

## 特輯 : 고속촬영에 의한 용접 현상의 해석

# 인버터제어에 의한 펄스 입력형 고휘도 광원의 개발

김기철 · 강문진 · 조시훈

## Inverter Controlled Light Source for High Speed Filming of Welding Phenomena

K. C. Kim, M. J. Kang and S. H. Cho



김기철/포항산업과학  
연구원/1948년생/고  
에너지 밀도 용접, 용  
접 현상 해석 및 공정  
제어 system 개발



강문진/포항산업과학  
연구원/1963년생/생  
산 line용 특수용접  
system 및 용접 자동  
화 기술



조시훈/전 포항산업과  
학연구원/1968년생/용  
접 공정 해석 및 제어  
software package 개발

### 1. 서 언

용접 현상의 관측 및 해석에서 고속 촬영은 필수 불가결한 기법이며, 용접용 소재의 개발, 용접봉은 물론 용접 장치의 개발에서도 큰 힘을 발휘하고 있다. 고속촬영에는 고속 카메라(필름, 비디오 및 기억소자 내장 카메라 등)와 조명 장치가 필요하지만<sup>1-3)</sup>, 그 중에서도 광원을 포함하는 조명 기술은 영상의 품질에 지대한 영향을 미치는 요소이다. 일반 사진에서도 그렇지만, 특히 고속촬영에서는 1초에 수 천 장 이상의 사진이 노광되기 때문에 실제로 한 장의 정지상에 할당되는 노출 시간은 수 백분의 1초에서 몇 백만분의 1초에 이르게 된다<sup>4,5)</sup>. 따라서, 대단히 큰 용량의 조광 장치가 필요하나, 현실적으로 일정한 크기 이상의 장치를 사용한다는 것은 용접 현상 관측 여건을 고려할 때 그렇게 간단한 일이 아니다.

광량의 많고 적음과 함께 빼놓을 수 없는 것이 전원 장치의 깜박거림이다. 상용주파수를 그대로 사용한다고 하더라도 육안으로는 전혀 깜박거림을 느낄 수 없으나, 고속촬영에서는 경우에 따라서

치명적인 결과를 초래하기 쉽다. 왜냐하면, 상용주파수의 전원은 일정한 주기마다 반드시 0V 점을 지나게되고 그 전력이 전구에 그대로 인가되면 전구의 형태 및 열용량에 따라 차이는 있겠지만 빛이 완전히 꺼지는 순간도 존재하기 때문이다. 빛이 광원으로 부터 발생되지 않았다는 것은 감광 기법에 의한 기록이 불가능하다는 것과 같은 뜻이 되며 그 순간의 실험 결과는 얻을 수 없다. 또, 정류형 전원 장치를 사용하는 경우, 평활이 충분하지 않으면 전술한 것보다 경미하기는 하지만 깜박거림을 피할 수 없다. 뿐만아니라, 촬영 조건에 맞추어 낮은 출력에서 높은 출력의 빛 까지 변화 시키면서 품질 좋은 빛을 만들어 내는 것이 기술적으로 또는 제작 원가 면에서 고려되어야할 부분이다.

본 연구는 이상과 같은 문제점을 인식하고 고주파 인버터 기술을 이용하여 피사체의 실상을 충실하게 기록하고자 하는 용접 현상 기록 현상의 특수성 충족과 광원으로서의 제한점을 배제하려는 시도의 하나이다.

## 2. 고속촬영용 광원 및 전원 장치

용접 현상 기록을 위한 조광장치의 광원은 텅스텐 전구, 제논 전구 및 레이저 등으로 대별할 수 있는데 그들 중 레이저 빛은 특별한 색깔을 가지고 있기 때문에 실물을 직접 관찰하기 보다는 운동체의 그림자를 기록<sup>6)</sup>하는데 더 효과적이므로 본 연구의 범위에는 포함되지 않는다.

### 2.1 발광 기구

#### 2.1.1 백열 전구 (photoflood lamp)

이 형태의 전구는 텅스텐 필라멘트형 전구의 대표적 예로서 색온도 2,800K~3,400K 범위의 발광을 일으킨다. 이 전구를 이용하여 보다 높은 색온도를 얻는것도 불가능한 것은 아니지만, 동일한 필라멘트에 과대한 전력을 인가하여야 하기 때문에 Fig. 1에 보인 바와 같이 전구의 수명을 크게 단축시키는 결점이 있다.<sup>7,8)</sup>

#### 2.1.2 할로젠 전구 (tungsten halogen cycle lamp)

이 형식의 전구는 장시간 사용하더라도 발광량이 거의 변하지 않고, 수명 또한 백열 전구에 비하여 긴 특징이 있는데 그 이유를 기술하면 다음과 같

다. 전구 내에서 필라멘트는 가열되면 필연적으로 텅스텐 금속의 증기를 발생시키면서 소모되는데, 전구 내에 할로젠 물질이 존재하면 증발된 금속 증기와 반응을 일으켜 화합물을 만든다. 이 화합물이 전구내에서 이동하다가 텅스텐 필라멘트에 접근하게되면 그곳에서 다시 텅스텐으로 환원되어 필라멘트의 손실과 전구 내벽의 오염을 막아준다. 한편, 필라멘트를 사용하지 않는 아크 방전형 할로젠 전구 (metal halide lamp)는 고휘도 장수명을 목표로 하는 조명 장치에 쓰이고 있다. 이상의 전구들은 수 10~1,000W 정도의 소비 전력 범위로, 고휘도 광원으로서 낮은 출력 영역에 속해 있으나 사용이 간편하고 전원 장치도 단순하다.

#### 2.1.3 제논 전구 (xenon arc lamp)

제논 전구는 발광 효율이 매우 높고 출력광의 색온도도 5,500K 정도로 자연광과 유사한 빛을 낼 수 있는 전구이다. 또, 이 종류의 전구는 대용량의 것이 많아서 수 10~20,000W 까지 넓은 선택의 폭을 가지므로 용접 현상을 기록할 때 필요한 3,000W 이상의 조명 장치에는 가장 적합한 전구로 일컬어지고 있다. 이 전구는 기본적으로 직류 전류를 이용하여 방전시킬 때 얻어지는 빛을 이용하도록 설계되어 있는데, 가시광선 영역에서는 거의 자연광에 가까운 스펙트럼의 발광 강도를 가지고 있다.<sup>8)</sup>

텅스텐 전구는 진공에 가까운 내부의 압력을 부여하는데 대하여 제논 전구는 방전 효율을 높이기 위하여 고압으로 제논 가스를 봉입하고 있기 때문에 강한 충격이나 진동을 피하는 장치 구조와 사용 조건이 요구된다. 제논형 전구는 잔광 현상이 거의 없기 때문에 약간의 전원 변동에도 깜박거림이 현저하게 나타난다. 따라서, 제논 전구를 구동하는 전원 장치에서는 리플이 최소화되도록 제어하여야 한다. Fig. 2는 제논형 전구의 입력 전력에 대한 출력 스펙트럼의 변동을 보이는 것으로, Fig. 1의 텅스텐 전구와는 대조적으로 입력 전력 변화가 출력광의 분광학적 특성에 거의 영향을 주지 않는 안정성을 나타내고 있다.<sup>9)</sup>

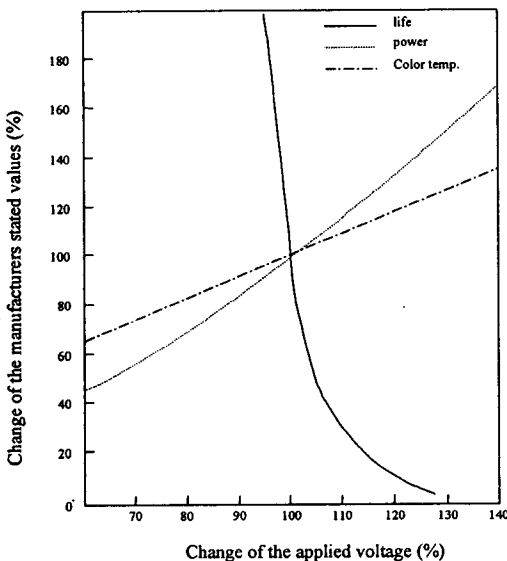


Fig. 1 Characteristics of a tungsten halogen lamp

### 2.2 전원 장치

수 1,000W의 고출력 광원은 전술한 제논 전구를 사용하는 것이 유리하며, 거의 대부분 싸이리스터에 의한 위상제어 전원 장치로 점등하는 기법을 쓰

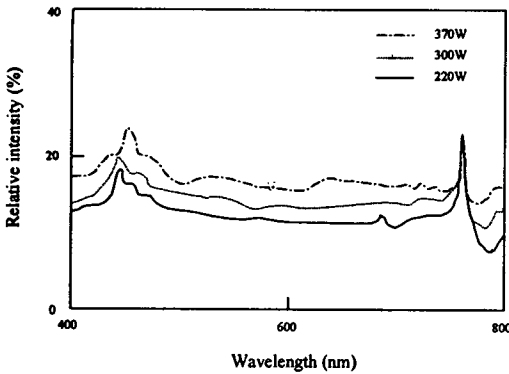


Fig. 2 Spectral distribution change with lamp input power

고 있다. 이러한 형식의 전원 장치에서는 대용량 입력 변압기에서 필요한 만큼 강압된 전압을 얻은 다음, 제어된 전력을 전구에 공급하도록 되어 있다. 따라서, 이와같은 형식의 전원 장치는 크고 무거울 뿐만 아니라 전력 제어 범위도 비교적 좁아서 정치형이어야 하며 일정한 밝기의 빛이 요구될 때 사용되는 한계점을 내포하고 있다. Table 1은 제논 광원용으로 제조된 싸이리스터 전원 장치의 사양을 예시한 것이다<sup>10)</sup>.

Table 1. An example of phase controlled power supply for xenon lamp

Input	200V/ 3 $\phi$ / 9kVA
Output voltage	33V
Output current	160A max.
Power control range	100~160A
Ripple	10%
Weight of power source	85kg

### 3. 설계의 기본 요구 사항

용접 공정의 메카니즘 구명을 위한 촬영 속도는 적어도 3,000~5,000fps 또는 그 이상이며 그 때의 노광 속도는 화질을 고려한 셔터 상수를 감안할 때 수 100 $\mu$ s 정도가 되지 않으면 안된다. 따라서, 아크 빛의 간섭을 최소화하면서 필름에 원하는 용접 현상을 감광시키기 위하여는 기술한 바와 같이 고휘도의 빛을 사용하여야 하며, 그 빛 또한 순간적

인 감박거림이 없어야 한다. 종래의 전원 장치를 이용할 때, 넓은 범위의 전력을 자유로이 제어 가능하면서도 리플 전압을 최소화하는 것은 경제적으로 어렵다. 따라서, 고휘도 조명 장치에서는, 연속 출력 보다는 소정의 짧은 기간 동안만 전구를 구동시키는 기법이 쓰여지고 있다. 그러나, 이러한 점은 용접 현상 기록이라는 요구 조건의 특수성 즉, 고휘도 및 연속 발광이라는 조건에는 적합하지 않다.

광원 장치가 가져야할 또 하나의 요구 사항은 광원 자체의 출력 특성 중, 인가 전력에 대하여 색온도 변화가 없어야 하고, 발광 스펙트럼도 태양광과 유사하여 촬영시 색 보정을 위한 필터의 사용으로 불필요한 빛의 감쇠를 배제하여야 한다<sup>7,11~14)</sup>. 용접 작업이 반드시 정해진 실험실에서만 이루어지는 것이 아니므로 작업성도 우수하여야 한다. 즉, 소형 경량화된 조명 장치이어야 하며 집속된 빛이 상하좌우로 가능한 한 넓은 범위에서 조절될 수 있어야 한다. 또, 필름의 감광 특성과 정합되어 조명 결과가 기록된 상의 품질 저하를 일으키지 않아야 한다.

이상과 같은 용접 공정 기록의 요구 조건을 감안하여 빛의 품질면에서는 방전거리가 짧은(short arc) 형식의 제논 전구를 사용하며<sup>9,15~17)</sup>, 전원 장치의 제어 성능 면에서는 인버터형의 장치를 도입하되 고주파 필스를 그대로 전구에 인가하는 시도를 하였다<sup>18)</sup>. 설계의 기본 사상으로서, 본 조명 장치의 사양을 요약하면 Table 2와 같다.

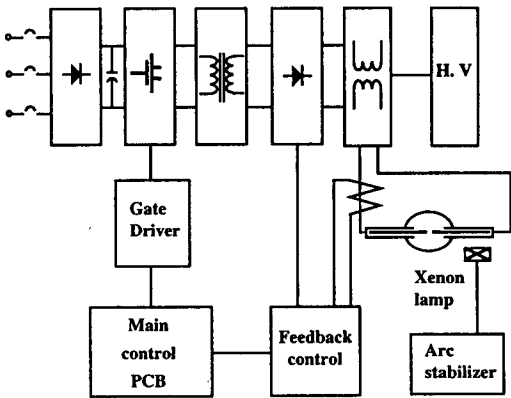
## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 장치의 구성

Fig. 3은 본 연구에서의 설계 사상을 기초로 제작된 조명 장치의 구성을 나타낸 것이다. 입력 전원은 1차 정류기에 의하여 정류 평활된 다음 고속 전력 제어 소자인 IGBT를 통하여 강압 변압기에 인가된다. 그림에서도 알 수 있듯이 이 전원 회로의 기본 구성은 통상의 아크 용접 전원과 매우 유사하다<sup>19~24)</sup>. 그러나, 조명 장치로서의 용도에 맞도록 출력 전압을 조절할 것과 기록 속도에 따라 제어 주파수를 변화시킬 수 있는 점이 다르다. 또, 이 조명 장치에는 제논 아크 전구의 초기 점등을

**Table 2.** Design concept of xenon light source for high speed welding physics analyzing.

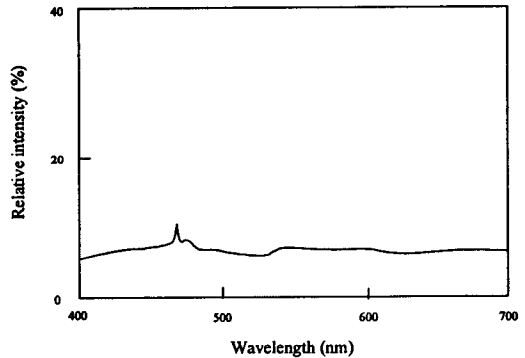
		Aimed specification	Design concept
Lamp	Xenon short arc type	Normal input: 5,000W	- Daylight color balance to prevent EV loss during filming - Maximum filming speed of 10,000fps - Forced air cooling
	Input power	0~80% of maximum lamp input power	- Stepless control
	Light output	Continuous	- Easy to determine the exposure condition
Power source	Type	Inverter controlled power source	- Compact/ light weight - Controllability - Duty: 100% - Output wave form: modulated pulse - Safety cutoff: 80% of maximum lamp input - Sufficiently high PWM frequency for good picture quality



**Fig. 3** Block diagram of inverter controlled Xe light source

위한 고전압 발생 기구와 발광 안정도를 높이기 위한 아크 안정기가 설치되어 있다. 전구 주변에는 강력한 송풍기를 설치하여 점등 중 강제로 냉각이 이루어지도록 하였다. 전원 장치의 출력 측에는 전력 제어의 신뢰성을 도모하기 위하여 Hall 전류 소자와 전압 계측 센서가 개입되어 있는데, 이것으로 출력의 안정적 공급을 꾀하고 있으며, 부하측에서 발생할 수 있는 만약의 사고를 미연에 방지하였다.

한편, Fig. 4는 본 장치에 장착된 고출력 제논 전구와 유사한 형식의 다른 전구에 대한 광학적 특성을 보인 것으로<sup>9)</sup> 가시광선 영역에서는 전 파장 구간을 통하여 일정한 출력 강도를 보이고 있어서 기록 후의 색 균형을 예측할 수 있다. 모든 제논 전구



**Fig. 4** Spectral distribution of a Xe short arc discharge lamp

가 다 그러하듯이 이 경우도 적외선 영역에서 높은 강도의 출력이 있으나 가시광선 영역 밖의 현상이므로 통상의 기록에서는 문제시 되지 않는다. 한편, 본 조명 장치는 작업 현장의 조건에 유연하게 대처하기 위하여 전원과 투광기를 하나의 몸체에 조립하여 단순화하고, 빛의 집속 방향을 조절할 수 있도록 하였다. 또, 특히 높거나 낮은 위치에 대한 조명을 위하여는 필요에 따라 투광기를 독립시켜 사용할 수도 있도록 고안 하였다.

#### 4.2 전원 장치의 전기적 특성

Fig. 5는 개발 장치를 고출력 제논 전구에 연결하고 전원의 특성을 조사한 것이다. 전원 장치의 설계 사상에서는 안전을 고려하여 전력의 제어 범

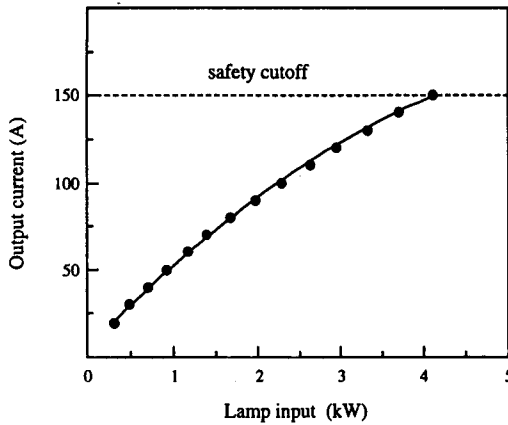


Fig. 5 Relationship between lamp input and DC output

위를 전구 최대 입력의 0~80%로 설정하였으나, 실제로 용접 현상을 관찰할 경우 적어도 1,000W 이상의 광량이 필요하므로, 그러한 사용상의 여유를 보아 350W를 최소 위치로하여 80%인 4,200W 까지 조사 하였다. 이러한 값은 전원 측에서 볼 때, 출력 전류 24~150A에 해당되는 것으로 여러 차례 반복 실험에서 신뢰성이 양호하였으며 장시간 연속 부하 실험에서도 그 결과는 만족스러웠다. 한편, Fig. 6은 전원의 출력 주파수를 20kHz로 설정하고 전구 입력 1,200W와 3,000W일 때의 전류 파형을 관찰한 예를 보인 것이다. 이 실험 결과에 의하면, 제논 램프에는 전원 장치로부터 얻어진 정류 출력이 거의 평활되지 않은 상태로 인가되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 부하 회로에 존재하는 약간의 인덕턴스 성분은 펄스 전류안에 직류 값을 생성시키는 요인으로 나타나고 있었다. 이러한 직류 성분은 부하 전력이 증가할수록 커지는 경향이었다.

### 4.3 용접현상의 실측 결과

Fig. 7은 광원 장치의 전방에 초점 위치를 조절하기 위한 증계 렌즈를 설치한 다음 표준 반사판 농도와 유사한 색조의 냉연 강재(CR) 및 아연 도금 후 열처리를 받은 합금화 아연 도금 강재(GA)를 배치하고 그 곳으로부터 반사된 밝기를 측정하는 것이다. 이 때의 초점 직경은 100mm였는데, 그것은 밝기를 높이는 것이 주 목적이 아니라 이러한

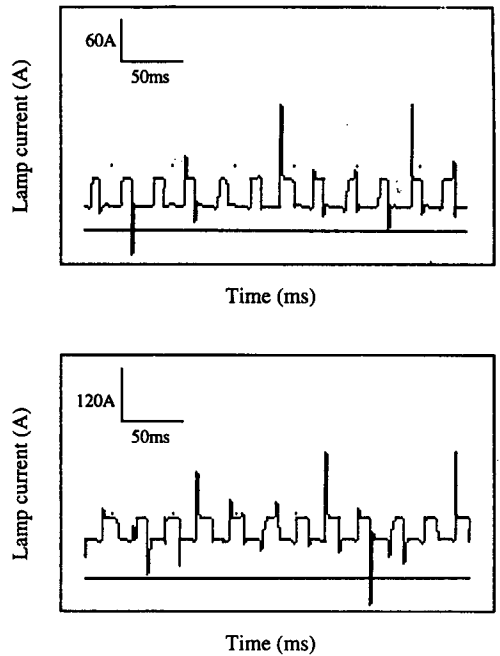


Fig. 6 Waveform of lamp input at 1.2kW (a) and 3kW (b)

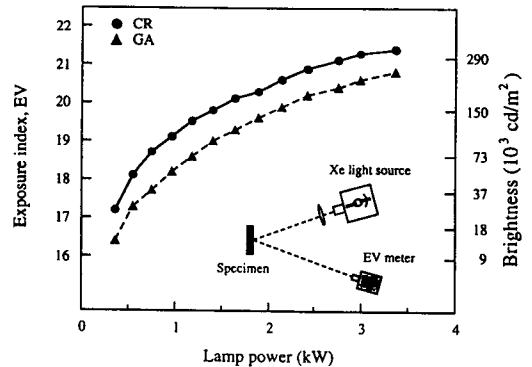


Fig. 7 Brightness on the flat specimen versus the lamp power

소재의 용접 공정을 수 1,000fps로 촬영할 수 있을지를 알아보기 위한 것이었다. 실험 결과, 전구의 입력 3,000W에서 계측된 노출지수는 CR의 경우 약 21EV 및 GA의 경우 약 20.5EV였는데 이 값은 식 (1)을 이용하여<sup>25)</sup> 휘도로 환산하였을 때 각각 약  $2.9 \times 10^5$  및 약  $2.1 \times 10^5$  cd/m<sup>2</sup>에 해당한다. 또, 이것은 EI=250의 주광용 필름을 사용할 경우, 셔터

정수 10, 조리개 16의 설정값에서 4,000fps의 속도로 촬영이 가능한 밝기에 해당한다.

$$\log B = 0.30125 Q - 0.8634 \quad (1)$$

여기서, B: 휘도

Q: exposure index

Fig. 8은 실제로 GMAW 공정을 관찰할 목적으로 용접 전류 200~300A 범위에서 용접을 실시할 때의 아크 밝기와 GA 소재에 초점 직경 60mm로 집속된 조명장치의 조사 강도를 비교한 것이다. 전술한 방법으로 환산된 밝기는 아크 용접시 실험 구간 최대 전류에서  $7 \times 10^5 \text{cd/m}^2$ 이었으나, GA 시험편으로 부터 반사된 빛의 밝기는 전구 입력 1,000W에서 약  $3 \times 10^5 \text{cd/m}^2$ 이었으며 설정 최대 입력인 4,200W에서는 약  $9 \times 10^5 \text{cd/m}^2$ 이었다. 용접 아크의 크기는 조광 장치의 초점 크기 보다 훨씬 작으므로 계측된 결과의 신뢰성이 저하할 수 있다. 그러나, 조광 장치의 초점 크기를 축소 한다면 더 높은 밝기도 쉽게 얻을 수 있을 것이기 때문에 GMAW 공정에서 용접 이행을 보다 좋은 품질로 관찰 가능함을 예측할 수 있었다.

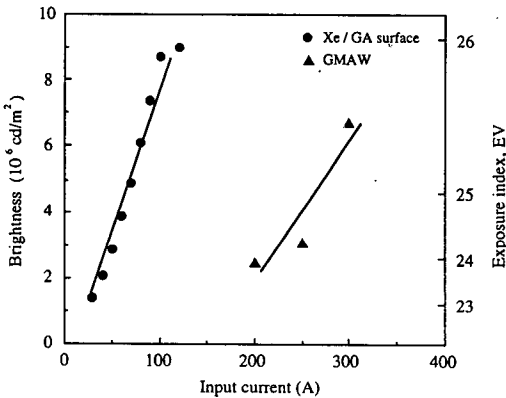


Fig. 8 Brightness of the Xe light source reflected from the GA flat specimen and the welding arc

#### 4.4 펄스 입력 및 출력 변동이 기록 품질에 미치는 영향

고속촬영 장치의 종류는 매우 다양하지만<sup>4,5)</sup>, 용접 현상 관측에 쓰이는 통상의 고속촬영 장치는 회

전 프리즘 형이다. 이와 같은 장치에서는, 필름이 정상상태일 경우 설정된 촬영 속도로 등속 이동을 하므로 하나의 프레임에 빛의 펄스를 정확히 동기시키는 것은 사실상 불가능하다. 또, 촬영 속도가 펄스 주파수와 정수 관계를 가지지 않으면 필름 면에서의 시간적 펄스 위치는 항상 다르게 된다. 그러나, 편의상 그것이 일치되었다고 가정할 경우에는 하나의 프레임에 항상 일정한 수의 빛 펄스가 입사되며, 그 결과 감광 품질도 일정하다. Fig.9는 이러한 영향을 확인하기 위한 실험 결과의 하나이다.

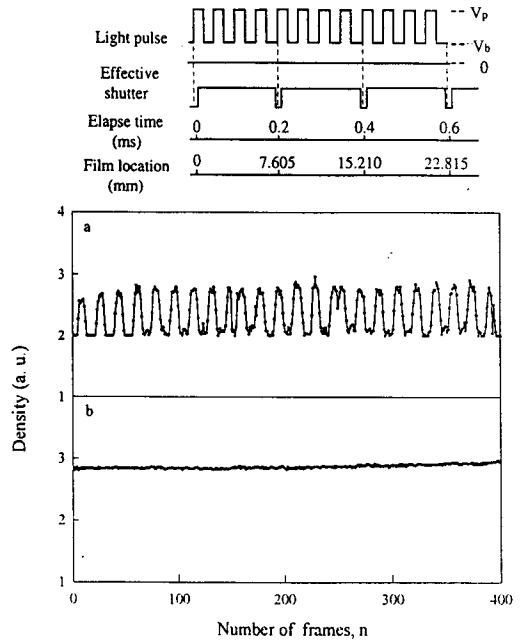


Fig. 9 Recording quality with the lamp input waveforms  
a. rippled DC b. modulated pulse

이 실험에서는 약 15%의 리플을 가진 광원 (Fig. 9a) 과 펄스 입력형 광원 (Fig. 9b) 을 이용하여 고속촬영을 실시한 다음 필름 면에서의 감광 농도를 정밀 농도계로 계측하였다. 그림에서 알 수 있듯이 측정 대상 400프레임에 대하여, 리플이 존재하면 촬영 후 큰 폭의 감광 농도차를 보이고 있으나 펄스 입력형 광원의 경우에는 매우 안정적인 결과가 얻어졌다.

이와같이 전원 장치의 출력 조건을 실시간 감시하여 그 값이 항상 일정하도록 PWM 제어를 수행하면 제어 능력을 벗어나는 급격한 부하 변동이 없는 한 전구의 입력 전력은 실질적으로 일정하다.

이러한 현상은 Fig. 9에서  $V_p - V_b - \Delta V$  만큼의 출력광 변화만 존재할 뿐, 정류식 장치에서 볼 수 있는 전기적 리플에 의한 빛의 저주기 변동은 없다.

또, 전술한 바와 같이 출력 전류가 증가 할수록 부하 회로의 인덕턴스가 원인이 되는 평활 작용으로  $\Delta V$ 는 감소한다.

그러나, 여기에서 중요하게 다루어져야 할 항목들 중에는 각각의 프레임에 대하여 감광에 소요된 빛 에너지의 양이 실질적으로 일정하여야 하며, 그 변화의 미소한 양이 감광 허용도 이내에 있어야 한다는 것이다. 즉, 필름 면에서 펄스 빛의 위상 변화량이 원인이되는 감광 에너지 변화가 소정의 값을 넘지 않도록 변조된 펄스 높이를 억제하여야 한다. 왜냐하면, 통상의 필름을 사용할 때, 적정 노출 허용도를  $\pm 1\text{EV}$ 로 관리하면 기록 품질에 영향이 없는 것으로 알려져 있으며<sup>26)</sup>, 전술한  $\Delta V$  값도 이 범위 내에 존재하도록 제어할 필요가 있기 때문이다<sup>27)</sup>.

## 5. 결 언

고주파 인버터 기술을 활용하여 용접 현상 관측용 고휘도 광원 장치를 제작하였다. 전구는 광량, 발광 스펙트럼 및 입력 변동에 따른 색온도 변화 등을 감안하여 단거리 방전형 제논 아크등을 사용하였다. 용접 현상의 촬영 현장 조건에 능동적으로 대응하기 위하여 전원 장치의 출력 제어 범위를 가능한 한 넓게하고 무단 제어를 목표로 한 PWM 기법을 채택 하였다.

필름의 감광 특성을 고려하여 제어 주파수는 아크 용접 공정을 기준으로 할 때 사용되는 통상의 촬영 속도 보다 수 배 높게 설정하였고, 주어진 범위에서 그 주파수를 변화시킬 수 있게 하였다. 그렇게 함으로써, 한 프레임 내에 여러개의 광 펄스가 입사되도록 할 수 있었을 뿐만 아니라, 각각의 펄스가 감광광에 미치는 영향을 실용적으로 완전히 배제할 수 있었다.

전구 입력 전류의 파형을 조사한 결과, 직류 성분에 포함되어 있는 펄스 전류의 크기는 평균 입력 전류의 값이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있었다. 그러한 사실은 부하회로의 인덕턴스가 정류파의 평활에 영향을 미친 결과로 해석되었으며, 그 경향은 출력 전류에 리플이 존재할 때에도 동일하게 나타나고 있었다.

정류 출력을 변화시키면서 리플이 필름의 기록 품질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 약 15%의 직류 전압 변동량을 첨가 하였을 때 필름의 감광 농도 변화가 크게 나타났다. 이 사실은 전구에 입력되는 저주파의 전력 변동이 필름의 감광 농도에 민감하게 관계됨을 보여주는 것으로 이러한 출력 특성은 될 수 있는한 피하여야 하지만, 높은 주파수의 펄스이면서 상대적으로 직류 성분이 많은 전류를 사용할 경우에는 하나의 펄스가 감광에 미치는 효과도 미약하기 때문에 그 영향 또한 발견할 수 없었다.

## 후 기

조명장치의 제작에 많은 도움을 주신 (株)映像 시스템의 金光磨 사장님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 安藤弘平, 長谷川光雄: 溶接アーク現象, (株)産報 (1962)
2. 溶接法研究委員會: アーク溶接におけるセンシングと制御, 溶接學會 (1990), II-32
3. T. Shinoda, H. Nishikawa, T. Shimizu: Data Processing Algorithms for Assessment of Stability of Short Circuiting Metal Transfer in MAG Welding, The 6th. International Welding Symposium, Nagoya (1996), 661
4. W. G. Hyzer: Engineering and Scientific High Speed Photography, The MacMillan Co., New York (1962)
5. Kodak Publishing No G-44, Eastman Kodak Co. (1981)
6. Y. S. Kim: Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, Ph.D Theses, M. I. T (1989)
7. M. Langford: Advanced Photography, 5th Edition, Focal Press, London (1993)
8. B. Fitt, J. Thornley: The Control of Light, Focal Press, London (1992)
9. 제품카탈로그, Ushio Xenon Short Arc Lamps, Ushio Inc, Tokyo

10. 제품카탈로그, Thyristor Rectifier for Xenon Lamp, SanRex, Osaka
11. J. D. Agin: Student Filmmaker's Handbook, Eastman Kodak, Rochester (1990)
12. A. LoSapio: Kodak Publishing No O-16, Eastman Kodak Co. (1989)
13. Kodak Publishing No H-2, Eastman Kodak Co. (1992)
14. Kodak Technical Data H-1-5293 (1992)
15. 久保田廣, 浮田祐吉, 會田軍太夫: 光學技術 핸드ブック, 朝倉書店, 東京 (1975), 334
16. S. F. Ray: Applied Photographic Optics, Focal Press, London (1988), 495
17. T. Ueyama: Private Discussion on The Power Source for Driving a Xenon Lamp
18. 김기철, 강문진, 조시훈: 용접현상 관측을 위한 고휘도 광원의 개발, 대한용접학회 춘계학술발표 개요집 (1996), 75
19. 坂部 昭, 鹿島孝之, 三田常夫, 荒谷 雄: インバタ制御アーク溶接機, 溶接學會誌, 55, 7 (1986), 419
20. T. Kashima, Y. Yamanaka : IIW-XII-878-85 (XIIC-105-85)
21. S. K. Gilbert, A. D. Faircloth and B. Goodwin : Proc., IIW Asian Pacific Welding Congress, Hobart, Australia (1988) 252
22. J. Tanimoto, M. Minooka, Y. Nishida: Development of The Arc Pulsed MAG Welding Process, Proc. IIW Asian Pacific Welding Congress, Hobart, Australia, Vol. 2 (1988), 678
23. T. Mita, T. Shinada: Waveform Control for Reducing Spatter in CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding, The 5th. International Symposium of JWS, Vol. 1 (1990), 121
24. 김기철, 강문진, 조시훈: GMA/GTA 용접전원 System 및 제어기술, 대한용접학회지, 14, 3 (1996), 1
25. Spotmeter F 使用説明書, ミノルタ株式会社, 東京
26. Kodak Publishing No H-11 (1992)
27. G. Schaub: The Amphoto Book of Film, Watson-Guptill Publication Inc., London (1993)