

## 자기부상열차 선로의 3차원 위치해석에 관한 연구 A study on the 3-D positional analysis for track of magnetically levitated vehicles

강준목\* · 윤희천\*\* · 배상호\*\*

Kang, Joon-Mook\* · Yoon, Hee-cheon\*\* · Bae, Sang-Ho\*\*

### 요 旨

본 연구는 사진측정 기법을 이용하여 정밀 시공 및 주기적 안전진단을 요하는 자기부상열차 선로의 정밀 위치해석을 보다 효율적으로 처리할 수 있는 기법을 연구한 것이다. 연구결과, 사진의 해석 정확도에 절대적 영향을 미치는 평면적 기준점의 배치를 보완한 공간적 분포의 기준점을 사용함으로써, Z의 정확도뿐만 아니라 X, Y의 정확도를 향상시킬 수 있었으며, 진단에 요구되는 1 mm이내의 정확도로 자기부상열차의 선로에 대한 검증을 할 수 있었다. 그리고 구조물 상면의 정밀 위치해석은 물론 중·횡단경사에 대한 기하학적 특성을 효율적으로 도출할 수 있었다.

### ABSTRACT

This study is the 3-D positional analysis for track of magnetically levitated vehicles to precise construction and periodical safe diagnosis by photogrammetry. In the result, we could improve the accuracy of Z as well as X, Y using the modified control points of spatial distribution to the plane distribution of the absolutely effective control points to accuracy and diagnosis the the track of magnetically levitated vehicles using the below 1mm accuracy. And we could analysis the 3-D precise positions and efficiently decide the geometric characteristics of the cant and gradient to the instrument.

### I. 서 론

최근 대형 건설 구조물의 잇따른 붕괴사고는 우리에게 많은 충격을 주고 있다. 현재 대부분의 건설현장에서는 안전대책으로서 변형으로 인한 붕괴의 위험성이 있는 경우 센서나 게이지를 매설하여 주기적으로 지점의 선형적 거동을 계측하고 있으나 결과값이 상대적이며 국부적이어서 구조물 전반에 대한 안전관리에 많은 어려움이 뒤따르고 있다.<sup>5)</sup>

이에, 본 연구는 차세대 교통수단이라 일컬어지는 자기부상열차 선로에 대한 시공후 정밀 검측 및 주기적 안전진단을 보다 효율적으로 수행하기 위해 근접 사진측정을 이용하여 구조물 상면 전반에 대한 3차원 정밀 위치결정 기법을 연구하였다.<sup>1,2,3,6)</sup> 그간 영상해석에서

나타난 일반적 결과는 촬영방향 오차가 상대적으로 큰 경향(Z>X,Y)으로 나타났으며, 경사사진에 비해 수직사진의 상대적 과다 해석량에 따른 비효율적 경향을 내포하고 있었다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 사진해석 정확도에 절대적 영향을 미치는 기준점 문제를 보완하고 해석의 효율성을 피하기 위해 촬영조건을 다양화한 기초실험을 실시함으로써, 자기부상열차 선로의 위치결정에 대한 C.R.P의 적용가능성을 제시하고자 하였다. 그림1은 다양한 촬영조건에 따른 해석과 자기부상열차 선로에 대한 정확도 분석 및 시공 검증을 위해 기초실험을 실시함으로써, 자기부상열차 선로외에 선형 구조물의 영상을 이용한 정밀 3차원 위치해석 및 응용가능성, 그리고 응용범위를 확대하고자 하는 연구목적과 이에 따른 연구방법을 도식화 한 것이다.

\*충남대학교 토목공학과 교수

\*\*충남대학교 토목공학과 박사과정

### II. 기초실험

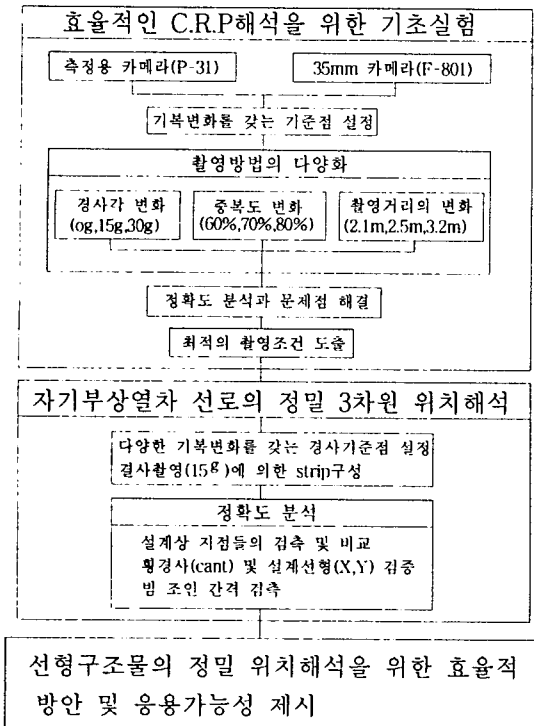


그림 1. 연구진행 흐름도

선형 구조물의 3차원 위치 결정을 위한 최적기법의 도출을 위해 그림2와 같은 대상면에 다양한 촬영조건을 적용하여 기초실험을 실시하였다. 그림 3은 기준점 및 미지점의 분포를 3차원으로 도시한 것이다. 카메라는 측정용 카메라(Wild P-31)와 semi-metric화 한 35mm 카메라(Nikon F-801, f:35mm)를 이용하였으며, 경사각( $\omega$ : 0°, 15°, 30°), 중복도(60%, 70%, 80%), 촬영거리(2.1m, 2.5m, 3.2m)등을 다양하게 변화시켜 사진영상을 획득하였다. 기초실험에서 미지점은 평편한 대상면에 균일한 분포로 54점을 배치하였으며, 기준점은 미지점과 동일한 높이의 21점과, 기복의 변화(40~160mm)가 있는 21점을 배치하였다. 이때 기복의 변화가 있는 기준점은 촬영각의 변화와 좌표측정에 용이하도록 표면을 약 45°기울여 배치하였다(경사기준점). 그리고 미지점은 촬영거리 3.2m의 경우는 0.6m×0.46m, 촬영거리 2.1m의 경우는 0.43m×0.33m 간격으로 각각 배치하였다.

촬영은 피사계 심도와 산란원의 관계를 고려하여 산란원의 직경을 50 $\mu$ m로 제한하고, f-stop은 11이상으로 계획하여 3.2m, 2.5m, 2.1m의 촬영거리에서 각각 촬

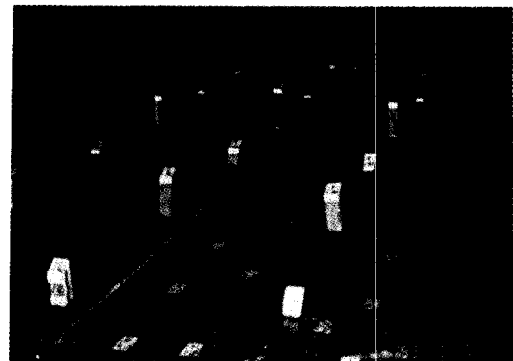


그림 2. 기초실험 대상면

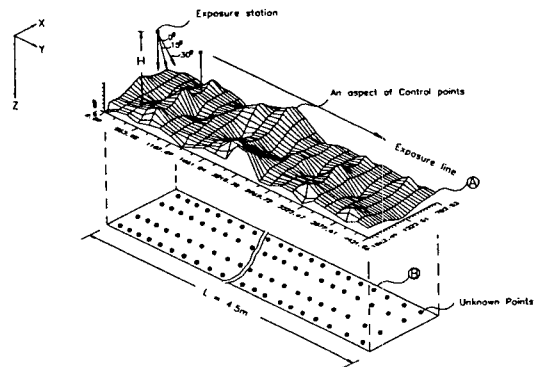


그림 3. 기준점 및 미지점의 분포도

영하였다. 또한, 촬영거리에서는 카메라의 경사각을 0°, 15°, 30°로 변화시켜 촬영하였다.

30°의 경사촬영시 산란원의 제한을 벗어나는 범위가 단사진 피복면적중 촬영거리 3.2m에서는 약 20%, 촬영거리 2.1m에서는 약 30%이므로, 중복도를 고려하였다.

이와같이 촬영한 필름으로부터 기준점, 미지점 및 지표의 기계좌표는 해석도화기(Intergraph사)를 이용하여 획득하였다. 기계좌표로부터 사진좌표 및 미지점의 3차원 좌표와 표준오차는 번들조정 프로그램을 이용하여 산출하였다. 이때 각 촬영조건의 변화에 따른 정확도를 검토하여 최적의 촬영조건을 도출하여 구조물의 위치결정뿐 아니라 그 응용범위를 확대하고자 다양한 조건으로 해석하였다. 각각의 조건에 따라 미지점의 3차원 좌표에 대한 기하학적 표준오차 및 실험적 표준오차, 그리고 3차원 위치오차를 도출하여 그 결과를 비교검토하였다.

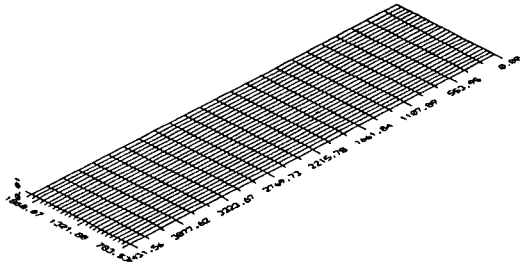


그림 4. A<sub>CP</sub> 기준점의 3차원 분포

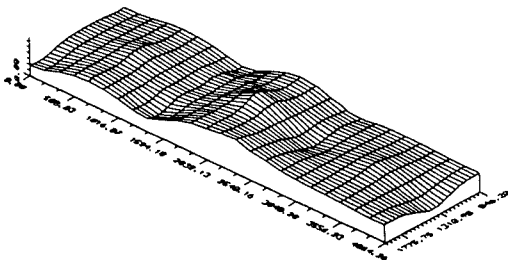


그림 5. C<sub>CP</sub> 기준점의 3차원 분포

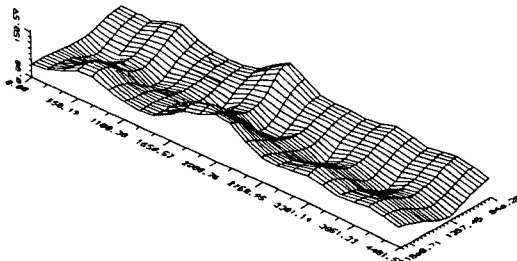


그림 6. B<sub>CP</sub> 기준점의 3차원 분포

그림3의 ㉠와 ㉡는 그림 2와 같은 기초실험 대상면을 각각 기준점과 미지점으로 나눠 도시한 것이다.

평면의 미지점 해석시 기준점의 공간적 분포에 따른 정확도를 검토하기 위해 그림 4, 그림 5, 그림 6과 같이 기준점을 분포시켜 분석하였다. 여기서 A<sub>CP</sub>의 기준점 배치는 미지점과 같은 평면에 있는 기준점만을 사용하

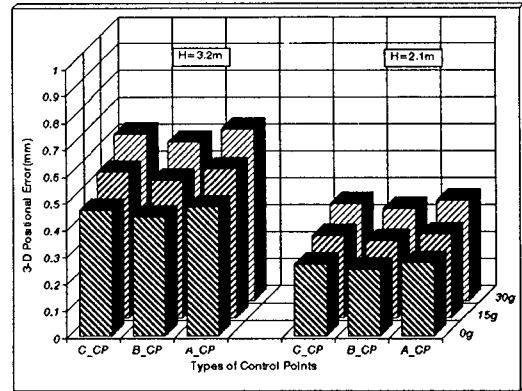


그림 7. 기준점 양상에 따른 3-D 위치오차

여 분석을 시도한 경우이고, C<sub>CP</sub>는 평면과는 높이차가 있는(40~160 mm) 기준점만을 취하여 해석한 경우, 그리고 B<sub>CP</sub>는 평면과 기복변화가 있는 기준점을 혼합(0~160 mm)하여 해석한 경우를 나타낸 것이다. 이때 각각의 경우 공히 21점의 기준점을 사용하였다.

그림7은 측정용 카메라를 이용하여 촬영거리, 경사각, 그리고 기준점 유형에 따른 3차원 위치오차를 나타낸 것이다. 촬영거리가 3.2 m인 경우 촬영거리가 2.1 m의 경우에 비해 약 75%의 오차 증가율을 보였으며, 기준점 분포에 따라서는 B<sub>CP</sub>를 사용하여 해석한 경우가 A<sub>CP</sub>의 기준점을 사용하여 해석한 경우보다 3차원 위치오차가 약 8% 감소하는 경향을 보였다(그림7). 또한, C<sub>CP</sub>를 사용하여 해석한 경우도 A<sub>CP</sub>의 기준점 배치형태를 사용해 해석한 경우보다 약 2.5% 오차감소율을 나타내고 있다. 따라서 기준점의 공간적 배치는 정확도 향상에 효과적임을 알 수 있다.

표 1은 촬영거리 3.2 m에서 측정용 카메라로 촬영하고 이를 경사각과 기준점 분포에 따라 해석한 결과를 X, Y, Z좌표의 실험적 표준오차로 나타낸 것이다. 경사각이 0°에서 15°, 30°로 증가됨에 따라 X좌표와 Z좌표의 표준오차에 비해 Y좌표의 오차가 보다 크게 증가하

표 1. 경사각 변화에 따른 X,Y,Z좌표의 실험적 표준오차

Camera : P-31, H : 3.2 m

기준점	0°			15°			30°		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
C <sub>CP</sub>	0.128	0.157	0.421	0.143	0.183	0.486	0.159	0.210	0.562
B <sub>CP</sub>	0.125	0.150	0.397	0.140	0.175	0.463	0.157	0.201	0.532
A <sub>CP</sub>	0.130	0.163	0.431	0.145	0.190	0.503	0.163	0.218	0.576

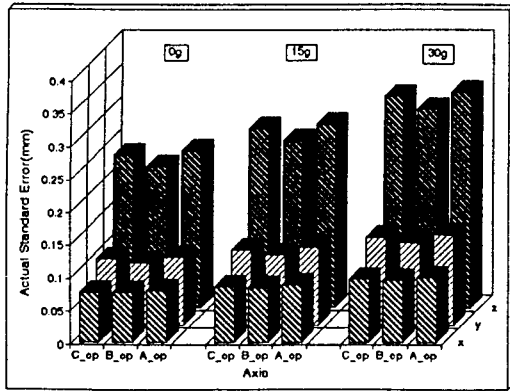


그림 8. 실험오차(camera:P-31, H:2.1 m)

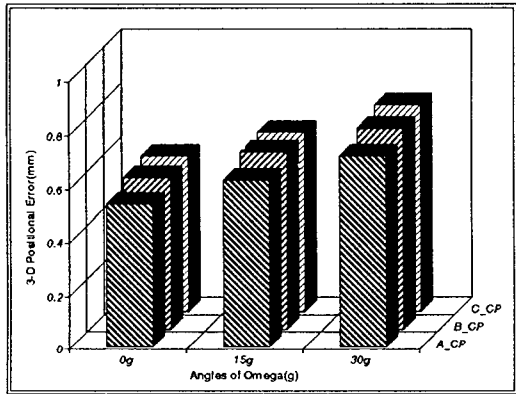


그림 9. 3차원 평균 위치오차(camera:F-801, h:2.5m)

였다.  $B_{cp}$ 의 기준점을 사용하여 해석한 경우는  $A_{cp}$ 의 기준점을 사용하여 해석한 경우보다 X, Y, Z좌표의 오차가 공히 약 10% 감소하는 경향을 보였다. 촬영거리 2.1 m에서 촬영하여 해석한 결과(그림8)는 3.2 m에서 촬영하여 해석한 결과에 비해 낮은 오차분포를 보였으며 X, Y, Z좌표의 오차분포는 유사하게 나타났다.  $B_{cp}$  유

형의 기준점을 사용하여 해석한 실험적 표준오차와  $A_{cp}$  유형의 기준점을 사용하여 해석한 실험적 표준오차를 비교한 결과, 촬영방향(Z)의 정확도뿐 아니라 X축 및 Y축의 정확도가 모두 향상되어짐을 알 수 있었다. Z좌표에 대한 오차가 X, Y좌표의 오차에 비해 크게 나타나는 이유는 기선고도비에 따른 다른 기하학적 상태에 기인하는 것으로 사료된다. 그림9는 35 mm 카메라를 사용하여 2.5 m에서 촬영하여 경사각변화에 따른 기준점별 3차원 위치오차를 도식한 것이다. 촬영거리를 2.5 m로 취한 이유는 측정용 카메라를 사용하여 2.1 m에서 촬영한 대상면과 동일한 대상면을 피복하여 정확도를 비교하고자 한 것으로, 분석 결과 촬영거리 2.1 m에서 측정용 카메라를 사용하여 해석한 결과에 비해 각각의 기준점 유형과 경사각에 있어 2.5배 큰 오차분포로 나타났으며, 기준점 유형에 따른 해석 결과는 측정용 카메라에 의한 해석 결과와 동일한  $B_{cp} > C_{cp} > A_{cp}$  순으로 높은 정확도를 보였다.

15°의 경사촬영을 실시하여 해석한 결과의 표준오차는 수직촬영(0°)의 오차에 비해 각 촬영거리에서  $A_{cp}$ ,  $B_{cp}$ ,  $C_{cp}$ 의 경우 공히 약 14% 증가하여 나타났다. 그러나, 수직사진으로 촬영하여  $A_{cp}$ 분포의 기준점을 사용하여 해석한 결과에 비해 15°의 경사사진으로 촬영하여  $B_{cp}$ 분포의 기준점을 사용하여 해석한 결과의 표준오차는 각 촬영거리에서 공히 약 6.5%의 오차증가율을 보임으로써 경사촬영시 기준점의 공간적 배치가 효과적임을 알 수 있었다. 따라서, 수직사진으로 촬영하고 기복변화가 있는 기준점을 사용하여 해석하는 것이 이상적이거나 대상물에 따라 경사사진이 요구될 때, 평면의 기준점을 이용하는 것보다 기복변화가 있는 기준점을 사용하는 것이 오차증가율을 억제하는데 효과적임을 알 수 있었다.

표 2. 경사각의 변화에 따른 3차원 표준오차

$\omega(^{\circ})$	촬영거리		3.2m(P-31)	2.1m(P-31)	2.5m(F-801)
	기준점				
0	$C_{cp}$		0.467	0.265	0.569
	$B_{cp}$		0.442	0.247	0.539
	$A_{cp}$		0.479	0.272	0.583
15	$C_{cp}$		0.543	0.307	0.663
	$B_{cp}$		0.514	0.288	0.626
	$A_{cp}$		0.557	0.314	0.679

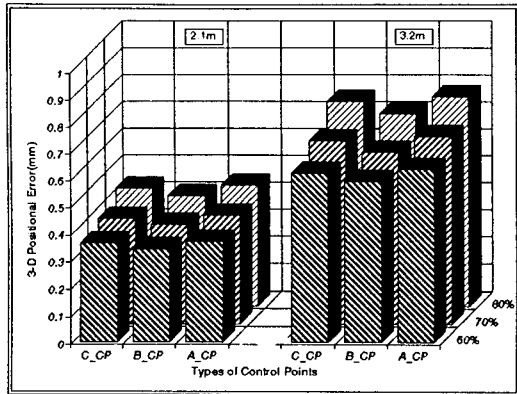


그림 10. 중복도 변화에 따른 3-D 위치오차

그림10은 측정용 카메라를 사용하여 각 촬영거리에서 중복도 변화에 따른 기준점별 3차원 위치오차를 도시한 결과이다. 각 촬영거리에서 공히 중복도 60%, B<sub>op</sub>분포의 기준점을 사용하는 경우가 가장 양호한 결과를 보이고 있다.

### III. 적용 실험

자기부상열차는 전자석의 흡입력에 의해 궤도의 레일 밑으로부터 레일을 끌어당김으로써 차체를 부상시키게 된다. 이때 시험선로는 레일을 끌어당기는 힘, 즉 흡입력을 발생시키는 상대역할을 함으로써 흡입력의 힘과 차체중량을 포함한 전제하중을 지지하게 되고, 열차

의 주행을 위한 리니어모터의 2차측 회전자를 고정하여 부상되어있는 차체가 추진시 원활한 추진력과 추진 방향을 안내하는 역할을 하게 된다. 따라서 시험선로는 전자석의 흡입력과 차량 차체중량을 지지할 수 있도록 견고해야 할 뿐아니라 충분한 흡입력과 추진력의 발생을 위해 가장 이상적인 구조와 형상을 갖도록 구성되어 있다(그림 11). 또한, 항공기와 같이 400~500 km/h의 빠른 속력으로 인입을 위해서는 구조물의 기하학적 안정성이 매우 중요하므로, 이러한 구조물의 건설 및 유지관리를 위해서는 정밀 측정기법의 도입이 절실한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 구조물의 정밀해석을 위해서 다양한 촬영조건에 따른 정확도를 비교·분석하여 최적의 기법을 기초실험을 통하여 도출하였으며, 이를 근거로 C.R.P에 의한 자기부상열차 선로의 3차원 정밀 위치해석을 실시하였다. 그림 11은 기계연 구조내 임시선로로 시공된 자기부상열차 선로의 측면도와 평면도를 도시한 것으로, 시험선로의 구성은 다음과 같다. 자기부상열차 시험선로는 부상력과 차체중량을 지지하는 기초와, 기초위에 설치되는 기둥(column) 및 기둥과 기둥사이를 연결하는 2열의 주 안내 빔, 2열의 주안내 빔 상부 좌우로 레일을 안착시키는 cross arm, 부상 전자석에 의한 부상력을 받는 rail, 차량의 주행에 필요한 추진힘을 발생하는 reaction plate 및 전자석에 자석을 발생시키기 위한 전원 공급시설인 conduct rail등으로 구성되어 있으며 그 단면은 그림 12와 같다. 또한, 시험선로는 양단 레일 중앙의 폭이 2,

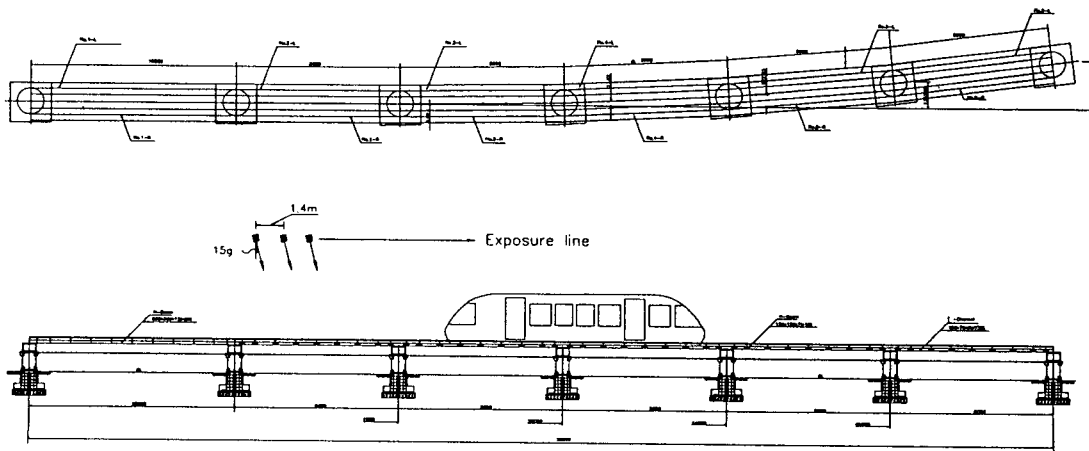


그림 11. 자기부상열차 시험선로

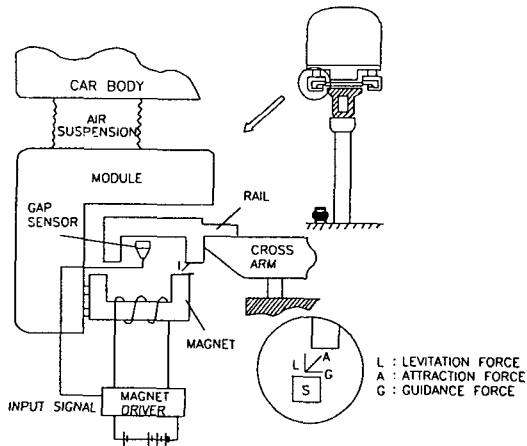


그림 12. 자기부상의 원리

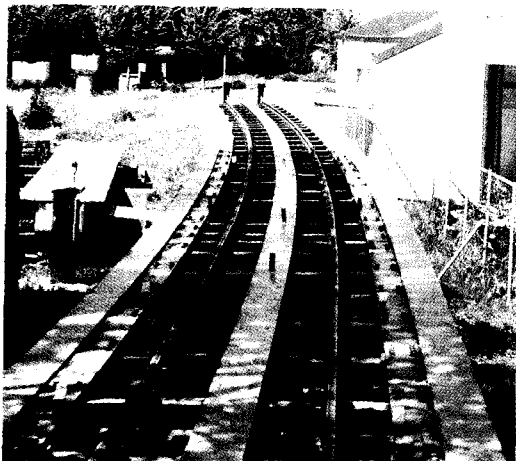
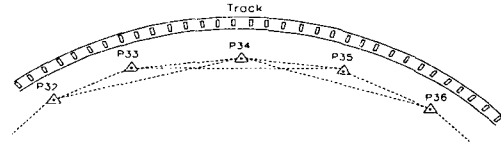


그림 13. 자기부상열차 임시선로

030 mm이고 높이가 지상으로부터 2,000 mm이며, 길이가 50,000 mm인 단열 레일로 되어 있다.

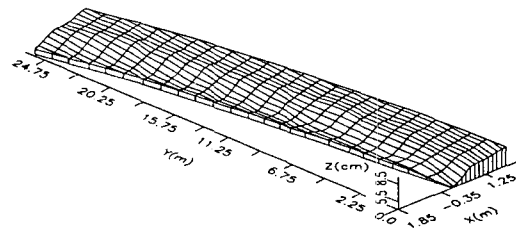
본 실험에서는 자기부상열차의 기능면에서 매우 정교함이 요구되는 빔 양측에 놓인 23 cm 폭의 압연레일에 대해 C.R.P를 적용하여 3차원 위치해석 및 구조물 전반에 대한 분석을 하고자 하였다. 촬영은 많은 사진 매수를 요하는 수직촬영을 피하여 15°의 경사각으로 촬영거리 3.6 m에서 중복도 60%로 촬영하였으며 산란 원은 50 μm로 제한하여 심도의 영향을 고려하였다. 또한, 기선거리는 1.4 m, 한 모델크기는 2.1 m×4.1 m로 22매를 1strip으로 형성하여 촬영하였다. 이는 수직촬영에 의한 사진매수에 비해 약 12% 감소한 양이다. 또한,

Track-parallel polygon



Determination of position net : mean direction error of 0.2mgon(1" theodolite)  
 mean distance error of 2mm(EDM)  
 Positional accuracy of the adjacent stations : standard deviation of 2mm  
 Vertical difference of neighbouring stations : standard deviation of 0.5mm  
 Tolerance of positional accuracy of the beam : Y: 2mm  
 (not as absolute values) X,Z: 1mm

그림 14. 조정망의 설계



X,Y scale = 10-Z  
 unit : X,Y(m)  
 Z(cm)

500kmph gradient : 1% cant : < 12-00-00 gradient : 0.85% cant : 2.75%(1-34-30)

그림 15. 설계선형, 편경사, gradient

4~5점의 기준점과 15점의 미지점이 동일하게 취해지도록 촬영하였으며, 기준점과 미지점은 촬영과 기계좌표 획득에 용이하도록 표면을 약 45°기울여 배치하였다.

그림 13은 실 적용 구조물인 자기부상열차 임시선로이다. 선로의 횡경사는 기동상부에 있는 조절볼트(adjusting bolt)로 조정되며, 시험선로의 최종 조립 및 차후 변형에 의한 rail의 수평 level 조정이 필요할 경우 쉽게 조정할 수 있도록 cross arm의 하단 flange에 조절볼트를 체결하도록 되어 있으며, 이로서 레일 전반에 대한 레벨을 조정할 수 있다. 정밀시공을 요하는 구조물에 대한 정밀해석을 위해서는 그에 대한 제한오차의 범주가 제시되며, 이에 상응하여 해석되어야 한다. 동일 좌표계로서 구조물 전반을 해석하기 위해서는 매우 정밀한 기준점의 설정이 요구되며, 위치 망의 결정은 1"독 데오드라이트의 경우 평균 방향오차 0.2 mgon(4")와 EDM의 경우는 평균 거리오차 2 mm로 한계로 두고 있다.<sup>11)</sup> 또한, 근접점의 위치정확도는 2 mm, 그리고 수직차는 0.5 mm의 표준편차를 한계로 규정하며, 일반적으로 빔 위치정확도의 한계는 Y축은 2 mm, X

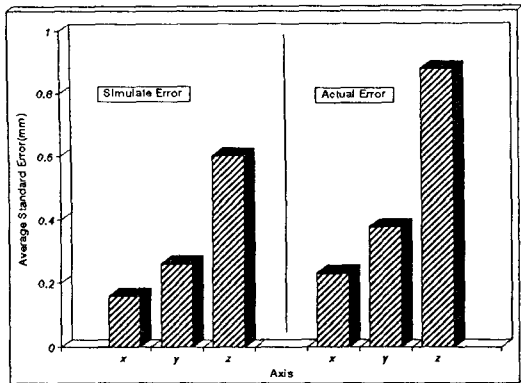


그림 16. 자기부상열차 선로의 평균 표준오차

축과 Z축은 1 mm로 한다<sup>11)</sup>(그림 14). 자기부상열차의 속도가 500 km/h의 경우 gradient는 1%, 편경사는 12° 이내로 규정하고 있어, 위치해석의 정확도 및 레일의 조건들을 검증하고자 하였다.

해석 결과, gradient는 최대 0.85%, 편경사는 최대 1° 34' 30"였으며, 구조물 상면 전면에 대한 설계선형 또한 해석 가능하였다. 그림 15는 이러한 각 지점들의 3차원 데이터를 도시한 결과로서, 곡선 부분의 편경사를 나타낸 것이다. 그리고 선형구조물이 큰 경우는 그림 14와 같은 지상 기준점의 설정과 그에 따른 정밀 망 구성, 그리고 정기적인 정밀측량등이 요구된다.<sup>11)</sup> 규모가 큰 구조물의 해석시 구간별 요구정확도를 획득하고 전체적인 망구성이 필요할 것으로 사료된다.

그림 16은 구조물 상면의 3차원 정밀해석 결과로, 실험적 표준오차와 기하학적 표준오차를 도시한 것이다. 설계선형 방향인 X축은 0.230 mm, Y축은 0.379 mm, 그리고 편경사를 나타내는 Z축에 대해서는 0.878 mm의 실험적 표준오차를 얻었으며, 3차원 위치오차는 0.984 mm로 기대정확도 1 mm내의 해석이 가능하였다. 이로써 설계상의 설계선형, 편경사, gradient의 검증을 효율적으로 할 수 있었다.

#### IV. 결 론

CRP에 의해 선형의 구조물에 대한 정밀 3차원 위치 해석 기법에 관한 실험적 연구결과, 다음의 결론을 얻었다.

1. 평면의 대상물 해석시 기록변화가 있는 기준점을 사용하여 해석한 결과, 평면의 기준점만을 이용하여 해

석한 결과에 비해 Z축의 정확도뿐만 아니라 X축과 Y축에 대한 정확도가 보다 향상됨을 알 수 있었다.

2. 평면해석시 수직사진으로 촬영하고 기록변화가 있는 기준점을 사용하여 해석하는 것이 이상적이나 대상물에 따라 경사사진이 요구될 때, 평면의 기준점을 이용하는 것보다 기록변화가 있는 기준점을 사용하는 것이 오차증가율을 억제하는데 효과적임을 알 수 있었다.

3. 자기부상열차 선로 상면을 촬영거리 3.6m, 경사각 15g로 촬영하여 해석한 결과, X축에서 0.230 mm, Y축에서 0.379 mm, Z축에서 0.878 mm의 표준오차를 얻을 수 있어 기대 정확도 이내의 3차원 위치해석을 할 수 있었으며 설계선형, 편경사 및 gradient의 검증을 효율적으로 할 수 있었다.

4. 오차 보정체계와 촬영시스템 등에 대한 지속적인 연구가 수행된다면, 대형의 선형 구조물에 대한 3차원 정밀 해석에 효율적으로 CRP를 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 姜準默, 李鎭德, "近接寫眞測量의 網構成이 3次元 位置解析에 미치는 影響", 韓國測地學會誌, 제8권, 제1호, 1990, pp.15~22
- 姜準默, 韓承熙, "共線條件에 의한 幾何學的 變形解析에 관한 研究", 韓國 測地學會誌, 제4권 제2호, 1986, pp. 77~87
- 姜準默, 申鳳浩, 李在璣, "C.R.P에 의한 構造物의 安全診斷", 韓國科學財團 目的基礎 研究 最終報告書, 1992.
- 姜準默, 尹熙天, 裴相鎬, "橋梁의 安全診斷을 위한 3次元 變形解析에 관한 研究", 韓國 測地學會誌, 제13권 제 1호, 1995, pp.69~76
- David Reymolds, A.M. ASCE and John A.Dearing, "Measuring building Movement by precise survey", Journal of the Surveying and Mapping Division, Proceeding of the American Society of civil Engineers.
- J.Risager Christensen, "Observation of Displacement of a Bridge Loaded to Failure Using Analytical Photogrammetry", 14th Congress of the International Society of Photogrammetry Hamburg Commission, 1980, pp.129~136.
- John N, Hatzopoulos, "An Analytical System for Close-Range Photogrammetry", Pe & RS, Vol.51, No.10, 1985, pp.1583-1588.
- J.P.Erlandson, S.A.Veress, "Monitoring Deformations of

- Structures", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 41, No.11, 1975, pp.1375~1384.
9. Haim B.Papo, "Deformation Analysis by Close-Range Photogrammetry", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol.51, No.10, 1989, pp.1561~1567.
10. Sanjit K.Ghosh,"Analytical Photogramtry", 2nd ed.Per gamon Press, 1987, pp.177~200.
11. Dr.-Ing.Klaus Heinrich, "Transrapid Maglev System" HESTRA-VERLAG Darmstadt, 1989, pp36~39.