고출력 CO_2레이저 용접시 포토 다이오드를 이용한 플라즈마와 스패터 모니터링

Monitoring of plasma and spatter with photodiode in CO_2 laser welding

박현상*, 이세헌*, 정경훈**, 박인수**
Hyunsung Park, Sehun Rhee, Kyung-Hoon Chung, In-Soo Park
*한양대학교 정밀기계공학과 **(주)대우자동차 생산기술연구소
('98.6.25심사시작-'98.8.20심사완료)

ABSTRACT

Laser-welded Tailored Blank is the hottest thing in many automobile companies. But they demand on weld quality, reproducibility, and formability. So it is the great problem of automation of laser welding process. Therefore, it is requested to construct on-line process monitoring system on high accuracy.

The light which is emitted from plasma and spatter in laser welding was detected by photo-diodes. It was found that the light intensity depends on welding speed, laser power, and flow rate of assist gas. The relationship between the plasma and spatter and the weld quality can be used for on-line laser weld monitoring systems.

Key words : Laser-welded tailored blank, Photo-diode, Plasma, Spatter, Keyhole, Monitoring system

1. 서론

현재 자동차 업계에서 행하여지고 있는 테일러드 블랭크(tailored blanks) 용접에서는 메시 심(mash seam)용접과 레이저를 이용한 용접이 행하여 지고 있으나, 현재는 레이저를 이용한 용접이 가장 활발히 연구되고 있으며, 이러한 레이저 용접과 더불어 레이저 용접 품질 검사방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

레이저 용접 품질 검사는 용접 중 발생하는 신호를 계측, 처리하여 현재 용접 되어지고 있는 품질의 양부를 판단하는 작업이다. 레이저 용접은 용접 중 판재간의 간격(gap)이 존재할 경우, 용접선에서 초점이 벗어나는 경우, 전송계의 이상 등으로 인하여 레이저의 출력이 떨어지는 경우, 보조가스 유량이 변화하거나 가스가 나오지 않는 경우 등 여러 가지 원인에 의해 결함이 발생할 가능성이 크며, 테일러드 블랭크와 같이 대량생산이 필요한 경우에는 이와 같은 레이저 용접 요소들의 지속적인 유지가 어려우므로 용접품질을 모니터링 하는 것이 필수적이다.

레이저 용접품질 검사 방법에는 음향방사(acoustic emission)를 이용한 방법[1], 광신호(optical signal)를 이용한 방법, 화상처리(image process)를 이용한 방법 등이 있으며, 이중 가장 많이 연구되

어지는 것이 음향방사와 광신호를 이용한 방법이다.

Beyer등[2,3]은 레이저 용접중 플라즈마 신호와 소리(sound) 신호를 계측하여 비교하였으며, 가스의 영향에 대해서도 살펴보았다. 또한 용접부 위와 아래에서 플라즈마 신호를 계측하여 완전용입과의 관계도 연구하였다. Chen등[4]은 용접부에서 나오는 자외선 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접품질을 판단하였으며, 레이저출력, 보조가스, 용접속도 등을 변화시켜 이에 따른 신호의 거동도 연구하였다. 또한 Miyamoto등[5-7]은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토 다이오드(photodiode) 두개를 각도를 다르게 하여 플라즈마를 계측한 후 신호의 AC성분을 이용하여 용접결함(underfill, pit등)을 검출하는 연구를 진행시켜 왔다. 그러나 Miyamoto등의 연구는 적외선 파장대의 최대 감도를 갖는 센서를 사용함으로써 Fe 플라즈마 파장과는 약간 다른 파장을 계측하는 단점이 있다.

그러나 현재까지 고출력 CO_2 레이저 용접의 경우, 용접변수에 따른 자동차용 냉연강판 및 아연도금강판의 용접시 발생하는 플라즈마와 스패터의 거동에 관해 정확히 규명되어 있지 않아, 이를 통한 용접품질 모니터링에 많은 어려움이 있으며, 특히 품질 판정시 빠른 신호처리를 통하여 용접의 상태를 판정할 수 있는 1차 성분인 DC 성분에 대해서는 그 변화 패턴이 명확하지 못하다. 또한 고출력 레이저 용접시 고품질을 확보하기 위하여 사용되고 있는 He을 보조가스로 사용하였을 때의 신호에 대해서도 정확히 알려져 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 포토 다이오드를 사용하여 용접속도, 레이저 출력 등의 용접변수 변화에 따른 플라즈마와 스패터의 거동에 관하여 연구하여 모니터링의 기초 자료로 삼고자 한다.

2. 플라즈마와 스패터의 계측 원리

레이저 용접에서 키홀(keyhole) 및 플라즈마는 레이저 에너지가 시편에 전달되는 과정에서 중요한 매개 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 스패터는 어느 용접에서나 그 정량적인 결과가 용접품질에 큰 역할을 하게 된다.

레이저 용접시 발생하는 플라즈마는 주위의 압력이 10^4Pa 이상으로 부분적인 열평형 상태에 있다고 알려져 왔다.[6] 플라즈마가 열평형 상태에 있는 경우에는 방출 스펙트럼이 흑체(black body)복사의 스펙트럼과 유사하다. 따라서 이때의 방사는 아래의 식(1)과 같은Planck의 방사법칙을 따르게 된다. 플라즈마의 방사력은

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \qquad (1)$$

이 된다. 여기서는 파장[㎛], T는 온도[K], C_1은 3.743×10^8[W · ㎛^{4}/m^2], 그리고 C_2는 1.4387×10^4[㎛ · K]이다.

이와 같은 복사곡선의 최대점은 Wien의 변위법칙(displacement law)에 의해 식(2)와 같이 정할 수 있다.

$$\lambda_{max} T = 2897[\mu m \cdot K] \qquad (2)$$

따라서 플라즈마와 스패터에서 발생하는 방사력을 열방사 온도계측에 의해 계측하게 되고, 이때 계측하게 되는 CO_2 레이저 용접시의 발생 플라즈마는 파장범위가 190-400nm[8]정도로 알려져 있다.

레이저 용접을 온라인(on-line)으로 모니터링(monitoring)하기 위해서는 플라즈마와 스패터의 거동을 나타내주는 자외선과 적외선 영역을 선택, 그 신호를 받아들여 신호를 분석한 후 품질을 판정하게 된다.

센서로 사용한 포토 다이오드는 들어오는 광의 세기에 따라 전류가 변하게 되며, 변화하는 전류를 전압신호로 변환, 증폭하여 광의 세기를 알아내게 된다. 한편, 포토 다이오드는 모든 광에 대하여 동일하게 반응하는 것이 아니라, 특정 파장대

의 광에 반응하게 되므로 적절한 파장범위의 포토 다이오드를 선택하여 플라즈마 혹은 스패터 광의 세기를 측정하게 된다.

3. 실험

3.1 실험장치의 구성

본 연구에서 사용한 포토 다이오드는 자외선 영역과 적외선 영역의 두 가지 종류이다. 자외선 영역의 포토 다이오드(이하 UV 센서)는 CO_2 레이저 용접시의 플라즈마 파장을 받아들이기 위하여, 파장감도범위가 260-400nm인 것을 선택하였으며, 적외선 영역의 포토 다이오드(이하 IR 센서)는 파장감도범위가 700-1700nm인 것을 사용하였다. 신호를 증폭하기 위한 앰프는 자외선 영역의 포토 다이오드와 적외선 영역의 포토 다이오드 각각에 적절한 회로로 구성하였다. 센서의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of the sensors

	UV Photodiode	IR Photodiode
Type	GaAsP	InGaAs PIN
Spectral response range	260-400 nm	700-1700 nm
Peak sensitivity wavelength(λ_p)	370 nm	1550 nm
Dark current(Max.)	50 pA	1.5 nA
Photo sensitivity(at λ_p)	60 mA/W	0.95A/W

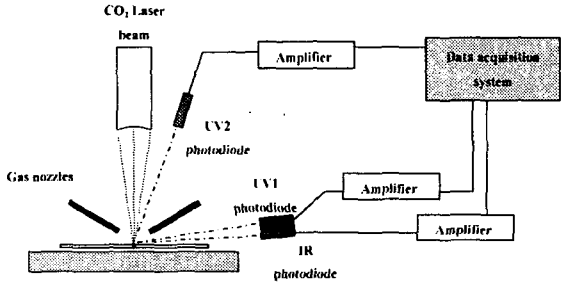

Fig. 1 Schematic diagram of the laser monitoring system

실험에 사용하는 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 테일러드 블랭크용 고출력 CO_2레이저 용접기에 센서를 부착하여 센서가 레이저 빔의 이송부와 함께 움직이며 용접부에서 발생하는 플라즈마와 스패터를 정확하게 계측하도록 하였다. 이때 센서는 용접부에서의 위치와 각도를 정확히 맞추어 감도 높은 신호를 검출하도록 한다. 특히 UV 센서의 경우, 각도에 따라 검출대상이 변화한다. 낮은 각도의 센서(UV1)는 시편 표면위의 플라즈마 플룸(plume)의 양을 검출하고, 높은 각도의 센서(UV2)는 키홀 내부 플라즈마의 발광을 검출하게 된다. 본 실험에서 사용한 센서의 각도와 거리는 Table 2와 같다.

Table 2. Angle and distance of the sensors

	Angle(°)	Distance(mm)
UV1	10	310
UV2	73	260
IR	6	310

측정된 신호를 PC로 받아들이기 위해 사용된 데이터 획득장치(data acquisition board)는 분해능(resolution)이 12bit, 샘플링 속도(sampling rate) 100kHz, 채널이 8개이다. 데이터를 측정할 때에는 센서로부터의 신호를 앰프에서 증폭하여 보드(board)에 입력하고, 용접 시간동안 1kHz 의 샘플링 속도로 저장시킨다. 이는 예비실험을 통하여 주파수 분석을 실시한 결과, 신호가 약 100Hz이내의 주파수 만으로 이루어져 있음을 알 수 있었으며, 또한 모니터링 시스템의 제작을 최종 목표로 하기 때문에 샘플링 속도가 너무 빠를 경우, 많은 데이터를 신호처리 함에 문제가 있어 1kHz를 사용하였다.

실험에 사용한 CO_2레이저는 비교적 고출력인 6kW급으로 사양은 Table 3과 같다.

Table 3. Specifications of the CO_2 laser welding machine

Laser	Rofin-Sinar 860HF
Laser power	CW 6 kW
TEM mode	TEM_{01}
Beam diameter	30 mm
Focal length	350 mm
Focus spot size	0.31 mm
Assist gas flow angle	20°

3.2 실험조건

용접 시편은 두께 1.5mm의 자동차용 아연도금 강판과 냉연강판(SPCEN)을 사용하였으며, 용접 길이는 약 500mm이고, 플라즈마와 스패터 거동의 기초 자료로 사용하기 위하여 상판(bead on plate) 용접을 수행하였다. 실험에 사용한 시편의 조성은 Table 4와 같다.

Table 4. Chemical composition of test plates

	C (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	P (wt%)	S (wt%)	Fe (wt%)	Zn (g/m²)
SPCEN	0.0029	0.005	0.087	0.013	0.011	bal.	
Galvanized	0.0032	0.002	0.065	0.009	0.008	bal.	45/45

용접변수는 용접속도(travel speed), 레이저 출력(laser power), 그리고 보조가스 유량(assist gas flow rate)으로 주어, 용접 변수의 변화에 따른 거동을 살펴 보았다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위하여 각각의 조건에 대하여 5회씩 수행하였다. 그 외 보조가스는 헬륨(He)을 사용하였으며, Fig. 1에서와 같이 앞, 뒤 노즐에서 가스가 나오게 되고, 레이저의 초점은 시편의 밑면에 맞추었다.

4. 결과 및 고찰

아연도금강판을 레이저 출력 6kW, 용접속도 6m/min으로 하였을 경우에 센서에서 받아들인 신호는 Fig. 2와 같다. 첫번째 UV1센서에서 나온 플라즈마 플룸의 신호를 보면 용접이 시작되는 곳에서 순간적으로 플라즈마 신호가 크게 나오고, 약 0.5sec후에는 안정한 상태가 되어 일정한 전압 신호가 나옴을 알 수 있으며, 또한 스패터를 측정하는 IR센서의 신호도 역시 초기에 큰 신호가 나타남을 알 수 있었다. 이것은 초기 플라즈마의 발생이 정상상태가 되지 못한 것과 레이저 헤드의 이송시 과도성에 기인한 것으로 생각되며, 따라서 UV1센서와 IR센서의 신호를 레이저 용접 모니터링의 판단 입력값으로 사용하려면, 용접 초기의 신호는 불안정하므로 이를 제외한 안정한 상태의

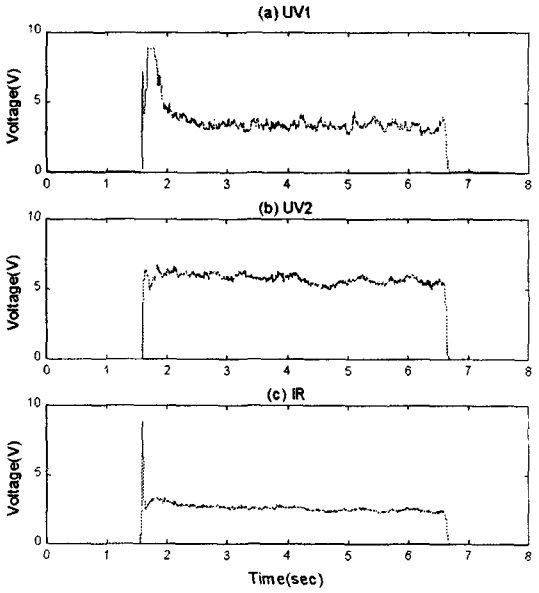

Fig. 2 Output signal of sensors (Galvanized steel, 6kW, 6m/min)

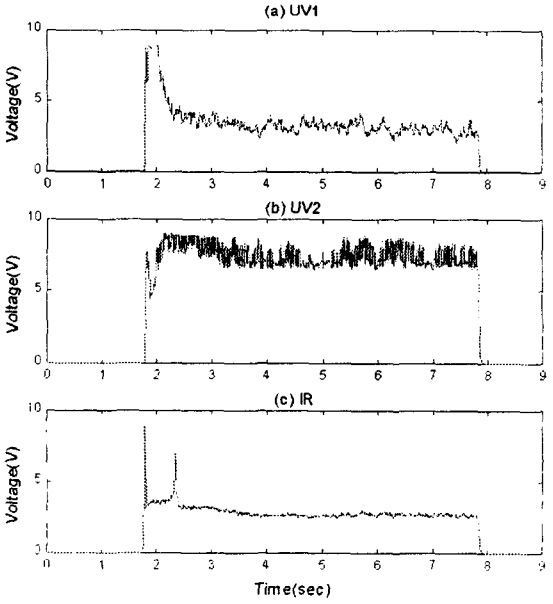

Fig. 3 Output signal of sensors (Galvanized steel, 6kW, 5m/min)

신호를 사용해야 함을 알 수 있었다.

위의 조건에서 용접속도를 5m/min으로 낮추었을 때의 신호는 Fig. 3과 같다. 용접속도가 낮아지면 UV2센서의 신호와 IR센서의 신호는 높아졌음을 알 수 있었으며, UV1센서의 신호는 낮아졌음

을 알 수 있었다. 특히 용접속도 6m/min에 비하여 UV2센서의 신호 중 AC성분이 증가하였는데, 현재까지 이런 AC성분의 증가에 대해서는 Leong[9]등이 발표한 보고서에서 기름 등의 오염에 의하여 발생할 수 있으며 이를 통해 표면오염을 판단할 수 있다는 것 외에는 별다른 보고가 없다. 그러나 본 실험에서는 표면의 청결을 잘 유지하였으므로 오염에 따른 영향이라고 보기 어려웠다. Miyamoto[7]등과 Beyer[10]등의 연구에 의하면 키홀(keyhole)이 생성된 후 부분 용입(partial penetration)일 경우에는 키홀 내부와 플라즈마 풀룸의 사이에 강한 플라즈마 일부(hot spot)가 생성되어 키홀 입구에서 상하 주기적으로 움직인다고 보고하고 있다. 본 실험에서 나온 이 AC성분도 입열량이 커짐에 따라 키홀이 성장하게 되고, 이 때 발생한 강한 플라즈마(hot spot)의 주기운동에 의하여 키홀 내부로 플라즈마(hot spot)가 이동하면 좁은 영역으로 응집되어 신호가 커지고, 외부로 나오면 넓게 퍼져 신호가 작아지는 것 때문이라고 생각된다.

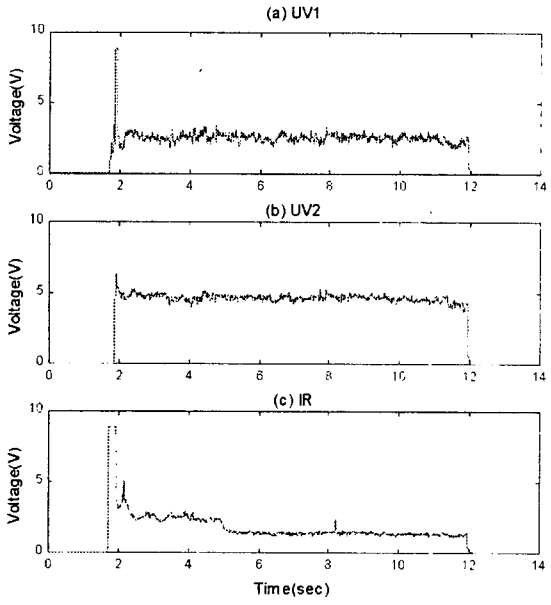

Fig. 4 Output signal of sensors (Galvanized steel , 6kW, 3m/min)

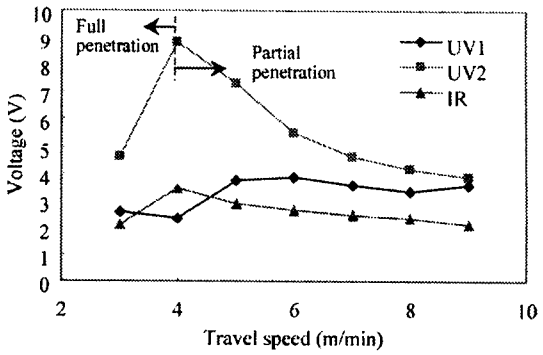

Fig. 5 Signal of sensors with travel speed (Galvanized steel, 6kW)

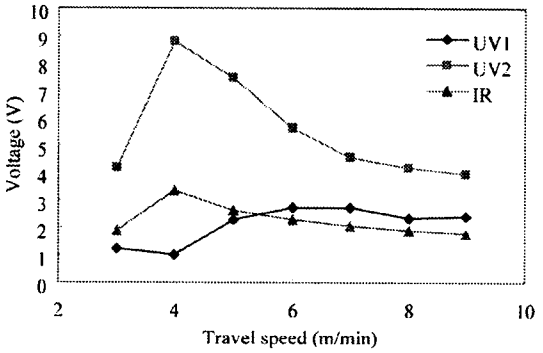

Fig. 6 Signal of sensors with travel speed (SPCEN, 6kW)

Fig. 4에는 용접속도를 3m/min로 낮추었을 때의 센서 신호를 보여주고 있다. 전체적으로 신호가 낮아졌음을 알 수 있었고, 이 때 용접부는 완전용입(full penetration)이 되었다.

Fig. 5와 6에는 아연도금강판과 냉연강판에 용접속도를 변화 시켜 용접했을 때의 각 센서별 평균 전압을 나타내고 있다. 현재까지 발표된 보고에 의하면 플라즈마의 신호는 단순히 레이저 용접시 들어가는 입열량이 증가하게 되면 같이 증가한다고 발표하고 있다. 그러나 UV2와 IR센서의 신호는 용접속도 9m/min에서 4m/min까지는 증가하다가 3m/min이 되면 갑자기 감소함을 볼 수 있다. 이는 4m/min까지는 입열량이 증가함에 따라 발생되는 플라즈마의 양이 증가하기 때문이며, 3m/min에서는 키홀의 밑부분이 열리면서 완전 용입이 일어나 그 곳으로 플라즈마의 일부가 빠지

면서 갑자기 계측되는 플라즈마의 양이 감소하게 된다. 이와 반대로 UV1의 신호는 용접속도가 작아짐으로 입열량이 증가함에도 불구하고 용접속도 4, 5, 6m/min에서 감소하는 패턴을 나타낸다. 이는 Fig. 7에 나타낸 보조가스를 사용하지 않았을 때의 신호를 보면 그 원인을 알 수 있다. 보조가스를 사용하지 않으면 UV1센서의 신호도 UV2나 IR센서의 신호와 마찬가지로 용접속도가 작아지면 전압이 증가함을 볼 수 있다. 보조가스의 유량이 일정하게 공급되어지고 있을 때, 용접속도가 작아지면 단위 길이당 불어주는 보조가스의 양이 늘어나게 되고, 따라서 보조가스에 의해 플라즈마의 분산이 더욱 잘 일어나게 된다. 또한 보조가스

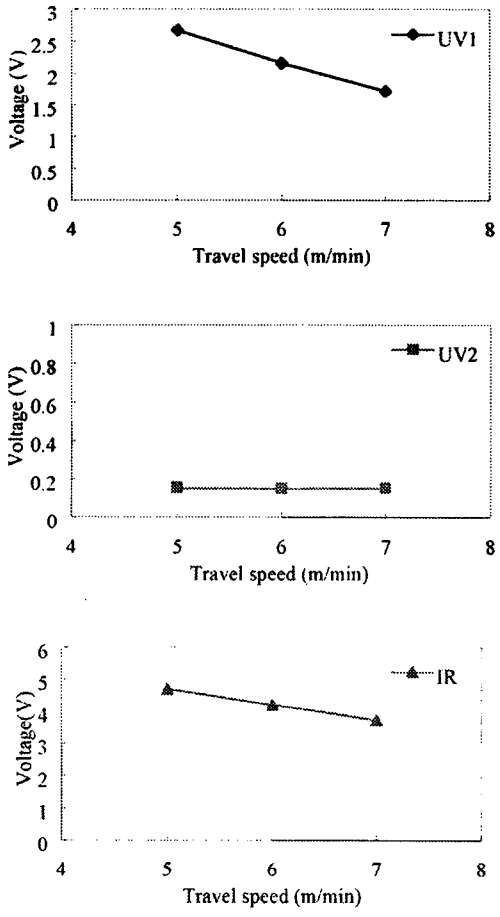

Fig. 7 Signal of sensors with travel speed (Galvanized steel, No Gas, 6kW)

의 영향은 시편위의 플라즈마 플룸이 많이 받으므로 UV1의 신호는 입열량이 증가함에도 불구하고 보조가스의 영향에 종속되어 반대의 경향을 나타낸 것이다. 한편 이 경우 출력 전압의 절대값에 큰 차이가 있음을 알 수 있는데, 보조가스를 사용하지 않는 경우에는 본 실험이 고출력인 관계로 시편 위의 플라즈마가 레이저의 전송계를 손상시킬 우려가 있어 센서의 장착을 수정하였고, 이로 인하여 전압의 절대값에 차이가 나타났다.

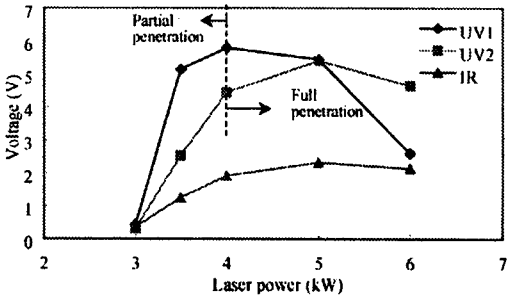

Fig. 8 Signal of sensors with laser power (Galvanized steel, 3m/min)

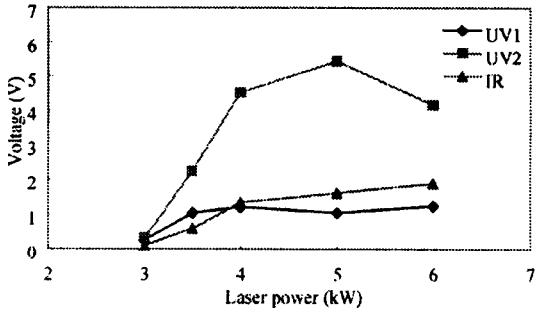

Fig. 9 Signal of sensors with laser power (SPCEN, 3m/min)

Fig. 8과 9에는 레이저의 출력에 따른 신호를 나타낸 것이다. 아연도금강판이나 냉연강판 모두 레이저 출력 4, 5, 6kW일 경우에는 완전 용입이 되고, 그 이하일 경우에는 부분 용입이 일어나게 된다. 두 구간으로 나누어 고찰해 보면 부분 용입일 경우에는 레이저 출력이 증가하여 입열량이 늘어나게 되면 플라즈마나 스패터의 양이 증가되게 된다. 그러나 완전용입이 일어나는 구간에서는

UV2의 신호가 5kW일 경우에 가장 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 5kW까지는 입열량에 플라즈마의 발생량이 종속되기 때문이며, 5kW이상에서는 열려진 키홀의 밑부분이 너무 커짐으로 인하여 빠지는 플라즈마의 양이 많아지는 것에 종속되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5에서 9까지의 결과를 보면, 아연도금강판으로 실험한 것이 냉연강판으로 실험한 것보다 전체적으로 큰 전압이 나옴을 알 수 있다. 이는 아연 도금층이 레이저에 의해 먼저 녹음으로써 플라즈마의 발생이 증가하기 때문이다.

또한 각 센서들의 신호와 용접 결과를 비교하여 보면, UV2의 신호가 용접부의 결과를 가장 잘 나타내어 주는 것을 알 수 있다. 이를 추후 모니터링 시스템에 이용할 경우, 가장 중요한 품질 판정 신호로 사용될 수 있을 것이다.

Fig. 10과 11은 보조가스의 유량을 변화시킴에

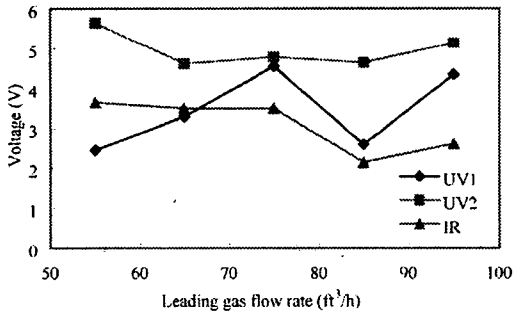

Fig. 10 Signal of sensors with gas flow rate(Galvanized steel, 6kW, 3m/min)

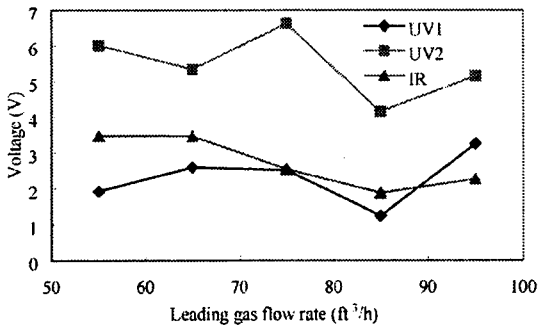

Fig. 11 Signal of sensors with gas flow rate (SPCEN, 6kW, 3m/min)

따른 신호를 표시한 것이다. 가스유량에 따라 명확한 패턴을 보이고 있지 못함을 알 수 있는데, 이는 모든 조건에서 보조가스를 사용하고 있기 때문이라고 생각되며, 추후 가스 변화에 따른 것을 다양하게 검증하여야 할 것이라고 사료된다.

5. 결론

포토 다이오드를 이용하여 CO_2 레이저 용접시 플라즈마와 스패터를 계측한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 포토 다이오드를 사용하여 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 스패터의 양을 검출할 수 있는 계측 시스템을 제작하였다.

2. 키홀내의 플라즈마와 스패터는 용접부에 들어가는 입열량이 증가함에 따라 증가하였고, 키홀이 열려지는 완전 용입시에는 발생량이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

3. 플라즈마 플룸은 용접속도가 감소하여 입열량이 증가함에도 불구하고 보조가스의 영향으로 계측되는 신호가 줄어듦을 알 수 있었다.

4. 레이저 출력에 대해서는 입열량에 비례하여 증가하나, 완전용입시에는 열려진 키홀의 크기에도 관계됨을 알 수 있었다.

5. 본 실험의 자료를 레이저 용접시 품질을 판정할 수 있는 모니터링 시스템의 기초 자료로 사용할 수 있을 것이다.

<후기>

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학) 지원과제(ME97-E-42)에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. D. Farson, K. Hillsley, J. Sames and R. Young, "Frequency-time Characteristics of Air-borne Signals from Laser Welds", Journal of Laser Applications, Vol.8, No.1, pp.33-42, 1996

2. W. Gatzweiler, D. Maischner, and E. Beyer, "On-line Diagnostics for Process-control in Welding with CO_2 Lasers", High Power CO_2 Laser System & Applications, SPIE 1020, pp.142-148, 1988

3. D. Maischner, A. Drenker, B. Seidel, P. Abels, and E. Beyer, "Process Control During Laser Bean Welding", Proceeding of ICALEO'91, pp.150-155, 1991

4. 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, pp. 113-122, 1991

5. K. Mori, H. Sakamoto, and I. Miyamoto, "Detection of Weld Defects in Tailored Blanks", 日本溶接學會 論文集, Vol.14, No. 4, pp. 689-693, 1996

6. I. Miyamoto, K. Kamimuki, H. Maruo, K. Mori, and M. Sakamoto, "In-Process Monitoring in Laser Welding of Automotive Parts," Proceeding of ICALEO'93, pp.413-424, 1993

7. I. Miyamoto, and K. Mori, "Development of In-process Monitoring System for Laser Welding", Proceeding of ICALEO'95, pp.759-767, 1995

8. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge, "An Investigation on CO_2 Laser-Induced Plasma", 日本溶接學會 論文集,Vol. 10, No. 2, pp. 239-245, 1992

9. K. H. Leong , "Low cost laser weld monitoring system", Proceeding of Automotive Laser Applications Workshop", Univ. Michigan Press, pp.26-35, 1997

10. E. Beyer, K. Behler, and G. Herziger, "Plasma Absorption Effects in Welding with CO_2 Lasers", High Power CO_2 Laser System & Applications ECO1, SPIE 1020, pp.84-95, 1988