808 nm 조명 레이저 및 광학 필터를 이용한 아크 용접 현상 고속촬영 기법

이 태 현^{*,**} · 오 제 훈^{**} · 감 동 혁^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}한양대학교 기계설계공학과

High Speed Photography for Arc Welding Phenomenon Using 808 nm Diode Laser Illumination and Optical Filter

Tae Hyun Lee^{*,**}, Je Hoon Oh^{**} and Dong-Hyuck Kam^{*,†}

^{*}Joining R&D group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

^{**}Dept. of Mechanical Design Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

[†]Corresponding author : kamdong@kitech.re.kr

(Received August 18, 2020 ; Revised September 21, 2020 ; Accepted October 5, 2020)

Abstract

In this study, high-speed photography was performed for Gas Metal Arc Welding using an 808 nm diode laser and an optical filter. A Neutral Density(ND) filter and an 808 bandpass filter were used to an excluded arc light. We observed that the applied ND filter succeeded in capturing the drop transfer, but the arc image could not be excluded. When considering the spectral distribution of the arc, the 808 nm diode laser is suitable for recording a high speed camera sensor. The Full Width Half Maximum (FWHM) 3 nm of 808 nm bandpass filter is suitable for removing the arc spectrum signal. By combining an 808 nm diode laser and an 808 nm bandpass filter, we obtained a clear image of the drop transfer without the arc light.

Key Words : High speed photography, 808 nm diode laser, Neutral density filter, Band pass filter, GMAW, Drop transfer

1. 서 론

고속촬영기법은 빠르게 변화하는 용접현상을 관찰하기에 적합한 기법 중 하나이다¹⁾. Direct current gas metal arc welding (DC-GMAW)의 경우 와이어가 용융되어 이탈되는 용적이행은 전류의 범위에 따라 초당 수십에서 수백 회가 발생하기 때문에 낮은 응답속도를 가지는 CCD 카메라로는 이미지의 획득이 어렵다. 따라서 높은 응답속도를 가지는 고속카메라를 통한 촬영기법의 적용이 요구된다. 고속카메라는 CMOS 센서를 사용하여 높은 기록 속도의 구현이 가능하기 때문에 초당 수천에서 수만 프레임까지 촬영이 가능하다²⁾.

아크 용접 현상 관찰을 위한 고속촬영기법의 적용을 제한하는 가장 큰 문제점은 플라즈마의 강한 휘도로 인한 이미지의 포화 현상이다³⁾. 아크용접에서 아크의 강한 휘도에 의해 고속카메라 촬영 이미지가 포화되어 용적 이행 및 용탕의 유동현상이 관찰되지 않는 문제가 발생한다. 따라서 아크로 인한 이미지 포화 현상을 해결하기 위한 방법들이 제안되었다. 대표적인 기법은 'Laser back lighting'⁴⁾ 이다. Laser back lighting을 위하여 He-Ne 레이저를 카메라 및 GMAW 토치와 일직선 상으로 배치하여 용접 중 용융된 와이어의 그림자를 촬영하는 방법으로 전류의 대역에 따른 용적이행의 거동이 관찰이 가능함을 확인하였다. 'Laser Back lighting' 기법은 최근까지도 용적이행의 이미지를 효과적으로 획득

할 수 있는 방법으로 적용되고 있다. 하지만 용융풀과 같이 레이저 조명으로 그림자를 형성하기 어려운 대상은 촬영이 불가하다⁵⁻⁸⁾. 광학 필터의 적용으로 아크에서 발생하는 포화현상을 유발하는 강한 빛을 배제하고, 대상물의 이미지를 촬영할 수 있다. 그러나, 아크의 스펙트럼은 파장 대역이 넓으므로 필터링 영역을 포함하는 경우가 많다. 따라서 아크로부터의 노이즈가 필터를 통과하여 용접현상의 선명한 이미지 획득이 어렵다⁹⁾.

본 연구에서는 용접현상의 선명한 고속촬영 이미지를 획득을 위하여 100 W 고출력 808 nm 조명 레이저와 808 nm 밴드패스 필터와 Neutral Density (ND) 필터를 적용하였다. 조명레이저의 출력 변화와 밴드패스 필터(band-pass filter)의 Full Width Half Maximum(FWHM)의 값의 변화와 ND 필터의 투과율의 변화를 통하여 고속촬영 이미지의 선명도를 비교하였다. 아크 용접현상의 스펙트럼신호 분석을 통하여 고속촬영에서 조명레이저, 밴드패스 필터, ND 필터의 각각의 역할과 최적 조합에 대하여 논의한다. 결론적으로 아크 용접 중 용적이행의 선명한 고속촬영 이미지를 획득하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 논문의 아크현상 고속촬영을 위하여 SS 275 소재의 DC-GMAW를 실시하였다. 실험에 사용된 substrate는 면적 150 mm × 100 mm에 두께 10 mm의 SS275를 사용하였으며 용접 와이어는 1.2 mm 직경의 ER70S-3솔리드와이어를 사용하였다. 용접전원으로 Fronius사의 TPS-3200이며 와이어 송급속도는 7.8 m/min (250 A, 30V)로 설정하였다. 용접속도는 0.5 m/min이며 10초간 용접을 수행하였다. 보호가스는 Ar 90%+CO₂ 10%로 사용하였으며 20 l/min의 유량을 송급하였다.

Fig. 1 (a)는 아크용접의 스펙트럼 신호측정을 위한 실험장치이다. 스펙트로미터는 Ocean optics사의 HR4000이며, collimation lens를 통하여 아크 스펙트럼 신호를 측정한다. collimation lens는 Ocean optics사의 74-VIS이며 위치는 아크 발생 위치에서 x 방향으로 100 mm 간격을 두고 설치하였고 노출시간은 100 ms이다.

Fig. 1 (b)는 808 nm 조명 레이저와 필터를 활용한 고속촬영 배치도이다. 고속카메라는 Photron사의 ux-100이며 촬영속도는 5000fps, 셔터 값은 0.2ms이다. 촬영에 사용된 렌즈는 Nikon사의 AF MICRO NIKOR 모델이며 조리개 값은 f/22로 설정하였다. 고속카메라는 용접 토치에서 x 방향으로 500mm 거리에 위치하

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up (a) arc signal measurement through spectrometer (b) high speed photography system

였다. Fig. 1 (b)와 같이 조명레이저는 고속카메라를 기준으로 15° 방향으로 용접부에 조사하였다. 레이저의 조명의 효과를 증대시키기 위하여 모재와 동일한 크기의 소재를 반사판으로 사용하였으며 용접토치 기준 x 방향으로 -50 mm 거리를 두어 위치하였다. 실험에 사용된 조명레이저로 LIMO사의 120 W 808 nm 다이오드 레이저를 사용하였으며 레이저 출력은 10, 50, 100 W를 적용하였다. 레이저는 직진성을 가지기 위하여 collimation lens를 사용하여 30 mm 직경을 가지는 광원을 가지도록 설계되었다.

본 실험에서는 투과율의 조절의 위하여 Hoya사의 ND 필터가 사용되었다. ND 필터는 투과율의 조절이 가능하며, ND 숫자의 역수는 빛을 감광하는 비율을 의미한다. 실험에 사용된 ND 필터는 ND 500, ND 8, ND4이며, 투과율은 각각 0.2%, 12.5 %, 25 % 이다. 투과율의 조절을 위해 조건은 ND500, ND500+ND8, ND500+ND8+ND4 조합을 사용하였다. 투과율은 각각 0.2%, 0.025%, 0.00625%로 계산된다. 808 nm 밴드패스 필터는 edmond optics사의 FWHM 3 nm 와 10 nm 2 종을 평가하였다.

3. 실험결과

3.1 아크 스펙트럼 측정

용접 중 발생하는 아크는 강한 휘도를 가지고 있어

Fig. 2 Spectrum of arc using Ar 90% + CO₂ 10% shielding gas

용접 현상의 촬영에 어려운 원인으로 작용한다. Fig. 2는 스펙트로미터를 통하여 아크의 스펙트럼을 측정된 결과이다. 아크는 250 ~ 950 nm의 파장 영역에서 강한 신호를 가지는 것으로 확인되었다. 아크의 스펙트럼 신호는 고속카메라의 이미지를 기록하는 CMOS 센서의 파장 별 응답특성인 양자 효율에 의해 파장에 따라 빛의 강도는 다르게 측정된다. 이미지 촬영 시스템에서 양자효율과 시스템 구성요소에 의한 파장에 대한 빛 강도의 측정 원리는 (1) 식과 같이 표현된다⁹⁾.

$$B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda)\rho(\lambda)\tau(\lambda)\eta(\lambda) \quad (1)$$

(1) 식에서 나타낸 B는 이미지 센서에 기록된 빛의 강도이며 L(λ)는 대기에서 빛의 전달 효율, ρ(λ)는 피사체의 반사 혹은 방사 계수, τ(λ)는 광학 시스템의 투과율, η(λ)는 이미지 센서의 양자 효율이며, λ₁, λ₂는 이미지 센서가 인식하는 파장의 범위이다. 즉, 고속촬영 이미지는 아크 용접 과정에서 발생하는 빛의 강도와 고속카메라의 CMOS 이미지 센서의 양자 효율에 비례하여

Fig. 3 High speed camera quantum efficiency

기록된다. Fig. 3는 Photron사에서 제공된 ux-100 고속카메라의 양자효율을 나타낸 그래프이다. 고속카메라의 양자효율 범위인 400~1000nm 영역에서 Fig. 2에 나타낸 아크 스펙트럼이 형성되는 것이 확인되었다. 따라서 고속 촬영 시 CMOS 센서의 양자효율 파장 범위 내에서 용접 아크의 강한 휘도가 발생하기 때문에 Fig. 4 (a)와 같은 아크 이미지가 촬영된다. 고속카메라의 CMOS 센서는 8 bit의 기록 범위를 가지기 때문에 최대 255의 값을 가질 수 있다. CMOS 센서의 측정이 가능한 범위를 넘어서는 빛은 255로 동일한 값을 가지게 되어 포화된 상태로 이미지가 측정된다.

3.2 ND filter의 적용에 따른 고속촬영 이미지 분석

ND 필터의 역할은 식 (1)에서 표현된 이미지 센서에 기록되는 빛의 양에서 광학 시스템의 투과율 τ(λ)을 낮추는 역할을 하게 된다. 이는 촬영되는 파장 범위 내에서 빛의 강도를 낮출 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 ND 필터의 종류에 따른 아크 용접의 고속 촬영 이미지를 비교하였다. Fig. 4 (a)는 ND 500 필

Fig. 4 High speed image using Neutral Density filter (a) ND 500 (b) ND 500 + ND 4 (c) ND 500 + ND 8 + ND 4

터를 적용하였으며 아크의 강한 휘도로 인하여 포화된 이미지가 확인된다. Fig. 4 (b)는 ND 500 필터와 ND 8 필터를 동시 적용하여 아크 빛의 강도를 저감하여 촬영된 이미지이다. 아크 빛의 강도 저감을 통하여 와이어가 용융되어 이탈되는 용적이행 현상을 관찰할 수 있다. 하지만 아크 이미지가 잔류하여 용적이행이 선명하게 관찰되지 않는다. Fig. 4 (c)는 ND 500 + ND 8 + ND 4 필터를 적용한 이미지이다. 이미지 센서에 입사되는 아크 빛의 강도를 더욱 저감하였으나 용적이행 이미지 신호 역시 희미하다. 따라서 아크 용접의 고속 촬영에서 ND 필터 적용만으로 아크 이미지를 제거하여 선명한 용적이행 이미지를 얻지 못한다.

3.3 808 nm 레이저 조명 적용에 따른 ND 필터의 적용

808 nm 조명 레이저는 아크 내부의 용적 및 용탕에 반사되는 빛을 형성하여 고속촬영을 가능하게 하는 역할을 한다. ND 필터를 적용할 경우, 강한 아크 신호와 고출력 조명 레이저로 인해 반사된 이미지 신호 모두 고속 카메라 이미지 센서가 변별할 수 있는 강도로 낮아지기 때문에 용접현상의 촬영이 가능하다.

Fig. 5는 808 nm 조명 레이저를 100W로 조사한 후 ND 필터의 종류에 따른 촬영 이미지를 비교하였다. Fig. 5 (a)는 ND 500 필터가 적용하였으며 조명레이저로 형성된 빛이 촬영 기록된 것을 확인할 수 있다. 용접 와이어와 용접 주변부가 촬영되어 가시성이 향상되었으나, 아크의 이미지가 기록되어 용접부의 현상의 관찰이 어렵다. Fig. 5 (b)는 ND 500 + ND 8 필터를 사용하여 촬영된 이미지이다. 레이저 조명의 영향으로 와이어에 반사된 빛을 확인 가능하지만 Fig. 4 (b)의 결과와 비교하였을 경우와 유사하다. ND 필터의 적용으로 이미지 센서에 기록되는 조명레이저로 인해 반사된 빛이 저감되었기 때문이다. Fig. 5(c)는 ND

500 + ND 8 + ND 4 필터를 적용한 이미지이며, 808 nm 레이저로 인한 용접 현상 이미지 정보가 거의 기록되지 않았다. 따라서 고출력 100W 808 nm 조명 레이저를 사용하더라도 ND 필터의 적용만으로 용접 현상에서 아크의 이미지만을 제거하기 어려운 것으로 판단된다.

3.4 FWHM에 따른 808 nm 밴드패스 필터의 효과

808 nm 밴드패스 필터는 808 nm 조명레이저로 인해 발생한 용접 이미지 정보를 제외한 아크로 인한 노이즈 이미지 제거를 가능하게 한다. Fig. 6에 밴드패스 필터를 통하여 아크의 이미지를 제거하는 방법을 도식화하여 표현하였다. 808 nm 밴드패스 필터를 적용할 경우 아크의 빛은 필터의 대역폭인 FWHM 영역을 제외하고 차단된다. 또한 808nm 조명 레이저는 밴드패스 필터로 인하여 차단되지 않고 투과된다. 따라서 고속촬영 이미지에는 아크로 인한 노이즈를 제외한 용접 현상이 촬영된다.

밴드패스 필터의 FWHM은 아크 스펙트럼 신호의 차단영역에 영향을 미친다. Fig. 7에 808 nm 조명레이저를 100W로 조사한 후 밴드패스 필터의 FWHM의 범위에 따른 촬영 이미지를 나타내었다. Fig. 7 (a)

Fig. 6 Schematic diagram of filtering Arc light using 808 nm band pass filter

Fig. 5 High speed image using ND filter with 808 nm diode laser (a) ND 500 (b) ND 500 + ND 4 (c) ND 500 + ND 8 + ND 4

Fig. 7 High speed image using 808 nm band pass filter with 100W 808 nm diode laser (a) FWHM 3 nm (b) FWHM 10 nm

Fig. 8 Arc spectrum in different FWHM regions of band-pass filter

는 FWHM이 3nm인 밴드패스 필터를 적용한 결과이다. 아크의 이미지가 제거되어 용접현상이 명확히 촬영된 것이 확인되었다. Fig. 7 (b)는 FWHM이 10 nm인 밴드패스 필터를 적용한 결과이다. 촬영된 이미지에서 아크의 이미지가 제거되지 않는 것이 확인되었다. 이는 FWHM 10 nm 밴드패스 필터의 적용하였을 경우 아크의 스펙트럼 중 밴드패스 대역폭에 해당하는 노이즈가 촬영된다는 것을 의미한다

FWHM은 아크 스펙트럼의 신호 차단범위에 영향을 미치며 식 (1)에서 λ_1, λ_2 의 범위로 설명 가능하다. Fig. 8는 아크 스펙트럼 신호에서 808 nm 밴드패스 필터의 FWHM영역을 보여준다. FWHM 3nm 필터는 파란색, FWHM 10 nm는 붉은색 영역이다. 아크 스펙트럼 신호의 강도는 FWHM 3nm 밴드패스 필터의 대역폭 내에서 낮은 것으로 확인된다. 따라서 FWHM 3 nm인 밴드패스 필터의 적용은 통하여 아크의 신호의 제거를 가능하게 한다. FWHM 10 nm 밴드패스 필터의 경우 대역폭 범위 내에서 아크의 스펙트럼의 신

Fig. 9 High-speed image due to effect of 808 nm diode laser power (a) 10 W (b) 50 W

호가 존재한다. 따라서 FWHM 10 nm 밴드패스 필터의 적용은 아크의 스펙트럼 신호가 밴드패스 필터를 통과하여 아크 노이즈가 기록되는 것이다.

3.5 808 nm 레이저 조명 출력에 영향

808 nm 조명레이저를 사용할 경우 레이저의 출력은 촬영된 이미지의 밝기에 영향을 미친다. 고속촬영은 높은 촬영속도로 인하여 짧은 노출시간을 가지기 때문에, 대상을 이미지 센서에 기록하기 위하여 고 휘도의 조명이 필요하다. 조명 레이저의 경우 고 휘도를 구현하기 위하여 출력의 증가가 필요하다. Fig. 9는 808 nm FWHM 3 nm 필터를 적용한 후 레이저 조명의 출력을 변화하여 촬영된 이미지이다. Fig. 9 (a)는 조명 레이저의 출력이 10 W이며, 조명 레이저로 인한 용접 현상이 이미지에 기록되지 않았다. Fig. 9(b)는 50 W의 레이저 출력으로 설정하여 촬영을 실시한 결과이다. 조명레이저의 출력이 증가하여 이미지가 명확해 지는 것들이 확인 가능하다. 따라서 고속촬영을 위한 조명 레이저의 출력은 고출력이 요구된다.

4. 결 론

본 논문에서는 고속 촬영을 통한 용접부의 현상을 관찰하기 위해 아크 스펙트럼의 신호 분석과 고속촬영 중 808 nm 조명 레이저와 광학 필터의 적용을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 용접 중 발생하는 아크 스펙트럼 신호는 고속카메라의 양자 효율 범위에서 형성된다. 아크의 이미지는 아크 스펙트럼 신호로 인하여 기록되며, 용접현상의 촬영의 방해요소로 작용한다.

2) ND 필터의 적용을 통한 투과율 저하를 통하여 아크이미지 제거가 가능하다. 하지만 강한 아크의 스펙트럼 신호로 인하여 용접현상의 명확한 이미지의 촬영이 어려운 것으로 판단된다.

3) 808 nm 조명 레이저는 고속촬영 중 용접부에 반사되는 빛을 형성하여 용접현상촬영을 가능하게 한다. 하지만 아크의 빛의 강도가 조명레이저의 강도보다 강할 경우 ND 필터의 적용을 통해 아크 이미지 제거는 어려운 것으로 확인되었다.

4) 808 nm 밴드패스 필터와 808 nm 레이저를 동시에 적용할 경우 용접현상의 명확한 촬영이 가능하다. FWHM는 아크 스펙트럼 신호의 차단범위로 작용하며, 3nm일 경우 아크 이미지 제거와 808nm 조명레이저의 빛의 촬영이 가능하다

5) 조명레이저의 출력은 고속촬영 중 이미지의 밝기에 영향을 미친다. 짧은 노출시간을 가지는 고속촬영의 특성으로 인하여 고 출력의 레이저 조명이 요구되는 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “Add-on 모듈 탑재를 통한 지능형 뿌리공정 기술개발(kitech EO-20-0017)”의 지원으로 수행한 연구입니다

ORCID: Tae Hyun Lee: <https://orcid.org/0000-0003-0010-972X>
ORCID: Dong-Hyuck Kam: <http://orcid.org/0000-0002-4027-3973>

References

1. Y. Ogawa, High speed imaging technique Part 1 - high speed imaging of arc welding phenomena, *Sci. Technol. Weld. Join.* 16(1) (2013) 33-43.
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549903>
2. S. Tsukamoto, High speed imaging technique Part 2 - High speed imaging of power beam welding phenomena, *Sci. Technol. Weld. Join.* 16(1) (2013) 44-55.
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889549949>
3. A. Rout, B. B. V. L. Deepak and B. B. Biswal, Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56 (2019) 12-37.
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.08.003>
4. Y. S. Kim and T. W. Eager, Analysis of metal transfer in gas metal Arc welding, *Weld. J.* 72 (1993): 269-s.
5. Y. Zhang, Z. Zhao, Y. Zhang, L. Bai, K. Wang and J. Han, Online weld pool contour extraction and seam width prediction based on mixing spectral vision, *Opt. Rev.* 26(1) (2018) 65-76.
<https://doi.org/10.1007/s10043-018-0479-3>
6. B. W. Shinn, D. F. Farson and P. E. Denney, Laser stabilisation of arc cathode spots in titanium welding, *Sci. Technol. Weld. Join.* 10(4) (2013) 475-481.
<https://doi.org/10.1179/174329305X46673>
7. Chen, S. J., L. W. Wang, J. Xiao, and P. S. Wei, Arc Behavior and Droplet Dynamics of AC GTAW-GMAW Hybrid Indirect Arc, *Weld. J.* 97(3) (2018) 91-98.
<https://doi.org/10.29391/2018.97.008>
8. K. Kotaro, N. Kazufumi, M. Kohei and H. Yoshinori, 3D spectroscopic measurement of argon and metal vapour in MIG welding, *Weld. Int.* 32(4) (2018) 254-263.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1346218>
9. Z. Zhao, L. Deng, L. Bai, Y. Zhang and J. Han, Optimal imaging band selection mechanism of weld pool vision based on spectrum analysis, *Opt. Laser Technol.* 110 (2019) 145-151.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.058>