

다중회귀분석을 이용한 CO₂레이저 용접 비드 예측

박현성* · 이세헌** · 엄기원**

Estimation of CO₂ Laser Weld Bead by Using Multiple Regression

Hyunsung Park*, Sehun Rhee** and Ki-Woan Um**

Key Words : Laser welding, Photo-diode, Plasma, Spatter, Keyhole, Multiple regression

Abstract

On the laser weld production line, a slight alteration of the welding condition changes the bead size and the strength of the weldment. The measurement system is produced by using three photo-diodes for detection of the plasma and spatter signal in CO₂ laser welding. The relationship between the sensor signals of plasma or spatter and the bead shape, and the mechanism of the plasma and spatter were analyzed for the bead size estimation. The penetration depth and the bead width were estimated using the multiple regression analysis.

1. 서 론

최근에 레이저를 이용하여 고속, 대량으로 용접을 하는 경우, 용접 품질을 확보하는 것이 중요하며, 레이저 용접 품질 검사 방법이 계속적으로 연구되고 있다. 특히 자동차용 테일러드 블랭크(tailored blank)와 같이 CO₂ 레이저를 사용하여 고속으로 용접을 하는 경우, 판재로 사용되는 박판의 상태, 레이저 출력, 보조가스의 유량, 용접속도등 용접변수들의 변화에 의해 용접비드의 형상과 크기가 변화할 수 있으며, 이것이 용접 결함으로 작용하게 된다. 또한 대량생산 체제로 돌입하게 되면, 약간의 용접변수 변화는 불연속적인 비드 형상을 발생시키게 되고, 그로 말미암아 용접부의 강도가 변하게 되지만 이를 생산공정상에서

육안으로 관측하기는 매우 어렵다. 따라서 레이저 용접을 하면서 발생하는 용접부의 비드 형상을 실시간으로 검출해 내어야만 계속되는 불연속 비드의 발생을 막을 수 있으며, 재료의 손실을 줄이고, 우수한 품질을 얻을 수 있다. 그러므로 비드의 형상을 실시간으로 검출해낼 수 있는 용접 비드 예측 시스템이 요구되고 있다.

레이저 용접 품질을 예측할 수 있는 신호를 추출하는 방법에는 음향방사(acoustic emission)를 이용한 방법¹⁾, 광신호(optical signal)를 이용한 방법, 화상처리(image process)를 이용한 방법 등이 있으며, 이중 가장 많이 연구되어지는 것이 음향방사와 광신호를 이용한 방법이다.

Chen등²⁾은 용접부에서 나오는 자외선 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접품질을 판단하였으며,

* 1998년 11월 12일 접수

* 학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

• 이세헌 : srhee@email.hanyang.ac.kr

레이저출력, 보조가스, 용접속도 등을 변화시켜 이에 따른 신호의 거동도 연구하였다. Beyer등^{3,4)}은 레이저 용접중 플라즈마 신호와 소리(sound) 신호를 계측하여 비교하였으며, 가스의 영향에 대해서도 살펴보았다. 또한 용접부 위와 아래에서 플라즈마 신호를 계측하여 완전용입과의 관계도 연구하였다.

또한 Miyamoto등⁵⁻⁷⁾은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토 다이오드(photodiode) 두개를 각도를 다르게 하여 플라즈마를 계측한 후 용접품질을 판단하는 연구를 수행하였다.

한편, 최근에는 Farson등⁸⁾이 광신호와 음향방사 신호를 계측, ARMA모델을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다.

그러나 레이저 용접의 경우, 현재까지 용접 비드의 형상을 예측하는 연구가 부족하여 용접품질을 모니터링 하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 자동차용 아연도금 강판의 용접시 포토다이오드를 사용하여 용접속도, 레이저 출력 등의 용접변수 변화에 따른 플라즈마와 스패터를 측정, 그 신호들을 체계적으로 분석하며, 이를 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 사용하여 용접 비드 형상을 정량적으로 예측하는 시스템을 구현하고자 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 용접 품질에 큰 역할을 하게 된다. 플라즈마와 스패터에서 발생하는 방사력은 열방사 온도계측에 의해 계측하게 되고, 이때 계측하게 되는 CO₂ 레이저 용접시의 발생 플라즈마의 파장범위는 190-400nm⁹⁾ 로부터 1600nm이상의 근적외선 영역에 이르기까지 넓게 분포하는 것으로 알려져 있다.

레이저 용접의 상태를 나타내 주는 플라즈마와 스패터의 거동은 자외선과 적외선 영역을 각각 선택, 그 신호를 받아들여 신호를 분석한 후, 플라즈마와 스패터의 상태를 알아내게 된다. 센서로 사용한 포토 다이오드는 들어오는 광의 강도에 따라 전류가 변하게 되며, 변화하는 전류를 전압신호로 변환, 증폭하여 광의 강도를 알아내게 된다. 한편, 포토 다이오드는 모든 빛에 대하여 동일하게 반응하는 것이 아니라, 특정 파장대의 광에 민감하게 반응하게 되므로 적절한 파장범위의 포토 다이오드를 선택하여 광의 강도를 측정하게 된다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용한 포토 다이오드는 자외선 영역과 적외선 영역의 두 가지 종류이다. 자외선 영역의 포토 다이오드는 CO₂ 레이저 용접시의 플라즈마 파장을 받아들이기 위하여, 파장감도범위가 260-400nm인 것을 선택하였으며, 적외선 영역의 포토 다이오드는 파장감도범위가 700-1700nm인 것을 사용하였다. 적외선 포토 다이오드의 경우 플라즈마의 적외선 파장대 신호와 스패터의 신호를 포함하게 된다. 센서의 전류 신호를 전압으로 변환, 증폭하기 위한 앰프는 자외선 영역의 포토 다이오드와 적외선 영역의 포토 다이오드 각각에 적절한 회로를 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

실험에 사용하는 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. UV센서의 경우, 각도에 따라 검출대상이 변화하므로, 낮은 각도의 센서(UV1)는 시편 표면위의 플라즈마의 광 강도를 검출하고, 높은 각도의 센서(UV2)는 키홀 내부 및 시편표면상의 플라즈마 광 강도를 함께 검출하게 된다. 본 실험에서 사용한 센서의 각도와 거리는 Table 2와 같다.

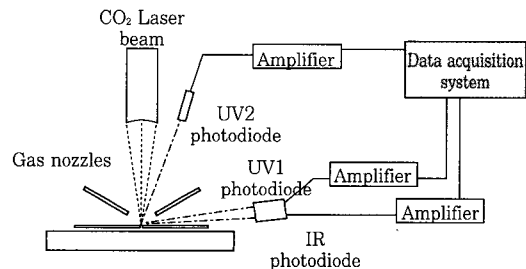


Fig. 1 Schematic diagram of the laser monitoring system

Table 2. Angle and distance of the sensors

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

측정된 신호를 PC로 받아들이기 위하여 데이터 획득 장치(data acquisition board)를 사용하여 1000 samples/sec로 받아 저장시킨다. 실험에 사용한 레이저는 비교적 고출력인 6kW급 CO₂ 레이저이다.

용접 비드의 형상을 알아내기 위하여 용접시편의 중앙 부위를 절단하여 부식시켜 50배 현미경으로 확대, 용입깊이(penetration depth)와 용접부 표면의 비드폭(bead width)을 측정하였다.

3.2 실험조건

용접 시편은 두께 1.5mm의 자동차용 아연도금강판을 사용하여 용접길이 약 500mm의 상판(bead on plate)용접을 수행하였으며, 시편의 화학적 조성은 Table 3과 같다.

Table 3. Chemical composition of galvanized steel

C (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	P (wt%)	S (wt%)	Fe (wt%)	Zn (g/m ²)
0.0032	0.002	0.065	0.009	0.008	bal.	45

용접변수는 용접속도(travel speed), 레이저 출력(laser power)을 주어, 용접 변수의 변화에 따른 신호를 획득하였으며, 각각의 조건에 대하여 5회씩 수행하였다. 그 외 보조가스는 헬륨(He)을 사용하였으며, 유량은 전방 노즐(leading nozzle) 85ft³/h, 후방 노즐(tail nozzle) 40ft³/h, 노즐각은 20°, 노즐과 용접부의 거리는 12 mm이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 플라즈마, 스패터 신호와 비드 크기

아연도금 강판을 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 전압신호가 나옴을 알 수 있으며, IR센서의 신호도 초기에 큰 신호가 나타남을 알 수 있었다. 이것은 초기 플라즈마의 발생이 정상 상태가 되지 못한 것과 레이저 헤드의 이송시 과도성에 기인한 것으로 생각된다. 따라서 용접 비드의 예측시 초기 신호는 데이터로 사용하지 않는 것이 바람직하다.

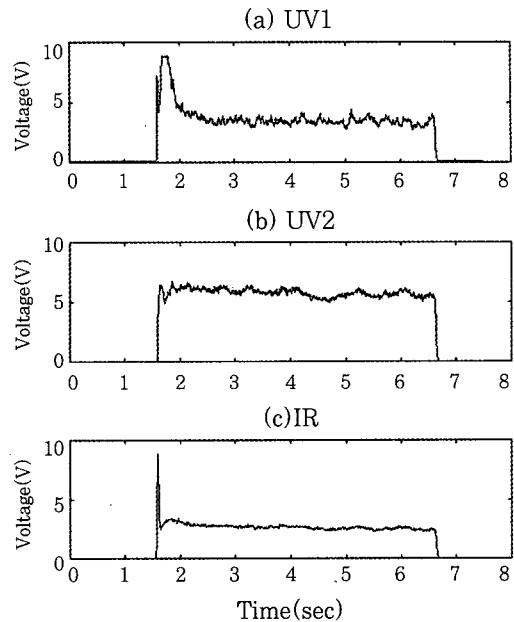


Fig. 2 Output signal of sensors (6kW, 6m/min)

위 조건에서 용접속도를 5m/min으로 낮추면, 신호는 Fig. 3과 같이 변화하게 된다. 이 신호에서 보는 바와 같이 용접조건이 바뀌면 입열량이 변화하게 되고, 이로 말미암아 플라즈마와 스패터 신호의 DC성분의 평균 뿐만 아니라 AC성분까지도 변화함을 알 수 있으며, 이 또한 용접비드의 형상을 결정짓는 하나의 독립 변수라고 할 수 있다. 여기서 AC성분은 DC성분의 평균으로부터 변화하는 부분을 의미한다.

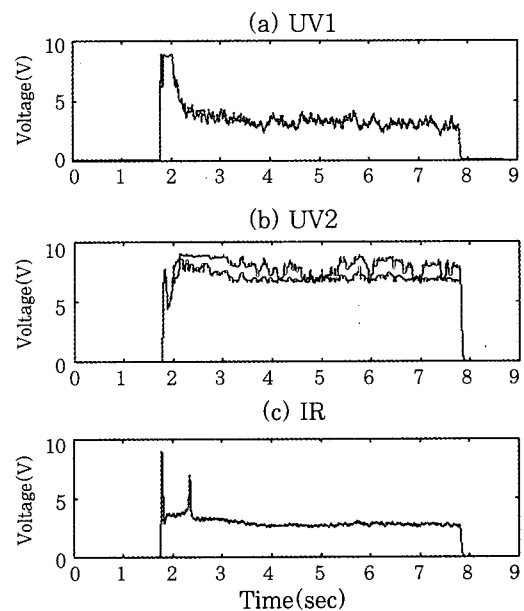


Fig. 3 Output signal of sensors (6kW, 5m/min)

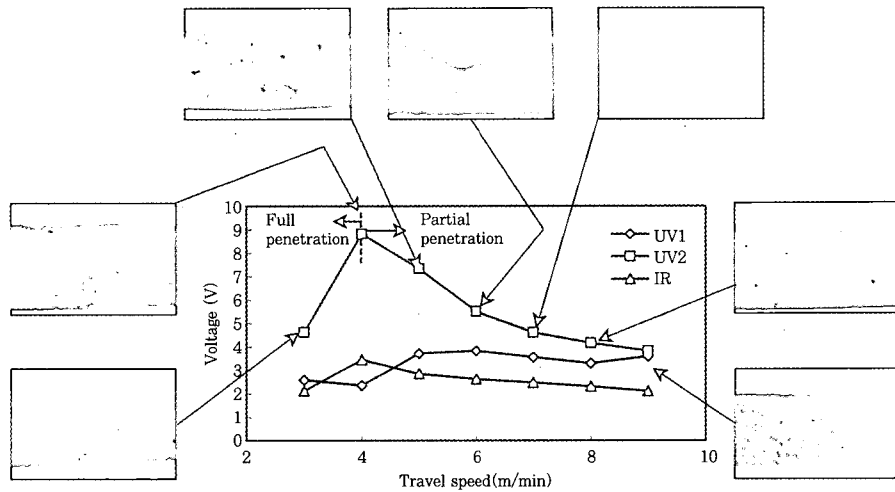


Fig. 4 Signal of sensors and bead shape with travel speed (6kW)

Fig. 4에는 용접속도를 변화 시켰을 때의 각 센서별 신호의 DC성분 평균 전압과 용접부 단면 사진을 나타내고 있다. 플라즈마 신호는 단순히 레이저 용접시 들어가는 입열량에 비례하여 증가하는 것이 아니라 UV2와 IR센서의 신호로부터 알 수 있듯이 용접속도 9m/min에서 4m/min까지는 증가하다가 3m/min이 되면 갑자기 감소하게 된다. 이는 4m/min까지는 입열량이 증가함에 따라 발생하는 플라즈마의 광강도가 증가하고, 3m/min에서는 키홀의 밑부분이 열리면서 완전 용입이 일어나 그 곳으로 플라즈마의 일부가 누출되면서 갑자기 계속되는 플라즈마의 광강도가 감소하기 때문이다. 이는 Fig. 4의 용접부 단면 사진과 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 용접속도가 줄어들수록 용입 깊이가 점점 커지게 되고, 3 m/min에서는 완전용입이 일어남을 확실히 알 수 있다. 한편 UV1의 신호는 용접속도가 감소하여 입열량이 증가함에도 불구하고 전체적으로 감소하는 패턴을 나타낸다. Fig. 5의 용입 깊이는 속도가 감소함에 따라 커짐을 알 수 있고, Fig. 6의 비드폭은 속도가 감소함에 따라 커지다가 완전용입시 약간 작아지는 비선형적인 형태로서, UV2나 IR의 신호패턴과 유사하다.

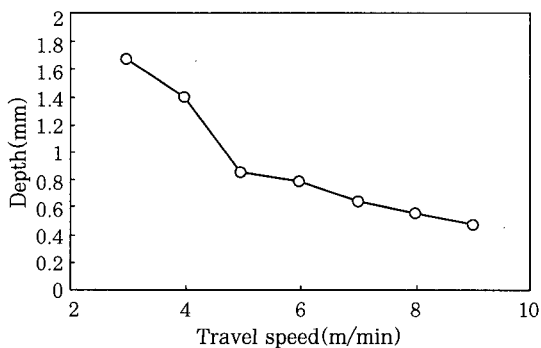


Fig. 5 Penetration depth with travel speed

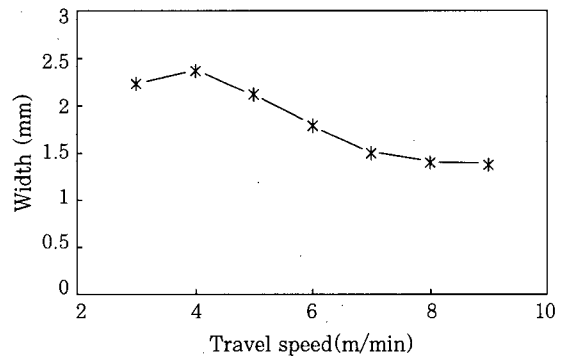


Fig. 6 Bead width with travel speed

Fig. 7에는 레이저의 출력에 따른 신호와 용접부 단면을 나타낸 것이다. 출력이 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 광강도가 증가되게 되고, 용접부의 크기도 커지게 된다. 그러나 완전용입이 일어나는 구간에서는 UV2의 신호가 5kW일 경우에 가장 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 5kW까지는 플라즈마의 광강도가 레이저의 입열량에 비례하나, 5kW이상에서는 비드 하부의 열려진 키홀이 너무 커짐으로 인하여 누출되는 플라즈마의 양이 많아지기 때문이라고 생각된다. Fig. 8과 Fig. 9의 출력변화에 따른 용입깊이와 비드폭의 변화를 보면 용입깊이는 출력변화에 따라 나타나는 UV2나 IR신호와 비슷한 비선형적인 형태를 보이고, 비드폭은 선형적인 변화를 나타낸다.

4.2 전 용접조건에의 회귀분석

본 연구에서는 UV1, UV2, IR신호와 용입깊이, 비

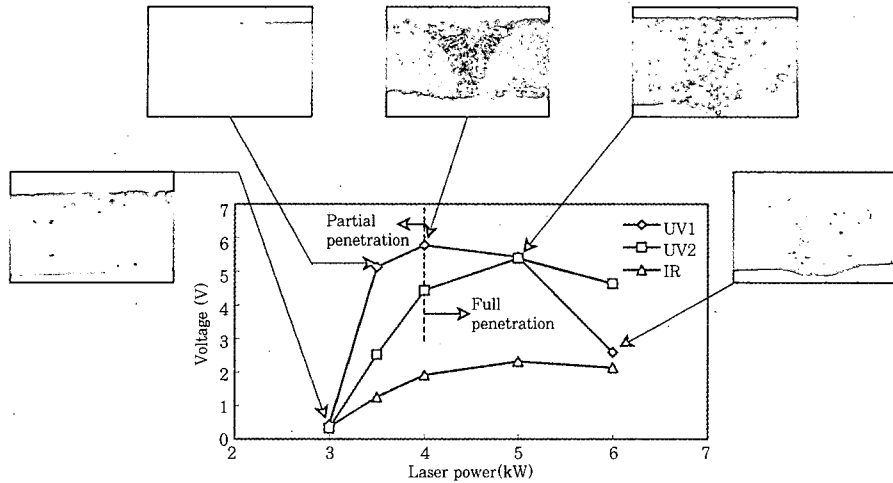


Fig. 7 Signal of sensors and bead shape with laser power (3m/min)

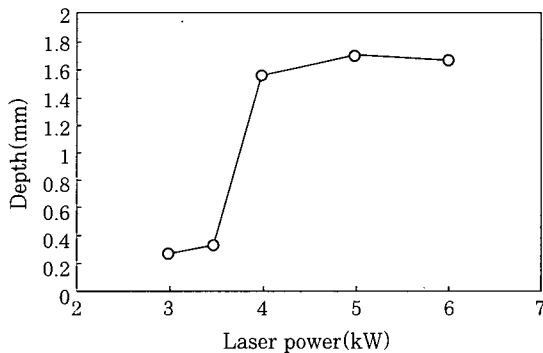


Fig. 8 Penetration depth with laser power

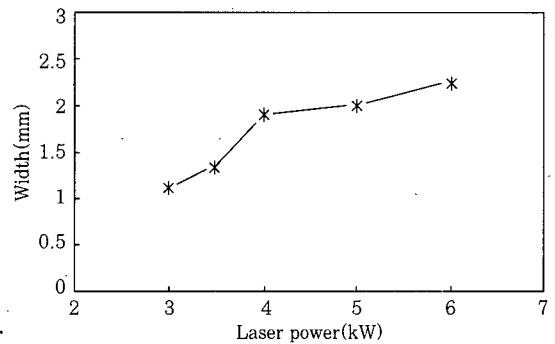


Fig. 9 Bead width with laser power

드폭과 관계를 검토하고, 이 데이터들을 이용하여 용입깊이와 비드폭을 예측하기 위해서 통계적인 방법인 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 사용하여 비드 예측 회귀 모델을 만들었다.

회귀분석에 사용하는 독립변수로는 신호의 DC성분 평균과 AC성분을 나타내는 신호의 표준편차를 사용한다. 비드의 크기를 용접선의 중앙에서 측정하였으므로, 전체신호의 평균을 사용하지 않고, 시편중앙을 기준으로 20mm에서 발생한 신호를 사용한다. 따라서

입력 독립변수는 각 신호당 평균과 표준편차, 즉 6개의 신호를 사용한다. 회귀분석 데이터의 수는 각 조건별로 4개씩을 사용하였고, 나머지 1개씩의 데이터로 생산단계에서의 회귀모델 적합성을 검증하였다. 본 회귀분석은 상용 통계 프로그램인 SPSS를 사용하였다.

앞 절에서 본 바와 같이 신호들과 비드의 크기 사이에는 선형 혹은 비선형의 복잡한 함수관계를 갖고 있다. 따라서 각 신호들과 용입깊이, 비드폭의 상관관계 계수(correlation coefficient)를 구한 신호들의 공상

Table 4. Correlations for signals and bead sizes(full and partial penetration)

	UV1	UV2	IR	UV1std	UV2std	IRstd	Depth	Width
UV1	1							
UV2	0.208	1						
IR	0.274	0.899	1					
UV1std	0.624	0.155	0.109	1				
UV2std	0.192	0.516	0.364	0.610	1			
Irstd	0.070	0.491	0.379	0.247	0.402	1		
Depth	0.371	0.572	0.255	0.230	0.357	0.313	1	
Width	0.192	0.797	0.508	0.217	0.571	0.420	0.834	1

관관계로 이 함수관계를 알아보면, 이는 Table 4와 같다. 용입깊이와 비드폭 모두 각각의 신호에 대해서 선형적인 상관성이 아주 높은 신호는 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 상관관계 계수와 신호의 분포를 고려할 때, 대체적으로 용입깊이와 비드폭 모두 신호에 대하여 비선형적인 형태를 나타냄을 알 수 있다. 또한 UV2평균 신호와 IR평균신호는 0.899의 상관계수를 보이는데, 이는 Fig. 4에서와 같이 용접조건 변화에 따라 상당히 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. 따라서 전체 신호에 대한 회귀분석 모델은 다음의 비선형 모델을 사용하였다.

$$P \text{ or } W = a \cdot U_1^b \cdot U_2^c \cdot I^d \cdot U_{1s}^e \cdot U_{2s}^f \cdot I_s^g \quad (1)$$

여기서, P는 용입깊이, U₁은 UV1신호의 평균, U₂는 UV2의 평균, I는 IR의 평균, U_{1s}는 UV1의 표준편차, U_{2s}는 UV2의 표준편차, I_s는 IR의 표준편차이며, a부터 g까지는 각 독립변수의 계수들이다.

회귀식의 신뢰성을 보장하기 위하여 회귀모델 계수의 유의수준(significance level)을 0.05로 하여 평가하였을 때, 각 계수의 t통계량의 유의확률(p-value)이 0.05보다 높은 변수를 제외하고, 다시 수정하여 구하였다. 이때 구한 용입깊이(P)와 비드폭(W)의 모델은 다음의 식 (2), (3)과 같다. 이 때 독립변수 제거는 단계적 변수 선택법(stepwise method)을 사용하였다.

$$P = 0.363 \cdot U_2^{1.076} \cdot I^{-1.153} \quad (2)$$

$$W = 0.549 \cdot U_1^{0.159} \cdot U_2^{0.396} \cdot I^{-0.292} \cdot U_{2s}^{0.11} \quad (3)$$

이 비선형 회귀모델을 사용, 분석에 사용했던 데이터를 적용하여 예측하였을 경우, 용입 깊이와 비드 폭의 측정치와 예측치를 비교하여 그린 것이 Fig. 10과 Fig. 11이다. 용입깊이인 경우, 모델의 수정된 결정계수가 0.493, 표준추정오차가 0.4597를 나타낸다. 결정계수로 보아 정확한 예측이 약간 힘든 모델임을 알 수 있다. 이를 좀더 구체적으로 규명하기 위해 오차율을 구해보면, 회귀분석에 사용했던 데이터를 그대로 적용한 분석 평균 오차율은 36.8%, 새로운 데이터를 적용한 생산 평균 오차율은 38.6%를 나타내고 있다. 따라서 전 용접조건에 대한 용입깊이의 회귀모델 예측은 정확성이 약간 결여되어 있음을 알 수 있었다. 비드폭인 경우, 수정된 결정계수 0.715, 표준추정오차 0.1316, 분석 평균 오차율 9.8%, 생산 평균 오차율 10.3% 등을 보이게 되어 용입깊이 보다는 좀더 정확한 예측을 할 수 있음을 알 수 있다.

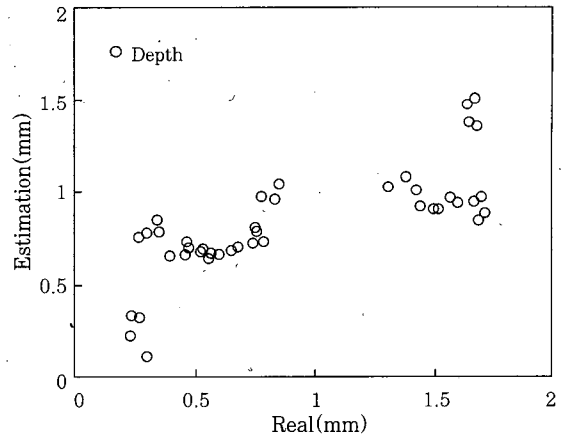


Fig. 10 Estimated penetration depth by regression method (total data)

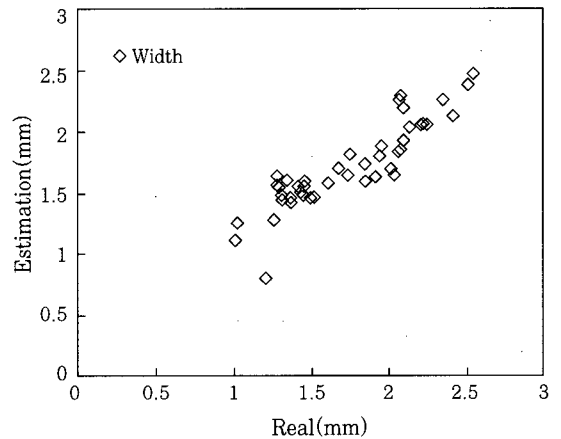


Fig. 11 Estimated bead width by regression method (total data)

이와 같이 전용접조건에서 용입깊이 예측의 오차가 상당히 크게 나타나는 것은 앞에서 본 바와 같이 레이저 용접시에 용접조건이 변화함에 따라 부분용입(partial penetration)과 완전용입(full penetration)으로 나뉘게 되고, 각각의 함수관계가 다르므로 인해 비선형성이 강하게 되어 회귀분석으로 적합한 모델을 찾기가 어려움을 알 수 있는 것이다.

한편, 모델을 각 독립변수에 대하여 2차식과 교호작용을 하는 독립변수간의 곱의 항을 추가한 2차 다항식의 형태로 모델링을 하면 용입깊이 25%, 비드폭 5% 내외의 오차를 갖는, 좀더 정확한 회귀 모델을 구할 수 있으나, 이는 곱의 형태로 나타난 변수들간의 다중공선성(collinearity)으로 인하여 회귀계수의 정확성을 보장할 수 없음을 알 수 있었다.

4.3 부분 용입 신호의 회귀분석

Table 5에는 부분 용입시의 각 신호들과 용입깊이,

Table 5. Correlations for signals and bead sizes(partial penetration)

	UV1	UV2	IR	UV1std	UV2std	IRstd	Depth	Width
UV1	1							
UV2	0.237	1						
IR	0.363	0.938	1					
UV1std	0.549	0.125	0.056	1				
UV2std	0.154	0.543	0.382	0.653	1			
Irstd	-0.009	0.560	0.411	0.280	0.453	1		
Depth	-0.024	0.919	0.800	0.129	0.595	0.669	1	
Width	0.080	0.921	0.771	0.210	0.678	0.597	0.928	1

비드폭의 공상관관계를 나타내었다. 전용접조건과는 달리 부분용입시에는 UV2평균, IR평균이 용입깊이, 비드폭과 높은 상관계수를 나타내어 선형성이 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 부분용입시에는 이 두신호를 사용한 선형모델과 비선형 모델을 구하여 보았다. 이때 가장 좋은 결과를 갖는 회귀모델은 다음과 같다.

$$P=1.132 \cdot U_1^{-0.794} \cdot I^{1.063} \cdot U_{IS}^{0.322} \quad (4)$$

$$W=1.096 + 0.269U_2 - 0.351I \quad (3)$$

이때 각 계수의 유의확률은 0.01이내로 각 계수들의 신뢰성은 검증되었다.

이 회귀모델을 사용하여 모델의 적합성을 검증하여 보면, 용입깊이의 경우, 수정된 결정계수는 0.929, 표준추정오차 0.1373, 분석 평균 오차율10.3%, 그리고 생산 평균 오차율은 8.0% 등을 나타낸다. 비드폭은 수정된 결정계수가 0.914, 표준추정오차 0.1235, 분석 평균 오차율5.8%, 그리고 생산 평균 오차율은 5.0% 등을 보인다. 한편, 이 용입 깊이와 비드 폭의 실측치와 예측치를 비교하여 보면 각각 Fig. 12, Fig. 13과 같다. 전체용접조건외의 결과보다 상당히 정확함

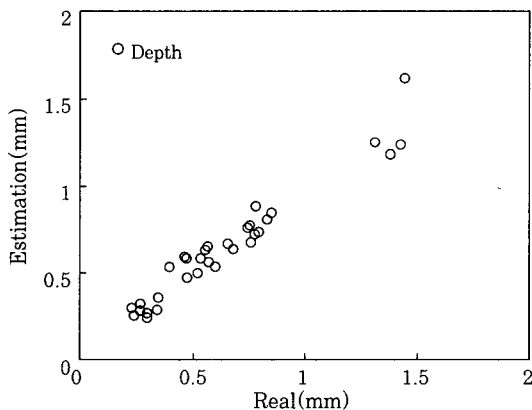


Fig. 12 Estimated penetration depth by regression method (partial penetration)

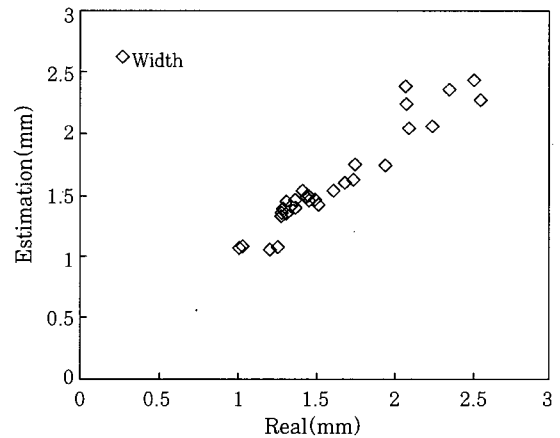


Fig. 13 Estimated bead width regression method(partial penetration)

을 알 수 있다. 이것은 전체조건을 함께 모델링했을 때와는 달리 부분용입시 어느 정도 선형성이 보장되어 오차가 약간 줄어들었음을 알 수 있다.

4.4 완전용입 신호의 회귀분석

Table 6에는 완전용입시 각 신호들과 용입깊이, 비드폭의 공상관관계를 나타내었으며, 용입깊이와 비드폭 모두 신호에 대하여 상당히 비선형적인 형태를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 완전용입 신호에 대하여 유의확률이 높은 변수를 제외하고 구한 비선형 모델은 다음과 같다.

$$P=0.787 \cdot U_2^{0.509} \cdot I^{-0.129} \quad (6)$$

$$W=0.932 \cdot U_1^{-0.145} \quad (7)$$

이 비선형 회귀모델을 사용하여 모델의 적합성을 검증하여 보면, 용입깊이에 대해서는 수정된 결정계수가 0.773, 표준추정오차 0.0213, 분석 평균 오차율 1.5%, 그리고 생산 평균 오차율이 4.4% 등이고, 비드 폭인 경우에는 수정된 결정계수가 0.526, 표준추

Table 6. Correlations for signals and bead sizes(full penetration)

	UV1	UV2	IR	UV1std	UV2std	IRstd	Depth	Width
UV1	1							
UV2	0.438	1						
IR	0.886	0.737	1					
UV1std	0.851	0.783	0.928	1				
UV2std	0.367	0.112	0.408	0.383	1			
Irstd	0.336	-0.219	0.245	0.124	0.101	1		
Depth	-0.134	0.718	0.174	0.314	0.050	-0.546	1	
Width	-0.692	-0.094	-0.588	-0.380	-0.121	-0.517	0.485	1

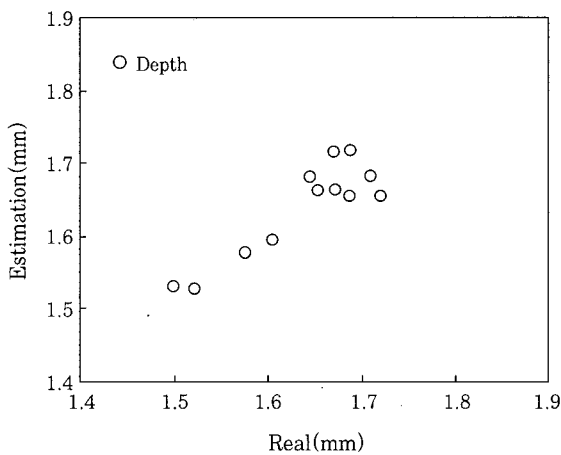


Fig. 14 Estimated penetration depth by regression method (full penetration)

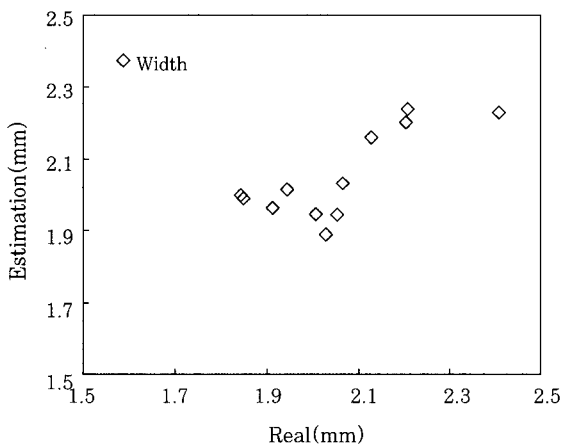


Fig. 15 Estimated bead width by regression method (full penetration)

정오차 0.0541, 분석 평균 오차율4.2%, 그리고 생산 평균 오차율은 4.8% 를 나타낸다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 용입 깊이와 비드 폭의 실측치와 예측치를 비교한 것으로 부분 용입보다는 선형성이 좀 떨어지는 것을 볼 수 있다.

4.5 회귀분석 모델의 고찰

레이저 용접의 비드 형상을 예측하기 위하여 다중회귀분석을 사용하였을 때 모델의 결과와 오차를 Table 7에 나타내었다. 전용접조건의 경우 부분용입과 완전용입의 공존으로 인한 비선형성으로 인하여 용입깊이의 경우 35%이상의 큰 오차를 갖게 되었으며, 비드폭의 경우에는 10%내외의 오차를 보이게 된다. 실제 비드 형상 예측 시스템으로 구현하기 위해서는 약 5%내외의 오차를 가져야만 타당성이 있는 것으로 간주하므로, 모든 조건에서 동시에 사용할 수 있는 회귀분석 모델을 구현하는 것은 상당히 어렵다. 부분용입과 완전용입만을 구분하여 사용할 경우에는 대체적으로 부분용입시 용입깊이를 제외하고는 모두 5%내외의 오차를 가지므로 어느 정도 타당성이 있다고 생각되어진다. 또한 부분용입시의 용입깊이도 수정된 결정계수가 0.929이며, Fig.12의 선형적인 결과로 보아 좀더 정확한 비드측정이 이루어지고, 더 많은 분석데이터를 사용한다면, 좀더 정확한 회귀 모델을 구현할 수 있을 것이다. 부분 용입과 완전 용입에서 실측치와 예측치의 비교 그래프와 오차율의 정확성이 다른 것은 부분용입의 경우에는 크기가 넓게 분포되어 선형적인 패턴이 명확하게 보이는 것이고, 완전 용입의 경우에는 크기가 작은 범위 내에 분포되어 선형적인 그래프를 볼 수 없는 것이다.

한편, 레이저 용접 모니터링 시스템에서 퍼지기법등과 같은 판단 알고리즘을 이용하여 부분용입과 완전용입을 구분한 후¹⁰⁾ 이 모델에 적용시킬 경우에는 비교적 정확한 용입형상 예측시스템으로 사용할 수 있을 것이다. 또한 이 형상 예측 모델은 하나의 방정식만으로 나타낼 수 있으므로 다른 프로그램에의 적용과 판단시간의 단축에도 상당한 장점을 갖게 된다. 따라서 용입형상 예측시스템을 레이저 결합 검출 시스템과 결

Table 7. Model summary and estimation errors

		Total regression	Partial penetration regression	Full penetration regression
Penetration depth	Adjusted R ²	0.493	0.929	0.773
	Standard error of the estimate	0.4597	0.1373	0.0213
	Error for training(%)	36.8	10.3	1.5
	Error for production(%)	38.6	8.0	4.4
Bead width	Adjusted R ²	0.715	0.914	0.526
	Standard error of the estimate	0.1316	0.1235	0.0541
	Error for training(%)	9.8	5.8	4.2
	Error for production(%)	10.3	5.0	4.8

합하여 생산현장에 함께 사용한다면, 완벽한 레이저 용접 모니터링 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

5. 결 론

CO₂ 레이저 용접시 플라즈마와 스패터를 계측하여 그 신호와 용입깊이, 비드폭을 분석하여 모델링한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 플라즈마, 스패터 신호와 용입깊이, 비드폭 사이에는 부분용입과 완전용입의 발생으로 인하여 비선형적인 관계를 가짐을 알 수 있었다.
2. 다중회귀분석을 사용하여 전체신호, 부분용입, 완전용입에 대한 회귀 모델을 만들 수 있었다.
3. 신호의 비선형성으로 말미암아 부분용입과 완전용입에서만 타당한 회귀 모델을 구현할 수 있었다.
4. 본 시스템을 결함검출 장치와 결합하여 생산현장에 활용하면 좀더 정확한 온라인 모니터링 시스템을 구축할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1997년 한양대학교 교내연구비에 의하여 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

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, (1996), pp.33-42

2. 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), pp. 113-122
3. 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, (1988), pp.142-148
4. D. Maischner, A. Drenker, B. Seidel, P. Abels, and E. Beyer : Process Control During Laser Beam Welding, Proceeding of ICALEO' 91, (1991), pp.150-155
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, (1996), pp. 689-693
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, (1993), pp.413-424

7. I. Miyamoto, and K. Mori : Development of In-process Monitoring System for Laser Welding, Proceeding of ICALEO' 95, (1995), pp.759-767
8. D. Farson, A. Ali, and Y. Sang : Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration, Welding Journal, Vol. 77, No. 4, (1998), pp.142s-148s
9. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge : An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasma, 日本溶接學會 論文集, Vol. 10, No. 2, (1992), pp. 239-245
10. 박현성, 이세현, 정경훈, 박인수 : 고풍력 CO₂레이저 용접시 포토다이오드를 이용한 플라즈마와 스펙터 모니터링, 한국레이저가공학회지, Vol. 2, No. 1, (1999), pp. 30-37