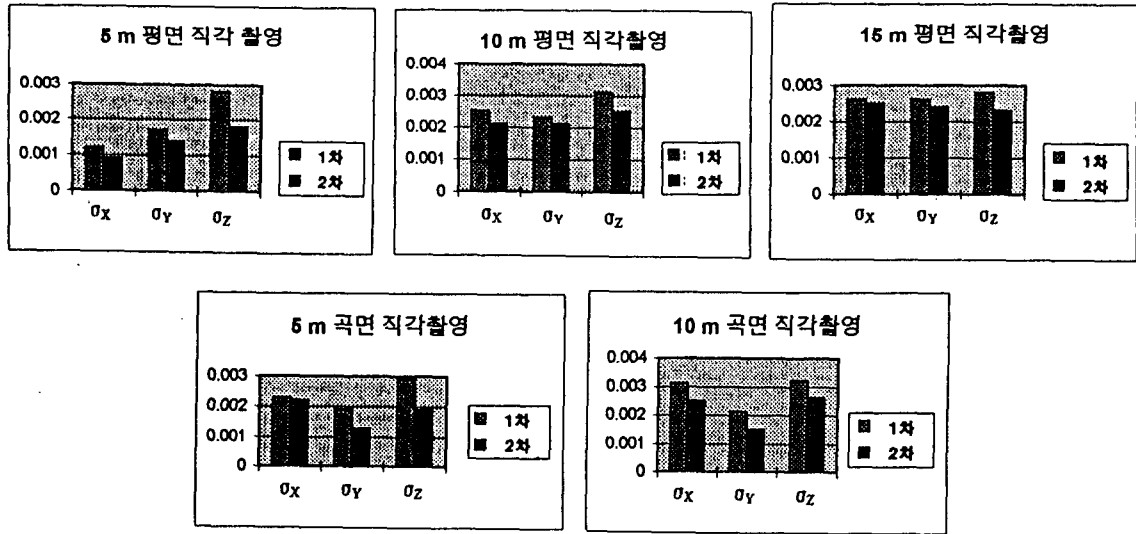
그림 5. 촬영 거리에 따른 표준편차

과 경사 촬영 방법에 의해 촬영거리에 따라 촬영하여 얻어진 사진으로부터 P3해석 도화기에 의해 사진 좌표를 얻었으며, 사진 좌표로부터 각 촬영 방법에 따른 절대좌표값을 번들 조정법에 의해 조정 계산하였다. 이때 경사 촬영에 따른 경사사진면에 대해 수직화된 사진면인 좌표계로 3차원 투영 변환을 실시한 후 투영 변환된 값으로부터 번들 조정법에 의해 3차원 절대좌표값을 얻었으며, 그의 결과에 대해 0.1초독 3차원 정밀 측량기에 의해 측정된 값과 비교하여 각축에 대한 표준편차를 계산하여 본 결과 표 1 및 표 2와 같으며, 이를 각 촬영 방법에 대한 정확도를 비교해 보면 그림 4에서 보는 바와 같이 각축에서의 표준편차가 경사 촬영 방법이 직각 수평 촬영 방법에 비해 많이 발생되고 있는데, 이는 측정점의 측정시 교회각이 90°에 가까운 직각 수평 촬영 방법이 경사 촬영 방법에서의 읽기 오차가 적게

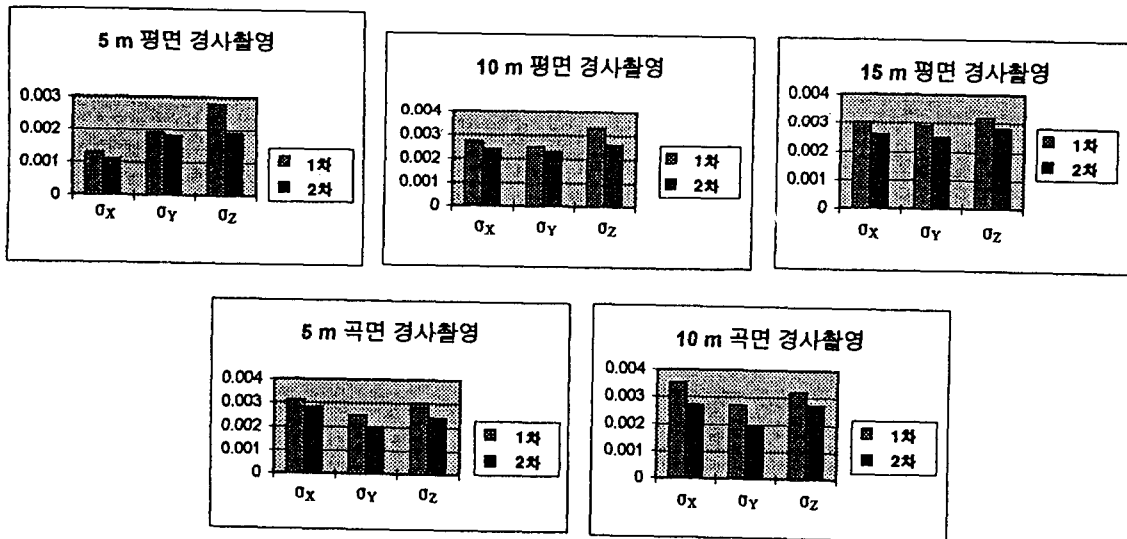
발생됨에 따른 오차이다. 따라서 측정점의 시준에 있어서 교회각이 90°에 가깝게 측정이 이루어지도록 하여야 한다. 따라서 구조물의 변형량을 측정하고자 할 경우 1 mm의 허용 오차를 가진다고 할 경우, 이에 정확도를 얻기 위해서는 구조물의 정밀측량시 시준각 및 촬영각이 측정점에 대해 직각이 되도록 가설물을 설치하여 측정되도록 하여야 한다.

### 3.2.2 촬영 거리에 따른 정확도 분석

각 모델에 대해 각촬영방법으로 5 m, 10 m, 15 m에서 촬영하여 얻어진 결과로부터 표준편차를 구해 이를 표로 나타낸 것이 표 1, 표 2이며, 촬영 거리별 표준편차에 대해 그림으로 나타내면 그림 5와 같으며, 그림 5에서 보는 바와 같이 대상물에 대해 촬영 거리가 멀어질 수록 정확도가 낮아지고 있음을 볼 수 있는데 이는



(A) 직각 수평 촬영 방법에서의 표준편차



(B) 경사 촬영 방법에서의 표준편차

그림 6. 기준점 변화에 따른 표준편차

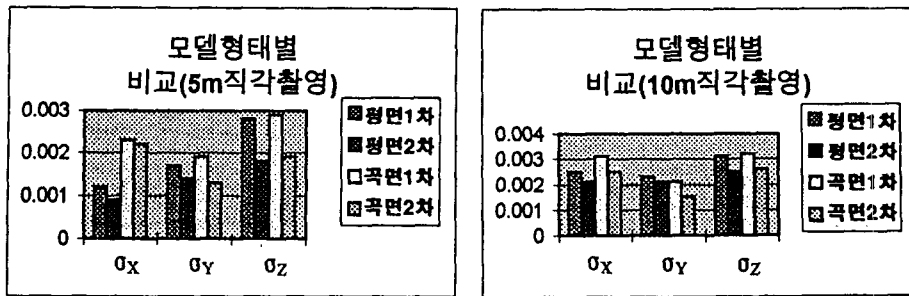
촬영에 따른 시준 오차 및 측정 오차 등 복합적인 요소가 작용되기 때문이다. 따라서 구조물의 변형 측량에서는 최소한의 촬영 거리를 유지하도록 하는 것이 정확도를 높이는 방법임을 알 수 있다.

### 3.2.3 기준점 변화에 따른 정확도 분석

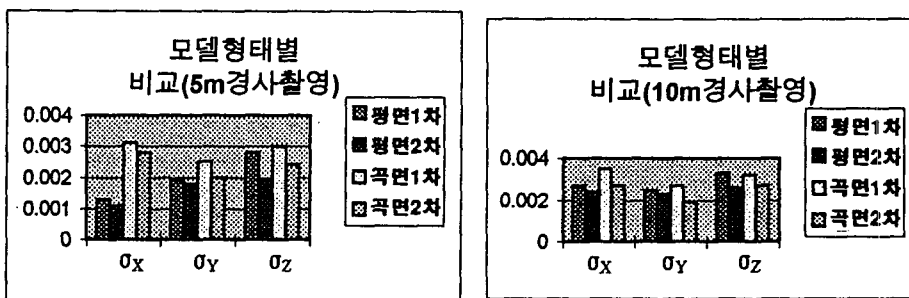
표 1, 표 2는 촬영 거리별 기준점의 수를 5개, 9개를 선정하여 해석하여 얻어진 결과로서 기준점 변화에 따

른 표준편차의 변화를 그림으로 표현하면 그림 6과 같으며, 그림 6과 같이 기준점의 수가 많을 수록 정확도가 높아짐을 알 수 있다. 그러나 소요의 정확도를 정확히 판단하고 있을 경우 여기에 합당한 기준점의 개수를 선정하여 분석함으로써 필요 이상의 노력이나 경비가 낭비되지 않도록 하여야 한다.

### 3.2.4 모델 형상별 정확도 분석



(A) 직각 촬영 방법에서의 표준편차



(B) 경사 촬영에서의 표준편차

그림 7. 모델 형태별 표준편차

표 1, 표 2에서 모델형상별정확도를 분석하기 위해 모델 형상에 따른 표준편차만을 고려하여 그림으로 나타내면 그림 7과 같으며, 이와같이 촬영 방법에 따른 모델 형상에 대해 분석하여 보면 평면 모델에 비해 곡면 모델의 정확도가 떨어지는데 이는 곡면 형상에 따른 곡률 변화가 영향을 미침을 알 수 있는데 곡률에는 측정점의 교회각이 다르게 나타나기 때문에 우리가 사진 좌표를 얻고자 할 경우 교회각에 따른 측정 오차가 포함된다. 따라서 곡률의 변화가 심할 경우 1회의 촬영이 아닌 수회의 촬영으로 여러 모델을 구성하여 해석하여야 한다.

이와 같이 촬영 방법 즉, 직각 수평 촬영 방법과 경사 촬영 방법으로 평면, 곡면 모델 형상에 대해 촬영 거리를 다르게 하며 촬영한 후 기준점의 수를 다르게 하여 해석된 결과를 이용하여 분석해 본 결과 각 촬영 방법에 따른 평면 형상이나 곡면 형상 모두 구조물의 변형량 측량에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

근거리 사진 측량 방법에 있어서 촬영 방법 즉, 직각

수평 촬영 방법과 경사 촬영 방법에 따른 평면 형태와 곡면 형태의 모델에 대해 적용하여 구조물의 형상에 대한 변형량 측정 가능성을 모색한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 경사 사진 촬영에 따른 경사 사진을 수직 사진으로 투영 변환을 시킴으로서 경사 사진의 축척 변화에 따른 3차원 좌표독취에서의 문제를 해결하였으며, 그로인한 소요의 정확도로 대상물에 대해 해석할 수 있었다.

(2) 촬영 방법에 따른 측정 오차가 촬영 거리 및 기준점의 수에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며, 그로인한 구조물 변형량측정의 촬영 거리가 10 m내외의 거리가 가장 적합함을 알 수 있었으며, 기준점의 수가 증가함에 따라 정확도가 높아지므로 얻고자 하는 정도에 따라 기준점의 개수를 측정하여 적용해야 함을 알 수 있었다.

(3) 근거리 사진 측량 방법에 의해 얻어진 결과와 0.1초독 3차원 정밀 측량기에 의해 측정된 결과를 비교해 본 결과 촬영 방법에 따른 해석 결과가 매우 양호한 결과를 얻음을 알 수 있었다.

이와 같이 촬영 방법에 따른 변형량 측정에 있어서



근거리 사진 측량 방법의 적용이 가능함을 알 수 있었으며, 추후 실제 구조물의 변형량측량에 적극 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 參考文獻

1. 이진덕, 강준목, "근거리사진측량의 망구성이 3차원 위치해석에 미치는 영향", 측지학회지, 제 8 권, 제 1 호, 1990, pp. 15-22.
2. Fraser, C.S., "Optization of Precision in Close-Range Photogrammetry", PE&RS, Vol.48, No.4, 1982, pp. 561-570.
3. Papo, H., "Deformation Analysis by Close-Range Photogrammetry", PE&RS, Vol. 51, No. 10, 1985, pp. 1561-1567.
4. Hadem, I., "Bundle Adjustment in Industrial Photogrammetry", ISP, Commision V, 1980, pp. 262-267.
5. American Society of Photogrammetry, "Manual of photogrammetry", 4th, Fall church, va, 1980, pp. 827-867.