

# 교량의 안전진단을 위한 3차원 변형해석에 관한 연구 A Study on the 3-D Deformation Analysis for Safety Diagnosis of Bridges

강준묵\* · 윤희천\*\* · 배상호\*\*

Kang, Joon-Mook · Yoon, Hee-Cheon · Bae, Sang-Ho

## 요 旨

본 연구는 교량의 3차원 정밀 변형측정을 위해 GPS와 3차원 측정시스템에 의한 정밀기준점 성과를 도출하고, 근접사진측량에 의해 교량의 정밀 3차원 해석을 효율적으로 처리할 수 있는 기법을 연구한 것이다. 연구결과 사진해석의 정확도에 절대적 영향을 미치는 동일좌표계의 참조점 및 기준점의 위치결정을 GPS와 3차원 측정시스템의 조합체제를 도입함으로써 종래의 기준점 측량의 문제를 극복할 수 있었으며, 좁고 긴 구조물의 3차원 변형 해석시 종래의 번거로운 계측과정을 단순화 시킬수 있었으며, 계측기에 의한 국부적인 변형해석의 단점을 보완할 수 있었다.

## ABSTRACT

This study is the 3-D precision deformation measurement of a bridge, obtain results of precision control points by GPS and 3-D measurement system and develop efficiently techniques which can solve precision 3-D analysis by CRP. In the result, we could overcome the problems of former control point measurement in the way of the combination system of GPS and 3-D measurement system to positioning decision of reference points and control points. Then we could simplify old measurement process on the 3-D deformation analysis of a linear structure and complement parted analysis fault of measurement instrument.

## 1. 서 론

건설 중인 교량이나 노후화된 교량의 붕괴로 인한 대형 사고는 막대한 경제적 손실과 인명피해를 초래하므로, 이의 시공과 관리에 있어 안전진단에 대한 종합적인 대책과 연구가 요구되어지고 있다.

구조물 안전진단을 위한 변형측정 방법으로는 주로 신장계, 경사계, 스트레인 게이지, 침하계등의 계측기에 의한 것으로 1차원 또는 2차원적 point성분 값만을 제시하고 있다. C.R.P(Close Range Photogrammetry)는 단시간에 많은 image data의 동시 3차원 위치해석이 가능한 기법으로, 정밀측정 분야에서 그 응용범위가 점점 확대되어 가고 있다.<sup>6,9)</sup>

본 연구에서는 교량 측면에 기준점 배치의 문제와

하상조건에 따른 관측지점 선정의 제한성을 극복하고 교량에서 특히 중요시되는 수직변위량을 정확히 도출하고자, 동일좌표계의 기준점 성과 획득을 피하고 교량 상면에 대한 수직촬영을 시도하였다.

대형 교량과 같은 선형의 구조물 변형측정시 참조점 및 기준점 위치결정의 정확도 여부는 전체 교량 변형 해석의 신뢰도에 절대적인 영향을 미치게 되므로, 본 연구에서는 GPS(Global Positioning System)와 3차원 측정시스템의 조합체제에 의한 신속, 정확한 3차원 좌표 성과를 도출하고, 근접사진측량에 의한 교량의 효율적인 변형측정 기법을 제시하고자 한다.<sup>1,5)</sup>

## 2. 관 측

긴 선형 구조물의 변형 측정기법을 개발하기 위해 test field를 설정하여 다양한 기초실험을 실시하였으며

\*충남대학교 토목공학과 교수

\*\*충남대학교 토목공학과 박사과정

그 결과를 토대로 실제 적용실험을 실시하였다.

사진측량에 의한 좁고 긴 구조물의 정밀측정시, 정확도에 절대적인 영향을 미치는 기준점 성과 획득을 위해 양단에 기선을 설치하고 25점의 기준점과 132점의 미지점을 중심 EF선에 대칭으로 고르게 배치하였다(Fig. 2). 촬영은 test filed에 배치된 기준점 및 미지점들의 sharp focus를 위해 f-stop과 셔터speed를 각각 f/11과 1/60, 그리고 circle of confusion이 30  $\mu\text{m}$ 이내가 되도록 계획하였으며, 3차원 측정시스템에 의한 기준점 성과 획득을 위해 최소 입·반사각을 고려한 경사타겟을 사용하였다.

중복도 60%로 대상면을 해석하기 위해 0.6 m마다 촬영점을 설정하여 촬영거리 1.8 m에서 1strip으로 17매, 1.4 m에서 2strip으로 36매를 수직 촬영하였다. 기준점 분포에 따른 정확도 해석을 위해 1모델당 동일양상의 기준점 3점, 미지점 12점이 피복되도록 하였다.

기초실험의 결과(Fig. 5)를 토대로 실제적용의 가능성을 검증하기 위해 실제 교량인 EXPO현수교를 설정하여 적용실험을 실시하였다(Fig. 1). 교량 상면에 92점의 기준점과 360점의 미지점을 균일하게 배치하였으며, 모델형성은 카메라 포맷의 긴변을 사용하여 기준점과 미지점이 60%중복도를 갖도록 하였다. 1 사진당 피복면적은 9 m  $\times$  11 m 이고, 모델당 피복면적은 9 m  $\times$  8.1 m로서 기준점과 미지점을 각각 4~5점, 15점씩 피복토록 수직촬영 하였다. 3차원 측정시스템을 이용하여 참조점(AA', BB')의 망을 피하여 양단에서 관측한 상면 92점의 기준점을 동일좌표계로 획득하였다. 또한 4점의 참조점은 GPS 수신기 trimble 4000SE를 이용하여 1시간(CNU A A'; CNU B B')씩 수신한 후, 충남대(CNU station)점을 고정점으로 MBP-single로 프로세싱하여 상대적 3차원 좌표를 도출하였으며, 이를 3차원 측정시스템을 사용한 성과와 비교하였다(Table 1). 촬영은 기준점과 미지점들이 사진상에 sharp focus를 갖도록 고가사다리 차

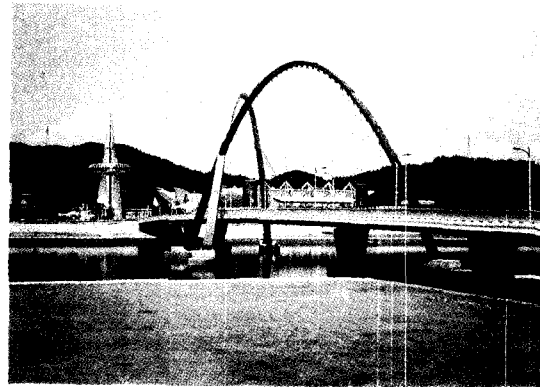


Fig. 1. Shape of Object (Expo Bridge).

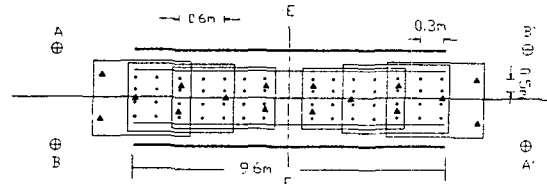


Fig. 2. Test Field

량을 이용한 촬영거리 11 m에서 25 m링 즉, 99.54 mm의 초점거리와 f-stop을 f/8~f/11, 셔터 speed는 1/125로서 circle of confusion을 고려하였으며, 기선거리 5.4 m로 수직촬영하여 총 61매의 사진으로 330 m의 현수교 상면에 대한 strip을 형성하였다(Fig. 3).

### 3. 결과의 비교분석

제안된 사진측량방법의 적용가능성을 검증하기 위해 테오도라이트와 3차원 측정시스템을 이용한 동일좌표계의 기준점 성과로 strip 및 block을 형성하여 해석하였으며, 기준점 수 및 분포, 촬영높이, 기준점과 미지점 간의 거리차 등에 의한 기하학적 오차 및 실 표준오차,

Table 1. Coordinate of reference points by GPS & 3-D Coord. measuring system UNIT : m

R.F	3-D Coord. Measuring System			GPS			residuals		
	X	Y	Z	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
A	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
B	17.8377	-0.1020	0.0000	17.8377	-0.0977	0.0149	0.0000	0.0043	0.0000
A'	17.7981	-0.1044	351.7076	17.7937	-0.1084	351.7137	-0.0044	-0.0040	0.0061
B'	-0.1265	0.1145	351.7338	-0.1230	-0.1172	351.7398	-0.0035	-0.0027	0.0060

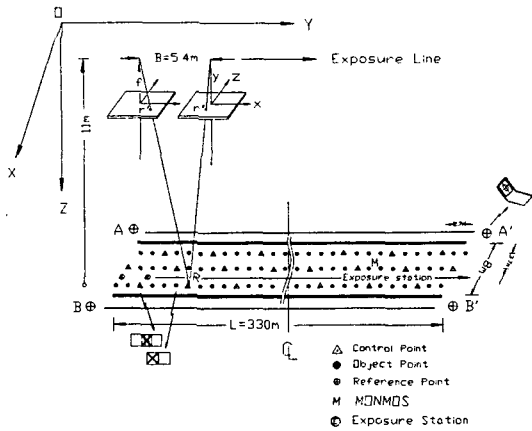


Fig. 3. Exposure plan on EXPO brige

그리고 3-D 위치오차를 도출하여 그 결과를 비교, 검토 하였다. 대규모 실교량의 변형해석시 모든 측정점을 동일좌표계에 의한 성과로 획득하기 위해 GPS와 3차원 측정시스템을 조합하여 참조점의 위치정확도를 산출하였으며, 3차원 측정시스템을 이용한 변형측정 기법의 가능성을 제시하기 위해 기준점 분포에 따른 미지점들의 위치오차 양상을 비교·분석하였다.

### 3.1 3차원 위치오차 분포

Test field에 배치한 4점의 참조점을 망구성하여 데오도라이트 및 3차원 측정시스템을 이용하여 양측부에서 관측한 기준점 성과를 동일좌표계로 전환, 이로서 1 strip의 대상면을 해석하였다. 양측기선을 각각의 기점으로하여 전면 25개 기준점에 대해, 다음과 같이 기준점 분포를 달리하여 해석하였다. Test field의 좌측 4개

의 기준점을 사용한 경우(4 cps), 우측 4개의 기준점을 사용한 경우(4' cps), 좌측과 우측 8개의 기준점을 사용한 경우(8 cps), 그리고 전면에 고르게 등 배치된 25점의 기준점을 사용한 경우(25 cps), 그리고 데오도라이트를 사용한 경우와 3차원 측정시스템을 사용한 경우의 기준점 성과로 3차원 위치오차를 비교하여 해석상의 신속·정확성을 높이고자 하였다.

Fig. 4는 기준점 분포에 따라 대상면에 고른 간격으로 배치된 132점의 미지점들에 대한 3차원 위치오차의 양상을 나타낸 것으로 단측부(4 cps, 4' cps)기준점 사용의 경우는 10 m의 선형 대상면에 있어 최고 8 mm의 오차를 보였다. 양측부의 소수 기준점(8 cps)을 사용한 경우 대상물의 길이에 따라 그 오차의 크기는 다르겠으나, 최고 1 mm정도의 3차원 위치오차를 나타냄으로써 단측부 기준점을 사용하여 해석한 경우에 비해 132점의 미지점들 오차분포가 안정한 양상을 나타냈다. 또한 이는 전면의 모든 기준점(25 cps)을 고르게 배치 사용한 경우와 유사한 오차분포를 보임으로서 전면 check points의 설정이 문제인 경우, 다소 길이에 비례하여 차이는 보이겠지만 양측부 소수 기준점 사용에 의한 해석이 바람직하다고 사료되었다. 그리고 1 strip의 해석과 동일한 기준점 배치와 기준점 측량방법으로써 1.4 m에서 사진 26매로 2 strip을 형성하여 동일대상면에 미지점들의 3차원 위치오차를 해석해 본 결과도 유사한 오차분포를 나타내었다.

### 3.2 표준오차 분포

기준점 분포(4 cps, 4' cps, 8 cps, 25 cps)에 따른 132점

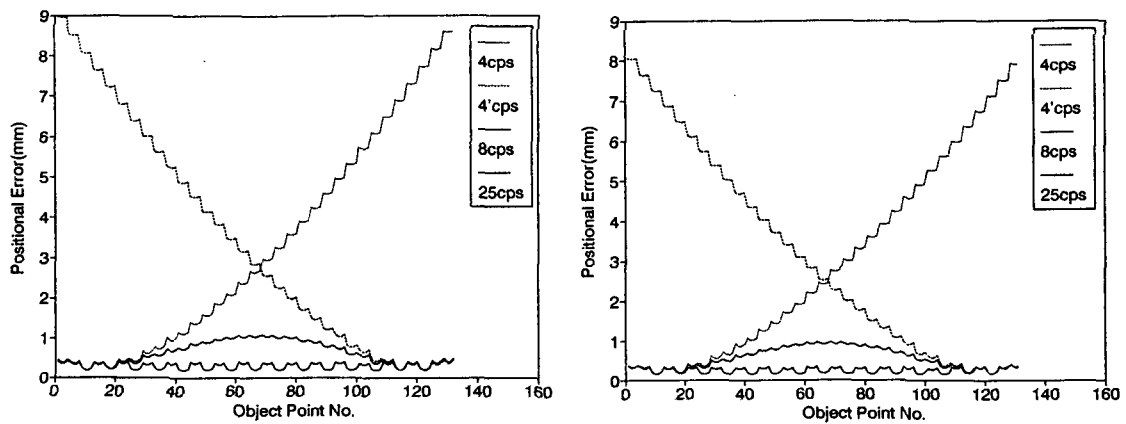


Fig. 4. 3-D positional errors of object points (3-D Coord. Measuring System.)

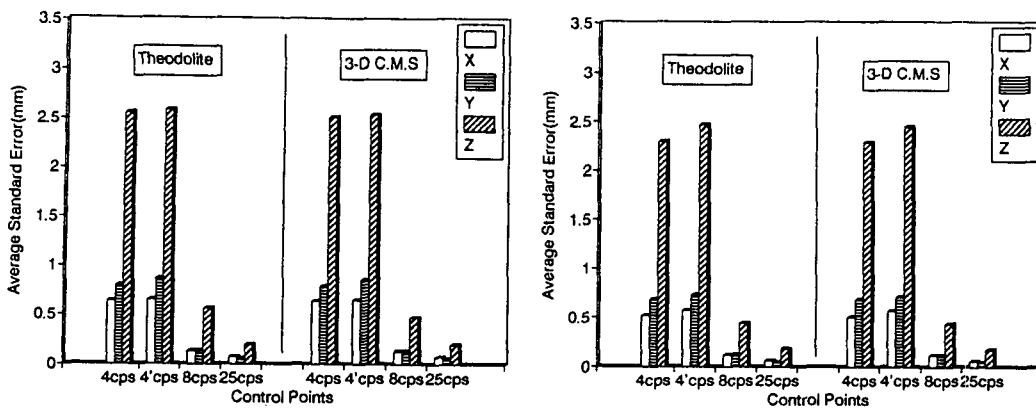


Fig. 5. Standard error of Object points (3-D Coord. Measuring System)

의 미지점들 각각의 위치오차를 X, Y, Z좌표로 평균하여 표준오차로 나타내었다(Fig. 5). 3차원 측정시스템을 사용하여 획득한 단측부 소수 기준점(4 cps, 4' cps)성과로서 해석한 결과에 비해 양측부 소수 기준점(8 cps)의 사용에 의한 해석 결과는 표준오차가 X, Y좌표에서 80-81%, Z좌표에서 82-86%정도의 오차감소를 보였다. 또한, 대상물 상면의 전면 기준점을 사용하여 해석한 결과는 양측부 소수 기준점을 사용한 해석 결과에 비해 X좌표에서 54%, Y좌표에서 40%, Z좌표에서 38%정도의 표준오차 감소를 보였다. 기준점 분포에 따른 해석에서 미지점들의 표준오차를 비교해 보면, 촬영방향(Z), 길이방향(Y), 그리고 X방향 순으로 평균 X, Y, Z좌표의 표준오차가 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 3차원 측정시스템에 의한 기준점 성과를 동일좌표체제로 전환하여 2 strip을 형성한 경우도 3차원 측정시스템을 이용한 경우는 X방향에서 77%, Y방향에서 83%, Z방향에서 78%의 오차 감소를 보였다. 전면기준점을 사용하여 해석한 경우 양측부 소수 기준점을 사용하여 해석한 경우보다 3차원 측정시스템의 경우는 X방향에서 45%, Y방향에서 33%, Z방향에서 31%정도의 감소된 표준오차를 나타냈다. 이 결과로부터 대상면에 고른 기준점의 사용에 의한 해석이 보다 나은 결과를 가져오나, 전면 기준점 배치 및 성과 획득이 어려운 경우 또한 신속한 자료처리가 요구되는 경우, 양측부 기준점을 사용한 경우의 효율성을 인지할 수 있었다.

### 3.3 기준점과 미지점의 거리차에 따른 오차분포

Fig. 2에서 기선 A점을 원점으로 기준점의 수를 8단

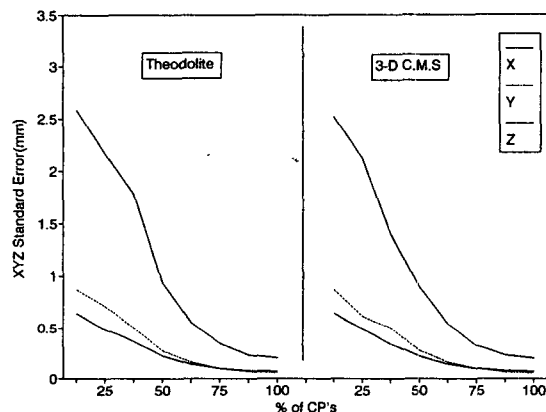


Fig. 6. Standard errors due to # of the control

계로 증가시켜감에 따른 132점의 미지점들에 대한 오차를 분석하였다. 3차원 측정시스템(3-D C.M.S)을 사용하여 획득한 기준점의 수를 증가시켜감에 따른 1strip의 해석에서 X,Y,Z방향에 대한 표준오차를 비교하여 보았다(Fig. 6).

기준점 사용율이 37.5-62.5% 사이에서 오차감소 비율이 X, Y, Z좌표 방향으로 각각 48%, 38%, 41%로 가장 크게 나타났으며, 80%정도의 기준점을 사용하여 해석한 결과는 전면 기준점(100%)을 사용한 해석 결과에 비해 상대적으로 적은 오차 감소율을 보임으로써, 과다 기준점 사용에 따른 해석이 반드시 효율성이 좋다고 볼 수 없다고 나타났다.

### 3.4 기준점 분포에 따른 정확도 분석

Fig. 7은 기준점 성과 획득 방법, 기준점 분포, 그리고

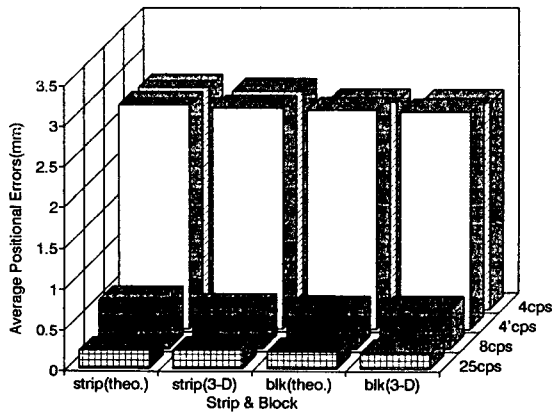


Fig. 7. Average positional errors due to the control points

strip형성에 따른 평균 3차원 위치오차를 나타낸 것이다. 4가지 유형의 기준점 분포에 따른 해석에 있어 3차원 위치오차의 양상이 단측부 기준점 사용(4 cps, 4' cps)의 경우 평균 2.7 mm, 양측부 소수 기준점 사용(8 cps)의 경우 평균 0.5 mm, 전면 기준점 사용(25 cps)의 경우 평균 0.25 mm 정도로 그 오차가 양측부 소수 기준점을 사용하여 해석한 경우가 단측부 기준점을 사용하여 해

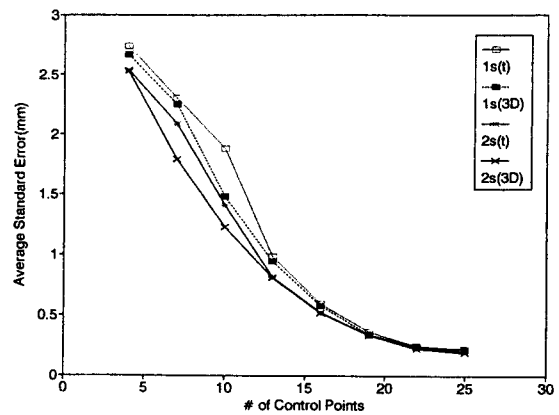


Fig. 8. Average positional error by # of the control points

석한 결과에 비해 80%정도의 감소를 나타내었다. 기준점 분포에 따른 4가지 유형에 있어 모두 유사한 오차를 나타냄에 따라, 사진 해석의 정확도에 절대적 영향을 미치는 기준점을 획득함에 있어 신속하고 정확하게 획득할 수 있는 신기법의 응용가능성을 알 수 있었으며, 또한 동일좌표계의 구성에 따른 양단부 소수 기준점 사용의 효율성을 알 수 있었다.

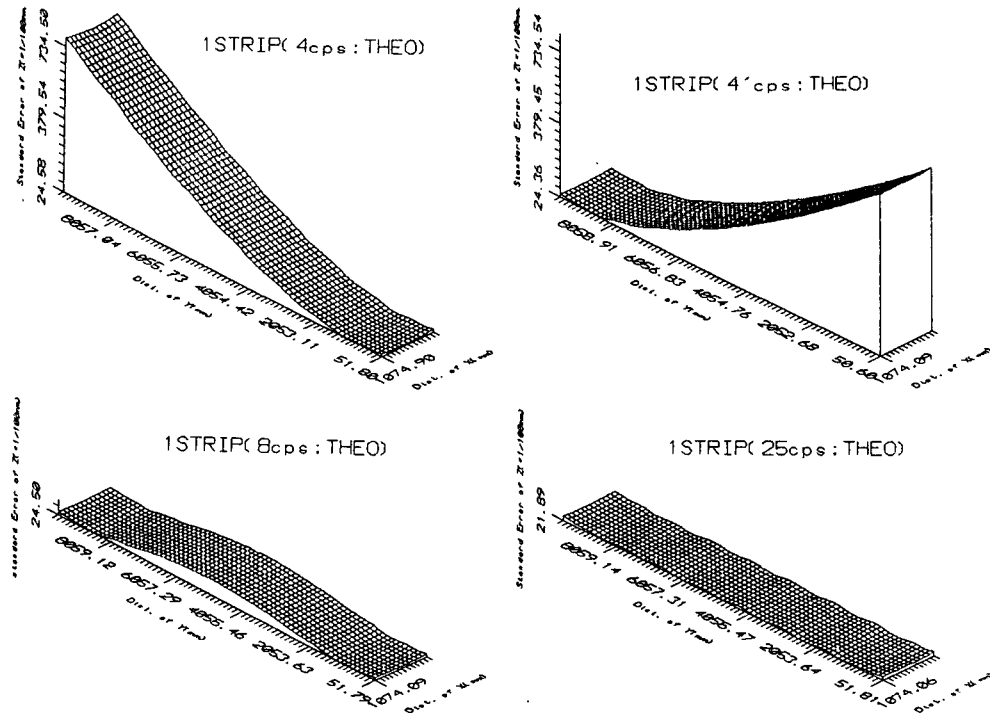


Fig. 9. Standard Error of Z on Test Field

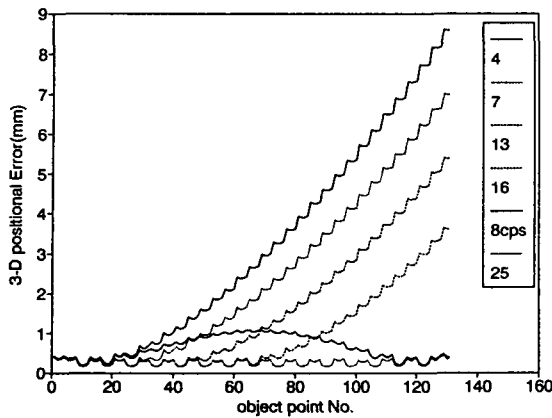


Fig. 10. 3-D positional error due to the difference between control points and object points

Fig. 8은 strip 구성과 기준점 획득방법에 따른 해석 시, 기준점 수를 증가시켜감에 따른 평균 3차원 위치오차의 변화양상을 나타낸 것으로, 기준점 수의 감소에 따른 각각 4가지 해석방법에 있어 그 오차가 포물선 형태로 증가함을 나타낸다.

Fig. 9는 대상면에 있어 촬영방법(Z)의 표준오차와 기준점 분포에 따른 미지점들의 X,Y방향의 좌표를 토대로 도시한 결과이다. 이는 대상면(XY)에 대해 기준점 분포(4 cps, 4' cps, 8 cps, 25 cps)에 따른 Z방향의 오차유형을 알아보기 위해 3차원 측정시스템을 사용한 기준점 성과로 1 strip을 해석한 결과이다. 이 경우 촬영(Z)방향의 표준오차는 양측부 기준점(8 cps)사용의 해석결과가 단측부 기준점(4 cps, 4' cps) 사용의 해석결과보다 최대 표준오차의 0.13배 정도의 감소, 전체 기준점(25 cps) 사용의 해석결과보다는 2.3배 정도 증가한 오차를 보였다.

또한, 2strip을 해석한 결과는 각각 0.13배의 감소와 2배의 증가를 나타냈다.

단측부 기준점의 수를 증가시킴에 의한 기준점과 미지점간 거리차에 따른 오차 분포를 도시하여 보았다(Fig. 10). 단측부 기준점 수를 증가시킴에 따라 해석한 결과 점차 감소하는 오차양상을 보였으나 대상면의 반 정도를 피복한 기준점(13점)을 사용한 해석시의 최대오차는 3.5 mm정도로 나타났다. 그러나 양측부 소수 기준점을 사용하여 해석한 결과는 1 mm정도의 최대오차를 보임으로서, 단측부 기준점 수의 증가로서 선형 구조물을 해석하기 보다는 동일좌표계의 양측부 소수 기

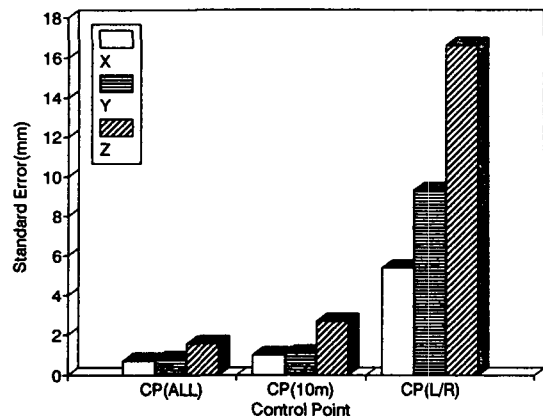


Fig. 11. Standard error on EXPO bridge

준점을 사용하여 해석하는 것이 보다 양호함을 알 수 있었다.

### 3.5 실구조물에 적용결과

기초실험에서 비교 분석한 결과를 토대로 선형의 긴 구조물의 변형해석을 위해 그 가능성이 입증된 3차원 측정시스템과 측남대(CNU station)점을 고정점으로 상대 static GPS를 대상면의 기준점 획득방안으로 채택하여 사용하였다. EXPO현수교 양측에 참조점을 설치하고 이를 망구성하여 동일좌표계상의 기준점 성과 획득을 피하였다(Fig. 3). 또한 참조점의 3차원 좌표는 기선 A점을 3차원 측정시스템의 기점으로 하여 획득한 직각 3차원 좌표체제상의 3차원 좌표와 상대 static GPS를 이용하여 얻은 상대적 3차원 좌표를 비교하여 그 차이를 알아 보았다(Table 1).

Fig. 11은 실교량 330 m에 배치한 360점의 미지점들에 대해 기준점 분포에 따라 해석한 경우 각각의 X, Y, Z좌표에 대한 평균 오차를 도시한 결과이다. 등간격의 기준점을 사용(CP(ALL))하여 전면해석시는 X좌표에서 0.7 mm, Y좌표에서 0.8 mm, Z좌표에서 1.6 mm의 표준오차를 보였다. 대상면 330 m에 5.7 m간격으로 등배치한 92점의 전체 기준점(cp(ALL)), 10 m간격의 기준점(cp(10 m)), 기선측 소수 기준점(cp(L/R))의 3가지 유형에 따른 미지점들의 3차원 위치오차 분포를 나타낸 것이 Fig. 12이다. 이의 결과로부터 보다 나은 정확도 산출을 위해서는 대상면에 고른 check point를 두고 해석하는 것이 이상적이나, 전면 check point가 어려운 경우 양측부 소수 기준점 사용의 가능성을 알 수 있었다.

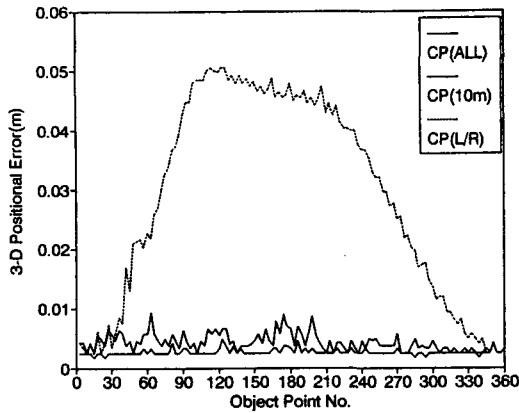


Fig. 12. 3-D Positional Error on EXPO bridge

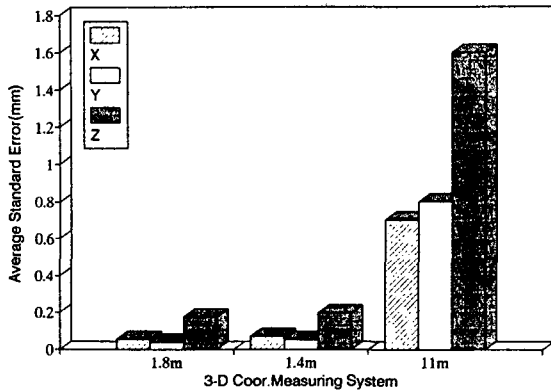


Fig. 13. Standard error due to the exposure

3차원 측정시스템을 사용한 기준점 성과로 1.8 m에서 17매 사진의 1 strip 해석시, 단측부(4 cps, 4' cps), 양측부(8 cps), 전체 기준점(25 cps) 사용의 경우 촬영방향(Z)의 오차가 strip(Y)방향 오차보다 상대적으로 각각 2.6-3.17배, 3.1-3.4배, 4배 정도의 양상을 보였으며, X방향으로 보다는 상대적으로 3.59-4.7배, 3.7배, 2.9배를 나타냈다. Fig. 13은 촬영거리 1.4 m, 1.8 m, 11 m에서 3차원측정시스템을 이용한 기준점 성과로서 해석한 경우 X, Y, Z 좌표에 대한 표준오차 성과를 도시한 결과이다.

촬영높이 1.4 m, 1.8 m에서의 표준오차 결과는 촬영거리가 0.4 m로 증가함에 있어 X좌표에 대해 26%, Y좌표에 대해 31%, Z좌표에 대해 14% 정도의 오차증가를 나타냈으며, 또한 촬영높이(11 m)가 거의 8배정도 증가함에 있어 X, Y, Z축 각각에 대해 10배, 15배, 8.5배 정도의 오차 증가를 보였다. 이의 결과로 실교량을

1 strip으로 해석하기 위한 촬영거리의 증가는 정확한 교량 해석에서 비효율적이므로 이에 대한 보완이 요해진다고 사료되었다.

#### 4. 결 론

교량의 안전진단을 위해 CRP에 의한 정밀 3차원 변형해석을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 교량과 같은 선형 구조물의 정밀 기하학적 변형 해석은 동일좌표계를 채택하여야 하며 좌표계 기준 설정과 기준점 배치는 정확도에 매우 중요한 영향을 미침을 알았다.

(2) 기준점 배치에 따른 정확도는 교량의 한쪽에 배치한 경우보다 양단의 일부 구간에 배치한 경우가 다소 길이에 비례하여 차이는 있으나 80%정도까지 현저한 오차 감소를 나타내었으므로 실제 기준점을 구조물 전체에 고루 배치하기 어려운 교량에서는 양단 기준점 해석이 바람직하다.

(3) 실 교량에서 촬영거리 11 m에서 수직촬영한 사진을 해석한 결과 X에서 0.7 mm, Y에서 0.8 mm, Z에서 1.6 mm의 표준오차로 해석이 가능했으므로 오차 보정과 촬영 시스템 등의 보다 나은 개발이 수행된다면 보다 정확한 변형해석이 가능할 것이다.

(4) 교량의 폭이나 피복면적을 고려하여 촬영거리를 높여 1 strip으로 해석하는 것은 수직변위의 중요성이 강조되는 구조물에서는 부적합할 수 있었다.

(5) 촬영거리를 짧게 할 수 있는 multi-camera system에 의한 영상 획득과 block 조정의 최적화가 수행된다면 단시간내에 효율적으로 교량의 안전진단을 위한 변형해석을 할 수 있을 것이다.

#### 參考文獻

1. J. Risager Christensen, "Observation of Displacement of a Bridge Loaded to Failure Using Analytical Photogrammetry", 14 th Congress of the International Society of Photogrammetry Hamburg Commission, 1980, pp. 129-136.
2. John N, Hatzopoulos, "An Analytical System for Close-Range Photogrammetry", Pc & RS, Vol. 51, No. 10, 1985, pp. 1583-1588.

3. Haim B. Papo, "Deformation Analysis by Close-Range Photogrammetry", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 51, No. 10, 1989, pp. 1561-1567.
4. J.P. Erlandson, S.A. Veress, "Monitoring Deformations of Structures", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 41, No. 11, 1975, pp. 1375-1384.
5. Sanjib K. Ghosh, "Analytical Photogrammetry", 2nd ed. Pergamon Press, 1987, pp. 177-200.
6. David Reymolds, A.M. ASCE and John A. Dearinger, "Measuring building Movement by precise survey", *Journal of the Surveying and Mapping Division, Proceeding of the American Society of civil Engineers*.
7. 강준욱, 이진덕, "근접사진측량의 망구성이 3차원 위치 해석에 미치는 영향", *한국측지학회지*, 제 8 권, 제 1 호, 1990, pp. 15-22.
8. 강준욱, 한승희, "공선조건에 의한 기하학적 변형해석에 관한 연구", *한국측지학회지*, 제 4 권 제 2 호, 1986, pp. 77-87.
9. 강준욱, 신봉호, 이재기, "C.R.P에 의한 구조물의 안전진단", *한국과학재단 목적기초 연구 최종 보고서*, 1992.