

## CO<sub>2</sub>레이저 용접 품질 모니터링 시스템

박현성 · 이세헌

### Weld Quality Monitoring System in CO<sub>2</sub> Laser Welding

Hyunsung Park and Sehun Rhee

#### 1. 서 론

현재 자동차 업계에서 적용하고 있는 테일러드 블랭크(tailored blanks) 용접에는 메시 심(mash seam) 용접과 레이저를 이용한 용접이 행하여지고 있으나, 현재는 레이저를 이용한 용접이 가장 활발히 연구되고 있으며, 이러한 레이저 용접과 더불어 레이저 용접 품질 검사방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 독일, 일본등 선진국에서는 이미 레이저 용접시 품질을 검사할 수 있는 모니터링 시스템을 개발, 상용화하여 적용하고 있으나, 현재 국내에서는 이와 같은 시스템의 개발이 부족한 것이 현실이다.

레이저를 이용하여 용접을 하는 경우, 용접 품질을 확보하는 것이 중요하며, 특히 자동차용 테일러드 블랭크(tailored blank)와 같이 CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 고속, 대량으로 용접을 하는 경우, 판재로 사용되는 박판의 상태, 레이저 출력, 보조가스의 유량, 용접속도 등 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 방법<sup>1)</sup>, 광신호(optical signal)를 이용한 방법, 화상처

리(image process)를 이용한 방법 등이 있으며, 이중 가장 많이 연구되어지는 것이 음향방사와 광신호를 이용한 방법이다.

Chen등<sup>2)</sup>은 용접부에서 나오는 자외선 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접품질을 판단하였으며, 레이저출력, 보조가스, 용접속도 등을 변화시켜 이에 따른 신호의 거동도 연구하였다. Beyer등<sup>3,4)</sup>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 Miyamoto등<sup>5-7)</sup>은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토 다이오드(photodiode) 두개를 각도를 다르게 하여 플라즈마를 계측한 후 용접품질을 판단하는 연구를 수행하였다. 최근에는 Farson등<sup>8)</sup>이 광신호와 음향방사 신호를 계측, ARMA모형을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였으며, Asibu<sup>9)</sup> 등은 이와 같은 다양한 레이저 용접 모니터링 시스템에 관하여 정리, 발표하였다.

따라서 본 해설에서는 자동차용 강판의 용접시 포토 다이오드를 사용하여 용접속도, 레이저 출력 등의 용접변수 변화에 따른 플라즈마와 스패터를 측정, 그 신호들을 체계적으로 분석하며<sup>10)</sup>, 이를 다중회귀분석(multiple regression analysis)과 신경회로망(neural network)을 사용하여 용접 비드 형상을 정량적으로 예측하는 시스템<sup>11,12)</sup>을 보이하고자 한다. 또한 이 신호들을 이용하여 결함을 검출해내는 알고리즘과 그 시스템에 대하여 설명하고자 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 CO<sub>2</sub> 레이저 용접시의 발생 플라즈마의 파장 범위는 190-400nm<sup>13)</sup>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. 실험장치

플라즈마와 스패터의 광신호를 받아들이기 위하여 사용되는 포토 다이오드는 자외선 영역과 적외선 영역의 두 가지 종류이다. 자외선 영역의 포토 다이오드는 CO<sub>2</sub> 레이저 용접시의 플라즈마 파장을 받아들이기 위한 것이며, 적외선 영역의 포토 다이오드는 적외선 영역의 파장을 가지는 스패터를 주로 계측하게 된다.

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.

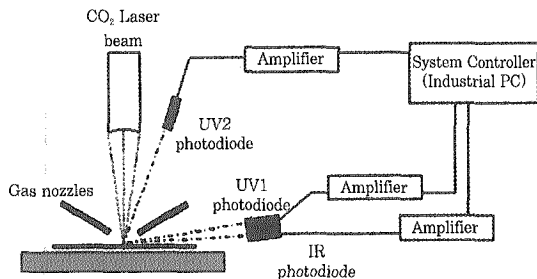


Fig. 1 Schematic diagram of the monitoring system

### 4. 플라즈마와 스패터 신호의 거동

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 정상상태가 되지 못한 것과 레이저 헤드의 이송시 과도성이 기인한 것으로 생각된다. 따라서 용접 비드의 예측시 초기 신호는 데이터로 사용하지 않는 것이 바람직하다.

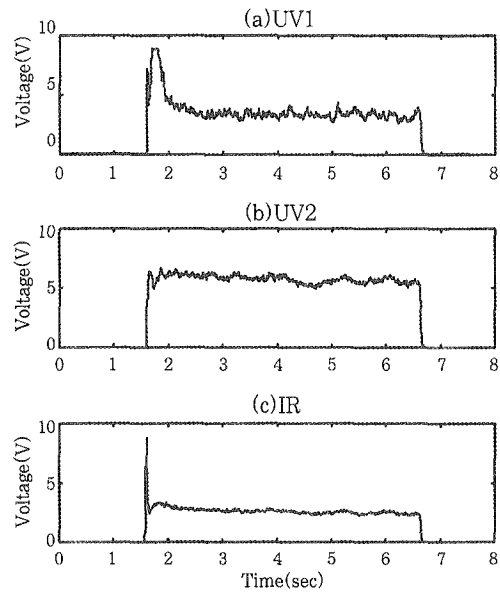


Fig. 2 Output signal of sensors (6kW, 6m/min)

위 조건에서 용접속도를 5m/min으로 낮추면, 플라즈마와 스패터 신호의 DC성분의 평균 뿐만 아니라 AC 성분까지도 변화하게 되며, 이 또한 용접비드의 형상을 결정짓는 하나의 독립변수라고 할 수 있다. 여기서 AC성분은 DC성분의 평균으로부터 변화하는 부분을 의미한다.

Fig. 3에는 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 밀부분이 열리면서 완전 용입이 일어나 그 곳으로 플라즈마의 일부가 누출되면서 갑자기 계측되는 플라즈마의 광강도가 감소하기 때문이다. 이는 용접부 단면 사진에서 보는 바와 같이 용접속도가 줄어들어 따라 용입 깊이가 점점 커

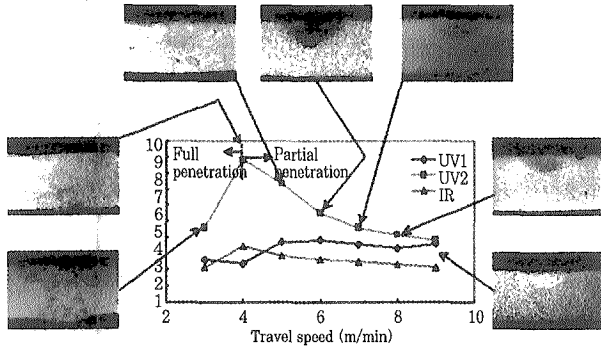


Fig. 3 Signal sensors and bead shape with travel speed(6kW)

지게 되고, 3m/min에서는 완전용입이 일어남을 확실히 알 수 있다. 용입 깊이는 속도가 감소함에 따라 커지게 되고, 비드폭은 속도가 감소함에 따라 커지다가 완전용입시 약간 작아지는 비선형적인 형태로서, UV2나 IR의 신호패턴과 유사하다.

Fig. 4에는 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 플라즈마 스패터의 광각도가 증가되게 되고, 용접부의 크기도 커지게 된다. 그러나 완전용입이 일어나는 구간에서는 UV2의 신호가 5kW일 경우에 가장 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 5kW까지는 플라즈마의 광각도가 레이저의 입열양에 비례하나, 5kW 이상에서는 비드 하부의 열려진 키홀이 너무 커짐으로 인하여 누출되는 플라즈마의 양이 많아지기 때문이라고 생각된다.

### 5. 용접 비드 예측

#### 5.1 다중회귀분석과 신경회로망의 적용

UV1, UV2, IR신호와 용입깊이, 비드폭과 관계를

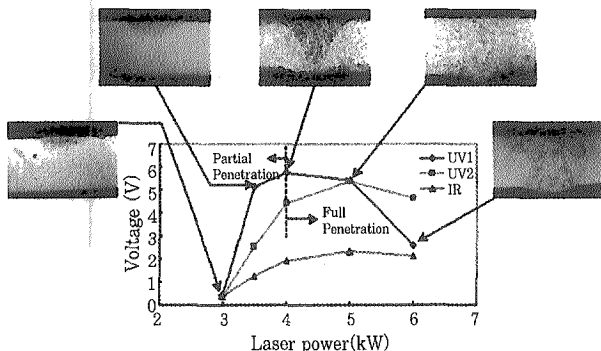


Fig. 4 Signal of sensors and bead shape with laser power(3m/min)

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 적용하게 된다. 따라서 입력 독립변수는 각 신호당 평균과 표준편차, 즉 6개의 신호를 사용한다.

앞 절에서 본 바와 같이 신호들과 비드의 크기 사이에는 선형 혹은 비선형의 복잡한 함수관계를 갖고 있다. 따라서 분석시 부분용입만을 가지고 예측한 경우, 완전용입만을 고려한 경우, 그리고 부분용입과 완전용입을 함께 적용하는 경우, 이렇게 세가지로 분류하여 비드를 예측한다. 이와 같이 비드를 예측해보면 식 (1)과 같은 비선형형태의 모델이나 혹은 선형 모델이 구해지게 되고, 이 모델의 정확성과 예측정도를 분석하게 된다.

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

여기서, P는 용입깊이, W는 비드폭, U<sub>1</sub>은 UV1신호의 평균, U<sub>2</sub>는 UV2의 평균, I는 IR의 평균, U<sub>1s</sub>는 UV1의 표준편차, U<sub>2s</sub>는 UV2의 표준편차, I<sub>s</sub>는 IR의 표준편차이며, a부터 g까지는 각 독립변수의 계수들이다.

한편, 플라즈마와 스패터 신호는 용접부가 완전용입과 부분용입으로 나뉘므로 인하여 신호가 변하게 되고, 그에 따른 용입깊이와 비드폭도 변하게 된다. 이로 말미암아 신호들과 용입깊이, 비드폭 사이에는 복잡한 비선형 함수관계를 갖게 되고, 이들 사이의 함수관계를 정확하게 사상(mapping)할 수 있는 기법이 요구된다. 따라서 최근에 예측 알고리즘으로 많이 사용되고 있는 인공신경회로망중에서 오류 역전파 알고리즘(error backpropagation algorithm)을 사용하여 용입깊이와 비드폭을 구하였다.

플라즈마와 스패터 신호 6개를 입력패턴(input pattern)으로 하고, 측정된 용입깊이와 비드폭 2개를 출력패턴(output pattern)으로 하여 신경회로망을 학습시킨다.

#### 5.2 예측 결과 및 고찰

레이저 용접의 비드 형상을 예측하기 위하여 다중회귀분석과 신경회로망을 사용하였을 때 모델의 결과와

Table 1 Model summary and estimated errors

	Total regression	Partial penetration regression	Full penetration regression	Neural network	
Penetration depth	Adjusted R <sup>2</sup>	0.493	0.929	0.773	
	Standard error of the estimate	0.4597	0.1373	0.0213	
	Error on training(%)	36.8	10.3	1.5	5.2
	Error on production(%)	38.6	8.0	4.4	4.2
Bead width	Adjusted R <sup>2</sup>	0.715	0.914	0.526	
	Standard error of the estimate	0.1316	0.1235	0.0541	
	Error on training(%)	9.8	5.8	4.2	3.5
	Error on production(%)	10.3	5.0	4.8	5.2

오차를 Table 1에 나타내었다. 다중회귀분석 전용접 조건의 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 0.929를 나타냄으로 미루어 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 부분 용입의 경우에는 크기가 넓게 분포되어 선형적인 패턴이 명확하게 보이는 것이고, 완전 용입의 경우에는 크기가 작은 범위 내에 분포되어 선형적인 그래프를 볼 수 없는 것이다.

따라서 퍼지기법등과 같은 판단 알고리즘을 이용하여 부분용입과 완전용입을 구분한 후 이 모델에 적용시킬 경우에는 비교적 정확한 용입형상 예측시스템으로 사용할 수 있을 것이다. 이 비드 예측 모델은 하나의 방정식 만으로 나타낼 수 있으므로, 다른 프로그램에의 적용과 판단시간의 단축에도 상당한 장점을 갖게된다.

한편, 비드 형상 예측 시스템이 부분용입과 완전용입의 정도까지도 구분해 내야하는 것까지 요구된다면, 이 모델의 사용이 곤란함을 알 수 있다. Fig. 5와 Table 1에서 보는 바와 같이 신경회로망을 이용한 비드 형상 예측은 학습 데이터 뿐 만 아니라 생산단계의 새로운 데이터도 모두 5 % 내외의 오차를 갖게 된다. 이 예측 오차는 용입깊이와 비드폭을 측정할 때 측정 오차로부터 기인한 것으로 생각된다. 이는 레이저 용접의 특성상 비드의 폭이 좁고, 크기가 매우 작아, 측정상의 오차가 발생한 때문이라 생각된다. 회귀분석 모델 예측 결과와 신경회로망 예측 결과를 비교해보면, 신경회로망의 성능이 월등히 뛰어남을 알 수 있다. 이와 같은 신경회로망의 5 % 내외 오차는 비드 형상 예측의 타당성 범위 내에 존재하게 되므로, 정확한 레이저 비드 예측시스템으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

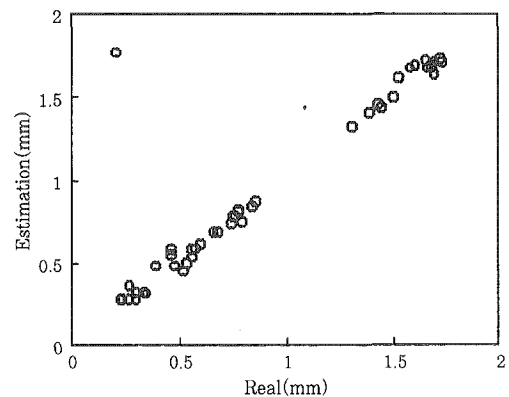


Fig. 5 Real vs estimated depth by neural network

### 6. 용접 품질 모니터링

플라즈마와 스패터의 광강도 신호는 레이저 출력, 용접속도, 시편의 상태등에 따라 신호가 변하게 된다. 맞대기(butt) 레이저 용접인 경우에 레이저 출력이 감소함에 따라서 UV1, UV2, IR센서의 신호, 모두가 감소하는 패턴을 나타낸다. 따라서 입열량에 따라 신호가 변화와 초점이탈에 따른 신호변화에 착안하여, 기준신호에 대비한 신호의 크기를 평가하여 용접 품질을 판단하게 된다.

모니터링 시스템을 통해 판단하고자 하는 용접품질의 종류를 양호한 용접이라 할 수 있는 적정 입열(optimal heat input)과 결함으로 분류할 수 있는 입열부족(low heat input), 그리고 초점 이탈(focus off)등으로 나누었다. 또한 양호한 용접이 이루어진 시편의 신호를 기준신호로 정한다. 이들 각각의 용접 품질에 대비한 기준 신호와의 차이에 대한 상호 관련성으로 결함을 분류, 정리하여 퍼지 패턴인식(fuzzy multi-feature pattern recognition)에 적용하게 된다.

Fig. 6은 적정한 조건에서 양호한 품질을 얻은 용접의 신호를 판정한 것이다. UV1, UV2, IR의 신호 모두 위,아래의 호린 선들이 허용 오차범위를 나타내는 선들이고, 가운데에 있는 짙은 색의 선이 현재 판단 대상인 신호이다. 그림에서 보는 바와 같이 판단 대상 신호가 모두 허용 오차 범위 내에서 존재하는 것을 볼 수 있다. 따라서 거의 허용 한도내에 신호가 들어옴으로 인하여, 가장 큰 속도를 나타낸 것이 적정입열이므로 결과적으로 좋은 품질의 용접이 이루어졌음을 알 수 있다.

이와 같이 아연도금 강판의 경우 퍼지 패턴 인식 알고리즘을 사용하여 레이저 출력이 변화하여 이면비드가 제대로 생성되지 못하는 경우와 초점이 벗어난 경우, 간극(gap)이 과다할 경우등의 결함의 발생여부를 판정할 수 있다. 본 프로그램은 아연도금 강판의 이중두

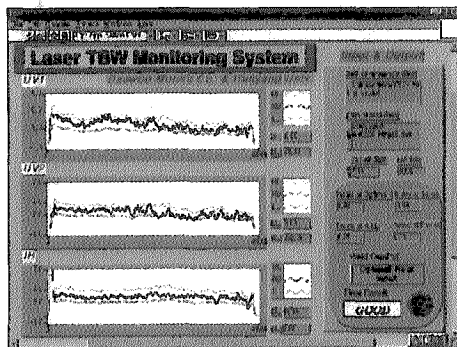


Fig. 6 Example of defect monitoring (optimal heat input)

께 용접을 대상으로 하였으나, 같은 알고리즘을 적용하여 기준신호만 바꾸게 된다면, 여러 가지 강종이나 두께의 용접에 적용할 수 있을 것이다.

### 7. 결 론

CO<sub>2</sub> 레이저 용접시 용접품질을 검사하기 위한 플라즈마와 스패터 거동, 용접비드 예측, 그리고 결함을 판별할 수 있는 모니터링 시스템에 관하여 간략히 소개하였다. 이는 고속, 대량생산을 하는 레이저 용접분야에는 필수적이라 할 수 있으며, 이를 위해서 다양한 시스템들이 개발되고 있는 중이다. 또한 플라즈마를 이용한 모니터링 시스템은 용접부의 결함을 검출한 후, 이것을 데이터베이스화 하고, 분석하여 장기간 사용에 따른 품질 변화를 알아내며, 용접 공정변수의 이상 원인을 감지하여 용접결함발생을 예방하는 차세대 레이저 용접 모니터링 기술로 발전해 나갈 것이다. 또한 최종적으로는 실시간적으로 레이저 용접품질을 검사하고, 제어하는 기술로 개발되어야 할 것이다.

### 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 CO<sub>2</sub> Lasers, High Power CO<sub>2</sub> 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. A. Sun, E. Kannatey-Asibu, and M. Gartner : Sensor Systems for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality, *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 4, (1999), pp. 153-168
10. H. Park, and S. Rhee : Analysis of Mechanism of Plasma and Spatter in CO<sub>2</sub> Laser Welding of Galvanized Steel, *Optics & Laser Technology*, Vol. 31, No.2, (1999), pp.119-126
11. 박현성, 이세헌, 엄기원 : 다중회귀분석을 이용한 CO<sub>2</sub> 레이저 용접 비드 예측, *대한용접학회지*, 17권, 3호, (1999), pp.26-35
12. H. Park, and S. Rhee : Estimation of Weld Bead Size in CO<sub>2</sub> Laser Welding by using Multiple Regression and Neural Network, *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 3, (1999), pp.143-150
13. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge : An Investigation on CO<sub>2</sub> Laser-Induced Plasma, *日本溶接學會 論文集*, Vol. 10, No. 2, (1992), pp. 239-245



- 박현성(朴賢星)
- 1969년생
- 한양대학교 기계공학부
- 레이저용접, 용접품질 모니터링 및 제어
- e-mail : welder@hanmail.com



- 이세헌(朴世憲)
- 1955년생
- 한양대학교 기계공학부
- 용접자동화 및 모니터링, 레이저 가공
- e-mail : srhee@email.hanyang.ac.kr