

特輯 : 고속촬영에 의한 용접 현상의 해석

고속 촬영장치의 원리와 응용

An Introduction to the High Speed Cameras and Their Application

J. S. Lee and S. H. Yook



이제선/브이 텍 광계
측기술연구소/1954년
생/초고속영상 변환
식 촬영장치 및 관련
기술개발



육상현/브이 텍 광계
측기술연구소/1969년
생/3차원 고속 운동
분석 장치 개발

1. 서 언

인간의 눈이 가지고 있는 시간 분해능은 약 0.1초 정도로, 그 이하의 시간 동안 변화하는 현상을 이해한다는 것은 거의 불가능하다. 이러한 제약을 극복하기 위하여는 고속으로 소정의 현상을 촬영한 다음 구별이 가능한 속도로 재생하는 방법이 필요하며 이러한 방법을 통칭하여 고속촬영 기술이라고 분류 한다. 고속촬영 기술의 발달은 인간의 동작, 기계구동, 병기, 동력학, 유체역학 등을 연구하는데 많은 공헌을 하였다. 최근에는 촬영기술과 전자공업의 발달에 힘입어 극한이용기술, 에너지 이용기술, 의용기술 등의 기반이 되는 시간분해 분광학(time resolved spectroscopy), 레이저 플라즈마, 핵융합, 압축특성, 물성분석, 광화학 및 로봇공학 등 기술 전반에 걸쳐 이용되고 있다^{1,2)}.

시간 간격 혹은 시간 분해에 대한 연구는 일찌기 갈릴레오가 진동체의 주기에 대하여 관심을 가지고 많은 실험을 시도하면서 시작되었다고 전하여진다. 그 후 오랫동안 큰 진전을 보지 못하다가 1851년 영국의 W. H. F. Talbot가 최초로 고속촬영을 시도하면서 많은 발전을 이루게 되었다. 그는

약 500 μ s 정도의 지속 시간을 갖는 섬광을 이용하여 고속 회전하는 자전거의 바퀴에 부착된 신문 기사를 선명하게 촬영하는데 성공하였는데, 이것이 고속촬영의 시작일 뿐만이 아니라 이 방법은 짧은 지속 시간을 갖는 섬광의 개발을 유도하였다³⁾.

한편, 1872년 미국의 E. Muybridge는 24대의 카메라를 일렬로 설치하여 약 2ms 동안 순차적으로 노출시켜 달리는 말의 네 발이 동시에 지면에서 떨어진다라는 사실을 과학적으로 입증함으로써 최초의 연속적인 고속촬영을 성공하였다(Fig. 1).

1920년 경에는 전기 부품의 개발을 바탕으로 광원은 스파크 갭(spark gap), 검출기는 광전자 증폭관, 기록장치로는 오실로스코프 또는 기계식 고속 촬영 장치를 채용하기에 이른다. 그러나, 1960년 이전까지는 광원의 지속 시간을 ns이하로 향상시키는 것이 불가능 하였으므로 그 이상의 진전이 이루어지지 못하고 있다가 1962년 이후 Q-switching, 모드동기, 펄스 압축기법등이 개발되면서 시간 분해능이 현저하게 향상되었다. 한편, 1970년대와 1980년대를 지나면서 관련 장치와 제작 기술의 향상으로 다양한 형태의 고속 카메라가 등장하게 되었다. 그 중에서도 빛에 직접 감응하는 물질을

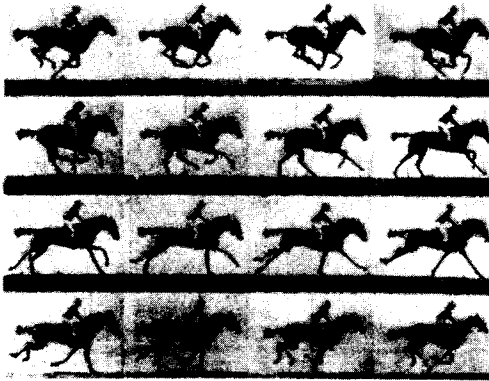


Fig. 1 E. Muybridge가 촬영한 달리는 말의 연속 사진

도포한 영상 저장 매체인 필름의 제한점을 극복할 수 있는 방법으로 자기 테이프에 의한 화상의 기록 기술은 고속 촬영의 새로운 장을 열게 되었다.

2. 고속 촬영 장치의 종류와 특징

2.1 필름을 사용하는 고속 촬영 장치

2.1.1 Intermittent pin형 고속 카메라

이 형식의 촬영 장치는 Fig. 2에 보인 바와 같이 재래식 영화용 카메라와 유사한 원리로 작동하는 것이다. Intermittent pin형 고속 카메라에서 필름 이송용 갈퀴(pull down claw)는 필름 가장자리의 구멍(perforation, 퍼포레이션)을 이용하여 필름을 이동시키도록 구성되어 있다. 필름이 노광면(exposure gate)에 위치했을 때 이 갈퀴는 후퇴하고 편들이 퍼포레이션을 채움으로써 필름이 움직이는 것을 방지하고 그 동안 셔터가 열리면서 빛이 입사된다. 이러한 동작은 필름을 일정하게 정지 및 이동(intermittent)시키게 되며 기계적인 동작으로 인하여 촬영 속도의 제한이 따르므로 16mm 포맷의 경우 최대 촬영 속도 500fps를 넘기기 어렵다. 그러나, 회전프리즘형 장치에 비하여 빛의 투과율이 높으며, 영상이 전달되는 경로의 광학계가 단순하므로 품질이 우수한 상을 얻을 수 있다. 공간 분해능은 보통 70~100 l/mm 정도로 뛰어난 편이다.

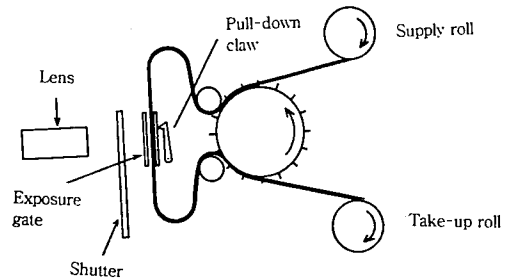


Fig. 2 Intermittent pin-registered 카메라의 원리

2.1.2 회전 프리즘형 고속 카메라

회전 프리즘형 고속 카메라의 원리는 Fig. 3에 보였다. 이 형식의 촬영 장치는 노출 시간 동안에도 필름이 정지하지 않고 계속적으로 이동하기 때문에 전술한 intermittent pin형 카메라에서 얻을 수 없는 고속 촬영이 가능하다. 이 카메라는 렌즈와 필름 사이에 회전하는 다각형 프리즘을 장착하여 필름의 운동으로 인한 상의 흔들림을 보상한다. 필름 면의 전방에는 회전 원판식 셔터를 삼입시켜 노출 시간을 효과적으로 조절할 수 있게되어 있다. 회전 프리즘형 고속 카메라의 공간 분해능은 40~50 l/mm 정도이다.

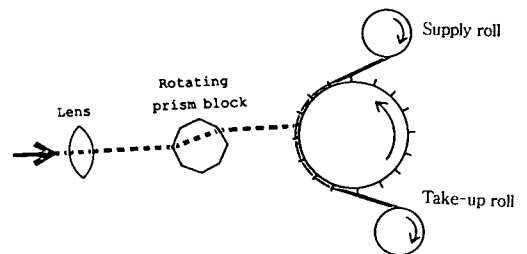


Fig. 3 회전 프리즘형 고속 카메라의 원리

2.1.3 회전 드럼형 고속 카메라

이 카메라는 회전 프리즘 방식의 장점인 촬영 속도를 중요시하면서, 필름 소모량의 저감 및 촬영 후 현상에 소요되는 시간과 비용 등을 고려하여 개발된 것이다. 회전 프리즘형 고속 카메라는 필름의 강도 한계가 존재하기 때문에 일정속도 이상으로 필름을 이송시키는 것이 불가능하다. 그러나, Fig. 4에 나타낸 바와 같이 회전 드럼형 고속 카메라는 드럼에 필름을 미리 장착시킨 다음 고속으로 회전시켜 원하는 속도에 도달하였을 때 광학계의

셔터가 열리도록하는 기계적 구조로 되어 있다. 이 형식의 고속 카메라는 단순한 구조를 가지고 있으며, strobe 광원을 셔터로 이용하는 것(최고 촬영속도 100,000fps), 회전 프리즘형과 회전드럼형 고속 카메라의 장점을 조합한 것(화면 분리는 회전 프리즘으로, 필름 이동은 회전 드럼을 사용하며 촬영속도는 최고 1,000fps) 및 광학 셔터 방식의 드럼형 초고속 카메라(최고 촬영속도: 200,000fps)의 세가지 부류가 사용되고 있다.

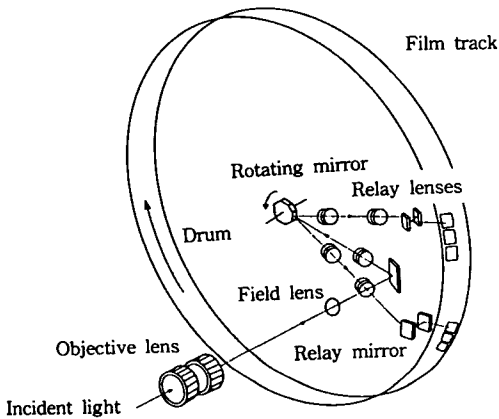


Fig. 4 회전 드럼형 고속 카메라

2.1.4 회전 거울형 고속 카메라

회전 거울형 고속 카메라는 기계적인 방법으로 는 최고의 촬영 속도를 낼 수 있는 고속 촬영 장치이다. 회전 드럼형 카메라의 경우 드럼이 회전하는 한계 속도는 500m/s 정도이다. 그러나, 회전 거울형 고속 카메라는 필름이 고정되어 있고 고속으로 회전하는 거울에 의하여 상을 주사하는 형태로 되어 있는데, 1940년 C. D. Miller에 의해 최초로 고안되었다(Fig. 5).

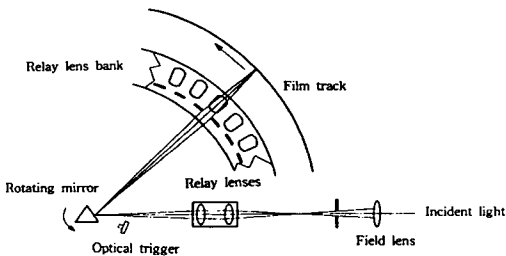


Fig. 5 회전 거울형 고속 카메라

2.2 자기 테이프 또는 반도체 소자를 사용하는 고속 카메라

2.2.1 자기 테이프를 사용하는 고속 비디오 카메라
 고속 비디오 카메라는 촬영 속도와 내부 특성에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 제1세대 장치는 1960년대 개발된 자기 테이프 방식의 비디오 기록 장치로서 기록 속도 120fps를 얻을 수 있고 1970년대에 들어서 상용화 되었다. 제2세대 고속 비디오 카메라는 1979년에 소개되었는데 200fps의 촬영 속도를 가지며 칼라 또는 흑백 영상을 장시간 녹화할 수 있는 장비였다. 1980년에는 2,000fps의 full frame(이하 ffps) 촬영 및 최고 12,000fps의 partial frame(이하 pfps) 촬영이 가능한 12.7mm 자기 테이프 장입형 제3세대 고속 고속 비디오 촬영 장치가 등장 하였다. 1986년에는 1,000ffps 및 6,000pfps의 촬영 속도를 가지는 것이 상용화 되었는데, 촬영 속도 면에서 이전 세대에 제품이 못 미치나, 운동 해석장치(motion analyzer)의 기능을 가진 것이 큰 특징이라고 할 수 있다. 이 고속 비디오 카메라에는 폭 12.7mm의 테이프를 7.62m/s의 속도로 이동시키는 기술이 최초로 적용되었으며, 2대의 카메라 영상을 동시에 작동 및 기록할 수 있는 기능도 수행할 수 있도록 GPIB 제어 보드를 채용하였다. 또, 2대의 카메라(또는 다른 장비)와 동기를 맞추기 위한 IRIG(Inter Range Instrumentation Group) time code도 채택되었다.

2.2.2 반도체 소자를 사용하는 고속 카메라

자기 테이프를 사용하는 고속 비디오 카메라는 기록 화면의 즉시 재생성 등 여러 가지 장점이 있으나 지연 시간(lag time)의 존재와 같은 제한점도 있다. 이러한 결점을 해결한 고속 기록 방법이 1990년에 처음 발표된 제4세대 motion analyzer로서, 지금까지의 고속 기록 방법과는 전혀 다른 새로운 접근 방식을 채용하고 있다. 즉, 이러한 형식의 카메라는 반도체 기억 소자를 기록 매체로 이용하는 고속 촬영장치이다.

이들은 디지털 영상 자료를 DRAM(Dynamic Random Access Memory)에 저장하는 방식을 사용하고 있다. DRAM을 저장 매체로 이용하는 기술은 이전까지의 motion analyzer에서는 기대할 수 없는 즉시성이라는 효과를 가져다 주었으며, 실제로 촬영하고자 하는 현상을 쉽게 포착 가능하여 많은 분

야에서 장시간 녹화의 불필요성을 제기하는 계기가 되기도 하였다.

제5세대 motion analyzer는 더욱 향상된 기술을 바탕으로 하여 고화질 및 고속의 컬러 혹은 흑백 영상을 기록할 수 있는 장비로 발전하였다. 이러한 기기들은 이전 세대에 비하여 약 4배정도 향상된 촬영 속도 즉, 4,500fps 및 40,500fps의 고속 촬영이 가능하면서도 매우 우수한 해상도를 유지할 수 있게 되었다. 한편, 제6세대 장치는 이동성이 뛰어나고, 512×512에 달하는 고해상도 및 1,000fps, 4,000fps의 촬영 속도를 가지며, 입력광에 대한 감도가 높은 것이 특징이다. 6세대 제품이 가지는 큰 장점은 소형 경량화 및 저렴한 가격으로 내구성이 우수하다는 것도 경쟁력을 가지는 요소의 하나이다.

2.2.3 고속 비디오 및 디지털 영상 기록 장치에서 사용되는 기술과 용어

• 영상 변환 소자(imaging device)

영상 변환 소자의 역할은 광학계를 통하여 촬상면에 맺힌 영상의 명암 등을 전기적 신호로 변환시키는 역할 즉, 광양자를 전자로 바꾸어주는 역할을 하는 것이며, 일반적으로 MOS 또는 CCD기술이 사용된다. 촬상 소자의 각 pixel에는 address가 주어지며 전기적으로 충전된 영상 정보가 주어진 address로 구분 및 데이터화 된다. 200fps 이상의 속도로 영상을 획득하는데 사용되는 소자는 다중의 출력 채널들로부터 병렬로 신호를 읽어내는 소자들이다.

• 신호처리

다중 채널 소자를 사용하는 고속 촬영 장치에서 신호처리는 고화질의 영상을 만들어내는데 매우 중요한 역할을 한다. 하나의 채널에 미치는 잡음의 영향은 그다지 문제가 되지 않지만, 몇 개의 대응되는 신호 처리장치가 중첩 사용되는 경우 전기적 잡음은 큰 영향을 미치게 되므로 저잡음형 센서를 채택하여야 한다.

• 영상의 기록

영상의 기록 방법에는 magnetic longitudinal recording, helical scan recording, solid state memory(DRAM), 자기 디스크, 광 디스크 및 opto-magnetic disk 등 있다. 전술한 바와같이 자기 기록 방식의 저장 매체들은 주로 테이프 형태를 가지며, 이동하는 테이프에 기록/재생 헤드가 정보를 기록

및 재생하도록 되어 있다. 그러나, 대부분의 motion analyser에 사용하고 있는 DRAM 방식의 경우는 저장에 필요한 물리적 동작이 수반되지 않으므로, 짧은 시간 동안에 많은 정보의 처리가 가능하여 해상도가 향상될 수 있도록 하는 요인이 된다.

• 기억상의 저장과 압축

자기 테이프는 기록과 동시에 영구적인 데이터의 보관이 가능하지만, DRAM의 경우는 휘발성이므로 주 전원이 차단되면 저장된 모든 자료가 유실된다. 또, 제한된 용량을 사용하고 있기 때문에 그 이상 작업을 수행하고자 할 때에도 이전의 데이터를 다른 곳으로 옮긴 다음 보존할 필요가 있다. 이와같은 경우, 자료 저장의 효율을 높이기 위하여는 데이터 압축 기법을 사용하여 한다.

• 결과의 분석

고속 비디오 촬영 장치 등은 대부분 디지털화된 영상 정보를 저장하고 연산하는 장치를 갖추고 있으므로 기본적인 물리적 정보들을 쉽게 처리하는 장점을 지니고 있다. 그러나, 체계적이고 전문화된 정보가 필요할 때에는 목적에 맞는 전문 분석 장비가 필요하다. 여기에는 workstation 규모의 전문적인 영상처리 장치가 사용되는데, 영상 정보를 읽은 다음 사용자가 정의한 특성에 의하여 분석 결과를 출력 한다. 고급 기기의 경우에는 3차원 정보를 연산하는 알고리즘을 장착하기도 하는데 이를 위하여는 최소한 2대 이상의 카메라가 동시에 영상 정보를 추출하여야 한다.

3. 용접 공정과 고속 촬영장치

용접 현상의 연구를 위한 고속촬영은 그 동안 회전 프리즘형의 카메라가 주로 이용되어 왔다. 이 카메라는 촬영 속도 10,000fps 및 최대 40,000fps 까지 가능한 16mm 포맷의 필름용 고속 촬영 장치로서 가격 대비 성능이 뛰어난 특징이 있다. 그러나, 전술한 바와 같이 촬영 후 필름의 현상 등 후처리 시간과 경비가 필요하며 촬영 정보의 처리에 있어서도 한계가 있고, 높은 품질의 사진을 얻기 위하여는 고도의 촬영 기술이 필수 요소로 알려지고 있다.

따라서, 광학적 필름 이외의 매개체를 사용하는 motion analyzer의 사용이 일반화되면서 용접공정 개발 환경에도 이를 적용시키고자 하는 노력과 기술 개발이 꾸준히 이어져 왔다. 다양한 용접 연

구 분야에서 고속 촬영기술을 적용함에 있어서 motion analyzer가 주는 장점(유지비, 즉시성, 반복성, 분석성) 이외에도 이러한 형식의 장치를 통하여 얻을 수 있는 부가적인 기능 또한 간과할 수는 없는 것이 현실이다. 즉, 용접과 같이 강력한 빛(아크)을 수반하는 이용 부문에서는 관측하고자 하는 대상의 영상 뿐만 아니라, 빛 그 자체의 성분과 특성의 분석도 의미 있는 작업이며, motion analyzer에서는 사용되는 센서의 특성에 따라 이러한 일을 수행할 수가 있다.

Motion analyzer를 확대 적용하면 광학 필름을 사용할 때는 관측이 어려웠던 자외선 영역과 근적외선 영역 광선에 대한 가시화 처리가 가능하다. 그러나, 반도체 영상 변환 소자를 이용하여 용접 아크와 같이 강렬하면서도 광량 분포의 차이가 심한 대상을 촬영하게 되면 센서 내의 일부 소자가 포화 영역에 놓이게 되고, 그 결과 전기적 잡음으로 작용하는 경우가 있다. 이를 보완하기 위하여 임계값을 낮춰주는 회로를 사용하는데 이 때에는 상대적으로 주변의 영상에도 영향을 주게 된다는 제한점이 있다.

4. 결 언

고속 촬영 방법을 이용함에 있어서는 활용하려는 용도에 따라 목적과 사용 현장의 여건을 기초로 적절한 촬영장치를 선정하는 것이 중요하다. 그러한 이유는 본문에서 언급하였듯이 많은 종류의 촬영장치들이 각각 독특한 동작 특성을 가지고 있기 때문이다. 사용자는 이러한 점을 충분히 검토한 후에 실험에 임하여야 하며 기기와 촬영 결과의 범용성, 전문성을 정확히 구별하여야 한다.

촬영 속도, 기록 시간 및 화질 면에서 필름 장입형의 고속촬영 장치가 유리한 점이 있는 반면, 고도의 촬영 기술을 필요로 하고 촬영 결과의 컴퓨터 연계 처리에 불리함이 있음을 부인할 수 없다. 현 시점에서는 많은 분야에서, 촬영 즉시 재생이 가능하다는 점과 촬영 결과의 후 처리에서 장점이 있는 고속 비디오 등 새로운 형태의 장치를 선호하는 경향이다. 그러나, 이 형식의 고속 카메라도 기록 속도, 해상도 및 높은 가격이라는 제한점을 가지

고 있기 때문에 설비 투자자의 입장에서는 면밀한 검토가 있어야 한다.

용접 기술의 개발과 관련된 고속 촬영 기법의 활용은 많은 연구, 응용 실적과 적용 가능성이 입증되고 있다. 그러나, 고속 촬영 결과의 품질과 활용도가 단순히 촬영 장치의 종류 및 고급화에 의존되는 것이 아니라, 실험 목적에 맞는 설비를 이용하여 최상의 영상을 얻는 것이 기본 요소임을 강조하고자 한다. 또, 이렇게 얻어진 영상, 또는 기록 결과가 적절한 방법으로 해석되어야 함은 물론이다. 촬영 대상이 되는 물리 현상 그 자체의 특성을 정확하게 분석한 다음 기기의 선정이 이루어져야 하고, 그 다음으로 작업 조건 즉, 촬영 개시점, 피사체와의 시간적 동기, 광학계의 적절한 구성과 후처리 과정 등을 감안한 촬영 환경까지도 고속 계측을 위하여는 반드시 고려되어야 하는 사항이다. 또, 촬영 그 자체가 빛을 이용하는 기술이므로 시험 현장의 여건에 적합한 광원의 선정도 필수 불가결한 요소의 하나임을 첨언하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 고동섭: 제2회 광계측기술 워크샵 논문집 (1993), 129
2. 고동섭, 김웅, 김종욱, 김민곤, 김동일, 이계선: 한국물리학회보 5 (1987), H-6
3. H. F. Talbot: Phil. Mag. and J. Sci. 3 (1852), 73
4. J. S. Courtney: Advances in High Speed Photography 1972 to 1982, SPIE Vol. 348
5. F. Ray: High Speed Photography and Photonics
6. K. Ball, D. J. Burt, G. W. Smith: High Speed Readout CCDs, Proc. SPIE 1358 (1990), 409-420
7. D. F. Barbe: Imaging Device Using the Charge Coupled Concept, Proc. IEEE 63, No.1 (1975), 38-67
8. A. E. Huston: U K patent GB 2 109 659