

사진측정기의 동향 및 응용사례

최정수*, 박응식**, 김형완***, 윤용식****

Current status and application of Photogrammetry

Choi, Jung-su*, Park Eung-Sik**, Kim, Hyung-wan***, Yoon, Yong-Sik****

ABSTRACT

Photogrammetry is a non-direct 3-dimensional coordinate measurement technique using 2-dimensional photographic images. For reconstruction 3-dimensional data from the 2-dimensional photos, photogrammetry uses the fundamental principle of triangulation. Digital photogrammetry solve for the camera location and coordinates simultaneously through the mapping, scaling and bundle processing in software processing.

In this paper, several applications for photogrammetry measurement are introduced, such as 'photogrammetric measurement of the gravity deformation of a cassegrain type antenna', 'analysis of photogrammetry data from ISIM mockup', 'underwater photogrammetric verification of nuclear fuel assemblies', 'spacecraft optical bench measurement' and 'spacecraft ground support equipment measurement'.

초 록

사진측정기는 2차원 사진 이미지를 사용해 비접촉식으로 3차원 좌표를 측정한다. 사진측정기는 2차원 사진으로부터 3차원 데이터를 재구성하기 위해 삼각측량법을 사용한다. 디지털 사진측정기는 측정사진에 대한 맵핑(mapping)과 비율 조정(scaling) 그리고 번들(bundle) 조정이 소프트웨어로 동시에 계산되며 이를 통해 카메라의 위치와 좌표를 해석해 낸다.

본 연구에서는 대형 전파망원경의 구조적인 변형 측정, ISIM 시험 구조체의 사진측정기 결과 분석, 원자로 연료 조립물에 대한 수중 사진측정, 위성 광학 조립부 측정 및 위성 지상지원장비 측정과 같은 특별한 용도로 사용된 사진측정기에 대해 소개하였다.

Key Words : Photogrammetry (사진측정기), Non-direct measurement (비접촉식 측정)

* 최정수, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
jschoi@kari.re.kr

** 박응식, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
espark@kari.re.kr

*** 김형완, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
khw@kari.re.kr

**** 윤용식, 한국항공우주연구원 우주환경시험팀
ysyoon@kari.re.kr

1. 서론

사진측정기(Photogrammetry)는 사진(Photo)과 측정(Grammetry)의 합성어로 그 명칭에서 유추할 수 있듯이 사진을 사용해 기하학적인 측정을 하는 기법을 의미한다. 역사적으로 볼 때, 이러한 사진측정기는 근대 19세기 중반 무렵의 사진의 개발과 함께 시작되었으며 오늘날에는 정밀 측정분야에도 적용이 되고 있다.

사진측정을 위해서는 그 목적에 따라 여러 종류의 사진을 이용할 수 있는데 일반적인 흑백사진이나 컬러 사진뿐만 아니라 열적외선 사진 또는 위성으로 찍은 특수 사진 등도 응용할 수 있다. 특히, 정적인 물체에 대한 측정만이 가능한 대부분의 측정법에 비해 사진측정기는 물체의 이동, 구조물의 변형 등과 같은 동적인 측정에도 가능하며, 위험한 환경이나 일반적인 방법으로 측정이 어려운 경우에도 비접촉식으로 측정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 사진측정기는 위성사진, 항공사진을 통한 환경 보존, 지질 정보, 해양 및 삼림 정보, 기상 정보 등에 적용될 수 있을 뿐만 아니라 우주개발이나 군사적인 목적, 직접적인 측정이 어려운 위험한 환경에 있어서의 측정 등 다양한 목적으로 활용될 수 있다.

항공우주 산업분야에서 사용하는 근거리 사진측정기는 고해상도의 영상 센서를 장착한 디지털 카메라와 데이터 처리를 통해 대상물을 3차원으로 형상화하는 CAD 시스템으로 구성되어 있다. 또한, 근거리 사진측정 시스템은 약 9m의 거리에서 ±0.2mm까지 측정할 수 있는 정확도를 가지고 있으며, 역 반사가 잘 되는 2개 이상의 표적을 대상물과 기준면 등에 부착하여 좌표를 측정할 수 있다[1]. 이와 같은 디지털 사진측정기는 항공우주 산업분야에서 오랜 기간 동안 근거리 측정을 위해 사용되어 왔으나, 근래에는 항공우주 산업 분야뿐만 아니라 다른 산업계로도 확산되어 활용되고 있다[2].

본 연구에서는 사진측정기의 수많은 사용용도 중 우주 개발 및 특수 용도로 적용되는 디지털 사진측정기의 국내외 동향 및 응용사례들을 고찰하고자 한다.

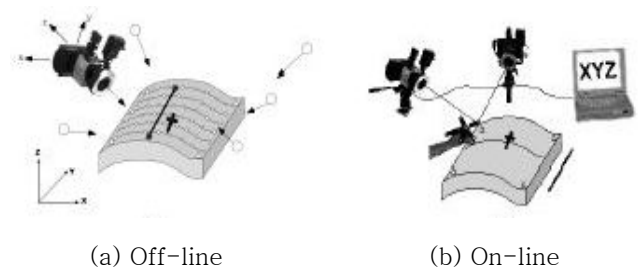
2. 사진측정기 이론

2.1 사진측정 시스템

사진측정 시스템은 사진 촬영을 통해 디지털 사진 정보를 획득하고 이로부터 대상물의 3차원 좌표를 획득하기 위한 시스템이다. 따라서 고해상도의 반도체 영상 센서를 장착한 디지털 카메라와 데이터 처리시스템으로 구성되며 정밀 측정을 위해 사용되고 있다.

근거리 사진측정에 많이 사용되는 INCA3 카메라와 V-STAR 데이터 처리시스템을 사용했을 때 4μm+4μm/M의 정확도를 획득할 수 있으며, 이때 M은 측정 대상물과 카메라간의 거리를 의미한다. 따라서 사진측정기를 사용하여 큰 대상물에 대해 정확한 측정결과를 획득하기 위해서는 가까운 위치에서 여러 장의 사진을 촬영해야 한다.

사진측정기의 방법은 크게 on-line 방법과 off-line 방법으로 나눌 수 있다. On-line 방법은 측정 대상물에 대해 2대의 디지털 카메라를 사용해 다른 각도에서 촬영을 하며 실시간으로 데이터 처리를 수행하여 측정과 동시에 결과를 확인할 수 있는 방법이다. 이와는 달리 off-line 방법은 디지털 카메라 1대를 사용하여 다양한 각도에서 여러 장의 사진을 획득 한 이후, 데이터 처리를 수행하여 3차원 좌표를 확인할 수 있는 방법이다.



자료 : <http://www.geodetic.com> 웹페이지
그림 1. 사진측정기 방법

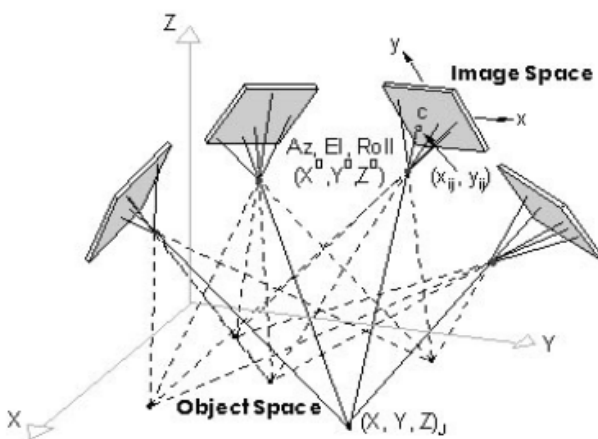
2.2 사진측정기 원리

사진측정기는 3차원인 실제 물체에 대해 카메라를 사용해 사진촬영을 함으로써 2차원 이미지를 생성하고 그 이미지를 가지고 3차원 정보를 추출해 내는 방식으로 삼각측량법(Triangulation)을 근간으로 한다. 그러나 삼각측량 정보를 얻기 위한 측정 시 각각의 측정점에 조준경을 교차시켜 주어야 하는 다른 3차원 측정기법들과는 달리 무한대의 삼각측량 정보를 동시에 나타낼 수 있다는 점에서 차이가 있다(그림2 참조).



자료 : <http://www.geodetic.com> 웹페이지
그림 2. Multi point 삼각측량 (I)

사진측정기는 삼각측량법을 이용하기 때문에 정밀 측정 시 3차원의 정보를 획득하기 위해서는 다른 위치의 사진이 최소한 2장 이상 필요하다. 디지털 사진측정기에서는 4장 이상의 사진을 찍으면 데이터 처리시스템에서 Self-calibration이 되어 정확도를 더욱 높일 수 있기 때문에 off-line 방법을 사용한 정밀측정 시 동일 위치 선상에서 보통 4~6장의 사진을 찍는다. 사진측정기를 사용해 촬영된 사진들은 데이터 처리시스템을 통해 사진기의 측정 지점과 촬영 각도가 계산되어지고 이때 발생되는 교차점으로부터 3차원 좌표를 알 수 있게 된다.



자료 : <http://www.geodetic.com> 웹페이지
그림 3. Multi point 삼각측량 (II)

사진에 찍힌 대상물만으로는 치수를 알 수 없으므로 크기를 예측할 수 있는 기준이 되는 물체가 필요하다.

이를 위해 기준자(Scale bar)를 사용하며, 여러 개의 기준자를 사용하면 데이터 처리 시 측정 결과가 보정되어 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다.

사진측정을 위해서 측정 지점에는 명암대비가 큰 표적들이 부착되며, 카메라 플래쉬를 사용하였을 때 일반적인 흰 점보다 100~1000배 정도 빛을 잘 반사하는 광반사 표적이 사용된다. 또한 촬영된 사진 상의 표적들은 데이터 처리시스템을 통해 인식되고 표적들의 이미지를 연결시켜주는 레퍼런싱(Referencing) 작업을 거친 후, 계산되어진다[3].

3. 해외의 사진측정기 응용 사례

3.1 호주 전파망원경의 중력변형 측정 연구

호주 Narrabri에는 전파 천문학을 목적으로 22m의 주 반사면과 2.75m의 보조반사면으로 구성된 접시형 안테나(Cassegrain antenna) 6기가 일렬로 설치되어 전파망원경으로 사용되고 있다. 이들 안테나들을 통해 1990년부터 1-12GHz 대역에서 천문관측이 수행되어 왔으며 최근에 측정대역을 최대 115GHz 까지 높이기 위한 업그레이드가 진행되고 있는 중이라고 한다.



자료 : www.narrabri.atnf.csiro.au 웹페이지
그림 4. 호주 Narrabri의 천문관측 안테나

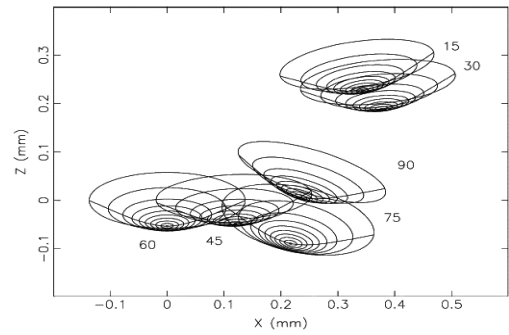
이 전파망원경을 사용하여 지구자전축에서 멀리 떨어져 있는 영역을 관측 할 때, 지구가 자전함에 따라

이 영역을 관측 중인 접시 안테나 역시 큰 각도(안테나 상승각도 12°~90°)로 움직여야 한다. 이 때 중력의 변화로 인해 안테나의 구조적 변형(deformation)과 반사면 및 광학 장비들의 위치변화(displacement)가 발생하고 이는 안테나의 이득(gain)과 방사(radiation) 형태를 변화시키게 되어 전파망원경의 성능이 저하된다. 따라서 이를 해석하기 위해 안테나 상승각도 변형에 의해 발생하는 안테나 구조물의 중력변형을 측정해야 할 필요성이 제기되었다.

M.Kesteven은 이 연구를 제안하였으며 Ravi Subrahmany의 주도로 B. Parsons 와 C. Murphy가 참여하였다. 또한, 사진측정은 D. Brizzi 와 H. Hanley에 의해 수행되었다. 이들은 사진측정을 위해서 총 398개의 광반사 표적(target)을 주 반사면에 부착하였고, 8개의 표적은 보조 반사면의 표면에 가장자리를 따라 부착하였다. 또한, 수집부 혼(horn) 안테나에 대해서는 보호커버를 제거하고 3개의 표적이 장착된 구조물로 대체하여 조립하였으며, 보조 반사면을 지지하는 4개의 지지물(quadripod legs)에도 표적을 부착하였다.

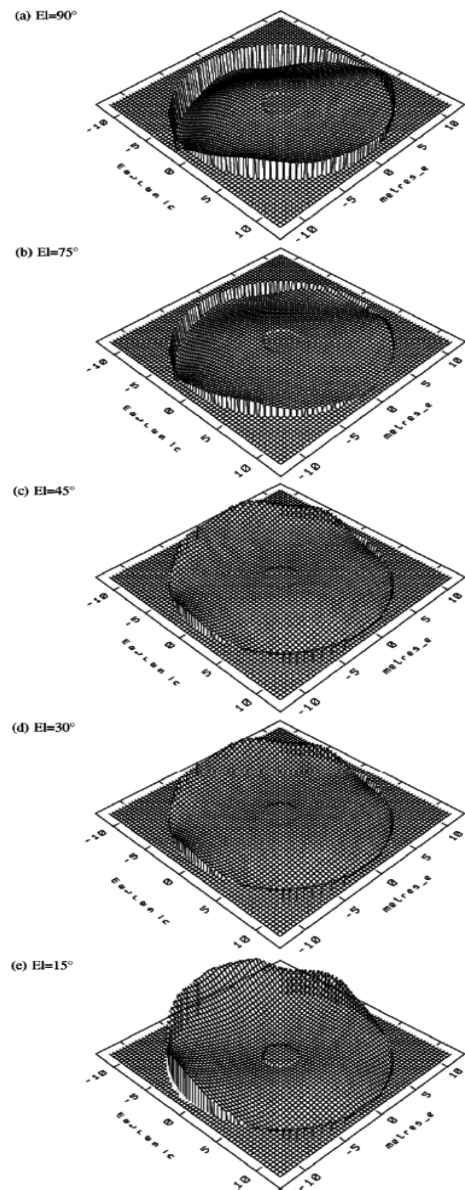
사진 측정은 야간에 카메라의 플래시를 사용해 촬영되었는데, 안테나의 각도는 90°, 75°, 60°, 45°, 30° 그리고 15°로 각각 고정하고 이동식 크레인에서 V-STAR/S 사진측정 시스템을 사용할 수 있는 디지털 카메라를 사용하여 사진촬영이 이루어 졌다. 측정 시 카메라는 주 반사판에서 약 17m 떨어진 위치에서 사진 촬영을 하였으며 안테나 각도별로 촬영된 사진의 총 합은 140장 정도 된다. 데이터 처리시스템을 통해 계산된 결과의 rms 오차 범위는 30-50 μ m이내 이며, 길이 측정의 기준이 되는 기준자(invar bar)에 대한 rms 길이 에러는 16 μ m 이었다. 따라서 사진 측정을 통해 그림5, 그림6와 같이 안테나의 상승각 변화에 따라 보조반사면의 위치변화, 변형 및 주 반사면 변형률 등을 확인할 수 있었으며 이를 통해 안테나의 방사 형태와의 연관성을 확인하였다.

이 연구는 사진측정 시스템을 사용하여 접시 안테나의 구동 시 발생하는 구조물의 중력 변형에 대해 각각의 각도별로 측정하고 이를 해석하여 안테나의 이득과 방사 형태 변형간의 연관성을 확인하는 최초의 적용 사례이다. Ravi Subrahmany는 이 연구를 통해 사진측정기가 대형 접시 안테나의 상승각 변화로 인한 구조물의 변형을 측정하기 위한 유용한 측정도구로써 사용될 수 있음을 확인한 바 있다[4].



자료 : 참고문헌(4)

그림 5. 안테나 상승각에 따른 보조 반사면의 위치변화

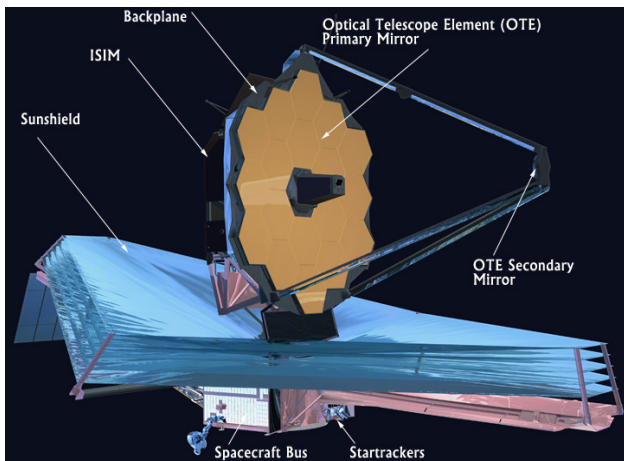


자료 : 참고문헌(4)

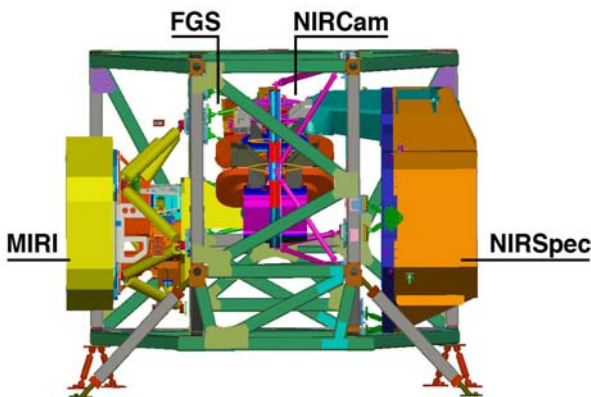
그림 6. 안테나 상승각에 따른 주 반사면 변형률 (확대계수, magnified factor = 4500)

2.2 미국의 ISIM 사진측정기 결과해석 연구

차세대 우주망원경(NGST: Next Generation Space Telescope)으로 명명되었다가 2002년에 James Webb Space Telescope로 새로 이름을 바꾼 JWST는 대형 적외선 우주관측 망원경이며 2013년에 발사가 계획되어 있는 NASA의 우주개발 프로젝트이다. JWST는 우주 관측을 위한 6.5m의 대형 반사경과 가로 22m, 세로 12m 크기의 태양보호막(sunshield)으로 구성된 초대형 위성으로 규모면에서 중형 민간 항공기와 대등하다고 할 수 있다. 이러한 크기로 인해 이 위성은 아리안-5 ECA 발사체에 접힌 상태로 발사된 이후 우주공간에서 모든 구조물들이 전개가 되며, 지구로부터 150만 킬로미터 떨어진 곳에서 임무를 수행할 예정이다.



자료 : www.jwst.nasa.gov 웹사이트
 그림 7. JWST 대형 적외선 우주관측 망원경(NASA)



자료 : www.jwst.nasa.gov 웹사이트
 그림 8. JWST 의 주요 탑재부-ISIM

이 연구는 JWST 위성의 핵심부인 Integrated Science Instrument Module(ISIM)의 비행모델에 대한 극저온 시험 시 사진측정기를 적용하기 위한 사전 검증 차원에서 수행되었으며, 이를 위해 Henry Sampler는 시험 구조체에 대해 레이저추적기(Lasertracker)로 측정을 수행하였고, Maria Nowak 와 Mike Hill이 사진측정기를 사용해 시험 구조체를 측정 하여 사진측정기의 결과를 레이저 추적기의 결과와 비교, 분석하였다. 측정 결과의 해석에는 Phol young, Pam Davila와 Ray Ohl이 도움을 주었다.

Maria Nowak 와 Mike Hill는 시험 구조체에 광반사가 가능한 표적을 부착하였고 각 표적의 구성은 37개의 구형(spherical) 표적, 10개의 45° 각도의 표적, 26개의 부착식 광반사 표적으로 총 73개의 표적들이 대상물에 분포되었으며 추가로 69개의 코디드(corded) 표적과 초기 좌표계 형성을 위해 서로 직교하는 기준자도 사용되었다. 시험 구조체의 사진측정기 적용을 위해 사용된 카메라는 INCA3로서 회전테이블에서 약 3.2미터 떨어진 위치에서 대상물에 대한 촬영을 수행하였다. 3차원 측정을 위해 시험구조체가 놓인 회전테이블을 7.5도씩 회전하며 촬영하였으며, 카메라의 자체적인 오차를 보정하고 보다 더 정밀한 사진측정을 하기 위해 각각 회전테이블의 위치별로 카메라 또한 0°, 90°, 180°, 270° 로 회전시켜가며 사진을 찍었다.

또한, Henry Sampler는 동일한 지점에 대해 3번의 레이저추적기를 이용한 측정을 수행하였다. 레이저추적기의 측정이 수행된 이유는 레이저추적기로 측정된 값을 ISIM 시험 구조체의 사진측정기 결과와 비교할 기준으로 설정하기 위함이었다. 이는 레이저추적기가 사진측정기와 비교할 때 정확도가 훨씬 뛰어나다고 알려져 있기 때문이다.

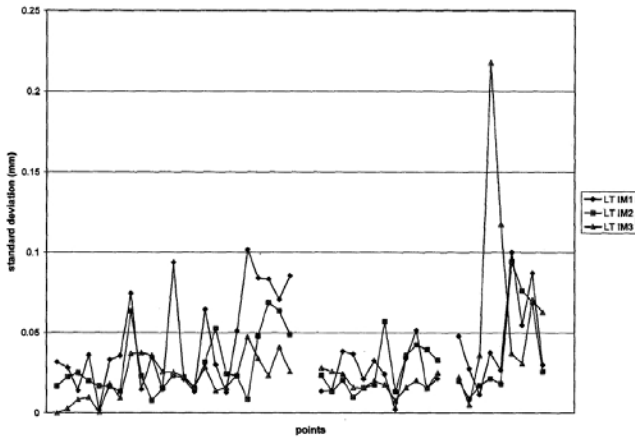
표 1. 사진측정기와 레이저추적기 결과 비교

단위, mm	IM1*	IM2*	IM3*
average st dev of 3 cycles LT	0.040	0.031	0.030
average st dev of 10 cycles PG	0.010	0.008	0.008
delta average PG from ave. LT	0.076	0.048	0.057

*IM1, IM2, IM3는 서로 직교하는 좌표축임

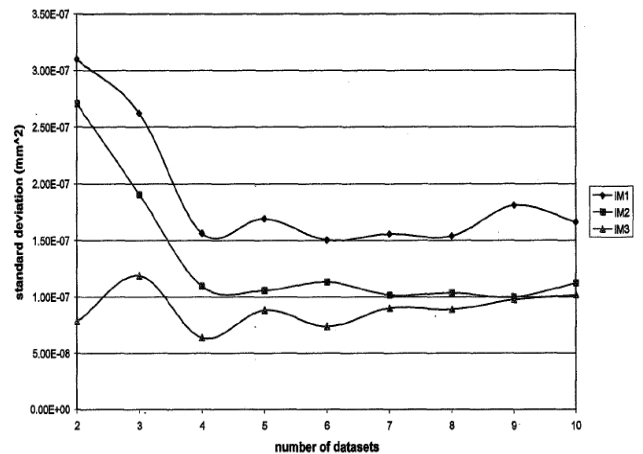
3회 수행하여 평균한 레이저추적기의 결과와 10회

수행하여 평균한 사진측정기의 결과를 3차원 좌표로 비교해 볼 때 그 차이는 평균 60 μm 정도 되었으며 이는 측정에서 허용되는 오차이다(표1 참조). 특히 사진측정기에서 계산된 표준편차는 10 μm 이내로써 이는 사진측정기의 반복성이 매우 좋다는 것을 의미한다. 따라서 사진측정기는 열주기 시험과 같이 시험 중 구조물이 변화하고 반복측정이 필요한 경우의 적용에 유리하다. 아래 그림9 과 그림10은 각각 레이저추적기 및 사진측정기의 표준편차를 같은 비율로 비교하고 있다. 비록 레이저추적기는 3회만 반복 수행되었으므로 더 많은 측정이 수행된다면 표준편차가 감소하겠지만 이를 고려하더라도 상대적으로 사진측정기는 반복측정에 대한 정확도가 현저하게 높은 것을 확인할 수 있다.

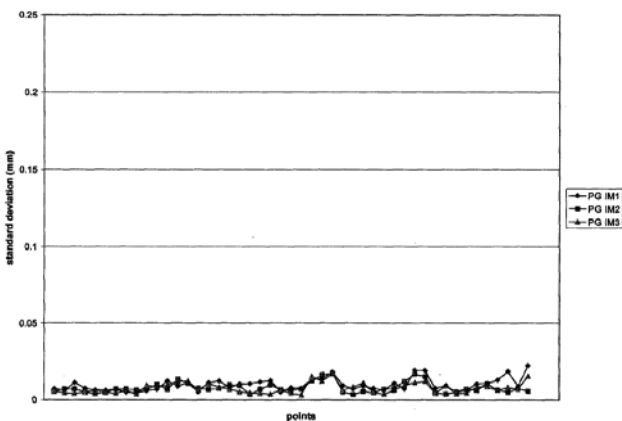


자료 : 참고문헌(5)
그림 9. 3회 레이저추적기 표준편차

회의 반복측정을 수행하는 경우 가장 효과적으로 정확한 결과를 얻을 수 있다는 경험 때문이었으나 ISIM 시험 구조체의 경우에 측정결과에 대한 분산과 표준편차를 확인한 결과 그림 11과 같이 4회 측정에서 분산이 급격하게 감소하며 최적의 결과를 나타내었다. 또한, 사진측정기 오차에 대한 표준편차 그래프에서 중력에 평행한 방향인 IM1에 대한 오차가 다른 방향에 비해 크다는 것을 알 수 있었다. 그 원인을 밝히기 위해 카메라와 근접한 상단에 위치한 표적과 상대적으로 카메라와 거리가 먼 하단에 위치한 표적에 대해 각각 분석한 결과 상단에 위치한 표적이 하단의 표적보다 표준편차와 오차가 적었다. 따라서, Maria Nowak 와 Mike Hill는 그 원인을 사진촬영 시 사진 방향이 아래쪽으로 기울인 상태에서 측정함으로 인해 기인되는 것으로 판단하였다.



자료 : 참고문헌(5)
그림 11. 측정회수에 따른 사진측정기 오차의 표준편차



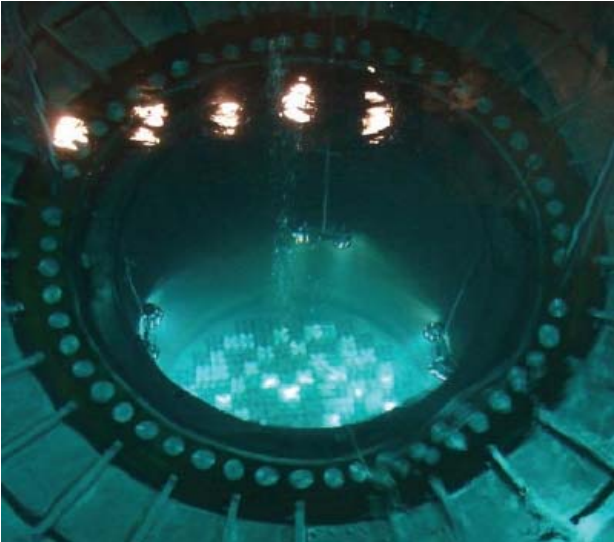
자료 : 참고문헌(5)
그림 10. 10회 사진측정기 표준편차

이 연구에서 사진측정기의 경우 10회 반복수행을 한 이유는 Student-T 분포를 통해 사진측정기의 경우 10

NASA Goddard 우주비행센터에서 수행된 이 연구는 사진측정기를 위성 부품에 대한 우주환경시험에 사용하기 위한 사전 검증 차원에서 수행되었으며, 이를 통해 사진측정기를 사용한 측정결과가 10회 측정 시 표준편차가 10 μm 이내로 반복측정에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 사진측정 기결과는 레이저추적기 결과에 비해 75 μm 정도의 차이가 났으며 이는 허용 오차범위 이내의 수치이다. 덧붙여 Maria Nowak 와 Mike Hill는 레이저 추적기의 오차가 레이저추적기의 측정 시 발생한 높은 표준편차로 기인한다고 보고, 레이저추적기로 반복 측정하여 비교한다면 사진측정기의 실제 정확도는 더욱 높을 것으로 예상하였다[5].

3. 국내의 사진측정기 응용 사례

3.1 핵연료 조립의 수중 사진측정기 검증



자료 : 참고문헌(6)
그림 12. 영광 원자력 발전소 원자로

영광 원자력 발전소는 한국 표준형 원자력 발전시설로써 12~24개월 주기로 핵연료의 교체가 필요하며 핵연료 교체 시에는 사용된 연료 봉 조립물을 제거하고 동일한 개수의 새로운 조립물로 대체하여 장착하여야 한다. 원자로 위쪽에서 이러한 조립물을 아래로 내리면서 정확하게 위치 시켜야 하므로 연료 재장전 작업은 매우 위험한 작업 중의 하나라고 할 수 있는데 이는 외부에서 발생한 오차에 의해 내부 조립물이나 원자로에 손상을 미칠 수 있기 때문이다. 또한 연료의 재충전 작업이 끝나고 나면 열적 특성, 운용 시의 변수조건, 안전계수 등이 변화되게 된다. 이러한 이유로 인해 연료 조립물 사이의 위치를 정확하게 확인하는 작업이 필요하다. 따라서 정확도나 효율성과 자동화를 만족시킬 수 있는 방법이 계속 요구되어 왔다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 사진측정기가 제안되었으나 특수한 환경적 제약으로 인해 어려움이 있었다. 그것은 핵연료봉이 조립되는 원자로가 수중 12m 아래에 위치해 있고 방사능 누출 지역이라는 점이다. 따라서 위험한 구역에 대한 수중촬영을 위해서는 카메라를 보호할 수 있는 방수용기가 필요하며, 원격으로 사진을 촬영하고 실시간으로 사진자료를 다운로드 받을 수 있는 통신라인이 구축

되어야 한다. 또한, 빛이 물과 방수 용기의 투과면 및 공기를 차례로 통과해 사진이 찍히기 때문에 데이터 처리 시 이러한 조건을 고려해야 한다.

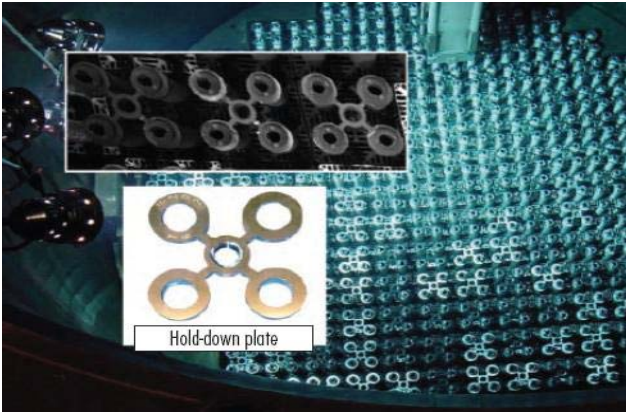
이 연구에서는 핵연료 조립 수중사진측정을 위해서 INCA3 카메라와 V-STAR 소프트웨어가 사용되었으며 추가적으로 호주의 'Underwater Video Systems of Perth'사의 도움을 받아 수중촬영을 위한 방수 용기를 제작하였다(그림13 참조). 또한, 카메라의 원격 작동을 위해 방사능 수중환경에서 사용할 수 있도록 보호처리가 된 30m의 케이블이 연결되었으며 방수용기는 90도 각도로 움직일 수 있도록 모터가 장착되어 지시부와 연결되었다.



자료 : 참고문헌(6)
그림 13. 수중 사진측정기용 방수용기

최초 시험에서 촬영된 이미지는 선명도가 떨어졌는데 이는 빛이 물과 방수 용기의 투과면을 통과해 사진기에 도달하기 때문인 것으로 유추되어 보다 더 선명한 이미지를 얻기 위해서는 셔터 스피드를 느리게 할 필요성이 제기되었다. 또한 사진기의 위치를 이동시킬 때 물의 댐핑 영향으로 인해 30초 이상 기다린 후 촬영을 해야 했다. 무엇보다도 원자로 내부 수중촬영 시 방사능이나 수분의 침투가 가장 우려되는 부분이었는데 실제로 시험 촬영 도중 카메라의 작동에 문제가 발생하였다. 이는 방수 용기 내부의 카메라 온도가 작동 제한온도인 55° 이상으로 올라가면서 CCD 센서에 이상이 생겼기 때문이었다. 이 때 원자로 냉각수의 온도는 약 30° 정도로 시험 시 카메라는 약 3시간 동안 전원이 켜진 상태로 있었는데 이로 인해 밀폐된 방수용기의 내부 온도가 올라갔으나 카메라를 사용하지 않을 때에는 전원을 꺼줌으로써 이 문제를 해결할 수 있었다.

일반적으로 사진측정을 할 때는 광반사 표적이나 스케일 바 등을 사용하여 측정을 하지만, 원자로 수중촬영의 경우 이들을 사용할 수 있는 여건이 아니므로 연료봉 조립체 윗부분 형상 정보를 기준으로 하여 측정된 조립체들의 위치가 계산되었다(그림 14, 그림15 참조).

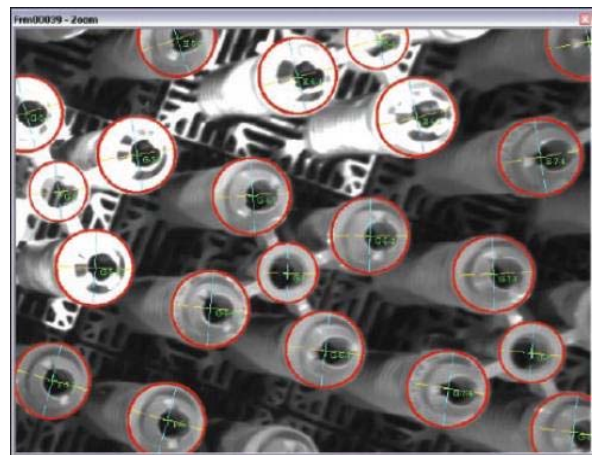


자료 : 참고문헌(6)
그림 14. 연료봉 및 연료봉 조립체 윗부분 형상

원자로에 대한 수중 사진측정을 위해 총 52장의 사진이 촬영되었으며 이 중 선명도가 좋은 46장의 사진이 실제 데이터 처리에 사용되었다. 각 위치별로 사진을 찍을 때 중앙부에 있는 연료봉 조립체에 모든 사진의 교차가 생기도록 하였다.

측정된 사진들을 사용해 측정결과를 확인한 결과 Z축 오차가 다른 축에 비해 크게 나왔는데 이는 원자로 내부에서 사진 촬영을 할 수 있는 공간이 한정되어 번들조정법에 필요한 충분한 정보가 부족한 데에서 기인하는 것으로 이해되었다. 그러나 실제로 이 연구의 주된 관심사는 X, Y 좌표이며 Z축 정보는 거의 불필요 하였다. 또한, 일반적으로 사진측정기의 정확도는 2개 또는 그 이상의 기준거리와 측정거리를 비교하여 계산이 되나 이 측정에서는 이러한 방법에서의 정확도 계산은 불가능하였다. 따라서 측정시와 마찬가지로 연료봉 조립체의 윗부분 형상 정보를 이용하여 비교되었으며 이에 대한 오차가 계산되었다.

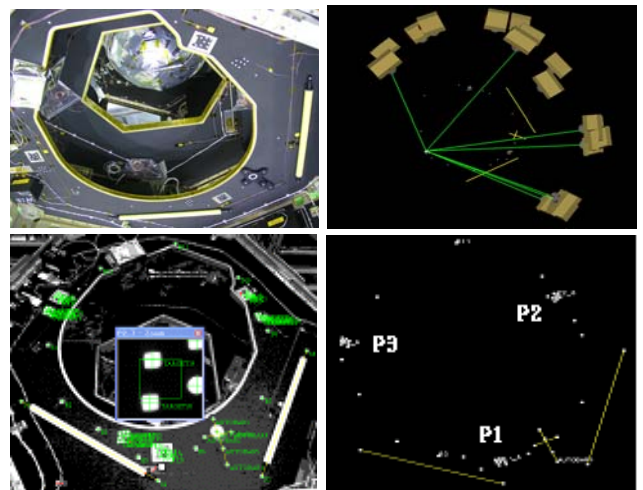
Kenneth Edmundson, Giuseppe Ganci와 박찬홍에 의해 수행된 이 연구에서 핵연료봉의 조립체 형상을 이용하여 사진측정기를 사용할 수 있음을 검증하였다. 또한, 이들은 외적인 형상을 검출해 측정에 응용하는 이 방법을 사용하면 다른 여러 산업계 많은 분야에서 응용할 수 있으리라 판단하였다[6].



자료 : 참고문헌(6)
그림 15. 연료봉 조립체 사진 측정

2.4 인공위성 관련분야에 대한 사용

인공위성 개발 분야에는 데오드라이트, 레이저추적기, 사진측정기 등의 정밀측정 방법들이 사용되고 있다. 그 중 사진측정기는 무엇보다도 측정을 하기 위한 공간과 환경에 대한 제약을 가장 적게 받으며 하드웨어가 작고 가벼워 측정이 용이하다는 장점을 가진다.



자료 : 참고문헌(8)
그림 16. 탑재센서 설치면 사진측정

한국항공우주연구원에서는 사진측정 시스템을 이용하여 인공위성에 설치되는 탑재센서의 설치면에 대한 편평도를 측정하였으며 편평도 요구조건은 50 μ m 이내이다. 편평도 측정을 위하여 김지영, 이상원, 김연용은 설치면에 총 20개의 표적과 2개의 기준자를 설치하고

측정대상에 대해 다양한 위치와 각도에서 촬영을 하였다. 사진촬영을 할 때 카메라의 위치가 대상물과 가까울수록 그 정확도가 높아지므로 가능한 한 가까운 위치에서 다양한 각도로 측정대상물을 촬영하였다(그림 16 참조). 측정된 결과는 quality factor가 1.1, RMS가 $0.25\mu\text{m}$ 였으며, 최대 편차는 편평도 요구조건인 $50\mu\text{m}$ 이내로써 탑재센서 설치면의 편평도는 요구조건을 만족하였다.

한편, 위성체 뿐 아니라 지상지원장비의 측정에도 사진측정기가 적용되었는데, 통신해양기상위성의 열진공 시험에 사용될 예정인 L-브라켓의 측정 시 이를 사용하였다. L-브라켓은 통신해양기상위성의 열진공 시험을 위해 프랑스 Astirum사에서 들여왔는데, 위성과의 접속 해석을 위해 Astrium사 기술진이 한국항공우주연구원에 3차원 측정을 요청하였다. L-브라켓은 가로 3.7m, 세로 3.5m, 높이 1.3m 정도 되는 대형 지상지원장비이며, 접속 해석을 위한 측정에 요구되는 정확도는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이다. L-브라켓의 측정 시 측정 장소의 공간적인 한계로 인해 레이저추적기의 사용이 불가능 하였으며, 그 대안으로 사진측정기가 사용되었다.

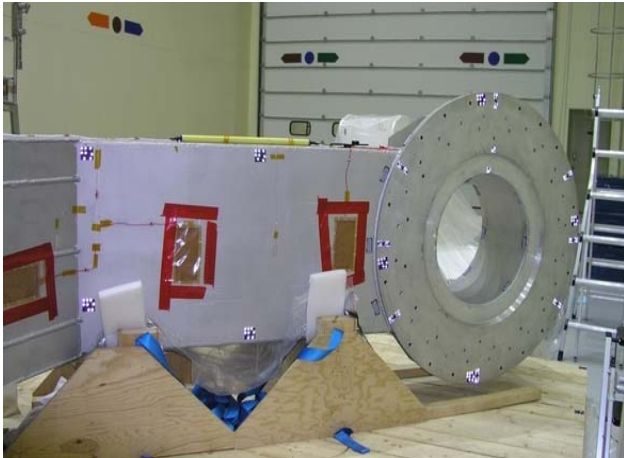


그림 17. L-브라켓의 사진측정

L-브라켓의 측정은 최정수, 김지영, 김연용, 이상원이 참여하였고 V-STAR 소프트웨어를 사용해 데이터 처리를 하였다. 접속 해석에 필요한 중요한 지점들에 광반사 표적을 총 69개 부착하였으며, 각 사진 이미지들의 연결을 위한 코드드 표적 20개를 L-브라켓의 주변에 적절하게 위치시켰다. 또한, 치수 및 정확도 계산을 위한 기준자 2개를 측정 대상의 윗면에 서로 직교하도록 위치시켰으며 최종적으로 데이터 처리에 사용된

사진은 40장정도 된다.

사진측정 결과 quality factor가 1.34, rms가 $0.23\mu\text{m}$ 이었으며 기준자에 대한 rms 오차는 $14\mu\text{m}$ 이었다. 따라서, 표적 부착 시 발생할 수 있는 오차를 감안 하더라도 0.5mm 이내인 측정요구 정확도를 만족하였다. 따라서 이 측정결과를 사용하여 열진공 시험을 위한 접속 해석이 수행되었으며 통신해양기상위성의 우주환경시험을 준비하였다.



그림 18. L-브라켓의 3차원 측정 결과 해석

4. 결 론

본 연구에서는 최근 국내외에서 사진측정기를 적용해 수행된 정밀측정 분야의 동향 및 응용사례에 대하여 기술하였다. 사진측정기는 레이저추적기에 비해 정확도가 떨어지며 특히 측정 계획의 수립 및 사진 촬영 각도 등에 따라 측정 정확도에 차이가 발생하는 등의 단점이 있으나, 측정 환경에 대한 제약을 적게 받으며 반복 측정 시 동일 측정 점에 대한 편차가 적고 복잡한 형상의 경우에는 측정위치를 용이하게 변경하여 측정할 수 있다는 장점이 있다.

위에서 언급한 장점들을 이용한다면 구조물의 변형이나 진동, 음향, 충격, 열 등의 우주환경시험 시의 정밀측정에 사진측정기를 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 레이저추적기의 보조 도구로써도 충분히 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 다만, 사진측정기의 사용 시 거리, 대상물과의 각도, 측정 방법, 반복측정 회수 등에 수반되는 정확도에 관한 후속 연구가 필요하며 이를 통해

정밀측정 시 더욱 광범위하게 활용할 수 있을 것으로 판단되어진다.

참고문헌

1. 윤용식, 이동주, “3차원 정밀좌표 측정 기술과 동향 (제1보) 중대형 구조물의 비접촉식 3차원 정밀 측정”, 한국공작기계학회지, 제11권 제1호, pp.7-13, 2002.
2. Fraser, C.S., “Industrial Measurement Applications.” Chapter 12, Close Range Photogrammetry and Machine Vision (K.B. Atkinson, ED.), Whittles, Scotland, pp. 329- 361, 1996.
3. 우성현, 김홍배, 문상무, 임종민, “Photogrammetry 기법을 활용한 다목적 실용위성 2호 MSC 설치면의 정밀 측정” 항공우주기술, 제2권 제1호, pp. 7-14, 2004.
4. Ravi Subrahmanyam, “Photogrammetric Measurement of the Gravity Deformation in a Cassegrain Antenna”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 53, No. 8, pp. 2590-2596, 2005.
5. Maria Nowak, Mike Hill, “Analysis of Photogrammetry Data from ISIM Mockup”, NASA Goddard Space Flight Center, 2007.
6. Kenneth Edmundson, Giuseppe Ganci, Chan-hong Park, “Underwater Photogrammetric Verification of Nuclear Fuel Assemblies via Natural Feature Measurement”, The Journal of the CMSC, 2007.
7. Fraser, C.S., “Innovations in Automation for Vision Metrology Systems,” The Photogrammetric Record, 15(90), pp. 901-911, 1997.
8. 김지영, 윤용식, 최준민, 유준, “위성용탑재센서 설치면의 편평도 측정”, 한국정밀공학회 논문집, 2008.
9. Geodetic Systems. Inc
(<http://www.geodetic.com>)
10. Australia Telescope National Facility
(<http://www.atnf.csiro.au>)
11. The James Webb Space Telescope
(<http://www.jwst.nasa.gov>)