

# Photogrammetry 기법을 활용한 MSC 설치면의 정밀 측정

우성현\*, 김홍배\*\*, 문상무\*\*\*, 임종민\*\*\*\*

## Flatness Measurement of MSC Interface Surface by Photogrammetry

Sung-Hyun Woo\*, Hong-Bae Kim\*\*, Sang-Mu Moon\*\*\*, Im-Jong Min\*\*\*\*

### Abstract

Photogrammetry, as its name implies, is a 3-dimensional coordinate measuring technique that uses photographs as the fundamental medium for metrology. In the last few years the accuracy of photogrammetry has increased dramatically thanks to the rapid advance of digital camera manufacturing technique. This paper discusses photogrammetric measurement of the interface surface of MSC(Multi-Spectral Camera), which is a main payload of KOMPSAT-2. Total 24 paper targets on the objective surfaces and two scale bars calibrated with high accuracy were used for measurement, and multiple images were taken from 11 different camera angles by using a spacecraft rotation dolly. As a result of analysis, 3D coordinates of each targeted point were obtained and the flatness value based on the selected reference plane was calculated and compared with the pre-determined requirement. The technique acquired by this study is expected to be used for the 3D precise measurement of ultra-light weight and inflatable space structures such as a satellite antenna and a solar array.

### 초 록

사진측량법(Photogrammetry)는 서로 다른 촬영각을 가지는 다수의 2차원 이미지로부터 대상물의 정밀한 3차원 형상을 얻어내는 기법이다. 본 연구에서는 사진측량법을 활용하여 다목적 실용위성 2호 비행모델 하부 탑재체 플랫폼(Low Payload Platform)의 고해상도 카메라 접합면에 대한 편평도(Flatness) 측정 작업을 수행하였으며, 정밀하게 교정된 2개의 스케일바(Scale Bar)를 사용하여 절대적인 길이 값을 3차원 모델에 부과함과 동시에 측정 정확도를 계산하여 내었다. 또한 측정된 편평도 결과는 고해상도 카메라 탑재체에서 제시한 편평도 요구조건과 비교되었다.

키워드 : 다목적 실용위성 2호(KOMPSAT-2), 고해상도 카메라(Multi-Spectral Camera, MSC), 사진측량법(photogrammetry), 3차원 정밀측정(precise 3D measurement), 삼각측량(triangulation), 편평도(flatness)

\* 우주시험그룹/mach@kari.re.kr

\*\* 우주시험그룹/hbkim@kari.re.kr

\*\*\* 우주시험그룹/smoon@kari.re.kr

\*\*\*\* 우주시험그룹/acoustic@kari.re.kr

## 1. 서 론

한국항공우주연구원이 제작중인 다목적 실용 위성 2호에는 1m의 해상도를 가지는 고해상도 카메라(Multi-Spectral Camera, MSC)가 주 탑재물로 장착되어진다(그림 1). 이때 MSC가 장착되는 위성체 플랫폼 상의 접합면 편평도는 운용환경에서의 MSC의 성능 및 획득 이미지의 질을 결정짓는 중요한 요소로 작용한다. 일반적으로 상기의 작업에는 3차원 정밀 측정기(CMM)가 사용되어지지만 장비의 이동, 설치 및 운용이 어려우며, 측정 대상점이 많을 경우 측정 시간이 길어지는 단점으로 인하여 현장 조립 단계에서의 간편한 측정은 불가능하다. 근래에는 서로 다른 각도에서 촬영된 2차원 이미지로부터 대상물의 정밀한 3차원 형상을 얻어내는 사진 측량 기법(Photogrammetry)이 위성 및 우주 구조물의 조립 및 시험 분야에 널리 사용되어지고 있다. 특히 디지털 카메라 제작 기술의 급속한 발전으로 인하여 사진 측량기법은 이전의 고정밀 광학 측정 기법을 능가하는 정확도를 제공해준다.

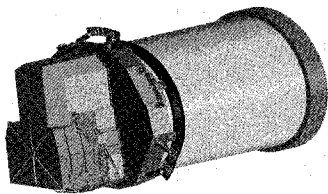


그림 1. 다목적 실용위성 2호 고해상도 카메라

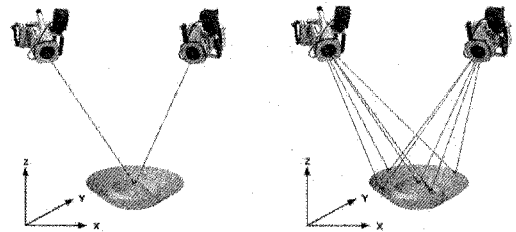
본 연구에서는 상기의 사진측량기법을 활용하여 다목적 실용위성 2호 하부 탑재체 플랫폼(Low Payload Platform)의 고해상도 카메라 접합면에 대한 정밀 측정 작업을 수행하였으며, 정밀하게 교정된 2개의 스케일바(Scale Bar)를 사용하여 절대적인 길이 값을 3차원 모델에 부과함과 동시에 측정 정확도를 계산하여 내었다. 또한 편평도 측정 결과는 카메라 제작업체에서 제시한 요구조건과 비교 검토되었다. 본 연구를 통하여

습득된 기술 및 정보는 일반적으로 부피가 크고 무게가 가벼운 위성 안테나 및 태양 전지 구조물의 비접촉식 정밀 측정에 사용되어질 수 있으며, 특별히 위성 안테나의 경우 제작 직후 구조물의 작업완성도(workmanship) 측정뿐만 아니라 열진공 시험 전후로 발생하는 안테나 면의 열변형 측정에 중요하게 사용될 수 있다.

## 2. 사진측량법의 원리

### 2.1 삼각측량기법(Triangulation)

사진 측량법은 여러 각도로 촬영된 사진 상의 2차원 이미지로부터 측정 대상물의 공간상의 3차원 좌표를 얻어내는 기술로서 삼각 측량(Triangulation)을 근간으로 한다는 점에서는 기존의 3차원 정밀 측정기법과 동일하다. 하지만 각각의 측정점에 조준경을 교차시켜 주어야 하는 지금까지의 3차원 정밀 측정기법(그림 2 (a))과는 달리 다수의 타겟(Target)에 대한 측정 작업이 사진 촬영을 통해 동시에 이루어진다는 것에 차이가 있다(그림 2 (b)).



(a) Single-Point Triangulation (b) Multi-Point Triangulation

### 그림 2. 삼각 측량과 사진 측량법

### 2.2 상대 좌표 측정(Relative Orientation)

사진 측량법을 위하여 사용되는 카메라는 그림 3과 같이 일정한 축소 비율(scale factor)을 가지는 광학계로 생각할 수 있으며, 일정한 거리를 떨어져 있는 동일한 카메라의 평행한 2개의 이미지로부터 그림 4와 같은 가장 단순한 형태의 측

정계를 구성할 수 있다. 이 경우 한 개의 측정점은 H1, H2, D의 3개의 미지수를 가지며, 삼각 측량기법으로 얻어진 3개의 선형 대수 방정식의 해를 구함으로써 그 값을 얻어낼 수 있다.

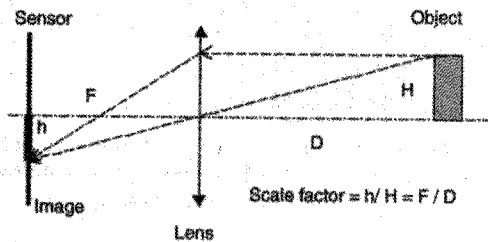


그림 3. 카메라의 광학계

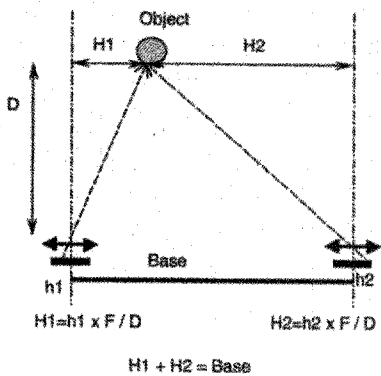


그림 4. 2차원 삼각 측량

이러한 원리는 카메라의 상대적인 위치 및 방향에 대하여 어떠한 제약조건도 없는 3차원 측정계에 대하여도 일반화하여 적용될 수 있다.

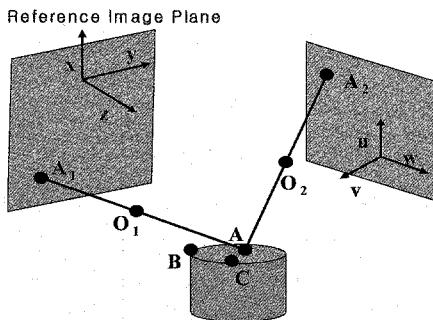


그림 5. 3차원 삼각 측량

그림 5는 하나의 대상물을 서로 다른 두 촬영각으로 촬영한 3차원 측정계를 나타낸다. 여기서  $xyz$ ,  $uvw$  좌표계는 각 카메라 이미지 평면상의 좌표계이며, A, B, C는 측정 대상물 상의 측정점을, A1, A2는 각 이미지 평면상에 맺힌 상의 위치를, O1, O2는 각 카메라의 렌즈 중심 위치를 나타낸다. 이때 카메라의 초점 거리를  $f$ 라 하면 식(1)과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \vec{O_1A_1} &= x_{A_1}\vec{x} + y_{A_1}\vec{y} - f\vec{z} & O_1A_1 &= D_A \\ \vec{O_2A_2} &= x_{A_2}\vec{u} + y_{A_2}\vec{v} - f\vec{w} & & \end{aligned} \quad (1)$$

또한  $xyz$  이미지 평면을 기준으로 한  $uvw$  이미지 평면의 방향 및 변위는 식(2)와 같은 행렬식의 형태로 표시할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \vec{u} \\ \vec{v} \\ \vec{w} \end{pmatrix} = M(r_x, r_y, r_z) \begin{pmatrix} \vec{x} \\ \vec{y} \\ \vec{z} \end{pmatrix} \quad \vec{O_1O_2} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

하나의 측정점(A)에 대하여 삼각 측량법을 적용하면 식(3)과 같이 2개의 방정식과 7개의 미지수로 구성된 선형 방정식을 얻을 수 있지만 방정식 개수의 부족으로 인하여 해를 구할 수 없다.

$$\begin{aligned} 2 \text{ equations} & : \vec{O_2A_2} \times \vec{O_2A} = \vec{0} \\ & \text{(One redundant)} \\ 7 \text{ unknowns} & : r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z, D_A \end{aligned} \quad (3)$$

이때 측정점을 6개로 늘리면 식(4)와 같이 거리 인수( $D_A \sim D_B$ , 거리 요소 하나는 비율 기준으로 사용)가 5개로 증가하여 총 미지수의 개수는 11개로 증가하고, 방정식의 개수는 총 12개가 되어 선형 방정식의 해를 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} 12 \text{ equations} & : 6 \text{ points} \times 2 \text{ equations} \\ 11 \text{ unknowns} & : r_x, r_y, r_z, t_x, t_y, t_z, \\ & D_A, D_B, D_C, D_D, D_E \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같이 사진측량법은 서로 다른 촬영각의 2개의 이미지 속에 존재하는 최소 6개의 측정점을 동일화시킴으로써 카메라와 측정점 간의 상대 좌표를 계산하여 낼 수 있다.

### 2.3 절대 좌표 측정(Absolute Orientation)

삼각 측량을 통하여 얻어진 상대 좌표계에는 측정 대상물의 상대적인 비율 정보만을 포함하고 있으므로, 실제 크기 정보를 부과하기 위해서는 스케일바와 같은 길이 표준계(Reference)를 사용해야 한다. 또한 많은 경우 미리 선정된 3차원 절대 좌표계를 기준으로 하는 측정이 요구되는데, 이 경우 좌표계 전환 행렬은 회전 인수 3개, 변위 인수 3개, 축척 인수 1개의 총 7개의 미지수로 구성되며, 이를 결정하기 위해서는 3개의 3차원 좌표점(9개의 방정식)의 정보가 필요하다. 그림 6은 사진 측량법에 의한 측정 작업에서의 상대 좌표에서 절대 좌표로의 변환 과정을 나타내며, 여기서는 점1과 점3사이의 거리를 길이 표준으로 하는 절대 좌표계를 구성하였다.

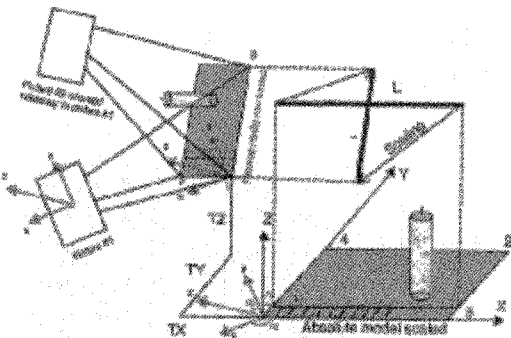


그림 6. 상대좌표계와 절대좌표계

## 3. 카메라의 교정

사진 측량법은 카메라를 정밀 측정 장치로 사용하는 만큼 실제 측정 작업에 앞서 카메라 자체에 대한 교정 작업이 요구되어진다. 카메라의 교

정 작업이란 그림 7과 같이 카메라의 특성을 결정짓는 렌즈 초점거리(Focal Length) 및 왜곡치(Distortion parameter), 중심점(Principal Point), 화면 크기(Format Size) 등의 값을 정밀하게 측정하는 것을 의미하며, 일단 교정된 카메라는 동일한 구성으로 이미지 획득에 사용되어야 한다.

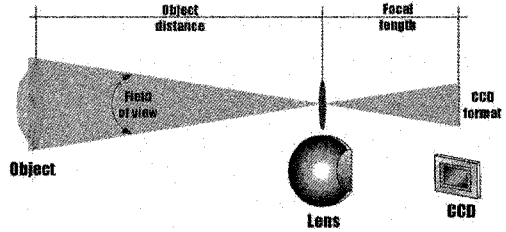


그림 7. 카메라의 구성 및 교정 인수

본 측정 작업에 사용될 산업용 고해상도 디지털 카메라(Kodak MegaPlus 6.3i)의 교정 작업을 위하여 그림 8과 같은 격자무늬 패턴을 벽면에 붙이고 총 10개의 서로 다른 촬영각의 이미지를 얻어냄으로써 교정 작업을 수행하였으며, 최종적으로 표1과 같은 카메라 교정 인수 값을 추출해 내었다.

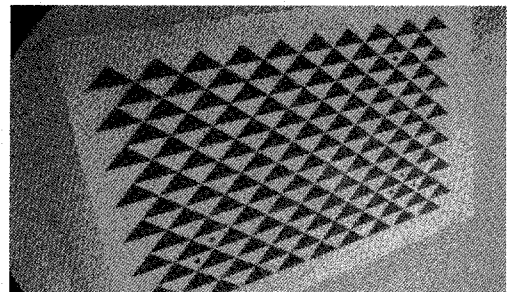


그림 8. 카메라의 교정 작업을 위한 기준 이미지

표 1. 카메라 교정 결과

Focal Length	30.0266 mm			
Format Size	W	24.5148 mm	H	16.3627 mm
Principal Point	X	12.1087 mm	Y	8.1978 mm
Lens Distortion	K1	8.175E-5	K2	-6.461E-8
	P1	1.123E-5	P2	-7.057E-5
Image Size	W	3068	H	2048

### 4. 측정 절차

그림 9는 사진 측량법을 이용한 일반적인 정밀 측정 작업의 절차를 나타낸다. 우선 측정에 사용될 카메라에 대하여 앞서 언급한 것과 같은 정밀 교정 작업을 수행하여야 하며, 사진을 촬영하기에 앞서 측정 대상물 상의 측정점에 명암대비가 큰 종이 또는 역반사 타겟(Retro-reflective)들을 부착하여야 한다. 이때 필요에 따라 절대 길이 또는 절대 좌표를 부과하기 위한 스케일바나 기준 좌표계의 설치를 함께 고려하여야 한다.

측정 시스템의 구성이 완료되면 가능한 많은 수의 서로 다른 위치에서 측정 대상물을 촬영하게 되며, 이로부터 얻어진 사진들 속에 나타나는 타겟들의 2차원 이미지는 운용 소프트웨어에 의하여 자동적으로 인식되어지고 표시되어진다(Marking). 또한 이러한 방법으로 표시되어진 타겟의 이미지들을 동일한 측정점의 이미지끼리 연결시켜주는 레퍼런싱(Referencing) 작업을 거친 후, 프로세싱(Processing)을 통하여 각 측정점의 3차원 좌표가 계산되어진다.

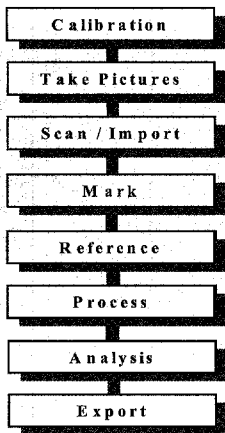


그림 9. 측정 절차

특히 원형 타겟을 사용하는 경우 타겟 인식 작업의 편리 및 측정 정밀도 향상을 위하여 서브픽셀 마킹(Sub-pixel marking)이라는 자동화 작업이 사용되어지는데, 이것은 그림 10에 보인 바

와 같이 원형 타겟의 이미지로부터 타원 형상의 외곽선을 우선 인식하고 그로부터 중심점(Centroid)의 위치를 정확하게 추출해내는 방법으로 일반적인 마킹 기법에 비해 30배의 정확도를 얻을 수 있다. 또한 레퍼런싱 작업시에도 대상 이미지로부터 6개의 측정점에 대한 레퍼런싱 작업을 우선적으로 수행하면 본 글 2.2에서와 같이 각 이미지 평면에 대한 상대 좌표를 얻을 수 있으며, 이러한 정보로부터 나머지 측정점에 대한 레퍼런싱 작업은 자동적으로 수행되어진다.

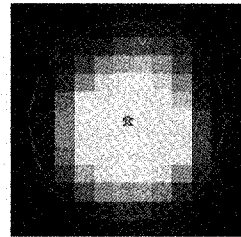


그림 10. 서브 픽셀 마킹

### 5. 측정계의 구성

MSC 집합면의 편평도 측정을 위하여 그림 11와 같이 구성하였다.

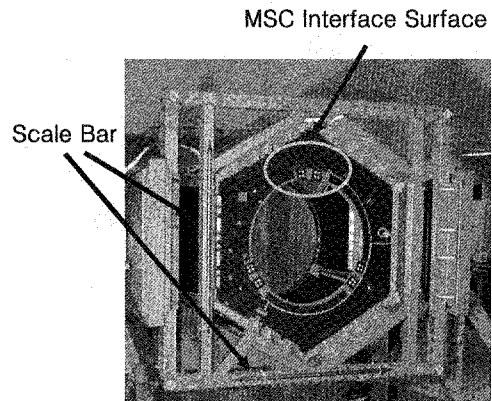


그림 11. 측정 시스템의 구성

다목적 실용위성 2호의 탑재체 플랫폼은 15° 간격의 회전이 가능한 지상지원장비(Mechanical

Ground Support Equipment, MGSE)에 장착되어 있으며, 측정 대상이 되는 세부부의 MSC 접합면에는 각각 8개, 총 24개의 원형 타겟(Target)을 설치하였다. 또한 측정 대상물 주변에는 양끝에 역반사(Retro-reflective) 타겟이 장착된 2개의 스케일바를 설치하여 하나는 길이 기준으로, 하나는 측정 결과의 정밀도 계산을 위하여 사용하였다. 사진 측량법의 정확도는 대상물을 촬영한 이미지의 개수에 따라 증가하게 되며 그림 12에서 보인 바와 같이 이미지 촬영 방향의 교차각이 90°를 이룰 때 가장 높은 정확도를 제공한다.

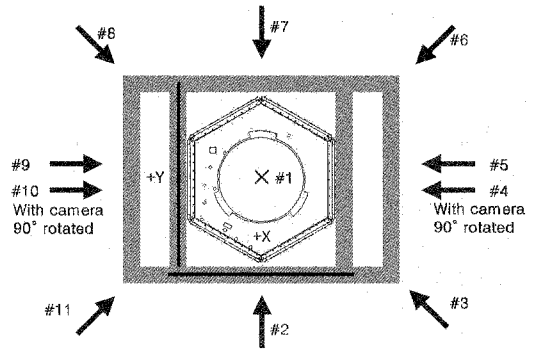
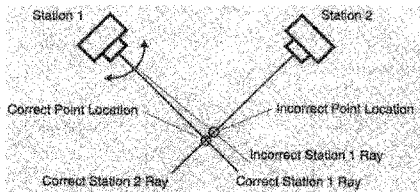
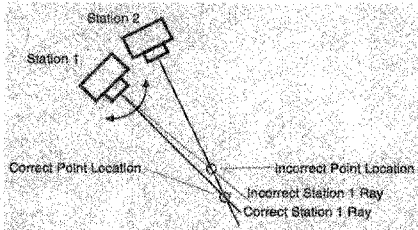


그림 13. 촬영각(Camera Angle)의 설정



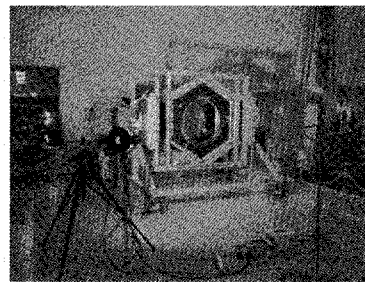
(a) Good Angular Separation



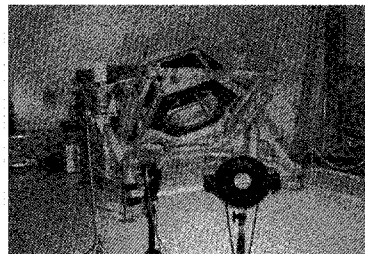
(b) Bad Angular Separation

그림 12. 교차각과 측정 정밀도

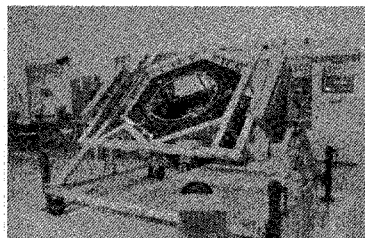
본 측정에서는 그림 13과 같이 총 11개의 서로 다른 앵글(Angle)에서의 이미지 촬영을 수행하였으며, 측정 작업에 편의를 위하여 카메라 높이를 고정시킨 상태에서 그림 14와 같이 지상지원장비의 각도를 0, 45°, -45°로 변화시키면서 측정 작업을 수행하였는데, 이 경우 주어진 작업 공간내에서 최대한 직각에 근사하는 촬영 교차각을 용이하게 얻을 수 있었다.



(a) for angle #1,4,5,9,10



(b) for angle #6,7,8



(c) for angle #2,3,11

그림 14. MSC 설치면 측정 작업

## 6. 측정 결과

자동 마킹과 레퍼런싱이 완료된 11개의 이미지들은 삼각 측량 원리에 의해 측정 대상점의 3차원 좌표를 미지수로 하는 충분한 수의 방정식을 제공하며, 최종적인 산술 계산을 통하여 그림 15와 같이 측정 대상물의 3차원 좌표 및 카메라 측정위치를 얻을 수 있다.

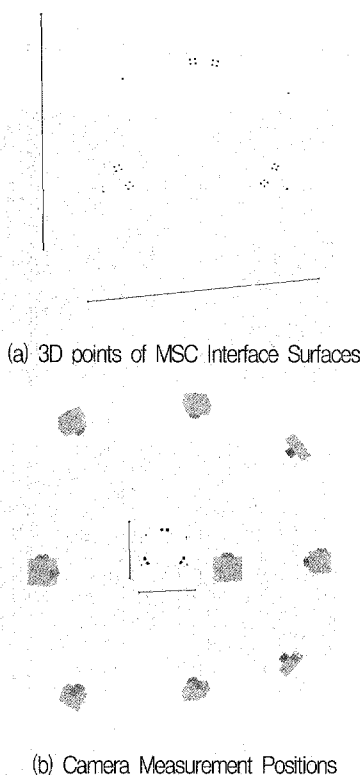


그림 15. 3차원 측정 결과

그림 16은 3차원 좌표 계산에 사용된 절대 기준 좌표계(Absolute Reference Frame)를 나타낸다. 측정점 78을 좌표계의 원점으로, 측정점 48, 70, 78을 포함하는 평면을 XY 평면으로, 측정점 78에서 70으로의 방향을 +X 방향으로 설정하였다. 표 2은 설정된 좌표계를 기준으로 최종적으로 계산되어진 측정 대상점들의 3차원 좌표

를 나타낸다.

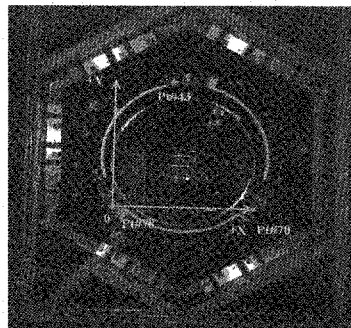


그림 16. 절대 좌표계

표 2. 측정점의 3차원 좌표값

Id	Name	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
41	ar	392.3404	660.653	0.100474
42	ar	389.1764	663.297	0.039122
43	ar	266.7847	661.27	0
44	ar	288.7928	664.794	0.006298
45	ar	395.1708	684.83	0.124328
46	ar	372.0038	687.496	0
47	ar	282.1293	686.421	0.034635
48	ar	285.2056	688.882	0.070646
61	ar	667.8381	19.14225	0.077632
62	ar	649.642	33.5308	0.086877
65	ar	711.2964	93.22718	0.074823
66	ar	689.7847	102.025	0.068654
67	ar	720.5057	115.7038	0.133472
68	ar	698.9953	124.5625	0.060598
69	ar	634.4789	14.4379	0.045598
70	ar	652.7179	0	0
71	ar	-41.8181	123.9515	-0.10008
72	ar	-64.3732	114.6265	0
73	ar	-55.4195	93.11307	-0.11917
74	ar	-32.9069	102.3133	-0.03825
75	ar	-13.9453	18.669	-0.00861
76	ar	5.546783	33.22577	-0.01381
77	ar	19.49316	14.5489	0.009158
78	ar	0	0	0
79		-108.774	-11.7394	-0.08374
80		-33.1142	566.4531	-0.18171
81		761.4479	534.6244	0.308341
82		774.9928	-19.3375	0.058311
83		-186.865	-544.387	101.3571
84		909.1101	-535.452	99.1274
85		-373.563	829.174	111.2894
86		-361.888	-266.764	111.4145

MSC의 제작업체가 제시한 평편도의 요구조건은 수직 방향(Z방향) 측정치를 기준하여 집합면의 최고 및 최저점의 차이를 0.3 mm 이내로

규정하고 있다. 측정결과 최대 편차는 측정점 46, 72 간에서 발생하였으며 이 경우 0.276 mm로 요구조건을 만족하는 것을 알 수 있었다. 또한 측정결과와 정밀도 계산 결과, 2.5  $\mu\text{m}$ 의 정밀도로 교정된 1096mm 스케일바는 1096.014mm의 측정값을 나타냈으며, 1300 mm의 시험 대상물의 크기를 고려할 때 대략 1/100,000 정도의 측정 정밀도를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 일반적으로 알려진 사진 측량법의 최대 정밀도에 근사한 값이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 최근 디지털 카메라 성능의 급속한 발전에 힘입어 3차원 정밀 측정 작업에 널리 사용되고 있는 사진 측량 기법(Photogrammetry)을 활용하여 고정밀도를 요구하는 위성체 조립 작업에 적용하였으며, 위성체 조립 현장에서 기존의 측정 기법에 비해 상대적으로 단순한 장치와 절차에 의해 높은 정밀도를 얻을 수 있었다. 특히 상기의 기법은 위성체 구조물의 제작성 검증 및 정렬 작업에 널리 사용되어질 수 있으며, 특히 열진공 챔버 안에서의 비접촉식 측정이 요구되는 위성 안테나의 열변형 측정 작업에 적용될 계획이다.

## 참 고 문 헌

1. Bruce B., and Charles P. W., "Close Range Photogrammetry in the Aerospace Test Environment", Proceedings of Institute of Environmental Sciences, pp. 135.
2. Michael. F. "3D Measurement Accuracy of a Consumer-Grade Digital Camera and Retro-Reflective Survey Targets, InSpec Engineering Services.
3. Manfred W. "Calibration of Digital Consumer Cameras for Photogrammetric Application", Institute for Photogrammetry and GeoInformation.