

## 고속 카메라 기술 동향

박두진\*, 노영환\*\*, 김태형\*\*\*, 이효근\*\*\*\*

# Technical Trend of High Speed Camera

Doo-Jin Park\*, Young Hwan Noh\*\*, Tae Hyung Kim\*\*\*, Hyo Keun Lee\*\*\*\*

### ABSTRACT

High speed camera is very important and essential device to analyze the motion of fast moving object in detail. This paper describes the basic concepts of the high speed film camera and high speed digital camera and the history and future technical trends in high speed camera industry. In addition, application field of high speed camera in Korea as well as other countries and future plan to use high speed camera in Naro Space Center has been described.

### 초 록

빨리 이동하는 피사체의 움직임을 상세히 분석하기 위해서는 고속 카메라가 필수 불가결하다. 본 논문에서는 고속 필름 카메라와 고속 디지털 카메라의 기본개념, 역사적 배경 및 향후 고속 카메라의 동향을 기술 하고자 한다. 또한 해외 및 국내 고속 카메라의 사용현황과 나로 우주센터에서 사용될 고속 카메라의 운용계획을 기술 하고자 한다.

**Key Words :** 핀 레지스터 방식 고속 필름 카메라, 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라, 회전 드럼식 고속 필름 카메라, CCD(Charge Coupled Device)영상센서, CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 영상센서

\* 박두진, 한국항공우주연구원 나로 우주센터 기술관리팀  
djpark@kari.re.kr

\*\* 노영환, 한국항공우주연구원 나로 우주센터 기술관리팀  
nyh@kari.re.kr

\*\*\* 김태형, 한국항공우주연구원 나로 우주센터 기술관리팀  
thkim@kari.re.kr

\*\*\*\* 이효근, 한국항공우주연구원 나로 우주센터 기술관리팀  
hklee@kari.re.kr

## 1. 서론

고속 카메라는 스포츠 운동역학 분석, 자동차 충돌 시험, 방송광고, 무기개발 및 발사체 개발 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 일반적으로 고속 촬영은 초당 100프레임 이상의 속도로 촬영하는 것을 의미한다.

현재 문헌에 기록된 최초의 고속촬영은 1873년 말경으로 알려져 있다. 그 당시 논란이 되었던 말이 달리는 순간 다리의 움직임을 관찰하기 위해 영국의 사진작가 Edward Muybridge가 12대의 스틸 필름 카메라에 전자 셔터장치를 이용하여 촬영을 하였다. 촬영 결과 말의 다리가 짱으로 나란히 움직이는 것으로 알고 있었으나, 네 다리가 땅에서 떨어지는 것을 은판사진을 통해 확인하였다.

이후 1882년 Mully가 고안한 사진 총으로 새의 비행을 촬영하였다. 고속 카메라는 필름 및 카메라의 발전으로 1950년대 ~ 1960년대에는 기계식 고속 필름 카메라 형태인 핀 레지스터 방식 고속 카메라와 로터리 프리즘 방식 고속 카메라가 개발되었다. 초기에는 영화 산업에 주로 이용되었으나, 미·소 냉전시대에는 유도무기 시험 및 발사체의 연소시험 등에서 주로 사용되었다. 1980년대부터 반도체기술의 급격한 발전과 더불어 CCD 영상센서 및 CMOS영상센서가 내장된 고속 디지털 카메라가 개발되어 현재는 고속 디지털 카메라가 주종을 이루고 있다.

본 원고에서는 고속 필름 카메라와 고속 디지털 카메라에 대한 내용과 미국의 로켓 발사장, 국내 유도무기 시험장의 고속 카메라 사용현황 및 나로 우주센터의 고속 카메라 운용계획을 기술하고자 한다.

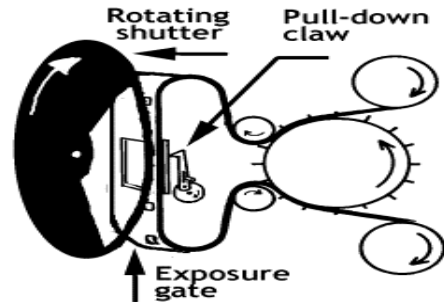
## 2. 고속 카메라 개발 동향

### 2.1 고속 필름 카메라 개발 동향

고속 필름 카메라는 핀 레지스터 방식 고속 카메라, 로터리 프리즘 방식 고속 카메라, 회전 드럼식 고속 카메라 및 회전 거울식 고속 카메라가 있다. 핀 레지스터 방식의 16mm 및 35mm 고속 카메라는 1950년대 초반에 D.B Millken사에서 개발하였다. 이후 Mitchell,

Redlake 및 Photosonic사 등에서 개발하여 미사일 탄두시험, 로켓 연소시험 및 로켓 발사 초기 거동분석 등에 널리 사용되었다.

그림 1은 핀 레지스터 방식 고속 필름 카메라의 간략한 내부구조이다.



자료 : 참고문헌 [2]

그림 1. 핀 레지스터 방식 고속 카메라 내부구성

고속으로 움직이는 피사체를 촬영하기 위해서 rotating shutter가 열리는 순간에 피사체의 영상은 exposure gate를 통과한다. 아울러 pull down claw가 풀림과 동시에 필름은 핀에 고정되고, 영상은 필름에 노출 및 기록된다. 이후 rotating shutter가 닫히고 pull down claw로 촬영된 필름은 이동된다. 이와 같은 촬영방법으로 최고 500 fps(frames per second)까지 영상을 촬영할 수 있다.

촬영에 필수적인 필름 노출시간(exposure time)은 rotating shutter의 열린 각(opening angle)의 크기와 필름의 이동속도(frame rate)에 의해 결정된다.

$$ET = \frac{SA}{360^\circ \times FR}$$

ET : 노출시간 (exposure time)

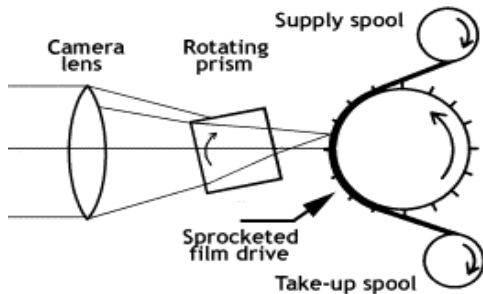
SA : 셔터 열린 각 (shutter opening angle)

FR : 프레임(frame rate)

예를 들면 셔터 열린 각을 45도, 프레임 비가 200 fps 일 경우 1/1600초 노출되어야 영상 끌림 현상(blur)이 나타나지 않는다.

로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라는 1950년대 후반부터 Redlake, Photosonic 및 NAC사 등에서 개발되었으며, 기존의 핀 레지스터 방식보다 최대 40,000 fps로 고속촬영이 가능하였다. 또한 필름 이동 시 고속 회전에 따른 부하가 핀 레지스터 방식보다 적었다. 이런

장점 때문에 유도 무기개발 및 발사체 개발에 있어 피사체의 고속현상을 보다 상세히 분석할 수 있었다. 카메라에 대한 간략한 내부 구성은 그림 2와 같다.



자료 : 참고문헌 (2)

그림 2. 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라 내부 구성

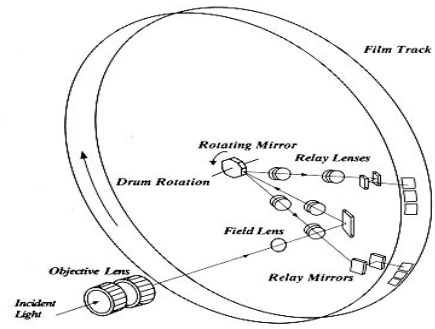
카메라 렌즈를 통해 입사한 피사체의 영상은 고속으로 회전하는 프리즘을 경유하여 supply spool에서 이동한 필름과 프리즘을 통해 영상 초점이 일치하는 필름 면에 순간적으로 기록된다. 즉 고속으로 영상을 촬영하기 위해서 회전 프리즘과 필름의 sprocket film drive 이동속도는 동기화 되어야 한다. 표 1에 핀 레지스터 방식과 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라에 대한 성능을 비교 하였다.

표 1. 핀 레지스터 방식 과 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라 성능 비교

항목	핀 레지스터 방식	로터리 프리즘 방식
프레임 비	10 ~ 500 fps	10 ~ 40,000 fps
셔터 각	7.5° ~160°	9° ~72°
필름 용량	Max. 400 ft	Max. 1200 ft
셔터 방식	회전 디스크형	4면 회전 프리즘형

이외에도 1950년대 중반에 회전 드럼식 및 회전 거울식 고속 필름 카메라가 추가로 개발되었다.

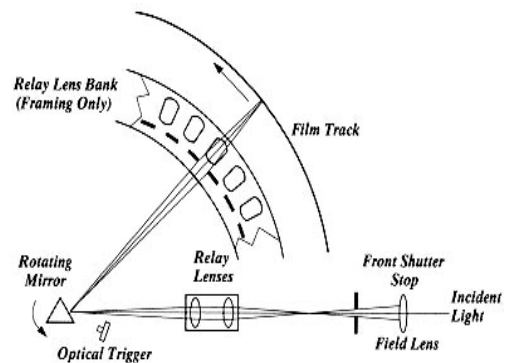
회전 드럼식 고속 카메라에 대한 내부 구성은 그림 3과 같으며, 고속으로 움직이는 피사체를 필름에 기록하기 위하여 입사영상은 대물렌즈와 교체 렌즈를 경유하여 회전거울에 반사되어 회전 드럼에 설치된 필름에 기록된다. 촬영속도는 최대 100,000fps 가능하다. 그러나 드럼에 설치된 필름 카세트의 용량이 최대 1m 정도로 고속 촬영에 대한 기록시간이 매우 짧은 단점이 있다.



자료 : 참고문헌 (3)

그림 3. 회전 드럼식 고속 필름 카메라 내부구성

그림 4는 회전 거울식 고속 카메라의 내부구성이며, 피사체의 입사영상은 대물렌즈 및 필드렌즈를 경유하여 가스터빈으로 초당 20,000번 회전하는 거울을 통해 반사된다. 그리고 영상은 슬릿과 교체 렌즈군을 통과하여 필름에 기록된다. 최대 영상속도는 35,000fps 정도이나 필름 용량이 최대 90cm 정도로 기록시간이 짧은 단점이 있다.



자료 : 참고문헌 (3)

그림 4. 회전 거울 식 고속 카메라 내부구성

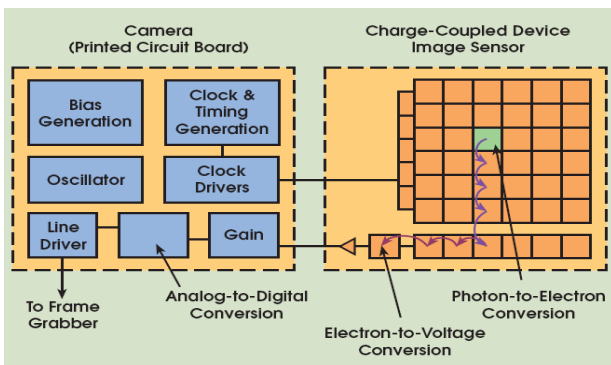
## 2.2 고속 디지털 카메라의 개발 동향

기존의 고속 필름 카메라를 사용할 경우 촬영된 영상은 할로젠 은의 광화학 반응으로 인해 필름에 잠상(latent image)으로 존재하기 때문에 촬영 후, 고속 영상을 관찰하기 위해서는 현상처리를 해야 한다. 그리고 연속적인 피사체 영상을 보기 위해서는 영사기 또는 필름 스캐너를 이용하여 디지털 영상으로 편집해야 한다. 그러므로 촬영된 영상을 관찰 및 분석까

지는 암실에서 필름 현상, 건조, 필름감기 등과 같은 여러 과정을 거쳐야 하므로 불편함과 시간이 많이 소요되는 단점이 있다.

1970년대부터 반도체 소자 개발과 함께 CCD (Charge Coupled Device)영상센서가 미국의 벨연구소 Willard Boyle와 George Smith에 의해 최초로 개발되었다. CCD영상센서 디지털 카메라는 필름과 달리 광전효과에 의해 센서에 영상을 기록하고 자기 테이프 또는 반도체 기억 소자인 DRAM(Dynamic Random Access Memory) 및 Flash Memory에 영상을 저장한다.

그림 5와 같은 CCD영상센서를 사용하는 고속 디지털 카메라에서 영상을 얻기까지는 렌즈를 통해 입사한 영상이 센서의 픽셀에 노출되면 광자(photon)가 전하로 전환되고 순차적으로 전압형태로 바뀌어 증폭된 출력신호가 주변 PCB회로에 전달된다. 이후 신호처리 과정을 거쳐 CCD 영상센서에 기록 한다.



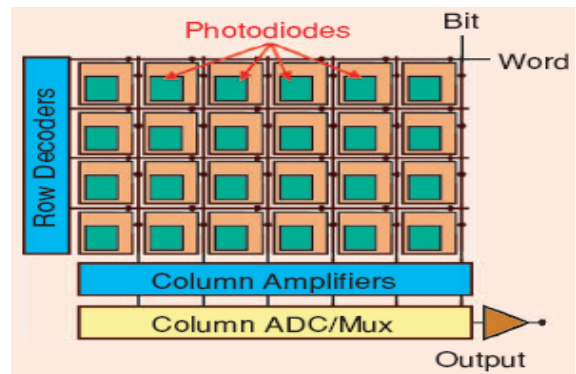
자료 : 참고문헌 [4]

그림 5. CCD(Charge Coupled Device) 센서 구조

1980년대에 주로 사용되었던 CCD 영상센서 고속 디지털 카메라는 Eastman Kordak사의 Ektapro system이다. 센서의 최대 픽셀 수가 192 × 240 픽셀로 구성되었으며, 영상을 1,000 fps 속도로 촬영을 하고 자기테이프에 기록 하였다. 최근에 선보인 CCD 영상 센서 고속 디지털 카메라는 최대 256 × 256픽셀을 구성하여 1,000,000 fps 속도로 영상을 촬영 할 수 있다. CCD 영상센서는 전하 이동의 효율을 극대화하기 위해 복잡한 공정이 도입되어야 하고 수율(yield)이 낮은 단점이 있다.

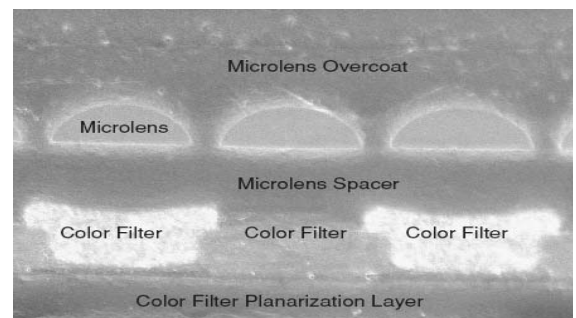
1990년대 초반에 NASA의 제트 추진연구소에서 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 기술을 적용한 영상센서를 개발 하였다. 그림 6과 같은

CMOS 영상센서를 사용하는 고속 디지털 카메라에서 영상을 얻기 위해서는 카메라에 부착된 렌즈를 통해 입사한 영상이 센서상부에 형성된 영상 집속장치인 microlens 및 컬러필터를 경유하며, 광 다이오드와 반응하여 광자가 전하로 전환된다. 이후 전하가 전압 형태로 바뀌어 센서내부에서 증폭 및 신호 처리과정을 거쳐 영상을 기록하고 반도체 기억소자인 DRAM 및 Flash Memory에 영상을 저장한다.



자료 : 참고문헌 [5]

그림 6. CMOS 영상 센서 구조



자료 : 참고문헌 [5]

그림 7. CMOS 영상 센서 픽셀 단면 (주사전자 현미경 사진)



자료 : 참고문헌 [5]

그림 8. CMOS 영상 센서 칩

CMOS 영상센서는 칩(chip)안에 픽셀 배열, A/D converter, amplifier 및 주변회로를 모두 집적화 할 수 있으며, CCD 영상센서에 비해 영상 처리속도가 빠르다. CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라는 카메라 제어용 소프트웨어가 내장된 개인용 컴퓨터를 이용하여 전자 셔터, 프레임 비, 노출시간, 픽셀 수를 사용용도에 따라 가변적으로 조정할 수 있으며, 광 통신 방식을 적용하여 원거리에서 원격조정이 가능하다. 표 2에서 고속 디지털 카메라에 내장된 CMOS 영상센서와 CCD영상센서에 대한 성능을 비교하였다.

표 2. CCD 영상 센서와 CMOS 영상센서 의 성능 비교

performance	CCD sensor	CMOS sensor
Resolution	High	Higher
Speed	High	Higher
Shutter	Fast	Fast
Fill factor	High	Moderate
Dynamic Range	High	Moderate
Sensitivity	High	Moderate
Power level	High	Low
Smear	Moderate	Low
Noise	Low	Moderate

최근에 개발된 우주개발분야에서 사용되는 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라는 일본의 Photron사의 FASTCAM SA1 모델과 미국의 Vison Research사의 Phantom 9.1모델이 있으며 표 3에서 두 제품의 성능을 비교하였다.

표 3. FASTCAM SA1과 Phantom 9.1 의 성능 비교

performance	Phantom 9.1	FASTCAM SA1
Active pixels	1,632 × 1,200	1,024 × 1,024
Max. FPS	144,175	675,000
Memory	24G byte	32G byte
Shutter speed	2μsec	370nsec
Network	G bit Ethernet	G bit Ethernet
FPS at full pixels	1,090	5,400

고속 영상 촬영성능에 있어 중요한 요소 중 하나인 최대 해상도에서 촬영속도가 FASTCAM SA1이 5,400 fps로 Phantom 9.1보다 약 5배 빠르며, 또한 픽셀

수를 가변시킬 경우 FASTCAM SA1이 최대 675,000 fps까지 촬영 가능하다.

현재 미국의 케네디 우주센터 및 케이프 커너베럴 공군기지에서 Photron사의 FASTCAM SA1모델이 사용 중에 있다.

### 3. 해외 및 국내 고속카메라 사용현황

#### 3.1 미국 발사장의 고속 카메라 사용 현황

1950년대~1960년대 후반까지 미국의 유도무기 및 로켓 발사장에서 사용되었던 고속 카메라는 핀 레지스터 방식 고속 필름 카메라와 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라가 대부분 이었다.

이들 고속 카메라는 발사대 주변에 설치하고 발사체 이륙순간에 발사체의 각종 공급선(umbilical)분리 상태, 발사체 자세 등을 확인하였다. 또한 발사체의 이륙 전, 약 -10초부터 이륙 후, 약 +170초 까지 발사체의 자세 및 상태를 촬영하기 위해서 광학 추적 장비에 고속 카메라 및 40인치 ~ 200인치 초점거리를 갖는 반사 렌즈를 장착하여 사용하였다.

그림 9는 Photo sonics사의 16mm 핀 레지스터 방 식 고속 필름 카메라로서 주로 발사대 주변에 설치되어 사용되었다. 그림 10은 White Sand Test center 및 케네디 우주센터에서 발사체 추적용으로 사용했던 광학 추적 장비이며, Photosonic사의 35mm 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라를 장착하여 사용 하였다.



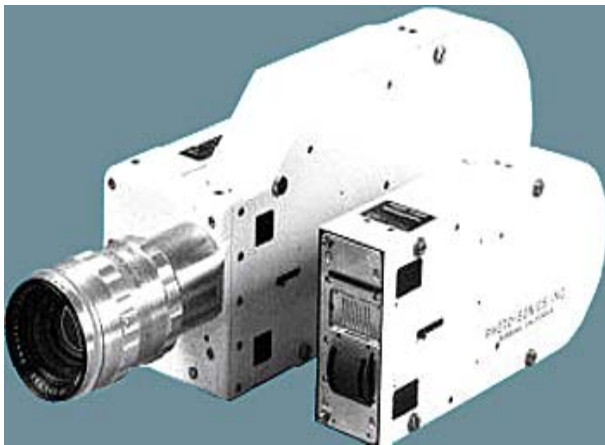
자료 : 참고문헌 (8)

그림 9. 16mm 핀 레지스터 방식 고속 필름 카메라 (Photsonics사)





자료 : 참고문헌 [9]  
그림 10. KINETO 433 광학 추적 장비 (BrashearIps사)



자료 : 참고문헌 [8]  
그림 11. 35mm 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라 (Photosonics사)

1990년대 후반부터 미국의 로켓 발사장에서는 기존에 사용하던 고속 필름 카메라를 CMOS 영상 센서 고속 디지털 카메라로 서서히 교체하고 있는 추세이다. 특히 1986년 1월 28일, 이륙 후 약 75초에 공중 폭발한 우주 왕복선 챌린저 호와 2003년 2월 1일, 귀환 도중 폭발한 콜롬비아 호 비행사고 이후 케네디 우주 센터에서는 광학장비를 대폭적으로 보강하였다. 고속 카메라 또한 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라를 사용하여 발사초기 순간에 왕복선의 고체 연료부스터의 연결부위, 각종 공급선 및 롤(roll) 자세 등을 관찰

하였다.

그림 12는 케이프 커너베럴 공군기지에서 2006년 1월 19일에 발사된 아틀라스 5로켓의 이륙 순간을 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라인 FASTCAM-MAX를 이용하여 1024 × 1024 픽셀의 해상도에서 촬영속도 250 fps로 2.94초 동안 촬영한 영상의 한 장면이다.



자료 : 참고문헌 [7]  
그림 12. 아틀라스 5 로켓의 이륙 장면

그림 13은 케네디 우주센터에서 2008년 3월 11일에 발사된 Endeavour 우주왕복선의 이륙 순간을 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라 인 FASTCAM-SA1을 이용하여 1024 × 1024 픽셀의 해상도에서 촬영속도 500 fps로 1.60초 동안 촬영한 영상의 한 장면이다.



자료 : 참고문헌 [7]  
그림 13. Endeavour 우주 왕복선 이륙 장면

### 3.2 국내 고속 카메라 사용 현황

국방과학연구소 종합시험장에서는 유도무기 및 탄도 시험을 위해 1978년 Phtosonics사의 16mm 핀 레지스터 방식 고속 필름 카메라와 35mm 로터리 프리즘 방식 고속 필름 카메라를 도입하여 운용하였다. 그러나 영상을 관찰 및 분석하기 위해서 필름 현상 및 인화에 따른 시간이 많이 소요되었고 해당 장비의 노후화로 인해 2000년대 중반부터 완전히 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라로 교체 되었다. 현재 주로 사용 중인 카메라는 미국의 Vision Research사의 Phantom 7.1과 9.1 모델로써 유도무기 탄두시험 시, 운용자의 안전을 고려하여 100M/ 1G bit Ethernet 통신으로 카메라의 원격제어가 가능하다. 그림 14는 Phantom v9.1 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라 이다.



자료 : 참고문헌 [7]

그림 14. Phantom v9.1 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라

이외에 현재 스포츠 과학 분야 및 자동차 충돌 시험에서 사용되는 고속 카메라 또한 CMOS 영상센서 고속디지털 카메라로 대체되고 있는 추세이다.

특히 고속 디지털 카메라의 거동 분석 프로그램을 이용하여 골프 스윙자세, 야구선수의 투구자세 및 타격자세 등 운동역학 분석에 활용되며 자동차 충돌 시험에서 에어백 반응시간 및 충돌상태 등을 분석하는데도 이용된다.

### 3.3 나로 우주센터의 고속 카메라 운용 계획

향후 나로 우주센터에서 발사될 한국형 발사체의 초기 이륙순간의 발사체 주요부분에 대한 상태, 전력 및 통신 공급선 분리장면 등을 고속 촬영하여 발사

초기의 발사체 거동분석에 활용할 계획이다. 이를 위해 1024 × 1024 픽셀의 해상도로 500 fps 촬영 시 최대 12초까지 저장이 가능한 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라를 발사대 주변에 다수 설치하여 운용할 예정이며, 또한 이륙 후 발사체의 초기비행 구간의 비행자세 분석을 위해 1200 × 1000픽셀의 해상도로 500fps로 운용 시 최대 2분까지 저장 가능한 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라를 광학추적 장비에 장착하여 운용할 계획이다.

## 4. 결론

앞에서 언급한 바와 같이 고속카메라의 사용 초창기에는 고속 필름 카메라가 널리 사용 되었으며, 내부 구조의 기능 향상에 따라 발전 하였다.

그러나 1990년대부터 반도체 집적회로의 급격한 발전으로 국방, 스포츠, 우주개발 및 자동차산업 등에서 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라로 대체되고 있는 추세이며, 기존의 필름과 유사한 화질을 갖는 고화질 CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라가 개발되고 있다.

또한 제어 및 영상신호를 원격으로 전송하기 위한 통신 기술의 발전으로 광케이블을 통한 전송속도 향상을 가져올 것이며, 고속 디지털 카메라의 원격제어 및 영상 신호 전송방식도 초고속 무선 랜을 적용하여 폭넓게 사용 될 것이다.

## 참고문헌

1. 김의진, “운동기술의 영상분석을 위한 기초지식”, 스포츠 과학 정보, 1988, pp.1-14
2. Andrew Davidhazy, An Overview of High Speed Photographic Imaging, pp.1-29
3. 회전 드럼식 고속 필름 카메라 및 회전 거울식 고속 필름 카메라 관련 홈페이지  
<http://www.cordin.com>
4. Gene Nepomuceno, CMOS Technology in High Speed Imaging An Introduction, pp.1-15
5. Abbas El Gamal & Helmy Eltoukhy, CMOS Image Sensor pp. 1-20

6. 田中益男, “사진의 과학”, 학문사, 1995, pp. 42-55
7. CMOS 영상센서 고속 디지털 카메라 관련 홈페이지  
[www.photron.co.jp](http://www.photron.co.jp)  
[www.visionresearch.com](http://www.visionresearch.com)
8. 고속 필름 카메라 관련 홈페이지  
[www.photosonics.com](http://www.photosonics.com)
9. 미국 항공 우주국 홈페이지  
[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)
10. White Sands Test Center 홈페이지  
<http://wstc.wsmr.army.mil>
11. 국방과학 연구소 홈페이지  
[www.add.re.kr](http://www.add.re.kr)
12. 노영환 외, “우주 발사체 추적 및 거동분석용 광학 장비기술개발동향”, 항공우주산업기술동향, 2004, pp.106-113
13. 박두진 외, “발사체의 발사거동분석을 위한 고속 카메라 시스템 설계 및 구현”, 시험평가기술 심포지엄, 2003, pp.31-39