

우주 발사체 추적 및 거동분석용 광학장비 기술개발 동향

글 / 노영환 nyh@kari.re.kr, 박두진, 김태형

한국항공우주연구원 우주센터 기술관리그룹

1. 서론

1950년대의 냉전시대에 접어들어 서구 열강들은 인공위성을 지구궤도에 진입시키기 위한 우주발사체 개발에 본격적으로 주력하기 시작하였으며, 뒤를 이어 아시아에서도 일본과 중국이 이에 동참하기 시작하였다.

현재 세계에서 우주센터 및 자체 발사장을 보유한 운영하고 있는 나라는 2001년 기준 12개국 26개소이며, 이들 국가들은 우주발사체 발사시 필요한 발사통제시설, 발사대시설, 원격자료수신장비, 추적레이다, 지령송신장비, 기상관측장비, 광학추적장비 등 첨단 제반 시설 및 장비들을 갖추고 있다.

이러한 첨단 장비 중에서 추적용 광학장비는 초기순간 발사체의 비행상태를 감시하고 분석하는데 중요한 역할을 하고 있다.

본 기고에서는 이러한 추적 및 거동분석용 광학장비의 기술 개발 동향에 대하여 기술한다. 그리고 국내·외의 광학장비 운용현황 및 향후 우주센터에서 운용될 광학장비에 대해서 소개한다.

2. 우주 발사체 추적 및 거동분석용 광학장비의 개발 동향

우주 발사체 추적용 광학장비(EOTS: Electro Optical Tracking System)는 발사체의 이륙단계에서부터 수십km까지 발사체를 추적하여 비행상태를

감시, 측정 후 궤적 정보, 비행자세와 관련된 영상 정보 및 TSPI(Time Space Position Information) 정보를 획득하여 이를 저장하고 동시에 발사통제센터에 실시간으로 정보를 제공한다. 이 장비는 크게 발사체를 추적하기 위한 Tracking mount, 추적장치(Tracker), 거리 및 비행자세에 대한 영상정보를 획득하기 위한 센서, 획득된 정보를 발사통제센터로 제공하기 위한 네트워크 시스템으로 구성된다.

거동분석용 고속카메라는 발사체의 거동분석을 위하여 발사대 주변에 배치되어 발사체의 발사순간의 거동(엔진점화 및 작동상태, Umbilical Plug 이탈거동, Tower clear 거동 등)에 대한 영상자료를 획득하는 기능을 한다. 위에서 언급한 각 부분에 대한 주요 기술의 개발동향을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 Tracking Mount

Tracking mount는 탑재된 여러 센서를 이용하여 비행중인 발사체를 추적하는 기능을 한다. 또한 Mount의 회전각의 변화에 따라 Azimuth angle과 Elevation angle을 계산해내는 역할을 한다.

1960년대 초기에 사용되었던 광학추적장비의 Tracking mount는 고정식 소형 Mount로써 대부분 탑재용량이 140kg이하였으며 사용된 센서 또한 단순히 35mm 고속 필름 카메라였다. 이는 돔 내부에 설치된 Mount에 운용자가 탑승하여 조준경을 보며 발사체를 추적하는 방식으로써 목표물 위치 추적에 대한 정확도 및 정밀도가 양호하지 못하였다.

그러나 최근에는 광학 및 전자제어 기술의 발전으로 이동식 대형 Mount가 개발되고 있는 추세이다. 이는 고속디지털 카메라, 추적용 적외선 카메라, 거리측정용 레이더, 칼라 비디오 카메라 등 다양한 센서가 탑재된 Mount를 Trailer 위에 장착한

형태로써 발사체 추적시 최적의 시야를 확보할 수 있는 위치로 이동가능하며 DGPS를 이용하여 이동한 Mount의 기준 위치를 정확히 측정할 수 있다.

또한, Direct drive torque 모터와 초정밀 엔코더를 설치함으로써 위치제어의 정밀도 및 정확도가 향상되었으며, 구동방식도 수동제어 대신 광통신에 의한 자동제어 및 원격제어가 가능하게 되었다.

현재 일반적으로 사용되는 Direct drive motor는 Power amplifier와 모터제어장치에 연결되어 구동되며 Tracking mount의 Azimuth 지지대 축과 Elevation 지지대 축에 설치된다.

엔코더는 측정하는 방식에 따라 광학식, 자기식, 전자유도식, 정전용량식, 레이저식으로 구분되며 최근에는 전자유도식 엔코더가 널리 사용되는 추세이다.

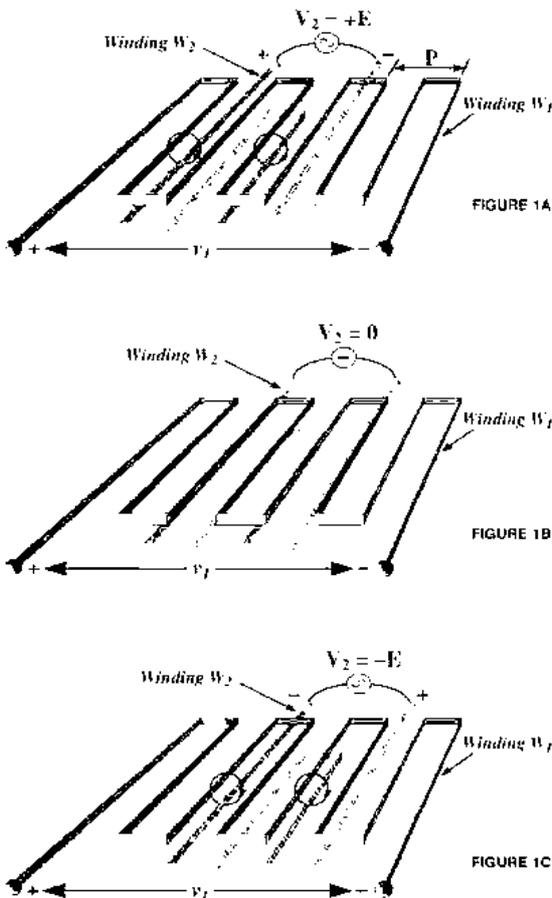


그림 1. 유도기전력을 이용한 angle 측정

전자유도식 엔코더는 동일한 피치 코일로 구성된 스케일과 슬라이더로 구성된다. 스케일 코일의 양단에 교류전압을 걸어준 후 슬라이더가 움직일

경우 발생하는 유도기전력을 측정, 이를 이용하여 Azimuth angle, Elevation angle을 계산한다. 현재 사용되는 Tracking mount의 일반 사양은 표 1에 나타내었다.

표 1. Tracking mount 일반 사양

Payload capacity	600 lb
Angular coverage	Azimuth : $\pm 335^\circ$ Elevation : $-10^\circ \sim +190^\circ$
Angular velocity	Velocity : $60^\circ/\text{sec}$
Acceleration	Acceleration : $60^\circ/\text{sec}^2$
Resolution	21 bit
Encoder type	electromagnetic mult-pole industosyn encoder
bearing wobble	< 3 arc seconds
Non orthogonality	< 5 arc seconds
Motor torque	Azimuth : 300N·m peak Elevation : 200N·m peak

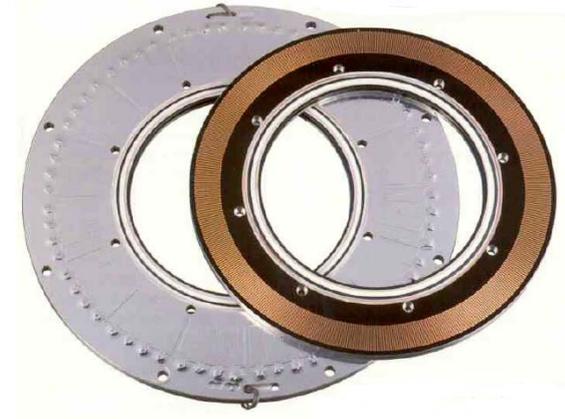
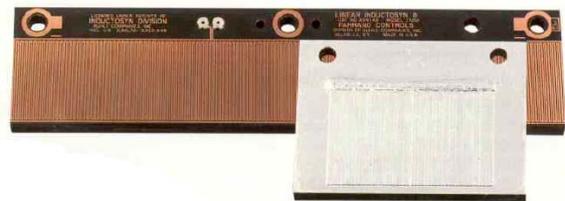


그림 2. 전자유도식 엔코더의 스케일과 슬라이더

2.2 Tracker

1960년대 초기에 사용되었던 광학추적장비는 수동식 mount에 운용자가 탑승하여 발사체를 조준하는 방식이었다. 그러나 최근에는 발사체를 자동으로 포착, 추적하여 목표물의 위치정보를 실시간으로 Control console로 전송해주는 추적장치

(Tracker)를 사용하는 추세이다. 이러한 추적장치는 크게 Video tracker와 Radar tracker로 구분된다.

Video tracker는 추적용 적외선 카메라, 추적용 비디오 카메라와 연동하여 작동된다. 위의 두 센서를 통해 이동하는 발사체를 촬영한 후 촬영된 영상의 Contrast 대비를 이용하여 발사체를 추적하게 되며, Mount 내부에 있는 추적제어장치에 의해 영상 프레임 속에서 이동한 Pixel 만큼 Mount를 구동하게 된다. 추적용 비디오 카메라와 연동하여 작동되는 Video tracker는 날씨조건이 양호하여 시야확보가 용이하며 시계(FOV: Field Of View)안에 들어오는 발사체가 클 경우에 사용한다. 추적용 적외선 카메라와 연동하여 작동하는 Video tracker는 시계확보가 어려운 날씨조건이나 야간에 추적할 경우 그리고 시계 안에 들어오는 발사체가 작을 경우에 사용한다.

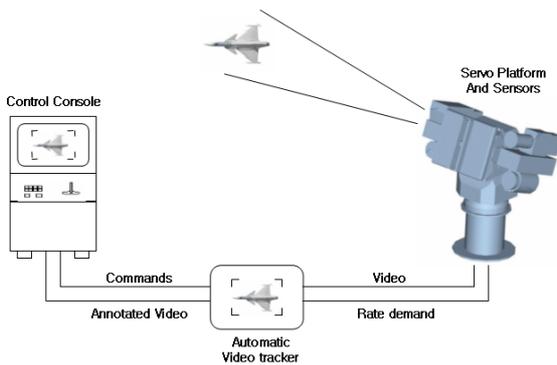


그림 3. Video tracker 개략도

2.3 Sensors

1960년대 초기 발사체를 추적하기 위하여 광학 추적장비에 탑재되었던 센서는 35mm의 고속 필름 카메라와 반사굴절 망원경이 대부분이었다. 그러나 최근에 들어와서는 추적용 적외선 카메라, 거리측정용 레이더, 비디오 카메라, 고속 디지털 카메라 등과 같이 센서의 종류가 다양해지고 있는 추세이다.

그 중 추적용 적외선 카메라는 발사체의 화염으로부터 방출되는 3 μ m~5 μ m영역의 적외선을 감지하여 추적할 수 있는 카메라로서 화각을 조정하여 시계를 확대할 수 있는 Dual FOV 기능을 갖고 있다. 추적용 적외선 카메라에 대한 일반 사양은 표 2에 나타내었다.

표 2. 추적용 적외선 카메라의 일반 사양

항 목	일 반 사 양
Sensor type	HgCdTe/InSb
Detect range (Waveband)	3 μ m ~ 5 μ m
Noise Equivalent Temperature Difference	\leq 50mk
Cooler	Stirling micro cooler
Field of view	Wide : 12° × 8° Narrow : 2.5° × 1.7°
Sensor size	320 × 240
Video format	RS 170 / CCIR
Remote control	RS422 serial link

발사체의 거리정보를 얻기 위하여 3대 이상의 광학장비를 운용하여 삼각측량법에 의해 발사체의 거리정보를 계산해왔던 기존의 방법대신 최근에는 거리측정용 레이더(Range only radar)를 사용하는 추세이다. 이는 1대의 광학추적장비만으로도 정확한 거리정보를 얻을 수 있다.

이 레이더는 10GHz(X-band) 대역의 도플러 방식으로 Radial velocity가 5m/s 이상이 되어야 거리 측정이 되는 단점이 있었으나 최근 FM-CW (Frequency Modulated-Continuous Wave) 방식이 개발되면서 이러한 단점이 개선되었다. 이러한 레이더는 광학추적장비의 Control console에서 모든 동작을 원격제어 할 수 있다. 거리 측정용 레이더에 대한 일반 사양은 표 3에 나타내었다.

표 3. 거리측정용 레이더의 일반 사양

항 목	일 반 사 양
Out power	> 60 watts
Calculated range for a 1m RCS target	55km
Antenna gain	34dB
Maximum beam width	Elevation : 10° Azimuth : 10°
Minimum beam width	Elevation : 2.5° Azimuth : 5°
Unambiguous range	0 to 1500km
Transmitter type	Multiple frequency CW
Frequency	X band, solid state PLO oscillator

고속 카메라는 렌즈와 필름 사이에 프리즘을 설치하고 필름 이동속도와 프리즘 회전속도를 동기화

시커 필름에 영상이 맺히도록 하는 로터리 프리즘 방식의 35mm 고속 필름 카메라와 핀 레지스터 방식의 35mm 고속 카메라에서 CCD(Charge Coupled Device) 또는 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)소자를 이용한 고속 디지털 카메라로 교체되고 있으며 흑백 고속 디지털 카메라에서 IR cut-off filter, ILD filter를 이용한 칼라 고속 디지털 카메라로 교체되고 있다. 또한 50mm~3000mm의 다양한 초점거리를 갖는 줌렌즈를 장착하여 발사체의 영상정보를 획득하며 Iris조정이나 Back focus조정등도 수km 떨어진 Control console에서 원격제어 할 수 있다. 촬영된 발사체의 영상정보는 Control console에 있는 VTR과 Tracking mount trailer에 있는 대용량 Movable hard disk에 기록되며 촬영된 영상을 분석하기 위한 거동분석용 프로그램이 사용되고 있다. 고속 디지털 카메라에 대한 일반 사양은 표 4에 나타내었다.

표 4. 고속 디지털 카메라의 일반 사양

항 목	일 반 사 양
Sensor type	CMOS/CCD (color or Mnochrome)
Sensor resolution	1024 × 1024
Pixel size	12 μ m
Frame rate	1000 frame at 1024 × 1024
Shutter	Electronic shutter, down to 10 μ s
Trigger	Pre & Post trigger
Synchronization	IRIG-B time
Lens mount	F/C mount

3. 해외 추적용 광학장비 운용현황

3.1 미국 Wallops station

미국은 1950년대부터 미항공우주국(NASA)과 국방성 관리 하에 본격적인 미사일 및 우주발사체 개발에 필요한 발사장을 건설하기 시작하였다. 현재 동부 및 서부 연안의 여러 곳에 유도무기 및 우주 발사체 발사장이 건설되었으며 기타 지역에도 건설중에 있다.

이중 Wallops station, 일명 Goddard Space Flight Center는 워싱턴 D.C에 본부를 두고 있는

미항공우주국(NASA) 산하의 발사장으로 1950년대 초기에 건설되었으며 1960년대부터 교체추진 로켓인 Scout 발사체를 개발하여 발사 시험을 진행하였다.

이에 사용되는 광학추적장비는 발사대를 중심으로 배치되었고, 표5와 같이 발사대를 중심으로 관측범위에 따라 SOT(Short Range Optical Tracker), IFLOT(Intermediate Focal Length Tracker) 및 IGORT(Intercept Ground Optical Recorder Tracker)로 나눌 수 있다.

표 5. Wallops station의 광학추적장비

Range	Mount type	Camera type	Lens type	Remarks
short range	SOT	16mm/35mm Mitchell	40 inch refractor 80 inch reflector	Enclosed in 10 foot astrodome
medium range	IFLOT	16mm/35mm Mitchell	10 inch refractor 20 inch reflector	Enclosed in 12 foot astrodome
long range	IGOR	35mm Mitchell	90 inch focal length	mount operation 2 men

이러한 광학추적장비는 Contraves사와 Photosonic사를 중심으로 개발되었다. 20 bit 이상의 초정밀 엔코더와 서보모터를 장착한 Mount는 100Mbps 속도의 광통신으로 원격제어장치(Remote control console)와 연결되어 원격제어가 가능하게 구성되었고, Mount에는 고속카메라 뿐만아니라 거리 측정용 레이더, 적외선 추적 카메라 및 이와 연동하여 발사체를 추적할 수 있는 Video tracker등이 탑재되었다. 또한 발사체 추적에 대한 시각동기를 위하여 GPS를 이용한 IRIG-B time 발생장치와 Mount의 정확한 기준위치정보를 얻기 위하여 DGPS 수신장치가 사용되었다.

현재 미국 케네디 우주센터와 그 밖의 발사장에서 사용중인 모델로는 Contraves사가 개발한 KTM(Kineto Tracking Mount)와 Photosonic사가 개발한 CTM(Compact Tracking Mount)이 주종을 이루고 있으며 일부는 BAE systems사에서

개발한 OTS(Optical Tracking System)을 사용하고 있다.



그림 4. Contraves사의 KTM



그림 5. Photosonics사의 CTM



그림 6. BAE Systems사의 OTS

3.2 일본 가고시마 우주센터

일본은 1960년대부터 일본우주과학연구소 (ISAS, 동경대학 우주항공과학연구소 전신)의 책임하에 가고시마 우주센터(KSC)와 다네가시마 우주센터(TNSC)를 건설하였다. 그 중 가고시마 우주센터는 1962년 오수미 반도의 가고시마현 우찌노우라에 설립되었으며 지금까지 300개 이상의 고공관측로켓과 인공위성을 발사하였다.

이에 사용되는 발사체 추적용 광학장비는 3대의 광학추적장비와 3대의 고속카메라로써 발사대를 중심으로 6곳에 배치되어 운용되었다. 각 관측점에 대한 발사체 추적용 광학장비는 표 6에 나타내었다.

표 6. 가고시마 우주센터 광학추적장비 사용 현황

관측점	장치명	용도	거리/위치
제1관측점	광학추적장치 (CT-3)	발사체추적	480m/ KS점후방
제2관측점	고정식 고속 카메라	고속촬영	532m/ 해측탑
제3관측점	서보 구동식 추적장치	프로그램자 동추적	1960m/ 미야겐 대지
제4관측점	광학추적장치	발사체추적	12000m/ 발사대 남서쪽
제5관측점	고정식 고속 카메라	고속촬영	449m/ 발사점 북쪽
제6관측점	고정식 고속 카메라	고속촬영	9m/ Mu 정비탑

1970년부터 가고시마 우주센터에서 사용되었던 광학추적장비는 90년대 이후 주변기기 및 센서를 중심으로 교체되었다. Mount에는 추적용 적외선 카메라, 고속 디지털 카메라, 칼라 Video 카메라 등의 센서가 탑재되었고, Video tracker를 사용한 자동추적이 가능하게 되었으며 광학 로터리 엔코더를 사용하여 정밀한 Mount 구동을 할 수 있게 되었다.

거동분석용 고속카메라는 발사대 주변과 정비탑에 광학 신호 회선을 구축하여 고속 카메라를 발사 시점에 맞게 무인작동 할 수 있는 시스템을 구축하였으며 기존의 노후화된 장비를 점진적으로 교체하고 있다.

이 밖에 다네가시마 우주센터에서도 3곳의 추적실인 히로타, 타케사키, 가도쿠라 추적실을 운영하고

있으며 사용하는 추적용 광학장비는 가고시마 우주센터에서 사용하는 것과 유사하다.

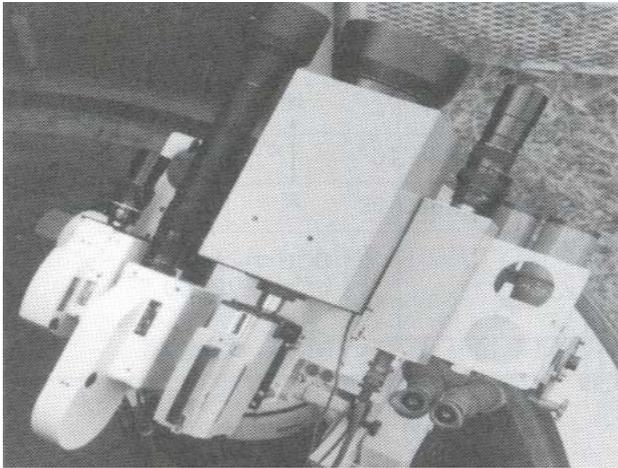


그림 7. 가고시마 우주센터 광학추적장비

표 7. 쿠르 우주센터의 고속 카메라 운용현황

형 태	35mm 고속 필름 카메라	16mm 고속 필름 카메라	35mm 고속 필름 카메라
촬영속도	200 frame/sec	500 frame/sec	200 frame/sec
기록시간	30초 이하	30초 이하	30초 이하
시계범위	140mm 이하	5m 이하	35m 이하
촬영위치	발사대 동쪽, 서쪽, 남쪽방향	발사대주변	발사대 동쪽, 서쪽방향
발사대까지 거리	약 300m	100m 이내	약 300m 이내
렌즈초점 거리	45mm	150mm	150mm
용 도	발사체 이륙 초기 고도 1m~100m까지 발사체 자세 분석	이륙 초기 고도 1m 이내의 발사체 주요 부분	발사체의 전기, 통신 공급선 분리과정

3.3 프랑스 Kourou 우주센터

프랑스는 1961년 우주과학 정책의 일환으로 프랑스 국립우주연구소(CNES, Centre National d'Etudes Spatiales)를 설립하였으며, 1964년 쿠르 우주센터(CSG)를 건설하였다.



그림 8. 쿠르 우주센터의 광학추적장비

쿠르 우주센터의 광학추적장비는 고정식 자동추적장비로써 추적용 적외선 카메라, Telescope를 장착한 칼라 비디오 카메라, 고속 카메라 등의 센서가 탑재되어 있다.

이 밖에 발사거동 분석을 위한 고속 카메라는 발사대를 중심으로 배치되어 운용되며 자세한 사항은 표 7에서 나타내었다.

4. 국내 추적용 광학장비 운용현황

4.1 국방과학연구소

국방과학연구소에서는 1978년 유도무기 및 초기 탄도 비행 자세를 계측하기 위한 광학추적장비와 초기비행탄체의 영상을 분석하기 위한 고속 카메라를 도입하였다.

국방과학연구소의 초기 광학추적장비(EOTS)는 최대 10km까지 추적할 수 있는 수동제어 방식의 고정식 열상추적 장비로써 특수 제작된 돔 내부에 진동방지 장치, 전원공급장치, 온 습도 제어장치등을 갖추어 운용되었다. 또한 35mm 필름 카메라와 반사식 카세그레인 망원렌즈, 목표물 추적용 적외선 카메라가 탑재되었다.

이 후 1999년 유도무기 및 탄도 거동에 대한 영상을 추적하기 위하여 최대 15km까지 추적할 수 있는 원격 제어방식의 이동식 적외선 추적 장비를 도입하였다.



그림 9. 국방과학연구소 광학추적장비

이 광학추적장비는 레이더와 연동하여 자동추적이 가능하며 추적용 적외선 카메라, 초당 1000 프레임을 촬영할 수 있는 고속 디지털 카메라, 비디오 카메라, 이동식 트레일러 및 차량, Pedestal 등으로 구성되어 있다.

국방과학연구소의 초기 고속 카메라는 필름 카메라로써 고속 필름 현상 준비실을 갖추어 운용되었으나 획득된 영상필름을 인화하는데 걸리는 시간이 길며 작업상 번거로운 단점이 있어 지금은 고속 디지털 카메라로 교체되었다. 교체된 고속 디지털 카메라는 초당 500 프레임을 촬영할 수 있으며 디지털 영상 분석기, 디지털 영상 출력기와 함께 운용되고 있다.

4.2 한국항공우주연구원

한국항공우주연구원은 1996년 국가우주개발 중장기 기본계획에 의거하여 국내 기술에 의한 저궤도 위성 및 발사체 개발로 독자위성 발사를 목표로 수행되는 사업 중 하나인 우주센터 건설 및 운용과 관련하여 우주센터의 주요 장비들 중 발사체의 발사거동 분석 및 추적, 비행상태의 감시를 위한 추적용 광학장비를 도입하였다.

우주센터의 광학추적장비는 발사체 추적시 최적의 시야를 확보할 수 있는 위치로 이동가능한 Mobile 타입의 추적장비로써 DGPS를 이용하여 이동한 Mount의 정확한 기준위치를 측정할 수 있다. 또한, 발사체의 자동포착 및 추적을 위하여 Video tracker, Radar tracker가 탑재되어 있다. Video tracker는 추적용 적외선 카메라, 칼라 비디오 카메라와 연동되어 작동된다.

총 300kg를 탑재할 수 있는 Tracking mount에는 10GHz(X-band) 대역의 도플러 방식인 거리측정용 레이더, 3~5 μ m영역의 발사체 화염을 감지하여 추적할 수 있는 추적용 적외선 카메라, 발사체의 비행상태를 실시간으로 포착할 수 있는 칼라 비디오 카메라, 미션 종료 후 발사거동 분석을 위한 고속 디지털 카메라, 방송용 칼라 비디오 카메라가 탑재되어 있다. 고속 디지털 카메라는 초당 500프레임을 촬영할 수 있으며 칼라 비디오 카메라, 고속 디지털 카메라에는 50mm~3000mm의 줌렌즈가 장착되어 있어 30km까지 촬영이 가능하다.

Tracking mount는 Direct drive torque 모터로 구동되며 21bit 초정밀 전자유도식 엔코더로부터 Azimuth

angle과 Elevation angle을 계산한다. 이러한 센서 및 Tacking mount는 Control console에서 광통신을 이용한 자동 및 원격제어가 가능하다 . 우주센터의 광학 추적장비에 대한 사양은 표 8에서 나타내었다.

표 8. 우주센터의 광학추적장비 사양

항 목	사 양
Tracking mount	
Type	Mobile
Payload	600 lbs
Encoder Resolution	21 bits
Angular velocity	60°/sec
Acceleration	60°/sec ²
Motor type	Direct drive torque motor
IR camera	
Sensor type	HgCdTe/InSb
Wave band	3 μ m ~ 5 μ m
NETD	≤ 50mk
FOV	Wide : 12° × 8° Narrow : 2.5° × 1.7°
Range Only Radar	
Output power	> 60 watts
Calculated range for a 1m ² RCS target	55km
Acquisition time	up to 1.0sec
Antenna gain	34dB
Transmitter type	Multiple Frequency CW
Frequency	X band, solid state PLO oscillator
High Speed Camera and Lens	
Sensor type	CMOS
Pixel resolution	1280 × 1024
Pixel size	12 μ m
Frame rate	500 frames at 1280 × 1024
Recording time	2 minutes
Shutter speed	variable up to 2 μ s
Image format	AVI, TIFF, JPEG, BMP
Forcal length	50mm ~ 3000mm
F/number	f/7.3 ~ f/16



그림 10. 우주센터의 광학추적장비

발사대 주변에는 초당 2000 frame를 촬영할 수 있는 다수의 고속디지털 카메라를 설치하여 발사초기 발사체의 거동을 분석한다. 고속 디지털 카메라에 대한 사양은 표 9에서 나타내었다.

표 9. 우주센터의 고속 디지털 카메라 사양

항 목	사 양
Sensor type	CMOS (color)
Sensor resolution	1024 × 1024 Pixels
Pixel size	17.5 μ m
Frame rate	2000 frame at 1024 × 1024
Shutter	Electronic shutter, down to 4 μ s
Trigger	Pre, Post & Center trigger
Synchronization	IRIG-B time
Pan/tilt driver	Operation velocity/degree

5. 결론

광학장비는 전자공학, 광학, 반도체, 신소재 등 첨단기술이 복합적으로 응용된 분야이다. 주요 선진국들은 자체 발사장의 시스템 운용개념에 적합한 추적용 광학장비 및 서브시스템을 개발하고 있다. 광학장비 내부에 있는 서브시스템인 거리측정용 레이다는 Radar tracker와 연동하여 그리고, 적외선 카메라와 칼라 비디오 카메라는 Video tracker와 연동하여 운용되면서 추적의 전 과정이 자동화 되고 있다.

또한, 정밀한 추적 데이터를 획득하기 위하여 Tracking mount에 다양한 센서들이 탑재됨에 따라 Mount의 탑재용량은 증가하는 추세이고, 최근 이동식 Mount도 많이 운용되고 있다. 엔코더의 경우 최근에는 21bit 분해능을 갖는 전자유도식 엔코더가 널리 사용되고 있다.

이에 반하여 국내기술은 선진기술을 많이 필요로 하는 상황이며 앞으로 추적용 광학장비의 기술 개발에 많은 노력이 필요하다.

참고문헌

1. 한국항공우주연구원, "우주개발의 전진기지-우주센터 해외 우주센터 및 나로 우주센터 소개" 항공우주산업

기술동향, 제1권, 제1호, 2003, pp.100-108
 2. NASA, Wallops station handbook general information, 1964, pp. 201-226
 3. NASA, Wallops flight facility range user's handbook, 2003, pp.45-47
 4. 東京大學 宇宙航空 研究報告, 觀測 ロケット 特集号, 第11卷 第 1号, " M-4S-1,2,3,4 号機 の 光學的 追跡 について 高速飛 しょう体 の 光學的 追跡 に 關 ", 1975年 3月, pp.310-332
 5. 宇宙科學 研究所, 宇宙科學 研究 報告, 特集 第16号, 觀測 ロケット 研究 報告, M-3S型 特集号, " M-3S-1,2,3,4号機 の 光學 追跡 について", 1986年 10月, pp.369-388
 6. 日本우주과학연구소 홈페이지 <http://www.isas.jaxa.jp>
 7. 프랑스 크루 우주센터 홈페이지 <http://www.csg-spatial.tm.fr>
 8. 국방과학연구소 홈페이지 <http://www.add.re.kr>
 9. white sands test center 홈페이지 <http://wstc.wsmr.army.mil>