자동차 차체 적용을 위한 레이저-아크 하이브리드 용접의 동축 모니터링 시스템 개발

박 영 환* · 이 세 헌**† · 김 철 희***

*부경대학교 기계공학부

**한양대학교 기계공학부

***한국생산기술연구원 용접·접합연구부

Development of Coaxial Monitoring System in Laser Arc Hybrid Welding for Automotive Body Application

Young Whan Park*, Sehun Rhee**,† and Cheolhee Kim***

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

***Advanced Welding & Joining R&D Department, KITECH, Incheon 406-840, Korea

†Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received March 11, 2009 ; Revised September 3, 2009 ; Accepted November 4, 2009)

Abstract

In this paper, the coaxial monitoring system to capture image of weld pool was developed in laser-arc hybrid welding. In order to obtain the reliable image, green laser was used as a illumination system and measuring components such as band pass filter, ND (Neutral Density) filter and shutter speed was designed and optimized. Using this monitoring system, weld pool images were captured according to laser power, welding speed, welding current and interspace between laser and arc through the experiment. ANOVA (Analysis of Variation) was carried out to identify the influence of process variables on bead widths extracted from captured images of monitoring system. Welding speed and current were major factor to affect weld pool.

Key Words : Laser-arc hybrid welding, Coaxial monitoring, Illumination system, Optical filter, Bead width measurement, ANOVA

1. 서 론

레이저-아크 하이브리드 용접은 열원으로 레이저와 아크 용접을 접목한 복합 용접법으로 각 용접법이 갖는 장점은 극대화하고 단점은 서로가 보완하는 용접법이다. 깊은 용입이라는 장점을 갖고, 용접부 변형이 상대적으로 적으며, 모재의 갭(gap)에 대한 민감도를 극복할 수 있는 용접공정으로 많은 조립공정에서 사용되고 있다. 이러한 레이저-아크 하이브리드 용접공정을 자동화하는데 있어서 용접 상황을 모니터링하고 실시간으로 감지하는 것은 생산성과 품질의 확보에 있어서 매우 중

요하다. 용접공정에 있어서 발생하는 빛은 용접부 품질에 대한 많은 정보를 주기 때문에 모니터링 시스템의 설계 및 개발이 반드시 필요하다.

레이저 가공에 있어서 발생하는 현상은 음향(acoustic), 소리(sound), 그리고 빛의 방출, 화상(image), 플라즈마에 의한 가공부 주변의 전하의 변동 등이 있다¹⁾. 이 중에서 가장 많이 사용되는 방법은 음향이나 소리 그리고 빛이나 화상을 계측하는 방법이다. Jon²⁾은 압전 트랜스듀서(piezoelectric transducer)를, Chen 등³⁾은 용접부에서 나오는 자외선(UV)신호와 적외선(IR)신호를 동시에 계측하였다. Beyer 등^{4,5)}은 레이저 용

접 중 플라스마 신호와 소리(sound)신호를 계측하여 비교하여 용입간의 관계를 연구하였다. Miyamoto 등^{6,7)}은 적외선 영역의 포토다이오드를 각도가 서로 다르게 배치하여 용접품질을 판단하는 연구를 수행하였다. Farson 등⁸⁾은 광신호와 음향신호를 계측, ARMA모델을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다.

화상을 이용한 방법도 용접부를 모니터링하는 기법으로 이용되었다. Richardson 등⁹⁾은 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접에서 용접 토치와 동축으로 카메라를 설치하여 용융부의 폭을 측정하였고, Ohshima¹⁰⁾는 GMA(Gas Metal Arc) 용접에서 CCD(Charge Coupled Device) 카메라의 셔터신호를 용접전류 신호와 동기시켜 모니터링과 용입깊이를 제어하였다. Kovacevic 등¹¹⁾은 펄스형 레이저를 광원과 고속 셔터 스피드의 카메라를 이용하여 용융지를 관찰하여 용입상태를 판단하였다. Zheng 등¹²⁾은 플라스마 아크 용접에서 밴드패스 필터(band pass filter)를 이용하여 아크광의 특정 파장대만을 투과시켜 용접부를 관찰하였다. Postma¹³⁾는 레이저 용접공정에서 동축 모니터링 방법을 이용하였고, Kim¹⁴⁾은 디스크 레이저를 이용한 용접에서 동축 모니터링 시스템을 이용하여 용접변수에 따른 기호의 직경과 용융지의 길이와 폭의 변화를 분석하였다. Beersiek 등¹⁵⁾은 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 센서를 이용하여 용접부형상과 계측된 이미지와 비교, 분석하였다.

본 논문에는 레이저-아크 하이브리드 용접에서 발생하는 광 신호를 이용하여 용접부를 직접 계측 할 수 있는 동축 모니터링 시스템을 설계하였다. 레이저-아크 하이브리드 용접시 발생하는 아크광을 줄여, 신뢰성있는 용융지 계측 시스템을 구축하기 위하여, 광원 및 밴드패스 필터, ND(Neutral Density) 필터를 설계하였다. 또한 설계된 동축 모니터링 시스템을 이용하여 다양한 용접조건에 따른 이미지를 계측하였고, 통계적 방법으로 그 결과를 분석하였다.

2. 레이저-아크 하이브리드 용접의 동축 모니터링 시스템

2.1 레이저-아크 하이브리드 용접 시스템

본 논문에서 사용된 레이저-아크 하이브리드 용접 시스템은 크게 레이저 시스템과 아크 용접 시스템 그리고 이를 이용하여 용접하기 위한 용접 헤드와 이송 장치로 구분된다.

레이저 시스템은 4 kW급 Disk 레이저를 이용하였고, 아크 용접기는 MAG(Metal Active Gas) 용접기

Fig. 1 Welding and monitoring system for laser-arc hybrid welding

를 사용하였다. 구성된 시스템은 Fig. 1과 같다. 레이저는 광 파이버와 집속 광학계(focusing optics)를 통하여 용접부에 집광되며, 용접점의 앞에 아크 토치가 달려 있다. 시편은 1축의 이송 테이블을 이용하여 움직이며 클램프에 의하여 고정된다.

2.2 동축 모니터링 시스템의 구성

2.2.1 동축 모니터링 시스템

레이저-아크 하이브리드 용접은 레이저 용접과는 달리 아크 용접과의 복합 용접이므로, 모니터링시 레이저 용접과는 다른 방법이 요구된다. 특히 밝은 아크광에 의하여 용융지와 기호가 관찰되지 않으므로 이를 보완하기 위해서 본 논문에서는 조명 및 광량, 그리고 필터 등을 최적화하여 용접 모니터링 시스템을 구현하였다.

동축 모니터링 시스템의 구성은 크게 2가지 부분으로 나뉜다. 첫째는 영상 계측 모듈이며, 둘째는 조명 시스템

Fig. 2 Method of coaxial monitoring system in laser-arc hybrid welding

Fig. 3 Response characteristics of CMOS sensor according to wavelength

템이다. 영상 계측 모듈은 Fig. 2와 같다. 레이저가 광학계에 의해 용접 시편에 조사될 때, 시편에서 발생되는 다양한 현상이 빛의 신호로 나타나며, 용접 헤드내에 있는 광분할기(beam splitter)를 통하여 카메라에 의해 계측된다. 정확한 이미지를 계측하기 위해서, 아크광의 세기를 줄여주기 위한 ND 필터, 그리고 원하는 파장대의 빛을 받기 위한 밴드패스 필터가 필요하다.

동축 모니터링에 사용된 카메라의 최대 분해능(resolution)은 1,024(H)×1,024(V)의 픽셀(pixel)로 CMOS(complementary metal oxide semiconductor)형의 10bit 단색(monochrome) 센서이며 계측된 이미지의 배율은 7배이고, 파장영역에 따른 반응은 Fig. 3과 같다. 밴드패스 필터는 광원 레이저의 파장인 532nm에 대해 $\pm 5\text{nm}$ 의 투과 파장영역을 갖는 필터를 사용하여 광원에 의해 반사된 레이저 빛을 효과적으로 모니터링 이미지를 계측할 수 있었다.

2.2.2 조명 시스템의 설계

레이저-아크 하이브리드 용접은 아크광이 매우 강하기 때문에 외부의 조명없이 용융지를 관찰하기가 매우 어렵다. 그러므로 조명으로는 그린 레이저(green laser)를 이용하였다. 레이저를 조명으로 사용한 이유는 레이저의 광원의 강도는 다른 광원에 비하여 강하며, 집광이 쉽고 그 크기를 작게할 수 있다. 용접시 발생하는 현상을 관찰하기 위해서는 레이저 조명이 용융지에 조사될 때 반사된 빛을 계측하여야 정확한 이미지를 계측할 수 있으므로, 반드시 밴드패스 필터가 필요하다. 그린레이저의 경우, 파장이 532nm의 단 파장이므로 필터 설계가 쉽다는 장점이 있다.

조명의 위치는 반사되는 빛에 큰 영향을 미치므로 본 논문에서는 그 방향을 2가지 방법에 따라 실험을 수행하였다. 하나는 용접 진행 방향에 대하여 후면에서 조사하는 방법과 다른 하나는 용접 진행 방향의 측면에서 조사하는 방법을 이용하였다. 이 두 방법과 이 때 얻어지는 이미지는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 (a)는 용접

(a) Illuminating at the rear of weld

(b) Illuminating at the side of weld

Fig. 4 Method of illumination irradiation and captured images for coaxial monitoring

진행 방향의 후면에서 조명을 조사한 방법이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 용융지가 어둡고 잘 보이지 않는다. 그러나 (b)에서 보는 바와 같이, 측면에서 조명을 조사하면 후면에서 조사하는 경우보다 상대적으로 용융지가 잘 보이고 있다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 용융지의 전체가 잘 보이는 것이 아니라 측면에서 조사하므로 용융지의 가운데를 중심으로 왼쪽이 오른쪽 보다 상대적으로 잘 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 용접부 조명 시스템은 측면에서 조사하는 방법으로 설정하였다.

2.2.3 카메라 설정과 ND 필터에 따른 동축 모니터링 시스템 설계

레이저-아크 하이브리드 용접의 동축 모니터링 시스템에서 신뢰성 있는 이미지를 계측하기 위해서는 적절한 필터의 조합과 카메라의 설정이 필요하다. 카메라의 설정에 있어서는 적절한 셔터 스피드(shutter speed)와 이미지의 측정 속도(frame rate)가 요구된다. 이미지 측정 속도는 초당 60frame으로 설정하였고, 이미지의 크기는 512(H)×1,024(V) 픽셀로 설정하였다.

셔터 스피드와 ND 필터의 조합에 따라 계측 이미지의 밝기와 선명도가 달라진다. 그러므로 적절한 셔터

Fig. 5 Captured image according to different shutter speeds and ND filters

Table 1 Designed parameters of coaxial monitoring system for laser-arc hybrid welding

Sampling rate	60 frames/sec
Shutter speed	1/1,000 sec
ND filter	16
Band pass filter	532 nm $\pm$ 5 nm
Illumination source	Green laser
Energy of illumination	3 mJ
Position of illumination	The side of weld

스피드와 ND 필터의 조합이 필요하다. Fig. 5는 필터와 셔터 속도에 따른 계측 이미지를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 ND 필터가 없는 경우에는 아크광이 매우 강하여 용융지의 모습이 보이지 않는다. 반대로 ND 필터의 수치가 높고 셔터 스피드가 빠르면 (ND 32, shutter speed 1/1,000sec 인 경우) 아크광은 매우 약하여 지고 이에 따라 키홀은 잘 보이지만 용융지 또한 잘 보이지 않는다. 그러므로 아크광의 세기를 적절히 감쇠시켜 키홀이 잘 보이며, 용융지의 형상도 잘 보이는 조합은 ND 16에 셔터 스피드가 1/1,000sec 인 경우와 ND 32에 1/500sec 인 경우로 판단된다. 셔터 스피드가 빠를수록 정확한 이미지를 계측 할 수 있기 때문에 본 연구에서는 ND 16에 셔터 스피드가 1/1,000sec 인 경우를 선택하였다. 최종적으로 얻어진 동축 모니터링 시스템의 설계 결과는 Table 1과 같다.

3. 동축 모니터링 시스템 실험

3.1 실험 방법

레이저-아크 하이브리드 용접에서 용접조건에 따른 동축 모니터링을 수행하였다. 레이저-아크 하이브리드 용접에서 용접부의 품질을 결정하는 다양한 인자가 존재한다. 본 논문에서는 다양한 인자중에서 레이저 출력, 용접속도, 용접전류, 그리고 레이저-아크 간 거리의 4가지를 제어 인자로 선택하였다.

레이저 출력에 대한 동축 모니터링 결과를 보기 위하여 레이저 출력을 4, 3.5, 3, 2.5, 2kW 인 경우에 용접전류를 250, 300, 350A로 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 이 경우 용접속도는 1m/min 으로 고정하였다. 용접속도에 따른 동축 모니터링 결과를 알아보기 위하여 용접속도를 1, 1.5, 2, 2.5, 3m/min으로 바꾸어 가면서 실험을 수행하였다. 이 때, 용접전류는 250, 300, 350A로 3수준으로 나누었고, 레이저 출력은 4kW로 고정하여 그 결과의 변화를 관찰하였다. 용접전류에 따른 동축 모니터링 결과를 알아보기 위하여 용접전류를 250, 275, 300, 325, 350A의 5수준으로 나누었다. 이 때, 레이저 출력은 4, 2 kW, 그리고 용접속도는 1, 2m/min으로 바꾸어 실험을 수행하여 레이저 출력과 용접속도에 따른 영향력도 함께 관찰하였다. 이와 같이 용접 입열의 변화에 따른 실험에서 레이저-아크간 거리는 2mm로 설정하였다.

레이저-아크간 거리에 따른 실험을 수행하였다. 레이저-아크간 거리는 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6mm 로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 실험에서 레이저 출력은 4kW, 용접속도는 1m/min, 용접전류는 300A로 설정하였다.

위에 언급된 제어인자 이외의 고정인자는 다음과 같이 설정하였다. 텀-모재간 거리(CTWD: Contact Tube to Workpiece Distance)는 17mm로, 전체 용접길이는 235mm로 설정하였다. 전체 용접중 시작부의 15mm는 레이저만 조사하였다. 보호가스는 Ar 80%와 CO₂ 20%가 혼합된 가스를 이용하였고 유량은 30L/min였다. 레이저의 초점은 모재의 표면에 맞추었다. 용접 전압은 용접기 내에 일원제어에 사용되는 프로그램에 설정된 값을 이용하였다. 용접전류가 250A 일 때는 24.1V, 275A에서는 27.5V, 300A에서는 29V, 325A에서는 30.8V, 그리고 350A 에서는 32V로 설정되어 있다. 실험에 사용된 시편은 연강을 이용하였고 용접방법은 BOP(Bead On Plate) 방법을 이용하였다.

3.1 계측 이미지와 특징인자

Fig. 6은 동축 모니터링 시스템을 이용하여 계측된

Fig. 6 Features of captured image from coaxial monitoring system

Fig. 7 Relationship between captured image and weld bead

이미지의 예이다. 그림에서 보는 바와 같이 계측 이미지로부터 아크 및 키홀의 안정성 그리고 용융지의 폭과 같은 정보를 알 수 있다. 그림에서 아크로 표현된 부분에서 아크가 안정한지 용접의 이행이나 용접의 크기 등에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 레이저에 의해 발생된 키홀의 안정적으로 형성되는지 혹은 키홀이 붕괴되는 지에 대한 정보를 얻을 수 있다. 또한 용융지의 폭의 변화를 이용하여 하이브리드 용접에서 용접비드의 크기와 형상 등을 예측할 수 있다.

용융지의 계측은 전체 용접길이에 대하여 중앙부에서 얻은 영상을 이용하여 계측하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 용융지 폭은 용융지의 이송방향에 대하여 직각 방향으로, 아크가 끝나는 지점에서 용융지의 끝 부분을 측정하여 그 값을 얻었다. Fig. 6의 경우 용융지 폭을 나타내는 점선의 끝 부분에 해당되며 이 거리를 측정하였다.

Fig. 8은 레이저-아크 하이브리드 용접 후, 용접 비드와 이때 모니터링 된 이미지이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접 초기에 레이저만 조사되는 부분에서는 아

크없이 레이저에 의한 키홀만이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 용융지의 폭이 좁다는 것을 알 수 있다. 그리고 중간 부분에 있어서 MIG 용접의 아크가 형성되어 하이브리드 용접이 진행되는 부분이지만, 아크가 안정되지 못하고 있으며 이로 인하여 용융지의 모습이 불안정한 모습이 모니터링 시스템에 의하여 계속되었다. 그 후 아크가 안정되어 일정한 용융지가 형성되며, 키홀도 안정된 모습을 보이고 있다. 그러므로 계측된 이미지를 이용하면, 용융지의 크기를 간접적으로 계측할 수 있으며, 이렇게 얻어진 물리적인 수치는 용고 후 용접부의 비드 폭과 밀접하게 관련이 있음을 알 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 레이저 출력에 따른 실험 결과

레이저 출력에 따른 동축 모니터링 이미지가 Fig. 8이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 변함에 따라 아크광의 변화가 크지 않다. 그러나 용접전류의 변화에 따라서는 아크광의 크기가 매우 크게 변화하고 있음을 알 수 있다.

계측된 이미지를 이용하여 용융지의 폭을 계측하였고 이것은 Fig. 9에 표시하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 레이저 출력에 따라 용융지의 크기의 변화는 크게 변화하지 않고 있고, 용접전류에 따라서 변화하고 있음을 알 수 있다. 용융지에 대하여 레이저의 출력 보다는 용접전류의 변화가 더 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Laser Power		4 kW	3.5 kW	3 kW	2.5 kW	2 kW
Welding Current	250 A					
	300 A					
	350 A					

Fig. 8 Monitored images according to laser power

Fig. 9 Melting pool width according to laser power

4.2 용접속도에 따른 실험 결과

용접속도에 따른 계측 이미지는 Fig. 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 아크의 크기는 용접속도가 빨라짐에 따라 약간은 작아지고 있다. 그러나 아크의 크기는 용접속도 보다는 용접전류에 더 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 키홀은 용접속도에 상관없이 안정적으로 형성되고 있다.

Fig. 10 Monitored images according to welding speed

Fig. 11 Melting pool width according to welding speed

용접속도에 따른 용융지의 폭은 Fig. 11에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 용접속도가 빨라짐에 따라 그리고 용접전류가 작아짐에 따라 용융지의 폭이 작아지고 있음을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 설정된 조건에서 용융지의 변화는 용접전류보다는 용접속도에 더 큰 영향을 받고 있다.

4.3 용접전류에 따른 실험 결과

용접전류에 따라 동축 모니터링 시스템에 의하여 계측된 이미지를 각각 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 아크의 전류가 커짐에 따라 아크의 크기가 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 속도가 빨라짐에 따라서 아크의 크기가 작아지지만, 레이저 출력에 대해서는 각 용접전류 조건에서 변화가 크기 않음을 알 수 있다.

용접전류에 따른 용융지의 폭에 대한 결과는 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 아크의 전류가 커짐에 따라 용융지의 폭이 선형적으로 커짐을 알 수 있다. 또한 각 용접전류 조건에서 용접속도가 빨라짐에 따라 용융지의 폭이 작아지고 있음을 알 수 있다. 그러나 레이저 출력은 약간은 다른 양상을 보여주고 있다. 용접속도가 느린 1m/min 조건에서는 모든 용접전류 조건에서 레이저 출력에 상관없이 비슷한 용융지의

Fig. 12 Monitored images according to welding current

Fig. 13 Melting pool width according to arc current

폭을 가지고 있다. 그러나 용접속도가 빠른 2m/min에서는 각 용접전류 조건에서 레이저 출력이 큰 경우가 용융지의 폭이 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 용융지의 폭은 레이저 출력보다는 용접전류와 용접속도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4.4 레이저-아크 간 거리에 따른 실험 결과

레이저-아크 간 거리에 따른 계측 이미지를 Fig. 14에 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저-아크 간 거리가 짧은 경우(0 혹은 1mm)는 키홀이 아크광에 가려 보이지 않는다. 그러나 2mm에는 아크광의 끝단에 키홀이 형성되고, 간격이 커짐에 따라 아크광을 벗어나 5mm 이상이 되면 아크광 뒤에 키홀이 위치하게 된다. 5mm와 6mm의 경우 아크광 끝 부분에서 용융지가 약간 오목하게 작아지는 현상을 볼 수 있다. 이것은 레이저-아크간의 거리가 커짐에 따라 두 열원의 복합작용이 형성되지 못하고 마치 두 열원이 독립적으로

Fig. 14 Monitored images according to inter-space between laser and arc

작용하는 것과 같은 효과에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

4.5 분산 분석을 이용한 모니터링 결과에 대한 제어 인자의 영향력 평가

분산 분석을 통하여 용접 제어인자의 영향력을 평가하였다. 종속 인자로서는 용융지의 폭을 선택하여 분산 분석(ANOVA: Analysis of Variation)을 수행하였고 그 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 LP는 레이저 출력을, AC는 용접전류를 WS는 용접속도를 의미한다. 분산 분석을 통하여 데이터의 제곱 합(sum of square: SS)을 인자(factor), 오차(error)와 교호 작용(interaction)을 포함한 요인(source) 별로 분해하고, 오차에 대한 각 요인간의 비(ratio)를 통하여 결과에 대한 영향력을 판단할 수 있다. Table 2에서 MS는 평균 제곱(Mean Square), DOF는 자유도(Degree of Freedom)의 약자이며, '×'는 두 개 이상의 인자 간의 교호 작용을 의미한다. F_0 는 평균 제곱의 비로서 에러의 평균 제곱에 대한 인자의 평균 제곱의 비로, 이 값이 클수록 결과에 대한 영향력이 크다는 것을 의미한다. 그리고 $F(0.05)$ 은 F-검정(F-test)의 유의 수준(level of significance)을 나타내는 것으로 95%의 유의 수준을 의미한다. 그러므로 F_0 가 $F(0.05)$ 보다 큰 경우, 요인이 결과에 영향을 주는 인자라는 것을 통계적으로 검증하게 된다.

Table 2에서 보는 바와 같이 F_0 의 값은 용접속도와 용접전류가 상대적으로 큰 값을 가지고 있었다. 이것은 이 두 인자가 용융지의 폭에 크게 영향을 미치고 있다는 것을 의미하여 용접전류보다는 용접속도가 더 큰 영향을 주고 있다는 것을 정량적으로 표현하고 있고 이것은 Fig. 11과 12를 통해서 확인할 수 있다. 레이저 출

Table 2 ANOVA table for weld pool width

Factor	SS	DOF	MS	F_0	$F(0.05)$
LP	1.47	4	0.37	0.66	2.626
WS	58.52	4	14.63	26.16	2.626
AC	23.33	4	5.83	10.43	2.626
LP×WS	1.13	1	1.13	2.21	4.098
LP×AC	0.55	10	0.06	0.1	2.096
WS×AC	0.58	10	0.06	0.10	2.096
LP×WS×AC	0.44	4	0.11	0.2	2.626
Error	21.25	38	0.559		
Total	107.27	75			

력에 대한 F_0 의 값은 매우 작다. 이것은 레이저 출력이 용융지의 폭에 큰 영향을 주지 못한다는 것을 나타낸다. 실제 Fig. 9에서 보는 바와 같이, 레이저의 출력에 따라 용융지가 크게 변화하지 않고 있다. 그리고 각 인자간의 교호 작용은 거의 없는 것을 알 수 있다. 용접 전류가 용융지의 폭에 큰 영향을 미치는 이유는 전류가 증가함에 따라 공급되는 와이어의 양이 많아지며, 그리고 상대적으로 아크의 크기가 커지므로 용융지의 폭 또한 커지기 때문이다. 또한 용접속도에 있어서는 속도가 느려짐에 따라 단위 길이당 열원이 유지되는 시간이 길어지며, 이에 따라 용융지의 폭 방향으로 열전달 및 용융이 일어날 수 있는 충분한 시간이 확보되기 때문에 용융지의 크기가 커지는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 디스크 레이저를 이용할 레이저-아크 하이브리드 용접의 동축 모니터링 시스템을 설계하였다. 또한 용접조건에 따른 동축 모니터링 이미지를 계측하여 분석하였다.

동축 모니터링 시스템을 구축하기 위하여 카메라를 이용한 이미지 계측 시스템과 이에 관련된 광학 필터를 설계 및 제작하였다. 또한 정확한 영상을 얻기 위하여 그린 레이저를 이용한 조명 시스템을 설치하였다. 조명 시스템의 위치와 셔터 스피드 그리고 ND 필터의 값을 조정하여 최적의 값을 구하였고 이를 통해 신뢰성 있는 화상과 동축 모니터링 시스템을 구축하였다.

또한 레이저 출력, 용접속도, 용접전류, 그리고 레이저-아크간 거리에 따른 동축 모니터링 시스템의 화상을 분석하여 설계된 동축 모니터링 시스템의 유효성을 검증하였다. 아크와 키홀의 안정성을 판단할 수 있었고 용융지의 폭을 정량적으로 측정할 수 있었다. 또한 분산 분석을 이용하여 용융지의 폭에 대한 각 제어 인자의 영향력을 판단할 수 있었다. 용융지의 폭에 대하여 레이저 출력 보다는 용접속도와 용접전류가 큰 영향력을 미치고 있음을 설계된 동축 모니터링 시스템을 통해 정량적으로 확인 할 수 있었다.

후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업(10848)의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A. Sun and E. Kannatey-Asibu, Jr. : Sensor System

- for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality, Journal of Laser Applications, **11-4** (2001), 153-168
2. M.C. Jon : Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding, Welding Journal, **63-9** (1984), 43-48
3. H.B. Chen, L. Li, D.J. Brookfield, K. Williams and W.M. Steen : Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors, Proceeding of ICALEO '91, (1991), 113-122
4. W. Gatzweiler, D. Maischner and E. Beyer : On-line Diagnostics for Process-control in Welding with CO₂ Lasers, High Power CO₂ Laser System & Applications, SPIE 1020 (1998), 142-148
5. D. Maischner, A. Drenker, B. Seidel, P. Abels and E. Beyer : Process Control During Laser Beam Welding, Proceeding of ICALEO'91, (1991), 150-155
6. K. Mori, H. Sakamoto and I. Miyamoto : Detection of Weld Defects in Tailored Blanks, Journal of Japan Welding Society, **14-4** (1996), 689-693
7. I. Miyamoto and K. Mori : Development of In-process Monitoring System for Laser Welding, Proceeding of ICALEO'95, (1995), 759-767
8. D. Farson, A. Ali and Y. Sang : Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration, Welding Journal, **77-4** (1998), 142s-148s
9. R.W. Richardson, D.A. Gutow, R.A. Anderson and D. Farson : Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control, Welding Journal, **63-3** (1984), 43-50
10. K. Ohshima : Observation and Control of Weld Phenomena in Arc Welding, Journal of Japan Welding Society, **58-4** (1989), 44-49
11. R. Kovacevic, Y. M. Zhang and L. Li : Monitoring of weld joint penetration based on weld pool geometrical appearance, Welding Journal, **75-10** (1996), 317s-329s
12. B. Zheng, H.J. Wang and Q.L. Wang : Front Image Sensing of the Keyhole puddle in the variable polarity PAW of Aluminum Alloy, Journal of Material Processing Technology, **83** (1998), 286-298
13. S. Postma, R.G.K.M. Aarts, J. Meijer and J.B. Jonker : Penetration Control in Laser Welding of Sheet Metal, Journal of Laser Applications, **14-4** (2002), 210-214
14. J.H. Kim : Analysis of Welding Phenomenon Using Coaxial Monitoring System in Disk Laser Welding, Master Thesis, Hanyang University, 2007 (in Korean)
15. J. Beersiek, T. Devermann and K. Behler : Practical Applications of In-process Monitoring for Laser Processes - Not only for Single Welds and Common Materials, Proceeding of ICALEO'04, (2004), 1001