

다중영상해석에 의한 전파망원경의 3차원 정밀측정 The Exact Position Measurement of Radio Telescope by Multi-photo Analysis

강준묵* · 한승희** · 엄대용*** · 이주대****

Kang, Joon Mook · Han, Seung Hee · Um, Dae Yong · Lee, Ju Dae

요 旨

최근 들어 수치사진측량은 산업분야를 비롯한 여러 분야에 그 활용범위가 확대되면서 측정정확도의 향상을 위한 다각적인 연구가 진행되고 있으며 그중 다중영상을 이용한 해석방법은 많은 연구자들로 하여금 관심을 모으고 있다. 그러나 이 방법은 영상획득의 용이성과 높은 해석정확도의 확보가 가능한 반면 처리데이터양의 증가로 많은 처리시간과 노력을 요하게 되므로 처리과정의 자동화를 통한 작업의 효율성 향상을 기하여야 한다. 이에 본 연구에서는 정밀시공이 요구되는 전파망원경에 대해 다중영상을 획득하여 이를 해석하기 위한 영상해석과정의 자동화를 구현하고 대상물에 대한 정밀 측정 및 정확도 향상을 꾀하고자 하였다. 연구결과 정밀한 측정을 요하는 대상물에 대해 다중영상해석을 통한 정확도 향상을 도모할 수 있었으며 이를 토대로 전파망원경의 정밀 측정 및 곡률산출을 수행하여 대상물의 시공 후 조립정확도를 검사할 수 있었다.

ABSTRACT

These days, the application range of digital photogrammetry is being extended actively, so the great variety of research is being progressed about improvement of measurement accuracy. This method can acquire a high analysis accuracy and can acquire easily image. But, so this method requires a much processing time and effort by increasing a data amount, as the automation of processing must be completed for efficiency improvement of processing. In this study, the automation of image processing stage is established for multi-image acquisition and analysis about a radio telescope. Also, the precise measurement and the accuracy on object were intended to be improved. As a result of this study, the accuracy on the object which demands precise measurement was enhanced from multi image analysis, and also the assembly accuracy of the object could be checked by precise measurement and curve fitting.

1. 서 론

수치사진측량은 컴퓨터의 발달과 관련 학문의 발달로 인해 그 활용범위가 크게 확대되고 있으나, 영상해석과정의 자동화를 통한 작업효율성 향상과 정밀측정을 위한 정확도 향상이라는 선결과제를 안고 있다. 최근 들어 이에 관련하여 영상처리 과정의 전산화 및 통합처리 환경 구축을 통한 자동화를 통해 자료처리의 효율성 향상과 자료취득방법 및 해석방법의 다양한 개발을 통해 측정 정확도의 향상을 꾀하고자 하는 연구가 많은 연구자들로 하여금 활

발히 진행되고 있다. 특히, 수치사진측량의 여러 적용분야 중 정밀 측정을 요하는 분야에서는 측정 정확도의 향상을 위한 연구가 다각도로 진행되어 많은 정확도의 향상을 가져왔으며, 그 중 다중수치영상을 이용한 해석방법이 일부 연구자들로 하여금 제시되고 있다. 그러나 다중영상을 이용한 해석방법은 영상획득의 용이성과 높은 해석정확도의 확보가 가능한 반면 처리데이터양의 증가로 많은 처리시간과 노력을 요하게 되므로써 처리과정의 자동화를 통한 작업의 효율성 확보가 선결되어야 한다.

이에 본 연구에서는 측정 정확도의 향상을 위해 다중영상에 의한 해석방법을 도입하고, 이를 효율적으로 처리하기 위해 영상해석과정의 자동화를 구현하므로써 해석의 효율성 향상을 꾀하고자 하였다.

이를 위해 다중영상 해석 알고리즘을 구축하는 한편 수

*충남대학교 토목공학과 교수
**전안공업대학 토목과 부교수
***충남대학교 대학원 박사수로
****충남대학교 대학원 박사과정

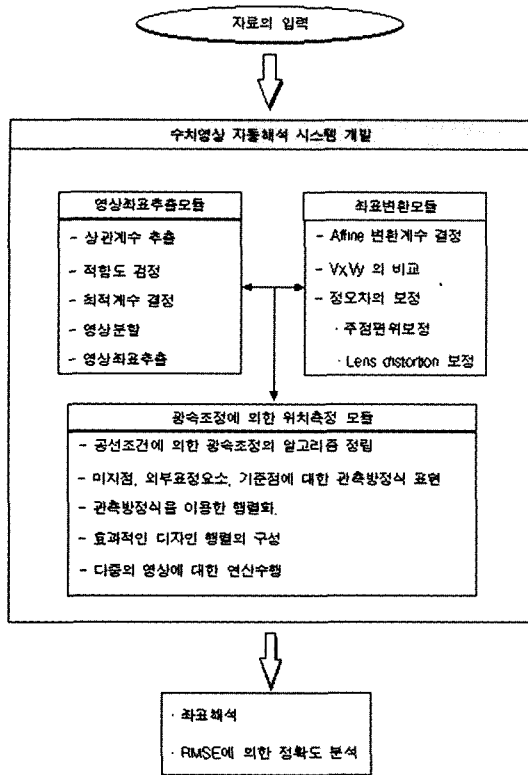


그림 1. 데이터 처리흐름도

치영상의 상좌표 자동측정, 상좌표의 좌표변환, 그리고 광속조정에 의한 정밀측위처리 과정을 모듈로 구성하여 사진측량 공정의 자동화와 체계화를 이루고자 하였다. 그리고 이를 통해 정밀시공이 요구되는 전파망원경에 대한 정밀 위치측정을 실시하고 제시한 처리기법의 활용가능성을 입증하고자 하였다. 또한 대상물에 대한 곡률을 영상으로부터 도출하여 이들에 대한 상대적인 분석을 수행함으로써 정밀시공여부를 평가하고자 하며 전파망원경을 구성하는 piece 라인별 단면분석 등 다양한 공간분석도 아울러 수행하고자 한다.

2. 정밀위치측정 시스템 구축

2.1 다중영상정합모듈

본 연구에서는 다중 영상에 있는 상좌표들을 효율적으로 찾아내기 위해 상관관계 영상정합을 이용하고 화소단위의 위치좌표를 분할하여 부화소의 좌표측정이 가능하도록 하였다. 모든 프로그램은 Visual C++을 이용하여 구현하였고 각 공정은 서로 독립된 모듈로 구성하였다.

수치영상은 왜곡보정이 가능한 고 정밀의 photo scanner (Zeiss photoscan TD)를 이용하여 필름 영상을 수치영상으로 변환하므로써 획득되고, 영상에 포함되어 있는 타겟의 경우 0~255의 밝기값으로 표현되는 수치영상의 일부분을 차지한다. 영상탐색의 기준이 되는 표본(template)은 그림 2와 같이 13×14 pixel의 표준타겟을 지정하였다. 표본 이미지와 영상들과의 각각의 상관계수값들을 추출하고 상관계수 값이 일정크기 이상이 되면 그 곳의 영상좌표를 저장시켜주게 된다.

그림 2는 표본영상에 대한 수치자료를 나타낸 것이다. 이러한 표본을 적용시킬 대상은 전파망원경의 원 영상이기 때문에 행렬의 크기가 3999×3989로 된다. 전체영역에 대한 하나의 행렬식을 구성하여 정합점을 찾기 위해서는 많은 시간이 요구되므로 원 영상의 전구간의 탐색은 피하고 에피플라 기하에 의해 탐색영역(Search Area)을 축소시켜 정합과정의 신속을 기했다. 매칭알고리즘에 있어 상관계수의 값의 변화에 대해 좌표의 추출속도나 정확도가 민감하게 작용한다. 그러므로 상관계수가 지나치게 작거나 클 경우 정확하게 측정되는 영상좌표와 성과가 좋지 않은 영상좌표가 공존하기 때문에 원 영상에 최적화시킬 수 있는 상관계수의 결정이 매우 중요하다. 따라서, 많은 실험 결과를 토대로 데이터를 분석하여 값을 결정하였다. 그림 3은 Correlation Matching에 의해 영상의 타겟점을 자동으로 찾고 이를 저장해주는 모듈을 나타내고 있다. 상관계수가 일정크기 이상이면 이때의 영상좌표는 저장되며 기대치에 도달하지 못할 경우 다시 원 영상으로 접근한다. 프로그램의 수행과정에 사용된 영상은 프로그램 코딩을 단순화하기 위하여 Raw파일의 형태로 입력 할 수 있게 되어있고 이를 위해 그레이로 수치화 되어있는 영상을 상용영상 처리 프로그램을 통해 포맷을 변환시켜 입력파일로 사용하였다.

31	240	253	238	245	235	201	203	214	215	211	25	15
36	25	21	211	212	213	222	241	194	194	37	34	17
199	31	22	36	231	234	231	236	241	27	36	45	201
1682	167	37	28	45	223	241	231	27	26	22	212	221
165	194	197	34	41	46	24	24	26	26	141	231	213
157	164	167	178	27	37	21	24	31	167	168	211	219
199	177	134	168	144	28	23	37	34	181	194	198	224
196	185	188	154	24	22	21	41	39	37	196	197	228
194	146	33	33	35	26	26	222	24	22	26	33	208
201	22	31	34	34	112	241	231	239	46	24	24	207
33	21	34	192	186	184	156	163	185	188	17	16	21
26	26	184	158	177	184	164	193	178	188	191	23	24

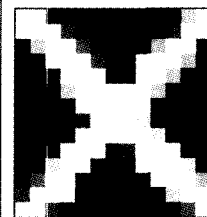


그림 2. template image의 수치데이터

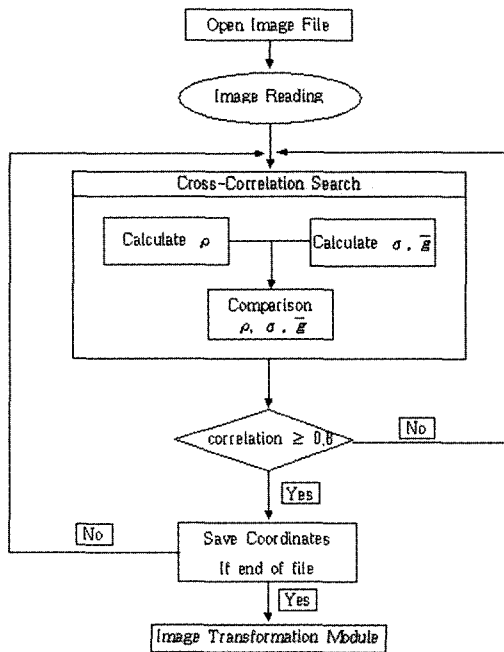


그림 3. Correlation Matching Flow Chart

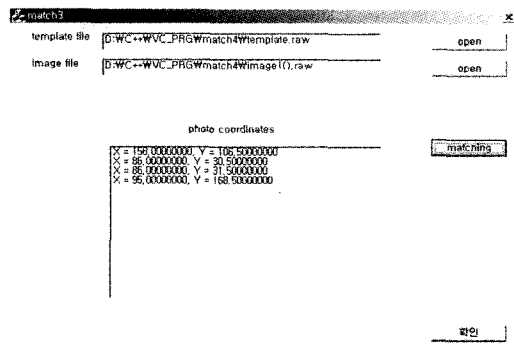


그림 4. matching program

2.2 부등각 사상변환 모듈

한 장의 영상에서 총 5개의 지표를 사용하여 좌표변환을 실시하였다. 좌표변환 방법에는 여러 가지가 있는데, 필름 상태의 영상을 수치형태의 영상으로 전환하는 과정에서 종축과 횡축에 서로 다른 비율의 왜곡이나 신축, 신장이 발생하기 때문에 이러한 불 균일한 왜곡을 효과적으로 보정하기 위해서 부등각사상변환(affine transformation)식을 사용하였다. 프로그램의 구현에 있어서는 사용자의 편의를 위해 위해 모든 데이터들을 텍스트 파일의 형태로 입출력하였으며, 측정용 카메라의 지표 데이터를 입력해 각각

의 변환계수 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ 를 계산하고 구해진 계수들에 의해서 변환된 영상좌표에서의 지표좌표와 카메라의 규격화된 지표좌표와의 잔차량을 V_x, V_y 로 표현하여 좌표 변환의 정확도를 검증할 수 있게 하였다. 프로그램 수행과정의 편의성을 위해 수식을 행렬의 형태로 표현해 프로그램을 구성하였다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & X_2 & Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_2 & Y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

식 (2-1)에서 A행렬은 영상의 지표좌표에 대한 행렬구성이고 X행렬은 부등각 사상변환계수, 식 (2-2)의 L은 변환할 영상좌표의 기준점 행렬, V는 잔차 행렬을 나타낸 것이다.

$$L = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} v_{x_1} \\ v_{y_1} \\ v_{x_2} \\ v_{y_2} \\ \vdots \\ \vdots \\ v_{x_n} \\ v_{y_n} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

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

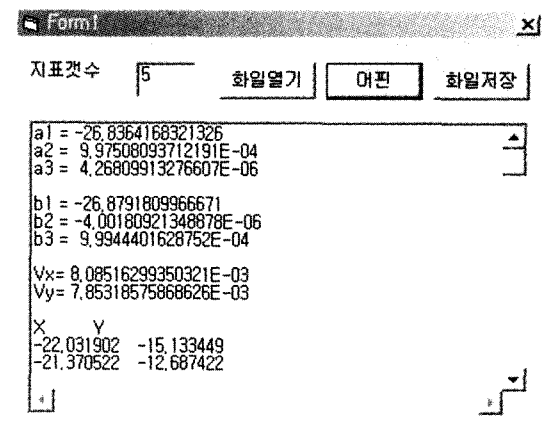


그림 5. 부등각 사상변환 모듈

프로그램 구성을 위해 입출력파일은 텍스트파일을 사용하였고, 식 (2-3)에서의 A 행렬에 대한 역행렬을 취하므로써 각 변환계수를 결정하였으며, 이 변환계수를 이미 얻어진 모든 영상좌표에 대입하므로써 좌표변환을 실시하였다. 그림 5는 부등각 사상변환에 대한 모듈을 나타낸 것이다.

2.3 좌표해석모듈

사진측량학에서 대상물의 3차원 위치를 결정하기 위해서는 두장 이상의 중복촬영이나 수렴촬영을 통해 좌표의 해석이 가능하다. 영상의 상점과 지상의 기준점들과의 기하학적 조건은 한 점에서 수렴한다는 공선조건의 이론을 이용해 좌표를 해석할 경우 두 장의 사진으로 해석했을 때 상대적으로 정확도가 떨어진다. 따라서 다중영상에 의해 공역점들을 추출하고 이를 공선조건식에 대입하므로써 고정밀도의 좌표해석이 가능하게 된다. 다중영상에 대해 적용시킬 경우 구성되는 행렬의 크기가 상대적으로 커지게 되므로 연산에 있어 효과적인 알고리즘의 구현이 필요하다. 이에 영상좌표와 지상 기준점을 이용해 공선조건식에 의한 관측방정식과 지상 기준점에 의한 관측방정식, 외부표정요소에 의한 관측방정식을 하나의 통합적인 행렬(Design matrix)로 구성하고 이 행렬에 대한 역행렬을 이용하여 초기값에 대한 잔차량을 구하였다. 그리고 이값을 초기값에 다시 보정해 주는 반복과정을 거쳐 잔차량이 허용범위 이하가 될 때 프로그램의 수행이 종료될 수 있도록 구성하였다. 다음에 나타낸 식은 광속조정식을 풀기 위한 관측방정식의 일반적인 표현을 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} V \\ \dot{V} \\ \ddot{V} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{B} & \ddot{B} \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \\ \dot{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon \\ \dot{C} \\ \ddot{C} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

$$\bar{V} + \bar{B}\Delta = \bar{C} \quad (2-5)$$

$$(\bar{B}^T \bar{W} \bar{B})\Delta = \bar{B}^T \bar{W} \bar{C} \quad (2-6)$$

$$\Delta = (\bar{B}^T \bar{W} \bar{B})^{-1} \bar{B}^T \bar{W} \bar{C} \quad (2-7)$$

여기서 식 (2-7)에 의해서 구해진 Δ 값은 외부표정요소에 대한 수정량이므로 Δ 를 외부표정요소에 보정해 주고 전방교회법에 의한 미지점의 좌표를 찾는 방법을 반복하므로써 정확한 좌표를 해석할 수 있다. 프로그램에서의 자료의 입력은 각 영상의 영상좌표를 txt형 개개의 파일로 관리하고 이를 파일단위로 입력하였으며, 연산의 수행과정에서는 다중의 영상파일을 하나의 행렬로 구성해서 결과값을 산출하였다. 그림 6은 광속조정 모듈의 실행 과정

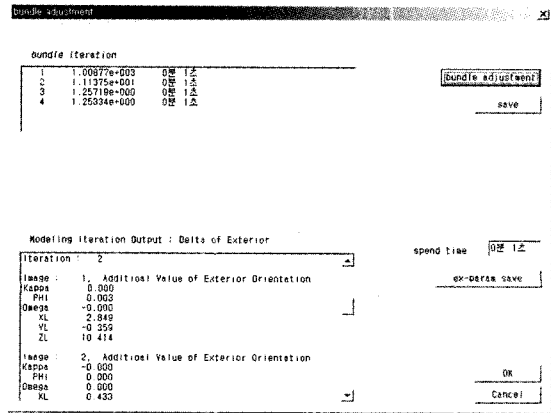


그림 6. 광속조정 모듈

을 나타낸 것이다.

이와 같이 근점사진측량에 의한 정밀 위치해석에 관계되는 과정을 각 모듈별로 프로그램화 하므로써 기존의 수작업에 의한 분석의 번거로움을 줄였으며, 수작업에 의한 정확도의 불균형을 해결하였다.

3. 기초실험 및 실적용

3.1 최적해 도출을 위한 기초실험

본 연구에서는 그림 7과 같이 현재 서울대학교 천문우주학과에서 보유하고 있는 전파망원경을 실험대상으로 선정하였다. 천체로부터 복사되는 전파를 관측하여 영상으로 변환하는 이 장치는 원반형 망원경의 지름이 6m나 되기 때문에 여러 개의 piece(88개)들을 조립해서 실제 시공을 하는

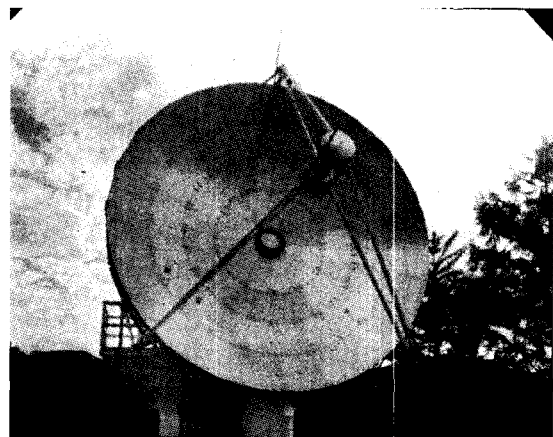


그림 7. 전파망원경 실물

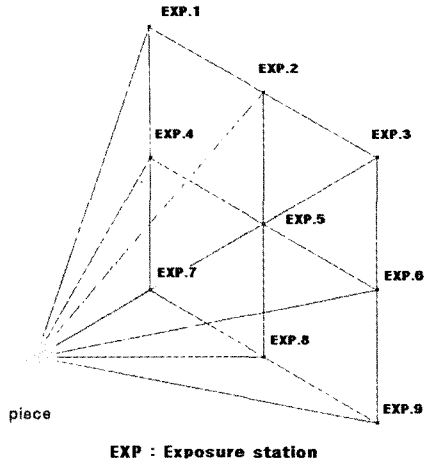


그림 8. piece sample 촬영계획도

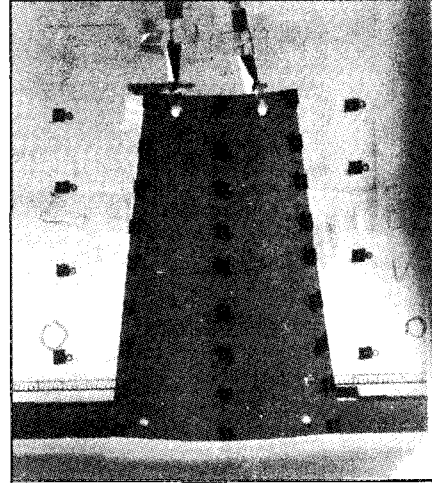


그림 9. Piece의 기준점/타겟 배치양상

데, 이 전파망원경의 성능을 좌우하는 것이 각각의 piece를 조립할 때의 정밀도이다. 그러므로 실제 전파망원경의 시공 중과 시공후 piece간의 연결부에 대한 정밀위치를 해석하고 이를 이용한 점검 및 재조정이 매우 중요한 의미를 지닌다.

이러한 연구를 수행하기 위해 우선 여러 개의 전파망원경 piece중 하나의 piece를 선택하여 정확도 유지를 위한 최적의 촬영조건을 도출하고 허용정확도 내에서의 측정가능성 여부를 판단하였다. 그림 8은 실제 대상물에 대해 적용하기 위한 기초실험으로 전파망원경의 일부분인 한 장의 piece에 대한 촬영계획도이다. 국부적 해석에서는 수렴촬영법이 일반적으로 정확도가 높으므로 수렴촬영을 실시하였다.

총 9개의 촬영점에서 촬영을 수행하였고, 각 촬영거리는 중앙부에서 2.5m이며 양쪽측면에서는 약 3.5m이다. 양쪽 측면에서의 piece에 대한 촬영각은 각각 -45°, +45°로 각각은 모델로 형성한다고 가정했을 때 수렴각이 90°를 이룰 수 있도록 구상하였으며, 중앙의 촬영점에서 상하로 ±1m 씩 높이 차를 주어 촬영을 하였다. 영상의 획득에 이용한 촬영시스템으로는 대상물의 수치사진을 얻기 위해 Rollei社의 측정용 카메라(Rollei6008)를 사용하였고, 수치영상으로의 변환을 위해 photo scanner를 사용하여 수치데이터를 얻었다. 기준점은 총 9점을 배치하여 이용하였으며, 기준점좌표 측정은 Kern社의 1" 독 데오도라이트 DKM2-A를 이용해 삼각수준측량을 실시하였다. 그리고 기준점과 미지점에 사용된 타겟은 공액점의 정합과정에서의 효율성을 높이기 위해 십자모양으로 자체 제작하였다. 타겟의 배치는 총 24점을 3열 등간격으로 배치하였다.

결과에 대한 비교 분석을 위해 정밀 좌표측정기인 콤파레이터를 이용해 1 μ m의 정도로 상좌표를 측정하였고, 자동정합의 방법으로 상좌표를 추출하여 두 가지 성과에 대한 좌표해석을 실시하였으며, 평균표준오차를 비교함으로써 상대적인 해석의 정확도를 판단하였다.

PDA 성과에 의한 좌표해석결과 X, Y좌표성과는 40 μ m의 정확도를 보였으나 Z좌표의 경우 비교적 큰 표준오차를 보였다. 반면, 본 연구에서 자동정합기법에 의해 해석한 결과 X, Y, Z 좌표성과는 공히 0.04mm이내의 비교적 고른 정확도 분포를 보였으며, PDA측정성과에 의한 해석결과

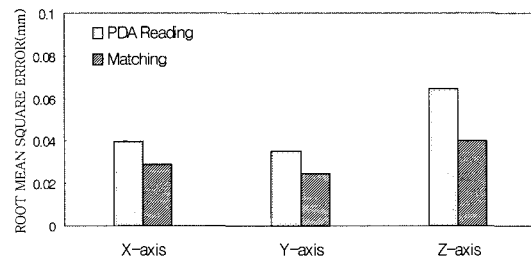


그림 10. 수동과 자동정합의 정확도 비교

표 1. 측정방법에 따른 3차원 정확도의 비교 (단위 : mm)

Axis	PDA Reading	Matching
X	0.0397	0.0291
Y	0.0351	0.0248
Z	0.0642	0.0401

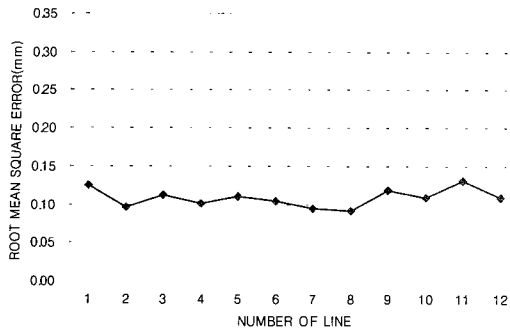


그림 11. 미지점 해석정확도(라인별)

표 2. 각 라인별 곡률 및 정확도 (단위 : mm)

Line No.	RMSE	곡률반경	곡률
Line1	0.1250	6118.243	0.0001634456
Line2	0.0964	6121.590	0.0001633563
Line3	0.1121	6119.145	0.0001634215
Line4	0.1010	6122.630	0.0001633285
Line5	0.1101	6126.512	0.0001632250
Line6	0.1045	6118.503	0.0001634387
Line7	0.0952	6123.940	0.0001632936
Line8	0.0912	6120.099	0.0001633960
Line9	0.1178	6121.941	0.0001633469
Line10	0.1095	6119.853	0.0001634026
Line11	0.1315	6120.422	0.0001633874
average	0.1086	6121.171	0.0001633675

와 비교할 때 10% 향상된 결과를 도출할 수 있었다.

그림 10은 해석방법별 정확도를 나타낸 것이고 표 1은 각 축에 대한 평균표준오차를 나타낸 것이다.

표 2는 타겟이 배치되어 있는 라인별로 각각 평균표준오차를 구하고 이에 대해 곡률 산출 결과를 비교한 것이고 이를 도시한 것이 그림 11이다. 해석결과 각 라인의 곡률의 편차가 허용치인 0.0000003안으로 수렴하였다.

3.2 전파망원경의 정밀측정 및 정확도 분석

기초실험을 통하여 도출된 해석 결과를 바탕으로 이미 적용했던 촬영조건 및 해석방법을 실제 전파망원경에 동일한 방법으로 적용하였다. 그림 12와 같이 실제 망원경은 지름이 6m인 대형 구조물이기 때문에 보다 정밀한 해석을 위해 망원경의 전면을 4구역으로 나누어서 촬영을 하였다. 각각의 구역 안에서는 다시 12개의 촬영점을 선정해서

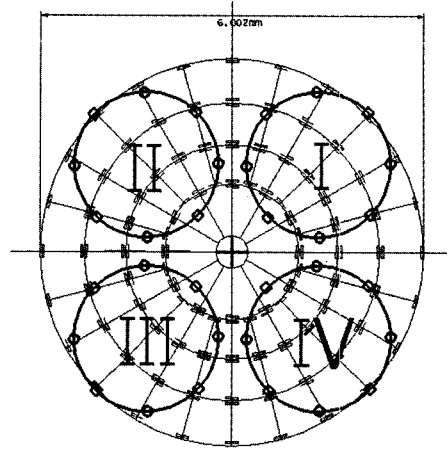


그림 12. 전파망원경 촬영계획

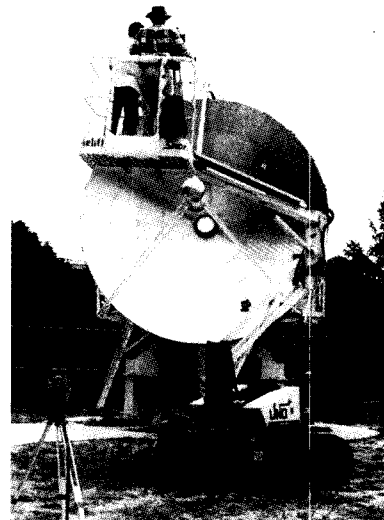


그림 13. 촬영광경

한 구역당 12장씩 총 48장의 영상을 얻었다. 각 촬영점에 서는 해석면에 대한 직각촬영을 고려하여 구역의 중앙부를 향해 Cone모양으로 촬영을 하였다. 타겟은 해석의 용이성과 곡률해석을 고려하여 piece 접합라인에 정렬하여 배치하였고, 각각의 piece 모서리에 300개의 미지점을 선정하였다. 그리고, 총 52개의 기준점을 망원경 표면에 균등 분포시킴으로써 해석상의 안정성을 도모하였다. 그림 12는 실제 전파망원경에 대한 촬영계획을 도시한 것이다.

그림 13은 실제 전파망원경의 촬영 장면이고 그림 14는 촬영된 영상이다. 촬영시 해석의 정확도를 높이기 위하여

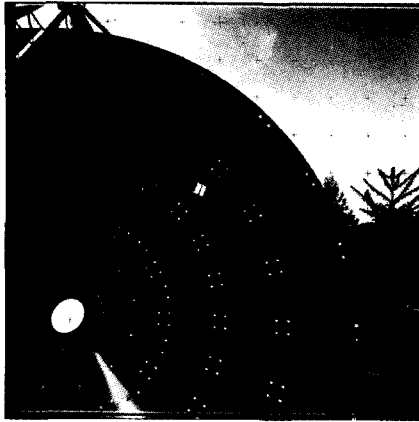


그림 14. 촬영영상

실물촬영시 망원경을 수직으로 고정시키고 카메라의 광축과 전파망원경 표면을 직각으로 유지하면서 각 구역에서 수렴촬영을 통해 영상을 얻었다. 촬영된 영상을 수치화 하는 과정에서 오차를 최소화하기 위해 항공사진용 Zeiss photoscan TD를 사용하였으며, 화소크기를 7.5 μm 로 설정했기 때문에 한 장의 영상에 대한 파일크기가 지나치게 크게 설정되는 것을 방지하기 위해 grayscale의 형태로 스캔하여 이용하였다.

3.2.1 수치영상해석

자동정합으로 얻어진 영상점들은 카메라 데이터에 의해 주점보정 및 렌즈왜곡 보정을 실시하였고 좌표변환은 부등각 사상 변환식을 이용, 측정된 지표들과 카메라 데이터를 비교하여 잔차량을 구해본 결과 V_x 와 V_y 가 0.02mm 이내로 계산되었다. 좌표변환에 필요한 지표측정이 잘못됐을 경우 잔차량이 매우 크게 나타나게 되므로 사전에 영상 해석시에 발생 할 수 있는 문제점을 찾아내고 이에 대처할 수 있었다. 또한 잔차량의 크기에 의하여 좌표변환상의 정확도를 예측 할 수 있었다. 표 3은 각각의 영상들에 대한 좌표변환 잔차량들을 보여주고 있다. 그림 15는 좌표 변환 후의 각 구역별 잔차량을 도시한 것이다. 실제로 정밀좌표를 해석하는 과정에서 기계좌표를 영상좌표로 변환하는 과정에서 많은 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 잔차량이 최소가 되어야 하는데, 각 구간 평균값이 0.02mm 이내로 측정되었기 때문에 좌표변환에 대한 정확도를 유지 할 수 있었다.

기준점 측량은 DKM2-A 1초독 theodolite를 이용해 삼각수준측량을 실시하였고, 기선거리는 반복 측정하여 평

표 3. 부등각 사상변환결과 (단위 : mm)

영상 번호	V_x	V_y	영상 번호	V_x	V_y
1--1	0.071114	0.037745	3--1	0.010519	0.002906
1--2	0.047737	0.034671	3--2	0.005308	0.002791
1--3	0.050926	0.018233	3--3	0.008098	0.004524
1--4	0.018100	0.017102	3--4	0.021669	0.010721
1--5	0.041836	0.027321	3--5	0.017266	0.009490
1--6	0.018019	0.014531	3--6	0.015216	0.012190
1--7	0.050926	0.018233	3--7	0.016165	0.009438
1--8	0.038966	0.029199	3--8	0.013422	0.003746
1--9	0.009919	0.017460	3--9	0.005107	0.012547
1--10	0.085894	0.051659	3--10	0.008685	0.004918
1--11	0.050069	0.021239	3--11	0.005525	0.001901
1--12	0.045329	0.022002	3--12	0.016335	0.004509
2--1	0.014837	0.004732	4--1	0.011389	0.008467
2--2	0.029823	0.011502	4--2	0.006849	0.005516
2--3	0.002350	0.006398	4--3	0.007104	0.010102
2--4	0.010491	0.003042	4--4	0.002323	0.005275
2--5	0.008083	0.008807	4--5	0.010344	0.006321
2--6	0.006302	0.010539	4--6	0.012482	0.003858
2--7	0.002302	0.007870	4--7	0.007573	0.006217
2--8	0.007078	0.011583	4--8	0.013906	0.005499
2--9	0.006016	0.006297	4--9	0.015298	0.005713
2--10	0.004544	0.006817	4--10	0.008075	0.003592
2--11	0.008085	0.007853	4--11	0.006846	0.011001
2--12	0.007174	0.011038	4--12	0.008950	0.003912

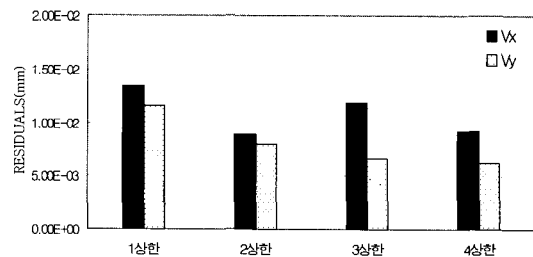


그림 15. 구역별 좌표변환결과

균을 취해 9.002m로 설정하였다. 이렇게 얻은 기선거리와 삼각수준측량자료를 이용하여 기준점에 대한 좌표를 계산하였고 기준점 좌표의 정확도는 0.001mm로 간주하고 모든 미지점들에 대한 좌표해석을 실시하였다.

3.2.2 수치영상에 의한 공간분석

3.2.2.1 위치정확도 분석

각 분할구역 당 수렴촬영방법으로 총 12장씩의 영상을 획득하고 이들 영상에 있는 상점들을 공선조건에 의한 광속조정의 방법으로 대상물에 대한 3차원 위치를 해석하였다. 좌표해석과정에서 사용된 기준점 좌표의 정확도는 1 μ m로 간주하고, 해석하고자 하는 미지점들의 영상좌표 x,y의 표준편차는 3 μ m로 하여 표준편차 제곱에 반비례하여 경중률을 부여하였다. 이로서 미지점들에 대한 3차원 좌표를 산출하였고, 이들에 대한 평균 기하학적 표준오차(Average Simulated Errors : A.S.E) 와 단위 경중률 표준오차(The

Standard Error of Unit Weight : S.E.U.W) 및 평균 실패준 오차(Average Actual Errors : A.A.E)를 도출하였다. 위치 해석결과 각 점들에 대한 위치해석 정확도를 나타내주는 A.S.E 값이 X, Y 는 0.3mm 이내의 값으로 수렴하였고, Z는 0.8mm 이내의 값으로 수렴하였다.

구역별 좌표해석 결과를 비교해 보면 X, Y축에 비해 Z축의 오차량이 크게 나타나고 있는데 이는 사진측량에서의 오차량이 광축 방향으로 가장 크게 발생하기 때문이며, 촬영당시의 기준점 좌표계의 설정에 대해 광축 방향을 Z축으로 정하고 기준점 측정 및 좌표 해석을 했기 때문이다.

또한 전파망원경 표면을 따라 배치된 타켓에 대해 라인 성분으로 구분하여 최상단의 라인을 1번으로 설정해서 약 15° 간격으로 24개의 라인에 대해 각점들의 평균오차 및 기하학적인 오차를 표현하였고 각 라인별 오차량을 비교 하므로써 전파망원경의 조립상태에 대한 대칭성에 대해 점검 할 수 있었다. 표 5는 24개의 라인에 대한 해석좌표들의 평균기하학적 표준오차와 단위 경중률 표준오차를 나타낸 것이다.

각 라인별로 오차량을 분석해 본 결과 구역당 오차량의 크기에 비해 적게 나오는 것을 알 수 있었고, 이러한 분석으로부터 미지점 전체의 정확도에 비해 곡률 측정방향으

표 4. 각 구역별 오차

상한	A.S.E (mm)		S.E. U.W	A.A.E (mm)			
	α_s	α_y	α_u	α_a	α_y	α_z	
1상한	0.2000	0.2037	0.6383	0.988	0.1977	0.2013	0.4075
2상한	0.2856	0.2809	0.7285	1.243	0.3550	0.3492	0.5307
3상한	0.1931	0.1995	0.5522	1.506	0.2908	0.3004	0.3049
4상한	0.1989	0.2032	0.7279	0.777	0.1545	0.1579	0.5298

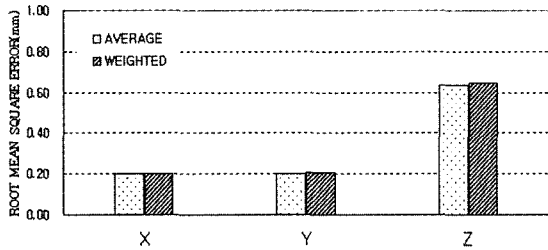


그림 16. 1상한 좌표해석결과

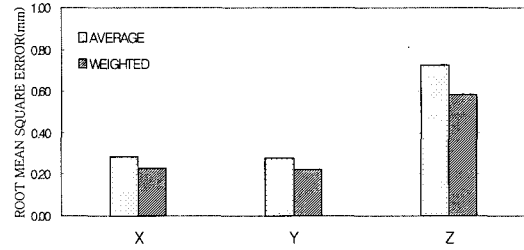


그림 17. 2상한 좌표해석결과

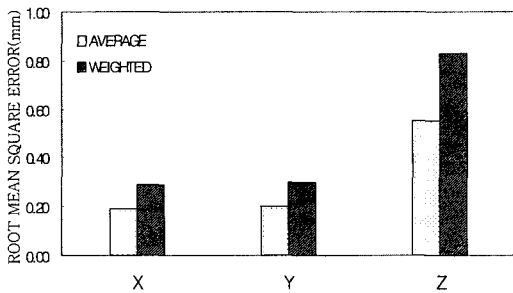


그림 18. 3상한 좌표해석결과

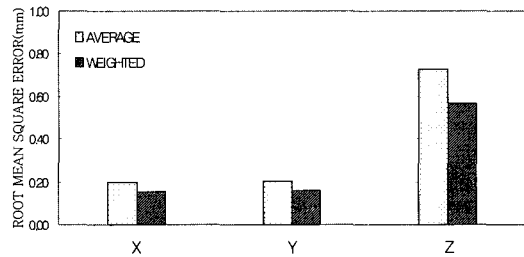


그림 19. 4상한 좌표해석결과

표 5. 라인별 해석정확도

Line No	A.S.E (mm)			S.E. U.W	A.A.E (mm)		
	σ_{x_s}	σ_{y_s}	σ_{z_s}	σ_u	σ_{x_a}	σ_{y_a}	σ_{z_a}
1	0.176	0.153	0.522	0.988	0.174	0.027	0.014
2	0.221	0.193	0.607	0.988	0.218	0.042	0.026
3	0.210	0.200	0.615	0.988	0.207	0.041	0.026
4	0.189	0.167	0.604	0.988	0.187	0.031	0.019
5	0.231	0.224	0.679	0.988	0.228	0.051	0.035
6	0.211	0.211	0.650	0.988	0.209	0.044	0.029
7	0.203	0.205	0.616	1.243	0.252	0.052	0.032
8	0.201	0.242	0.673	1.243	0.250	0.061	0.041
9	0.193	0.210	0.666	1.243	0.240	0.050	0.034
10	0.187	0.225	0.692	1.243	0.233	0.052	0.036
11	0.207	0.239	0.675	1.243	0.257	0.061	0.041
12	0.238	0.220	0.668	1.243	0.295	0.065	0.043
13	0.207	0.190	0.675	1.106	0.229	0.044	0.029
14	0.196	0.194	0.596	1.106	0.217	0.042	0.025
15	0.210	0.158	0.514	1.106	0.232	0.037	0.019
16	0.185	0.181	0.621	1.106	0.204	0.037	0.023
17	0.170	0.157	0.547	1.106	0.188	0.030	0.016
18	0.183	0.210	0.651	1.106	0.203	0.043	0.028
19	0.167	0.172	0.533	0.807	0.134	0.023	0.012
20	0.199	0.200	0.629	0.807	0.160	0.032	0.020
21	0.170	0.206	0.581	0.807	0.137	0.028	0.016
22	0.193	0.196	0.615	0.807	0.156	0.031	0.019
23	0.168	0.201	0.482	0.807	0.135	0.027	0.013
24	0.180	0.210	0.611	0.807	0.145	0.031	0.019

로의 오차의 범위가 크르다는 것을 확인할 수 있었다. 상대적으로 위치에 대한 정확도 보다 곡률에 대한 정확도가 높다는 것을 알 수 있었다. 또한 서로 대칭이 되는 라인별 비교에서 서로 마주보고 있는 위치정확도 값의 차가 매우 작게 나타나므로 허용정확도 내에 대칭성을 검증할 수 있었다. 그림 20, 21, 22는 라인별 해석정확도를 X, Y, Z에 대해 도시한 결과이다.

전파망원경 표면에 대한 균일한 정도의 조립은 기기의 성능을 좌우하는 매우 중요한 요소인데, 이와 같이 각 라인별 분석을 통해 허용범위 내에서 균일한 정도로 조립되어 있다는 것을 검증 할 수 있었다. 또한 도출된 오차량을 이용해 실제 대상물에 대하여 추후 수정보안이 가능 할 수 있도록 자료를 제공하고, 곡률분석에 대한 신뢰도를 높일 수 있었다.

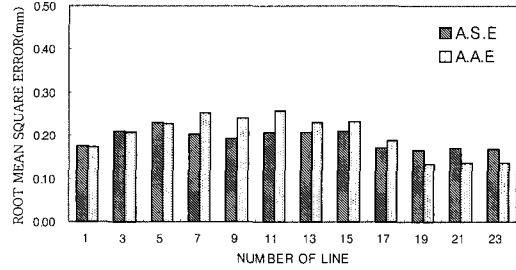


그림 20. 라인별 해석정확도(X-axis)

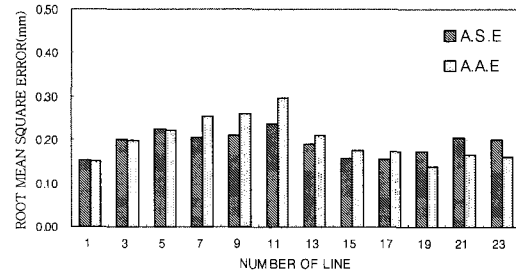


그림 21. 라인별 해석정확도(Y-axis)

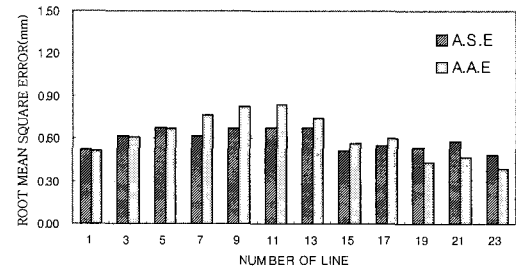


그림 22. 라인별 해석정확도(Z-axis)

3.2.2.2 곡률분석

전파망원경 설계당시의 곡률은 다음 식에서 보는바와 같이 면의 방정식을 이용해 제작되었다.

$$Z = \frac{1}{4 \times 100.8} (X^2 + Y^2) \quad (3-1)$$

식 (3-1)의 구면방정식 의해 설치된 전파망원경의 곡률을 점검하기 위해 망원경 조립상태의 균일도를 점검하였다. 각 라인별로 해석된 3차원 좌표를 이용해 가장 근접하는 곡선을 형성하고 이 곡선들이 가지는 자체 곡률들을 비교하므로써 조립할 당시의 각 방향에 대한 대칭성을 비교 검토하였다. 그림 23은 MicroStation에서 좌표를 분석하여

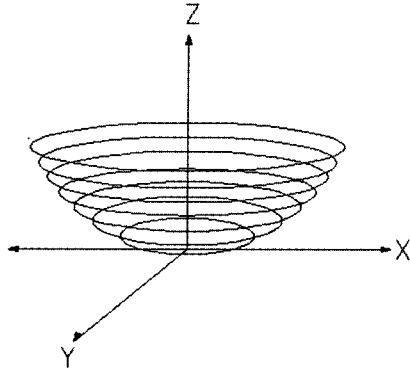


그림 23. 면방정식 도시



그림 24. Radius Extract

표 6. 곡률비교 (단위 : mm)

Line No.	Residuals	Line No.	Residuals
1	0.231	25	0.215
3	0.218	28	0.201
5	0.231	31	0.202
7	0.218	34	0.221
9	0.23	37	0.223
11	0.205	40	0.217
13	0.236	43	0.231
Average	0.224143	Average	0.215714

유사곡선을 찾아내고 이 곡선에 대한 곡률반경을 도출하는 과정을 나타낸 그림이다.

이와 같이 얻어낸 곡률반경에 대해 전파망원경 전 구역을 7개의 라인으로 구분하여 라인별 잔차량을 비교하였다. 그 결과 곡률의 잔차량이 0.25mm 이내였으며 대응하는 라인별 잔차량은 0.02mm 이내로 나타남으로써 허용정확도를 검증할 수 있었다. 그림 24는 각 라인과 그에 대응하는 반대편 라인에 대한 각각의 곡률반경에 대해 비교한 그림이다.

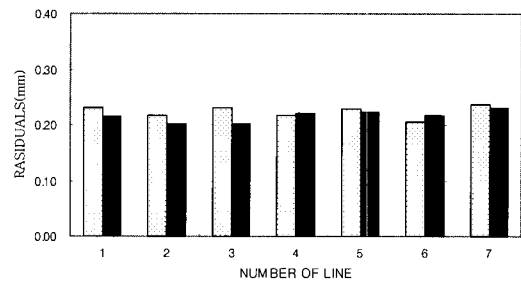


그림 25. RESIDUALS OF RADIUS

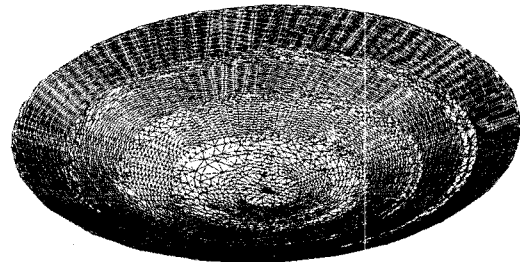


그림 26. Tin 형성

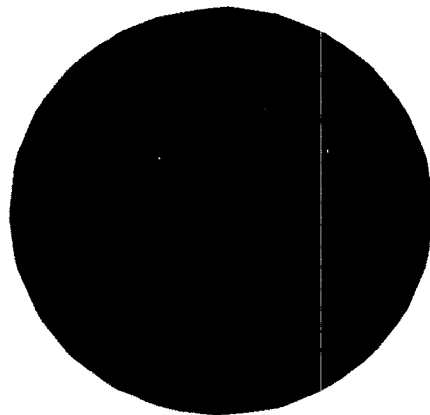


그림 27. 모델링

3.2.2.3 모델링에 의한 시각적 분석

정밀하게 해석된 3차원 좌표를 이용해 수치 모델인 DTM 을 그림과 같이 구축하였다. 불규칙 삼각망을 이용해 구성된 TIN 모델을 이용하여 대상물에 대한 3차원 모델링 뿐만 아니라 다양한 분석이 가능한 그리드 모델로의 변환을 위한 근간으로 사용하였다.

그림 26은 이미 해석한 3차원 점데이터를 이용하여 TIN 망을 구성한 것이며, 그림 27은 이를 모델링하여 나타낸 것이다.

이와 같은 다양한 시각적 분석을 통해 실제 대상물에 매우 근접하는 수치모델을 생성할 수 있었고, 정확도를 비교·분석할 수 있었을 뿐만 아니라 실제시공에 요구되는 정확도에 근접한 결과를 도출할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 정밀측정을 요하는 대상물의 해석정확도의 향상과 해석 효율성 확보를 위해 다중영상의 정합기법을 적용하고 처리과정의 자동화를 구현한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 정밀측정을 요하는 대상물의 해석을 위해 다중영상을 이용한 정합기법을 적용함으로써 측정정확도의 향상을 기할 수 있었으며 대상물 전면에 대해 X, Y 는 0.3mm 이내, Z는 0.8mm 이내의 균일한 성과를 얻어 조립정확도를 점검할 수 있었다.

2. 처리과정의 자동화를 통한 자료처리의 체계화를 이루었으며 처리시간의 단축과 사용자의 개입을 최소화 하므로써 작업의 효율성을 높일 수 있었다.

3. 전파망원경에 대한 해석 결과를 이용하여 piece의 각 라인별 곡률을 산출하고 이를 비교·분석함으로써 전체적인 조립의 균형 및 정밀 시공여부를 판정할 수 있었다.

참고문헌

1. 강준목, 송승호, 배상호, "윈도우 시스템 체계를 이용한 수치 사진측량기법 구축", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제III-2호, pp. 325-334, 1999.
2. 강준목, 배연성, 주영은, 엄대용, "CCD 영상획득 시스템에 의한 피사체의 뒀변형 해석", 대한토목학회 학술발표회 논문집(IV), pp.417-420. 1999.
3. 한승희, "3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표획득에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제15권 6호, pp. 1721-1930, 1995.
4. 강준목, 배상호, "Centroid Methods에 의한 Sub-pixel 측정정확도 향상", 한국측량학회, 제15권, 제2호, pp. 245-252, 1997.
5. K.B.Atkinson, "Close Range Photogrammetry and Machine Vision" 1996. pp. 217-255.
6. Baltasvias, E.,1991. Multiphoto geometrically constrained matching. PhD Thesis. Mitteilungen 49, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich. 221 pages.
7. Ebner, H. and Heipke, C., 1998. Integration of digital image matching and object surface reconstruction. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27(B11): 534-545.
8. Kempa, M. and Schlueter, M., 1993. DEM evaluation by an operator and fcets stereo vision: acomparison based on close range imagery. In A. Gruen and Kahmen(Eds): Optical 3-D Measurement Techniques 2. Wichmann Verlag, Kalrsrue. 624pages:502-509.
9. Maas, H-G., 1992. A high-speed solid state camera system for the acquisition of flow tomography sequences for 3-D least squares matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29(5): 241-249.
10. S. F. El-Hakim, "Photogrammetric Measurement of Microwave Antennae", PE & RS, Vol. 51, No. 10, pp. 1577-1581, 1985.

(2002년 5월 28일 원고접수)