

고속계측기술의 활용방법

글 : 김형섭 / 국방과학연구소
시험본부 제1시험장

본 자료는 지난 5월 19일, (주)브이.텍의 제3회 광계측기술워크샵에서 발표된 내용중 일부를 발췌한 것이다.

고속촬영기술에 관심있는 독자제현의 많은 참고 바란다.

-편집자 주-

고속촬영기술의 역사적 배경을 살펴보고 고속촬영장비를 특성별로 분류하여 소개하였다. 실제적인 촬영시 고려해야 될 촬영범위, 렌즈의 선정, 촬영속도의 결정, 필름선택과 노출에 관해 다루었으며 앞으로의 고속촬영기술의 발전방향을 기술하였다.

I. 서 론

1839년 프랑스의 Louis Daguerre에 의해 최초로 실제적인 사진기술이 발명됨에 따라 오늘날 예술분야 뿐만 아니라 과학분야에 크게 이용되고 있다. 백문이 불여 일견 (Seeing is Believing)이란 속담처럼 인간이 얻은 정보중 시각으로 확인하는 것 만큼 확실한 정보는 없는 것이다. 그러나 인간의 눈으로 감지하는 반응시간은 1/4초 정도이며 그보다 빠른 현상에 대

해서는 감지할 수 없다.

고속촬영기술은 그 시간의 한계를 최대한 넓혀 공간상의 운동상태를 영상으로 기록하고 분석할 수가 있다. 마치 현미경이 인간의 눈으로 분해할 수 없는 공간영역을 확대시켜 분해할 수 있듯이 시간영역을 확대시켜 느린 동작으로 분석할 수 있는 시간 현미경과 같은 것이다. 일반 영화용 필름은 공간상의 장면을 기록함과 동시에 소리를 기록하지만 고속촬영용 필름은 소리 대신 시간을 기록하므로써 시간의 흐름에 따른 공간상의 움직임을 분석할 수 있게 해준다.

고속촬영기술의 장점은 예상되거나 예상치 않은 현상들을 실제적으로 가시화시킬 수 있으며 생물학적인 대상을 제외하고는 조사할 대상에 거의 영향을 끼치지 않는다. 또한 필름내에 많은 정보를 수록하므로써 정상적, 정량적인 분석

을 가능케 한다.

인간의 자연현상에 대한 지식이란 주어진 조건 내에서 일어나는 현상에만 익숙해져 있으며 초고압, 초저온, 초고속 따위의 극한 조건 아래에서는 매우 특이한 현상들이 일어난다. 탄도학분야에 있어서 일어나는 현상들은 거의 초고속운동이며 이들에 대한 연구에 있어 고속촬영기술은 필수적일 수 밖에 없다.

본 논문에서는 고속촬영기술의 역사적 배경을 살펴보고 촬영기술에 대한 정의와 분류를 하였다. 또한 실제적인 촬영시 고려할 요소들을 다루고, 앞으로의 발전방향을 제시하므로써 관련분야를 처음으로 접하는 관련 실무자들에게 도움을 주고자 한다.

II. 역사적 배경

최초의 고속촬영사진은 18

51년 William Henry Fox-Talbot가 라이덴 병(Leyden jar)으로 부터 방전시켜 얻은 전기섬광을 이용하여 고속회전판에 부착된 런던 타임지(London times) 기사를 선명하게 찍은 것이었다.

1878년에 Prague 대학의 E. Mach교수는 짧은 지속시간을 갖는 섬광을 이용, 고속비행중인 탄을 역광(shadow) 사진으로 찍어 논문으로 발표했다.

1929년 Cranz와 Schardin은 다중 섬광 촬영기법을 고안했다. 이 기술은 비행중인 탄의 연구를 위해 초당 백만장에 이르는 연속사진을 찍을 수 있게 했다. 동물과 인간의 이동기관(Locomotion)에 관한 연구로는 1872년 Edward Muybridge에 의해 24대의 카메라로 도약(Full Gallop)중에 있는 말을 찍음으로써 말이 달릴 때 4발이 동시에 지면에서 떨어진다라는 사실을 입증하였다. 1893년 Jenkins는 Chronoteine이라는 카메라를 이용하여 표준 35mm 필름에 초당 3,200매의 속도로 촬영하였다.

1930년 초 MIT의 Harold E. Edgerton 박사는 수은 등(Mercury Arc)의 장점을 개선시켜 섬광관(Flash Tube)과 전자회로를 개발하여 오늘날 전자플래시(Flash)를 일반화 시키는데 큰 기여를 했다.

2차 세계대전 이후로 유도

무기와 항공산업에 대한 큰 관심으로 인해 고속촬영기술은 크게 확대 가속되었다. 회전프리즘(Rotating-Prism)개념의 고속카메라의 개발은 실제적으로 가장 효과적으로 쓰였으며 Kirby Race Timing 카메라가 최초로 선을 보였다. 이때의 촬영속도는 초당 1,000매 정도였다. 16mm카메라와 시계(clock)로 구성된 완전한 Timing System은 Eastman Kodak Co.와 Electrical Research Products, Inc.(ERP-I)에 의해 개발되어 1932년 LA 올림픽에 사용되었다. 벨전화연구소(Bell Telephone Lab)에서 릴레이(Relay)와 전기적 접점현상의 연구를 위해 개발된 Eastman ERPI 고속카메라 Type II는 최대 촬영속도가 초당 2,000매 이었으며 신뢰성이 떨어지고 더 높은 촬영속도가 요구되었다. 이를 위해 1930년 중반에 초당 4,000매의 성능을 가진 최초의 Fastax 카메라가 설계제작되었고 초당 3,200매까지 가능한 Eastman 고속카메라 Type III가 발표되었다.

또 다른 중요한 전진은 1939년 NACA의 C.D. Miller에 의해 회전거울(Rotating Mirror)형 카메라가 개발되었다. 이것은 밀러의 원리(Miller principle)에 기초한 초당 100만매의 초고속촬영을 가능하게 하는 Multiple Framing

Camera였다.

기계적 운동으로 인한 촬영속도의 제한을 극복하기 위해 전자관형 카메라의 개발이 시작되었는데 1949년 Courtney-Pratt은 최초로 Mullard ME 1201튜브를 이용, 초당 백만매의 촬영에 성공했다. 1973년 프라즈마연구를 위해 Richardson과 Sala가 picosecond frame image를 얻을 수 있는 고속전자 영상관을 개발했다.

장비개발과 더불어 고속촬영기술에 관련된 용어들이 국제회의를 통해 도출되고 정의되었는데, 사진계측(Photographic Instrumentation)이란 용어는 1950년 처음으로 Shafton에 의해 다음과 같이 정의되었다.

“과학과 공학현상을 검출, 기록, 측정하기 위한 감광재료의 사용”

후에 1963년 White와 Hyzer에 의해 관련 용어들이 정의되고 1964년 St. Thomas에 의해 보장되었다. 이어 SMPTE(The Society of Motion Picture & Television Engineers)의 Instrumentation and High Speed Photography Committee에 의해 다음과 같이 용어들이 도출되고 인준되었다.

△ 사진 과학(Photographic Science)

사진 기술과 장비의 관찰과

연구를 통해 도출된 체계적인 지식

△사진 공학(Photographic Engineering)

요구되는 목적을 달성키 위한 계획, 설계, 방법을 창출하기 위해 사진 기술, 사진 계측과 사진장비분야에 과학적인 지식을 적용

△사진 계측(Photographic Instrumentation)

사진장비개발, 제작, 응용, 특히 현상의 검출, 기록, 측정에 관련된 사진과학, 공학과 기술의 분야.

△사진 기술(Photographic Technology)

사진 과학과 공학에 의해 창안된 도구와 기법들의 실제적인 응용

△사진 장비(Photographic System)

요구되는 사진 결과를 내기 위해 구성품의 사용계획을 포함한 광학적, 기계적, 감광적, 전기적, 화학적 구성품들의 총칭

사진 계측 분야는 눈으로 감지하기에 빠른 현상을 관찰하기 위한 시간의 확대가 요구되는 고속 촬영술(High-Speed Photography)과 육안으로 분석하기에는 너무 복잡한 형태를 기록하기 위한 현미경 사진술(Photomicrography), 육안으로 관찰하기에는 너무 느린 현상을 관찰하기 위해 시간의 축소가 요구되는 시간 지연 사

진술(Time-Lapsed Photography), 정상적으로 보이지 않는 물체의 내부 구조 관찰을 위한 X-Ray 사진술과 Shadowgraphy, Schlieren 등과 같은 사진술로 나누어진다.

고속촬영기술은 전자공학과 광공학의 발전에 따라 필름이 아닌 매체에 영상을 기록하는 비디오기술과 광자(Photon)가 정보매개체로 작용하는 시스템을 포함하는 과학분야로 정의되는 광자공학(Photonics)을 포함하는 기술영역으로 발전되고 있다.

Ⅲ. 고속촬영기술의 분류

1948년 Sandell은 처음으로 고속촬영기술을 촬영속도와 노출시간에 의해 성문화 했다. 즉

△고속촬영기술-초당 250매 이상, 1/1,000초 이내

△초 고속 촬영기술- 초당 1000매이상 1/10,000초 이내 등으로 그 분류방법은 학자마다 다르다.

다 다르다.

1951년 Chesterman은 촬영 속도 기준으로, 1952년 Jones은 필름운동 형태로, 1956년 Sultanoff는 노출수단 형태로, 1957년 Sakharov는 감광물질과 영상의 상대적 운동형태를 기준으로 각각 분류했다.

크게는 장비구조 및 동작원리에 따라 기계식 카메라와 전자식 영상변환 카메라로 나눌 수 있으며 영상형태를 기준으로 각각 프레이밍(framing) 촬영술과 스티릭(streak) 촬영술로 나눌 수 있다. 프레이밍 촬영술은 1 msec 이내의 짧은 방전(spark)을 이용하여 노출을 쉼(shuttering)으로써 단일화면 또는 다중화면을 얻는 섬광사진술(spark photography)과 편광, 복굴절 현상을 이용 전장과 자장을 걸어 고속서터의 효과를 이용하여 촬영하는 방법, 일반영화용 필름처럼 영사기로 투영시켜 느린 동작으로 분석할 수 있도록 촬영하는 영화(cine)사진술을

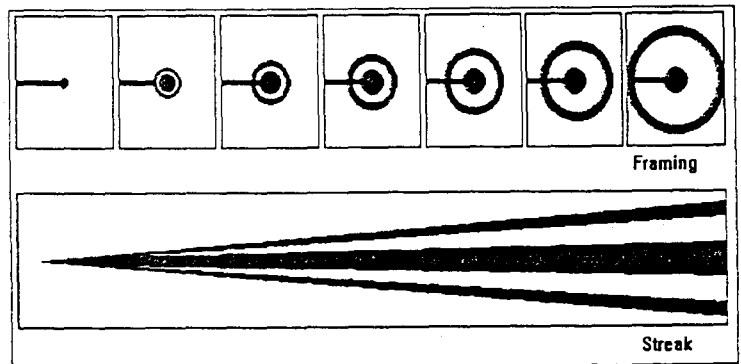


그림 1. Framing 모드와 Streak 모드의 비교 그림

포함한다.

스트리 사진술은 주로 선형 운동분석에 사용되며 운동방향과 평행으로 촬영하여 선명한 동기된 영상을 획득하는 synchro ballistic mode와 운동방향에 대해 직각으로 촬영하여 줄 무늬로 기록하는 streak mode가 있다.

촬영속도와 장비특성 별로 분류해 보면 각각 다음과 같다.

△ 고속카메라(High Speed Camera) : 275 fps - 20,000 fps

△ 초고속카메라(Very High Speed Camera) : 20,000 fps - 500,000 fps

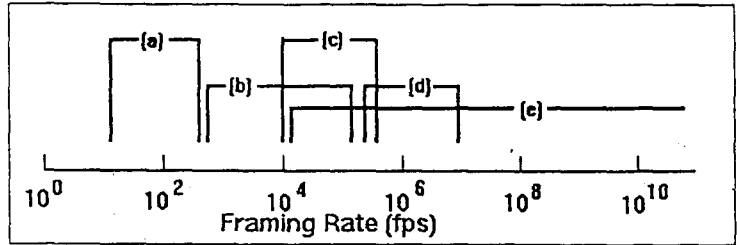
△ 극초고속카메라(Ultra High Speed Camera) : 500,000 fps 이상

IV. 고속촬영기의 종류

장비특성을 기준으로 고속 촬영기를 분류해 보면 인터미턴트 핀(intermittent pin register)식, 회전 프리즘(rotating prism)식, 스트리 및 초고속(streak and ultrahigh speed)식 카메라로 나눌 수 있다.

1. 인터미턴트 핀형 카메라

그림 3은 인터미턴트 핀형 카메라에서 사용되는 기본적인 원리를 보여 준다. 이 원리는 재래식 영화용 카메라에 사



- (a) 영화용 카메라 (Intermittent Pin Registered Camera),
- (b) 회전 프리즘형 카메라 (Rotating Prism Camera),
- (c) 회전 드럼형 카메라 (Rotating Drum Camera),
- (d) 회전 거울형 초고속 카메라 (Rotating Mirror Camera),
- (e) 전자식 영상변환형 카메라 (Electronic Image Converter Camera)

2. 프레임 카메라의 촬영속도

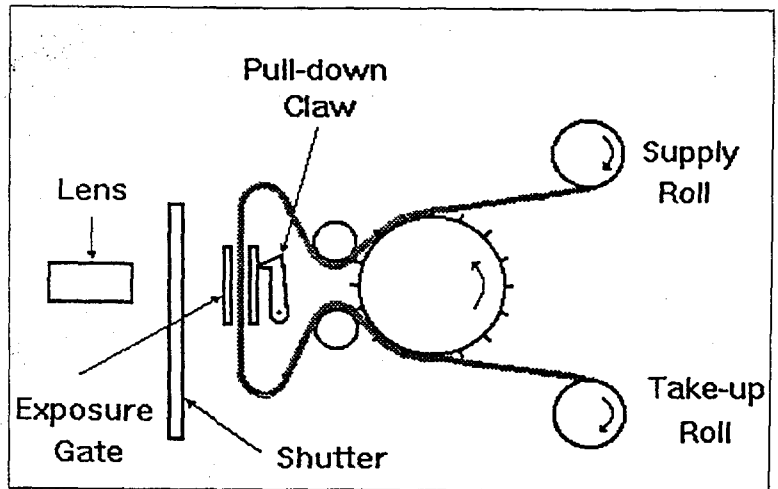


그림 3. 인터미턴트 카메라의 기본원리

용되는 원리와 동일하다.

이동칼퀴(pull-down claw)는 필름 가장자리의 구멍(perforation)으로 들어가서 필름을 이동시킨다.

필름이 노광면(exposure gate)에 위치했을 때 칼퀴는 후퇴하고 핀들이 필름구멍을 채움

으로써 필름의 움직임을 방지하고 그동안 셔터가 열리면서 빛이 노광되는 것이다. 이런 동작의 결과는 필름을 일정하게 정지와 출발(intermittent)시키게 되며 기계적인 동작으로 인해 촬영속도의 제한을 받게 된다.

따라서 16mm 필름일 경우 최대 촬영속도가 초당 500매 정도에 머물게 된다.

이 카메라의 장점은 회전프리즘형에 비해 빛의 투과율이 높으며 영상이 전달되는 경로에 렌즈 외에는 아무것도 없으므로 영상의 질이 우수하다. 단점으로는 촬영 속도의 제한으로 인해 2 msec 이내에 발생하는 빠른 현상(event)은 프레임(frame) 간격 내에 발생될 수 있으므로 분석할 수 없다.

따라서 더 높은 촬영 속도를 낼 수 있는 장비가 필요하게 된다.

2. 회전 프리즘형 카메라

그림 4.는 회전 프리즘형 카메라에서 사용되는 기본적인 원리를 보여준다.

이 형태의 카메라는 노출시간 동안 필름이 정지하지 않고 계속적으로 이동하므로 인터미턴트 핀형 카메라에서 얻을 수 없는 높은 촬영속도를 가능케 한다.

카메라 렌즈와 필름 사이에 유리 블록(glass block)인 프리즘을 회전시켜 필름의 운동으로 인한 상의 흐름을 보상시켜준다. 또한 프리즘과 필름면 사이에 회전 셔터(rotary shutter)를 삽입시켜 노출시간을 효과적으로 조절할 수 있게 하며 프레임의 간격을 선명하게 해준다.

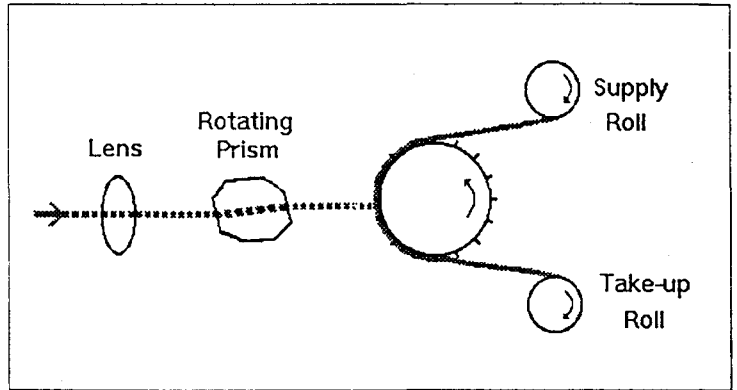


그림 4. 회전프리즘 카메라의 원리

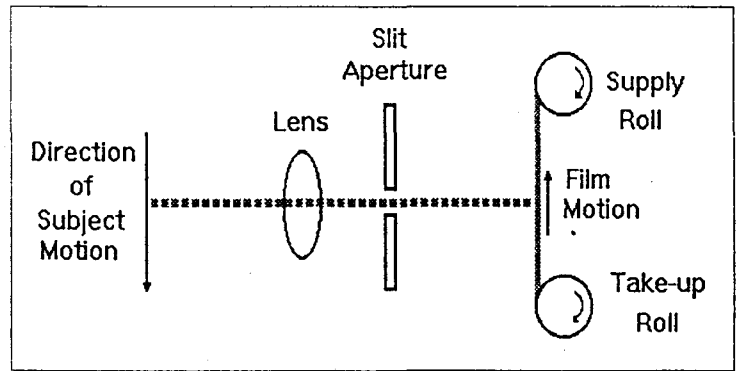


그림 5. 스트릭 카메라의 원리

회전 프리즘형 카메라에 사용되는 두가지 기본원리는 회전 프리즘이 필름감개(sprocket)와 직접 기어로 연결된 두 축(dual-shaft) 원리와 회전 프리즘과 필름감개(sprocket)를 동일 축으로 이용하는 한 축(single-shaft)원리가 있다. 1963년 4월에 소개된 HYCAM은 최초로 한 축(single-shaft)으로 설계 되었으며 1978년 1월에는 PHOTEC이 소개되었다.

촬영속도는 최대 초당 10,

000 매 정도이며 일반적으로 모든 분야에 가장 많이 사용되고 있다.

3. 스트릭 카메라

프레이밍 카메라에 대한 다른 형태의 기록 방식인 스트릭 카메라는 예정된 방향을 따라 직선으로 일어나는 현상을 연속적으로 기록하기 위해 개발되었다.

이 방법은 기존 회전 프리즘형 카메라의 회전 프리즘을 제거하고 격자(Slit)로 대체하

따라서 구분된 연속적인 장면을 기록하는 것이 아니라 프레임 구분이 없는 영상을 기록한다.

그림 5.에서 처럼 피사체의 운동방향과 필름의 운동방향에 따라 synchro ballistic mode와 streak mode 두 방식으로 촬영할 수 있으며 비행탄의 안전도 확인과 속도, 회전을 등을 측정할 수 있다.

주로 고속선형운동분석에 응용되고 있으며 프레임 카메라의 시간 분해능은 단순히 두장의 연속화면 사이에 시간 간격인데 비해 스트릭 카메라에서는 격자를 통하는 필름속도와 격자 간격, 필름의 분해능에 관계되며 셔터역할을 하는 기능이 없으므로 매우 높은 시간 분해능을 갖는다.

4. 초고속 카메라

보통 초고속 카메라는 매우 높은 촬영속도 때문에 필름에 찍기보다는 단지 몇자 정도 길이의 짧은 필름이나 건판(sheet film) 위에 여러장의 연속 사진이나 스트릭기록을 하도록 설계되었다.

프리즘형 고속 카메라의 경우, 필름강도의 한계로 16mm 필름의 경우 초당 10,000 매 이상 촬영이 불가능하다. 이의 극복을 위해 회전 드럼형 카메라, 회전 거울형 카메라, 영상 변환형 카메라들이 개발되었다.

드럼형의 경우 드럼에 몇 자

의 짧은 필름을 장착한 후 고속으로 회전시켜 원하는 촬영속도에 도달되면 셔터가 열리면서 촬영되도록 되어있다.

기계적인 방법으로는 최고의 촬영속도를 낼수 있는 회전 거울형 카메라는 고정된 필름 위에 고속으로 회전하는 거울에 의해 상이 맺히도록 되어있다.

1940년 C.D.Miller에 의해 고안된 이 카메라의 원리는 피사체가 대물렌즈와 필드(field)렌즈에 의해 상을 형성하고

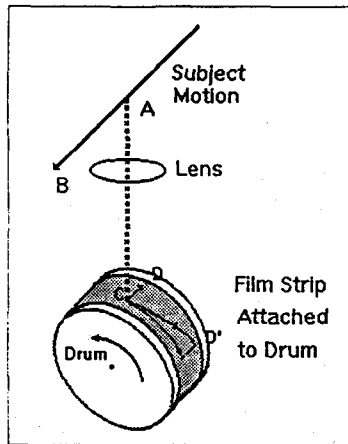


그림 6. 드럼 카메라의 개략도

회전거울에 의해 반사된 상은 호(arc) 형태로 배열된 중계(relay)렌즈에 의해 고정된 필름면에 순차적으로 맺히게 된다. 즉 회전 거울면과 중계 렌즈가 평행을 이루었을 때 클립이 없는 상이 맺게 된다. 이를 Miller 효과라 한다.

이상과 같은 기계적 방법에 의한 고속촬영의 경우 필름의 인장강도, 구성품들의 속도한계 등으로 최고 촬영속도는 초당 2,500 만장 정도로 제한된다.

이의 극복을 위해 1947년 Courtney-Pratt과 Saxe의 제한에 의해 1956년 1×10^9 fps의 전자영상 변환식 카메라가 개발되었다.

이 방식은 그림 8.에서 보듯이 대물렌즈를 통해 들어온 빛이 광음극선(photocathode)에 맺히게 되면 focus cone과 양극(anode)은 광학적인 상을 전자 빔(beam)으로 바꾸어 준다. 이때 양극과 스크린 사이의 shutter plate 보정판 및

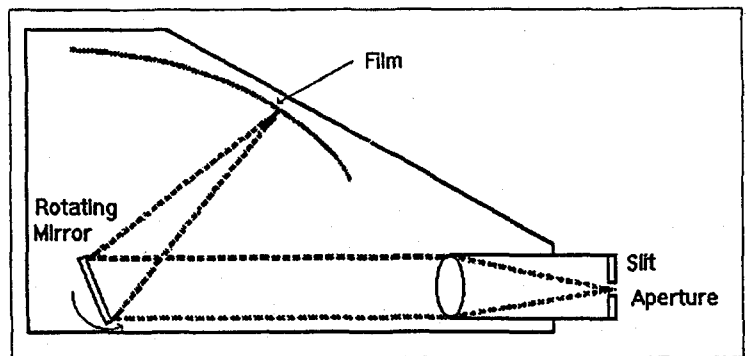


그림 7. 회전 거울형 카메라의 기본원리

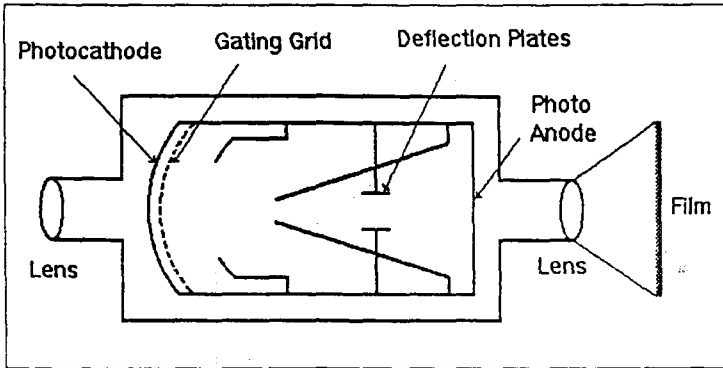


그림 8. 전자영상 변환 카메라의 기본원리

aperture plate에 의해서 beam 형태의 전자를 제어한다. 제어된 전자 beam은 형광 막(phosphor screen)에 충돌하여 빛을 냄으로써 상이 재생되는 것이다. 재생된 상이 잔상으로 남아 있을 때 보통 카메라로 촬영하거나 다른 영상 출력장치로 기록한다.

약한 빛일 경우 micro channel plate라는 광증폭장치를 부착시켜 1×10^4 배까지 광량을 증폭한다.

현재 최고 촬영속도는 초당 6억장 정도이다.

V. 고속촬영계측의 기본적 요소

고속촬영계측은 단순히 피사체의 촬영에 그치는 것이 아니라 촬영된 필름을 현상하고 편집한 후 정량적으로 필름 판독을 거쳐 컴퓨터를 통해 자료처리를 수행하는 절차를 거쳐므로 반드시 시험전에 시험목적과 내용에 대한 면밀한 협의

가 필요하다.

필름을 통해 획득하고자 하는 자료가 확정되면 그에 따라 사용되어야 할 고속카메라가 선정되고 촬영범위나 거리에 따라 렌즈가 선택되고 촬영 속도, 필름종류와 양, 이벤트와 카메라와의 동기여부, 노출 상태에 따른 조명문제, 기준시간 공급여부, 자료의 판독을 위한 기준점 설치등의 고속촬영계측을 위한 정보들이 결정된다.

1. 촬영 범위

촬영범위는 사용되는 렌즈와 필름크기에 따라 결정되는데 가능한한 촬영범위가 작을수록 양질의 자료를 얻을 수 있다.

그림 9.에서 렌즈 초점 거리와 촬영 거리와의 관계를 구해보면 렌즈 공식으로부터

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} + \dots \dots \dots (1)$$

$$a + b = d \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{o}{i} = r \dots \dots \dots (3)$$

식 (2), (3)으로부터

$$a = d \cdot \frac{r}{(r+1)}, b = \frac{d}{(r+1)} \dots \dots \dots (4)$$

(4)식을 (1)식에 대입하면,

$$d = f \times \frac{(r+1)^2}{r} \text{ 이 된다.}$$

만약 $a \gg b$, $b \approx f$ 라면

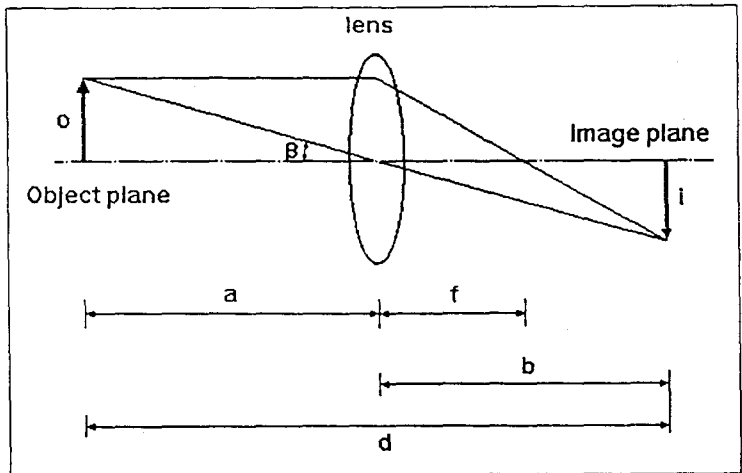


그림 9. 피사체와 영상의 관계

$r = \frac{d}{f}$ 가 된다. 따라서

필름 폭이 w 이고 높이가 h 이면 수평촬영범위는 $\frac{w \cdot d}{f}$, 수직촬영범위는 $\frac{h \cdot d}{f}$ 가 된다.

각으로 표현해 보면 view angle $\theta = 2 \cdot \beta_{\max} = 2 \text{arc tan } \frac{i_{\max}}{2f}$ 이 된다.

여기서 i_{\max} 값은 필름 크기에 해당된다.

2. 촬영속도

일차적으로 시간 확대율(영사속도에 대한 카메라 촬영속도의 비)에 의해 또는 샘플 주기(sample rate)에 따라 촬영속도가 결정되지만 노출시간 동안 물체의 운동으로 인한 영상의 흐려짐(image blur)의 허용치에 적정한 촬영속도가 요구된다. 프레임링 촬영시 적정 촬영속도는

$$V_i = \frac{k \cdot v_0 \cdot \cos\theta}{r \cdot u} \text{ 로 주어진다.}$$

다.

여기서

V_0 = 물체의 운동속도

θ = 필름면과 물체의 운동방향이 이루는 각

k = 셔터비(shutter opening angle / 360°)

$$r = \text{축소율} = \frac{o}{i} \approx \frac{d}{f}$$

u = Image Blur (0.02~0.005 mm)

스트리크 촬영시 촬영속도는 피사체 속도와 렌즈배율에 관계되며, $V_s = \frac{V_0}{r}$ 로 주어진다.

3. 필름 선정

고속촬영에 사용되는 필름은 일반 지지체(acetate base)와 달리 고속회전에 견딜 수 있는 폴리에스터 지지체(polyester base) 필름을 사용하며 현상 후 즉시 영사하거나 판독하기 위해 리버설(reversal) 필름을 사용한다.

유도탄 발사현상과 같은 시험자료(engineering data)의 기록은 색 재현도 보다는 노출보정에 대한 고려가 더 중요하게 된다.

따라서 일반필름이나 현상방법과는 달리 현상시간을 조정하여 노출부족에 대해서는 3단계(stop), 과다 노출에 대해서는 2단계(stop) 까지 보정할 수 있는 특수 계측용 필름(Instrumentation film)과 현상방법이 적용된다.

필름의 가장자리 구멍(perforation)사이의 간격을 피치(pitch)라고 하는데 고속 촬영에 사용되는 카메라는 대부분 긴 피치(long-pitch) 필름을 사용할 수 있도록 설계되어 있으므로 반드시 긴 피치의 필름을 사용하여야 한다. 그러나 짧은 피치(short-pitch) 필름을 사용하도록 설계된 카메라에서는 긴 피치 필름도 사용

가능하다.

따라서 필름 선택시 카메라 제조 회사에서 설계된 피치에 맞는 필름인지 주의하여 선택해야 한다. 그렇지 않을 경우 필름과 카메라에 손상을 줄 수 있다. 필름양은 촬영속도에 관계되며 16mm 필름인 경우 40 프레임이 1피트(ft)에 해당되므로 카메라 작동시간에 맞춰 결정하면 된다.

4. 노출 결정

촬영 장면으로 부터 오는 빛의 양(H)은 필름면에 조사되는 노광량 즉 상면조도(E_i)와 노출시간(T)의 곱으로 표현된다.

$$H = E_i \times T \dots \dots \dots (1)$$

상면 조도의 측정은 필름면에서 측정하는 것이 가장 이상적이나 측정상의 어려움 때문에 피사체 휘도를 측광하는 것이 상례다. 즉 상면조도는 피사체 휘도와 조리개 수치에 따라 변한다. 피사체 휘도는 단위 면적당 단위 입체각당의 광속($\text{lm}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ 또는 Cd/m^2)으로서 조리개가 만드는 입체각을 곱하므로써 필름면에 도달되는 단위 면적당의 전광속(lm/m^2 , lux)인 상면조도를 형성한다.

따라서

$$E_i = cB_s W = cB_s \pi$$

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 \frac{c\pi B_s}{f^2} = \frac{c\pi B_s}{4A^2} \dots \dots \dots (2)$$

여기서
C: 렌즈의 투과율, 비그네팅, 카메라의 특성등에 관계되는 상수

B_s : 피사체 휘도(cd/m²)
W: 입사동(entrance pupil)이 만드는 입체각(Sr)
A: 입사동의 직경에 대한 초점거리의 비, f/d
그러므로 전 노광량
 $H = E_t \times T_e = \frac{c\pi B_s T_e}{4A^2} \dots \dots (3)$

이 된다.
필름면에 적정 노출이 이루어지려면 필름감도 기준인
 $H = 10 \cdot H_m = \frac{8}{S_x} \dots \dots (4)$

의 관계가 성립되어야 한다.
여기서
 $H_m: D_f + D_b + 0.1$ 의 농도를 식출하는데 필요한 노광량(필름감도 표시 기준 노광량)
 D_f : 저 노광영역(fog level)에 존재하는 농도
 D_b : 필름 지지체 농도

S_x : 필름 감도(ISO)
위 두식으로부터 카메라 노출식

$$\frac{A^2}{T_e} = \frac{S_x B_s}{K} \left(K \frac{32}{c\pi} \right) \dots \dots (5)$$

이 도출되며 좌변에 2를 밑으로 하는 대수를 취한 값이 노출계에 표시되는 EV(exposure value) 수치를 나타낸다. 이 식으로부터 노출시간은

$$T_e = \frac{KA^2}{B_s S_x}$$

이 된다.
적정 노출을 위해 요구되는 피사체 조도는

$\pi B_s = RE_s$ { R : 피사체 반사율
 E_s : 피사체 조도
의 관계식으로부터

$$E_s = \frac{K'A^2}{T_e S_x} \left(k' = \frac{32}{cR} \right) \dots (6)$$

가 된다. (5)식은 반사식 노출계에 적용되며 (6)식은 입사식 노출계에 적용된다.

프레임 촬영술에서 노출시간은 단순히 촬영속도에 셔터비를 곱해준 값의 역수를 취함으로써 얻는다.

$$T_f = \frac{K}{V_f}$$

여기서
 K : 셔터비(shutter opening angle / 360°)

V_f : 필름 촬영 속도
스트릭 촬영술에서는 격자(Slit)폭에 관련된다.

$$T_s = \frac{\text{격자폭(Slit Width)}}{V_f}$$

식(6)에서 $[E_s] = \text{foot candle}$ 일 때 K' 은 대략 25의 값을 갖는다.

따라서 주어진 노출시간과 필름감도, 조리개수치를 대입하여 요구되는 빛의 양이 계산된다.

촬영장면에 대해 요구되는 전광속은 조명면적과 조도를 곱하므로 얻어진다.

$$\text{Total lumens} = \text{Target Area Ft}^2 \times \text{Foot candles}$$

$$\frac{\text{필요한 조명기구의 수는 Lighting units required}}{\text{Total lumens}}$$

$$= \frac{\text{Beam lumen output of selected source}}{\text{Total lumens}}$$

로 주어진다.
일반적으로 맑은 날 피사체에 조사되는 빛의 양은 태양의 위치에 따라 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ lux에 이른다.

프레이밍 카메라에서 최대 조리개는 프리즘 면의 높이로

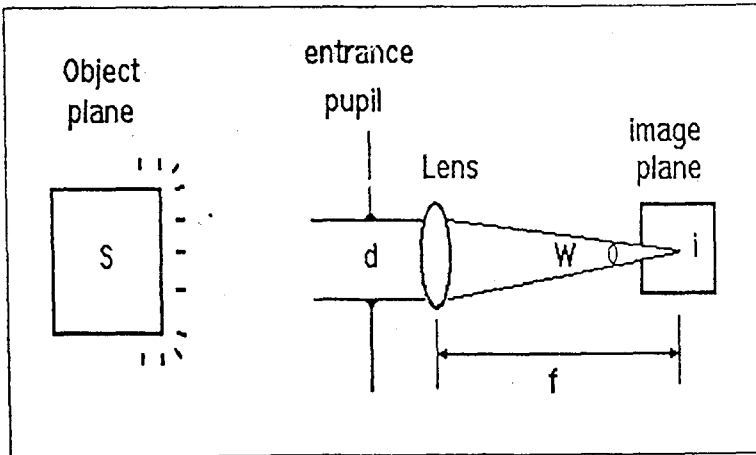


그림 10. 상면조도

인해 보통 $f/4$ 로 제한받는다. 필름감도 ASA 400을 사용할 경우 식(6)에 대입해 보면 단위가 $f.c$ 일때 노출 시간의 역수가 곧 필요한 피사체 조도값이 된다.

따라서 실제적으로 맑은 날 촬영할 수 있는 최대 속도는 4,000 fps 정도가 된다. 그러나 피사체에 조사되는 태양의 방향과 세기에 따라 노출보정이 필요하게 되며 부족한 광량에 대한 조명장비의 사용이 불가피하게 된다.

VI. 발전 방향

고속현상을 기록하기 위한 다양한 방법들이 꾸준히 발전되고 있는데 촬영속도의 증가

와 해상도에 주로 초점을 맞춰서 이루어지고 있다. 상대적으로 낮은 촬영속도 영역에서는 해상도 개선에 중점을 두고 실시간 자료획득을 위해 비디오 기법이 도입되고 있으며 높은 촬영속도영역에서는 전자영상 변환관의 활용이 두드러지게 나타나고 있다.

이에따라 자료기록과 분석 방법도 필름매체에서 전자매체로 대체되어가고 있다. 높은 해상도가 요구되지 않고 동화상이 아닌 정지화상을 필요로 하는 광고사진, 보도, 기술 문헌에 요구되는 필름시장에는 큰 충격을 주고 있으며 필름사용으로 인한 현상단계에서 발생하는 화학 처리로 인한 폐기물의 취급, 처리문제는 환경문

제에 민감해진 지역사회에 큰 문제가 제기되고 있기때문에 이미 미국정부는 1996년까지는 궁극적으로 현상처리를 없애는 계획을 실행해오고 있다. 그러나 고속촬영기술에 사용되는 필름매체는 비디오기법으로는 도달될 수 없는 해상도와 촬영 속도(또는 sample rate) 때문에 계속 병행 사용될 것이다. 높은 촬영속도, 해상도, 영상의 질, 자료 보존능력, 실시간 자료획득, 어디 것이 중요한가에 따라 필름이나 비디오나가 결정되며 이 두 방법은 서로 경쟁적이기 보다는 상호 보완적인 기술로서 발전될 것이다.

알아들 시간

* 주가 되는 피사체

의식적으로 주(主)가 되는 피사체를 화면의 한 구석에 조그맣게 배치하는 일도 있다.

그러나 상식적으로는 역시 당당히 화면 중심에 배치해서 찍어야 하며, 불필요한 공간을 넓게 비워두는 것은 누가 보아도 좋은 사진이라고 생각하지 않을 것이다.

또, 넓은 화면 중앙에 1명의 인물을 풀 피겨(全身)로 배치하고 주위에 아무것도 없다면 이것은 포트레이트(portrait : 인물사진)라고 할 수 없을 뿐만 아니라 좋은 사진이라고도 할 수 없다.

※ 참고) 삼성카메라 발행 「카메라교실(종합편)」