CO_2 레이저를 이용한 자동차용 고장력 TRIP 강 용접의 용접부 품질 분류에 대한 연구

박 영 환* · 박 현 성** · 이 세 헌*

*한양대학교 기계공학부
**기아자동차 (주)

A study on classification of weld quality in high tensile TRIP steel welding for automotive using CO_2 laser

Y. W. Park*, H. Park** and S. Rhee*

*Dept. of Mechanical Enginerring, Hanyang University
**Kia Motors

Abstract

In automotive industry, the studies about light weight vehicle and improving the productivity have been accomplished. For that, TRIP steel was developed and research for the laser welding process have been performed. In this study, the monitoring system using photodiode was developed for laser welding process of TRIP steel. With measuring light, neural network model for estimating bead width and tensile strength was made and weld quality classification algorithm was formulated with fuzzy inference method

Key Words : laser welding, plasma, keyhole, photodiode, neural network model, fuzzy classification

1. 서 론

전 세계적으로 환경 보호에 대한 관심이 높아지고 있으며 그로 인해 세계 환경기구와 같은 단체에서는 차량용 배기가스의 규제가 심해지고 있다. 그러므로 전세계의 자동차 업체는 자동차의 연비 향상을 위한 차체의 경량화가 큰 이슈로 대두되고 있다. 차량 경량화의 일환으로 TRIP강과 같은 고장력강이나 알루미늄과 같은 경량화 소재를 이용하여 차체 조립에 투입하고자 자동차 업체들은 기술개발에 많은 투자를 하고 있다.

레이저 용접은 생산성 향상은 물론 고정밀, 고품질의 용접, 그리고 깊은 용입깊이라는 장점 때문에 산업체에서의 적용이 점점 확대되고 있다. 또한 경량화 소재인 TRIP강이나 알루미늄에도 레이저 용접이 많이 이용될 것으로 예상되고 있다.

레이저 용접에 있어서 높은 생산성을 유지하기 위해서는 레이저 용접부에 대한 품질을 예측할 수 있는 정량적인 평가 알고리즘이 매우 중요하다. 레이저의 특성상 용접 후 사람이 육안으로 검사하는 방법을 벗어나 정량적인 방법으로 용접부를 모니터링하고, 품질을 예측하는 것은 레이저 용접의 생산성을 한 차원 더 높이는데 대단히 중요한 부분이라고 할 수 있다. 그러므로 많은 연구자들이 레이저 용접의 용접 모니터링

의 기법을 제시하였다. Jon[1] 은 piezoelectric transducer를 이용하여 플라즈마에 의해 생기는 증기압 변동을 계측 하였고, Chen 등[2] 은 용접부에서 나오는 자외선 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접조건에 따른 신호의 거동을 연구하였다. Beyer 등[3,4] 은 레이저 용접 중 플라즈마 신호와 소리(sound) 신호를 계측하여 비교하였으며 용접부 위와 아래에서 플라즈마 신호를 계측하여 완전 용입과의 관계도 연구하였다. Miyamoto 등[5-7] 은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토 다이오드(photodiode) 두개를 각도를 다르게 하여 플라즈마를 계측한 후 용접품질을 판단하는 연구와 용입깊이를 예측하는 수식을 유도하는 연구를 수행하였다. Farson 등[8] 은 광신호와 음향방사 신호를 계측, ARMA모델을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다. 한편 Rhee 등[9] 은 포토다이오드를 사용하여 플라즈마와 스패터의 신호들과 용접변수의 변화에 따른 용접품질과의 관계를 규명하였다. 또한 이 신호들과 품질과의 상관관계를 통해 다중회귀분석과 신경회로망을 이용하여 용접 비드의 용입깊이와 폭을 예측하는 연구[10]를 수행하였고 이를 퍼지 패턴인식 방법으로 품질을 판단하는 알고리즘[11]을 구현하였다. 이종명[12]은 색변조 기술을 이용하여 RGB의 다른 종류의 포토다이오드를 사용하여 레이저 가공공정을 모니터링 하였다.

본 논문에서는 TRIP강의 레이저 용접 시 발생되는 현상중 플라즈마와 키홀의 거동을 정량적으로 계측할 수 있는 UV 광센서와 용융금속과 스패터를 계측할 수 있는 IR 영역의 광센서를 이용하여 용접부를 모니터링 하였다. 그리고 계측된 신호를 이용하여 용접부 품질을 예측할 수 있는 모델을 구성하였으며 이를 이용하여 용접부 품질을 퍼지 추론 방법으로 분류하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 실 험

2.1 레이저 용접의 광계측 원리

금속 표면상에 고출력 레이저를 조사하는 경우, 고밀도의 레이저 빔에 의하여 중심부 구역에서는 금속의 증발이 일어나고, 그 외각지역에서는 용융이 일어난다. 따라서 중심부 구역의 큰 증기압은 용융금속을 레이저 빔이 조사되는 중심부 구역으로부터 옆으로 밀어내므로, 재료 내부에는 좁고 깊은 형상의 구멍이 생기게 되는데 이를 키홀(keyhole) 이라한다.

키홀이 형성되면, 키홀 내의 레이저 빔의 난반사에 의해 재료는 더 많은 에너지를 흡수한다. 이로 인해 용융된 금속은 기화하여 플라즈마를 형성하게 되고 이것은 레이저 빔이 키홀 내로 들어가는 것을 방해하게 된다. 레이저 빔이 지나가면 키홀 내에서는 용융된 금속이 다시 키홀을 메우면서 용접의 과정이 수행된다. 그러므로 레이저 용접에서 키홀의 형성과 플라즈마의 생성, 용융금속의 유동은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 적절한 광센서의 사용으로 이를 계측하면 용접부에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

대기압보다 높은 압력에서 플라즈마는 전기적으로 준중성이고, 국부적으로 열평형 상태에 있다고 생각된다. 레이저 용접에서는 단면의 위치에 따라 온도가 다르기 때문에 열평형 상태는 아니지만 한정된 작은 부분에서는 전자와 이온과 중성 입자들 간에 존재하는 열평형이 있어 이를 국부적 열평형 상태(local thermal equilibrium, LTE)에 있다고 한다. 레이저 용접 시 발생하는 플라즈마는 이와 같은 국부적 열평형 상태에 있다고 알려져 왔고, 이 경우에 흑체의 스펙트럼 방출과 유사하다.

그러므로 플라즈마는 Plank의 방사 법칙을 따르게 되는데 이때 생기는 온도와 방사 파장의

관계는 식 (1)과 같다.

$$E(\lambda,T)=\frac{2\pi hc^2\lambda^{-5}}{\exp(hc/\lambda kT)-1} \quad (1)$$

이때 복사곡선의 최대점은 다음과 같은 Wien의 변위법칙(displacement law)을 따르게 되고 최대점의 식은 식 (2)와 같다.

$$\lambda_{max}T=2897.8[\mu m\cdot K] \quad (2)$$

이 식에 의하면 플라즈마에서 방출되는 빛의 파장범위는 약 300~450nm 이다. 또한 용융풀의 온도는 대략 1500℃~2500℃ 이므로 용융풀에서 방출되는 빛의 파장범위는 대략 1.0~1.6㎛ 이다[13]. 위의 해석은 플라즈마가 열적 평형상태에 있을 것으로 가정한 경우에서 성립한다.

2.2 실험장치

레이저 용접부 현상을 계측하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템을 구성하였다. 시스템은 크게 용접 시스템과 계측 시스템으로 구분할 수 있다.

계측 시스템은 레이저 용접부의 광신호를 계측할 수 있는 센서와 계측된 신호를 증폭할 수 있는 증폭기, 그리고 데이터를 수집할 수 있는 DAQ보드와 신호처리를 위한 DSP 시스템으로 구성되어 있다. 2.1절에서 언급한 바대로 용접

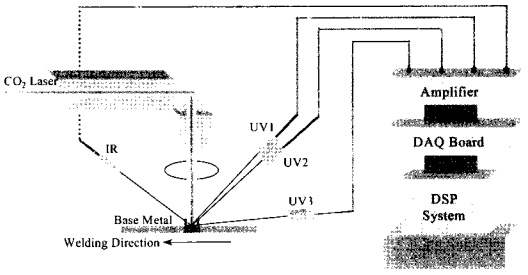

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

시 발생되는 플라즈마와 용융금속을 계측하기 위한 센서로는 포토 다이오드가 사용되었다. 사용된 포토 다이오드는 자외선 영역대의 UV센서와 적외선 영역대의 IR센서가 사용되었다. UV센서는 플라즈마의 광강도를 계측하기 위한 것이고, IR센서는 용융금속과 스패터의 광강도를 계측하기 위한 것이다. 각 센서의 세부사양은 Table 1과 같다.

포토 다이오드는 반응영역대의 빛을 받으면 광전류라는 것으로 반응하게 되는데, 이 전류는 μA 단위의 미세한 전류이다. 이 전류를 계측하기 쉬운 전압으로 바꾸고 이를 일반적으로 사용하기 쉬운 전압까지 증폭기를 이용하여 증폭하였다. 이 신호를 컴퓨터로 받아들이기 위해서 데이터 수집 장치(data acquisition board) 가 사용되었다. 이 장치의 분해능(resolution) 은 12bit 이고 샘플링 속도는 초당 1000개의 데이터를 받아 들이도록 되어 있다.

Fig. 1 에서 보는 바와 같이, UV센서는 여러

Table 1 Specification for sensors

	Spectral response range (nm)	Wavelength of peak response (nm)	Effective sensitive area (mm)	Photo sensitivity (mA/W)	Dark current (pA)
UV photodiode	260-400	370	0.8×0.8	60	50 Max
IR photodiode	700-1700	1550	ϕ0.3	0.95 peak	1.5 Max

각도에 위치되어 있다. 각도가 낮은 센서는 시편 위에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이고, 각도가 높은 센서는 키홀 내에 생기는 플라즈마를 계측하기 위한 것이다. 실험에 사용된 각 센서의 거리와 각도는 Table 2와 같다.

Table 2 Distance and angle of each sensor

	Distance (cm)	Angle (°)
UV1	50.0	49
UV2	43.2	43
UV3	43.6	4
IR	62.7	39

2.3 실험조건

레이저 용접에 있어서 용접 품질에 영향을 줄 수 있는 인자로 레이저의 출력, 용접속도, 보조가스의 유량 및 방향, 두 판재의 갭, 그리고 판재의 표면상태 등이 있다. 본 연구에서는 많은 용접 변수 중 제어 가능한 조건인 용접 속도를 제어인자로 사용하여 실험 하였다. 실제 생산 현장에 도입된 레이저 용접의 경우 일반적으로 레이저의 출력을 고정시키고 용접속도를 최대한 빨리 하여 높은 생산속도를 내기 때문에 용접속도를 변화시키며 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 레이저는 3kW급 CO_2 레이저로 레이저 빔의 단면 출력 분포를 나타내는 TEM mode는 TEM_{00} 모드를 사용하였다. 발진기의 출력 방법은 CW(continuous wave) 모드이고 보조가스(assistant gas)로는 아르곤(Ar) 가스를 이용하여 실험하였다. 레이저 파장은 10.6μm이고, 초점길이는 270mm, 레이저 빔 직경은 15mm이다. 레이저 출력은 3kW 그리고 보조가스 유량은 15l/min을 사용하였다. 실험조건으로는 용접속도를 2m/min, 3m/min, 4m/min, 6m/min, 8m/min의 5개 수준으로 나누어 실험을 실시 하였다. 이 경우 각 조건의 단위 길이 당 입열은 각각 90J/mm, 60J/mm, 45J/mm, 30J/mm 그리고 22.5J/mm이다. 용접시편으로는 TRIP ZnFe 도금강 1.2t를 이용하였고, 용접부 길이는 280mm이었다. 용접 방법은 맞대기 용접을 이용하였다.

인장강도와 표면비드폭, 이면비드폭, 용입깊이를 측정하여 실험결과에 대한 출력치로 설정하였다. 실험에 사용된 인장시편은 Fig. 2와 같다.

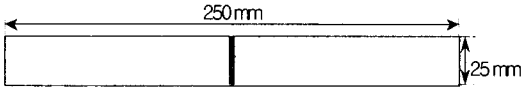

Fig. 2 Test specimen of tensile strength

2.4 결과 및 고찰

Fig. 3에서는 TRIP ZnFe강의 인장시험의 결과이다. TRIP ZnFe강의 경우 용접속도가 2, 3,4m/min에서는 모재에서 파단이 일어났고, 6와 8m/min에서는 용접부에서 파단이 발생하였다. Fig. 4는 용접 속도에 따른 각 강종의 전면 결과에서 보는 바와 같이 용접부의 투입 입열이 작아짐으로 인해서 비드폭이 작아지고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 용접 조건에 따른 TRIP ZnFe강의 용접부 사진이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 용접입열이 큰 경우에 있어서는 발생

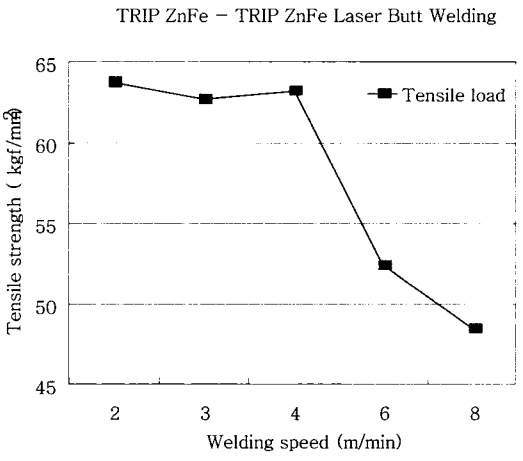

Fig. 3 Results of tensile test

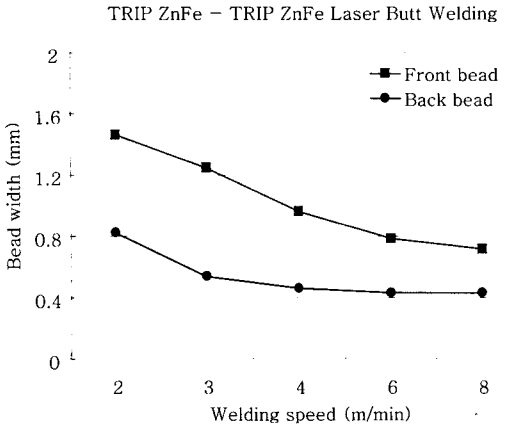

Fig. 4 Bead width according to welding speed

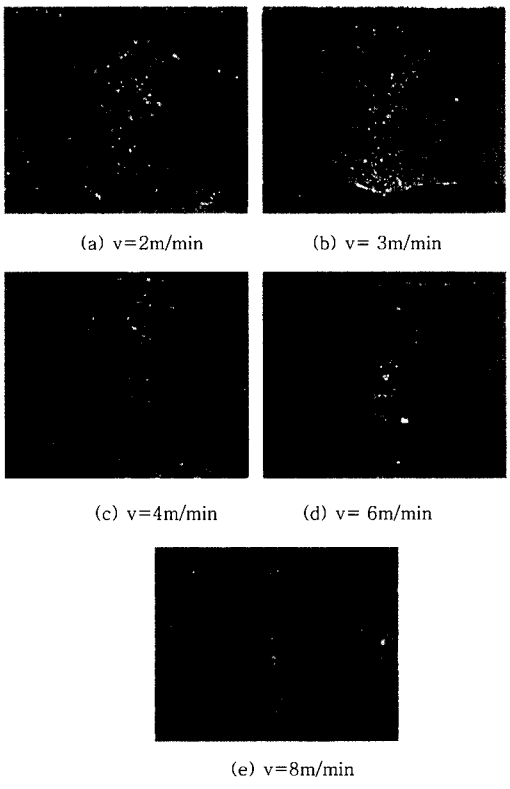

Fig. 5 Bead shape for different welding speed

하는 비드 모양은 크고 안정적이다. 그러나 입열이 작은 경우는 완전 용입이 된 경우에서도 언더컷과 같은 불량한 비드 형상을 보여주고 있다.

Fig. 6과 7은 용접 조건에 따른 각 센서에서 얻어지는 신호의 평균값과 표준편차이다. Fig. 6과 7에서 보는 바와 같이 입열이 큰 경우는 발생되는 플라즈마와 스패터의 광량이 많아지므로 센서에서 계측되는 전압신호가 높고 안정적임을 알 수 있다. 그러나 용접속도가 빨라지면 입열이 작아지므로 발생되는 광량이 줄고 키홀이 불안정하며 이로인해 용접부의 용융금속이 불안정하기 때문에 발생되는 각 신호의 평균값이 작아지고 표준편차는 커진다. 그러므로 센서의 신호는 용접부의 키홀의 상태와 용융금속 및 스패터의 상태를 잘 표현하고 있다.

레이저 용접품질을 판단할 수 있는 기준으로 제시될 수 있는 것은 인장강도와 이면비드로서 판단할 수 있는데 이번 실험에서는 투입 입열이 매우 낮은 경우를 제외하고는 대부분 모재에서

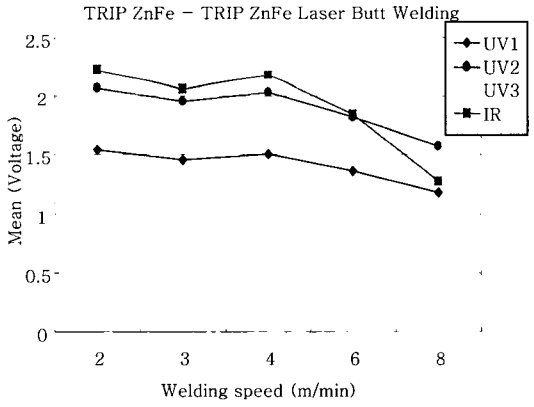

Fig. 6 Mean value of each sensor

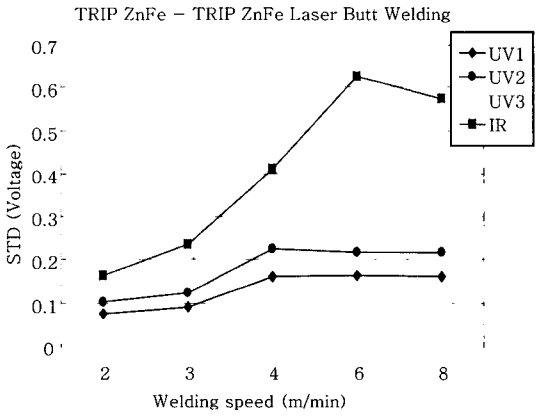

Fig. 7 Standard deviation of each sensor

파단이 되었다. 그러므로 충분한 인장강도를 가지면서 양호한 이면비드폭을 갖는 경우를 용접 품질의 양부로 결정하고자 한다. 본 논문에서는 인장강도가 TRIP ZnFe강의 경우 60kgf/mm^{2}으로 정하고, 이면비드가 0.5 mm 내외의 경우를 양호한 용접으로 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

3. 용접부 품질 분류 알고리즘

레이저 용접 품질은 플라즈마와 용융금속의 거동과 관계가 깊고 이것은 각 센서에서 계측되는 신호와 연관이 있다는 것을 밝혔다. 그러나 이 신호와 용접 품질은 선형적 관계를 맺고 있는 것이 아니기 때문에, 계측된 신호를 용접 품질을 판단하기 위한 인자로 사용하기 위해서는 비선형의 형태나 패턴 인식의 형태를 사용하여야 한다. 본 논문에서는 TRIP강의 레이저 용접에 대해 용접품질을 나타낼 수 있는 인장강도와 비드 형상에 대한 예측 모델을 인공신경회로망으로 제시하고, 이를 퍼지 추론의 기법을 사용하여 용접품질을 정량적으로 판단하고 분류하는

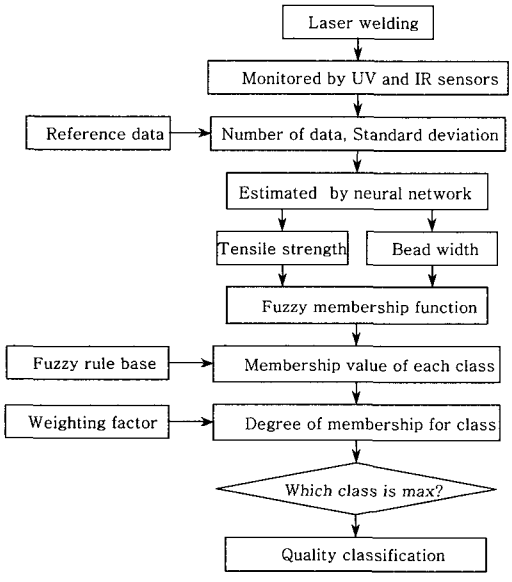

Fig. 8 Classification process

알고리즘을 제시하였다. Fig. 8은 본 알고리즘에 대한 흐름도이다.

3.1 용접강도 및 비드형상 예측 모델

용접부의 품질을 나타내는 인자를 여러 가지로 표현할 수 있으나, 본 논문에서는 인장강도와 용접부 이면비드의 폭을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

2장에서 언급한 바대로 용접부의 용접성은 용접부에 투여되는 입열과 직접적인 관련이 있다. 그리고 이 입열은 용접부에 발생되는 광량과 밀접한 관계를 가지고 있으며 이는 계측되는 센서의 신호와 연관이 있음을 알 수 있었다. 이러한 용접성을 계측신호를 이용하여 예측 할 수 있는 모델을 제시하고자 한다. 이 두 인자의 상관관계는 매우 비선형적이므로 일반적으로 비선형성을 잘 나타낼 수 있는 모델인 신경회로망 모델을 이용하였다.

신경회로망을 구성하기 위해서는 입력인자를 계측된 광신호의 신호처리 결과로 정하였고, 출력인자로 용접부의 인장강도 값과 이면비드 폭으로 정하였다. 레이저 용접시 계측되는 광신호는 계측거리나 용접 조건에 따라 많이 변화하기 때문에 상대적인 값으로 판단하였다. 즉 계측신호로부터 상대적인 값으로 보정할 수 있도록 기준 신호를 이용하여 기준신호와 비교하여 얻어진 값을 사용하였다.

기준신호는 적정의 여러 용접조건에서 얻어지는 신호의 평균값을 이용하여 상한선과 하한선을 작성하였다. 본 논문에서는 실험에서 얻어진 신호 중 2m/min와 3m/min의 경우를 적정신호로 잡았다. 이를 필터를 이용하여 신호처리 하고 그 신호들의 평균값을 이용하여 새로운 신호를 만들었다. 그리고 얻어진 신호에 1.3배와 0.7배를 곱함으로써 상한선과 하한선을 갖는 기준신호를 작성하였다.

그리고 용접이 수행된 후 얻어진 신호에 대하

여 기준신호와 비교하여 하한선을 벗어난 신호의 개수와 전체신호와의 비를 이용 예측모델의 입력 인자로 삼았다. 그리고 계측된 신호의 표준편차 값과 기준신호 중 하한신호의 표준편차와의 비를 예측모델의 입력인자로 하였다. 위와 같이 각 센서당 2개의 입력인자가 만들어지므로 예측모델의 총 입력변수는 8개가 된다. 그리고 출력변수를 용접부의 인장강도와 이면비드 폭으로 하는 2개의 모델을 구성하였다. Fig. 9는 예측모델의 인공신경회로망의 구조를 나타내었다. 인공신경회로망의 학습을 위해 사용된 방법은 오류 역전파(error back-propagation) 알고리즘을 사용하였다. 학습률은 0.1, 모멘텀 계수는 0.9로 주었으며 학습에러가 0.01이하가 될 때까지 신경회로망을 학습시켰다. Fig. 10과 11

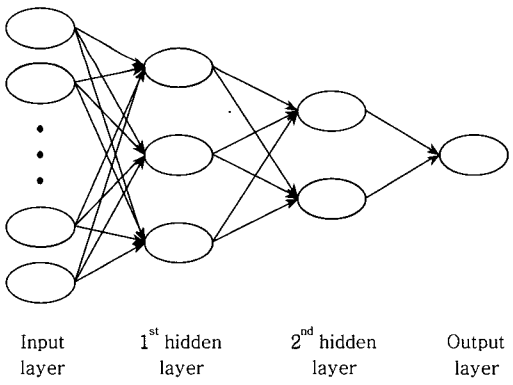

Fig. 9 Neural network model for estimation

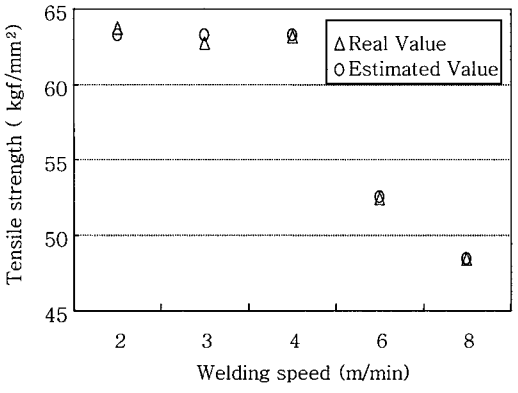

Fig. 10 Estimation of tensile strength

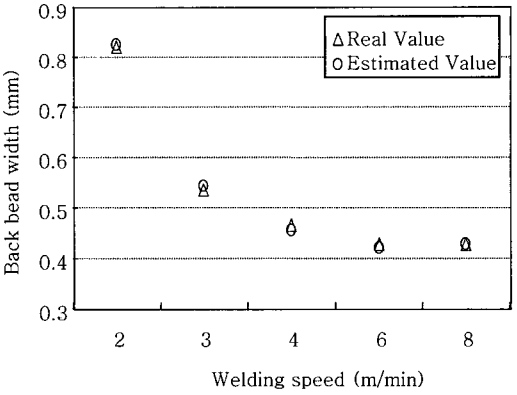

Fig. 11 Estimation of bead width

은 신경회로망의 예측모델에 의해 얻어진 인장강도 값 및 이면비드 폭의 실제값과 예측값을 비교한 결과이다.

3.2 퍼지 추론 시스템

3.1절에서 예측된 인장강도 값과 이면비드를 이용하여 용접품질을 분류하기 위해서 퍼지 추론이론을 이용하였다. 이를 위하여 퍼지 추론시스템의 입력변수를 퍼지화 하여야 한다. 이를 위하여 퍼지 함수를 Fig. 12 와 같이 정의 하였다.

여기서 L, M, H 값은 식 (3), (4), (5) 와 같이 구할 수 있다. 여기서 R값은 퍼지함수를 노말라이징 하기 위한 기준값으로 2.4절에서 제시된 값과 같다. 각 F_L, F_M, F_H값은 R을 1로 하였을 때의 비율로서 각각의 값은 Table 3과 같다.

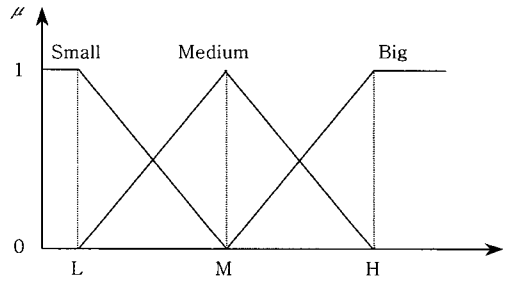

Fig. 12 Fuzzy membership function

$$L = F_L \times R \quad (3)$$

$$M = F_M \times R \quad (4)$$

$$H = F_H \times R \quad (5)$$

Table 3 Constants of fuzzy membership function

	F_L	F_M	F_M	R
Membership functionfor tensile strength	0.8	0.9	1	60
Membership function for bead width	0.8	0.9	1	0.5

각 함수의 조합에 따라 용접품질을 7가지로 분류하였다. 분류된 Class와 각 함수와의 관계는 Table 4와 같으며 이것은 퍼지 규칙 베이스(fuzzy rule base)가 된다. Class I 인 경우는 인장강도와 이면비드가 충분한 경우로서 용접부에 많은 입열이 투입됨으로써 적정한 용접부 형상 및 충분한 인장강도를 갖는 경우이다. Class II 와 Class III의 경우는 두 인자 중 하나는 충분하지만 다른 하나는 약간 부족한 경우이다. 이때 Class I, II, III은 용접품질 면에 있어서 양호한 품질로 간주하게 된다.

Table 4 Weld quality classification

Class	tensile strength	Back bead width	Weld quality
Class I	B	B	Good
Class II	B	M	
Class III	M	B	
Class IV	M	M	Bad
Class V	M	L	
Class VI	L	M	
Class VII	L	L	

Class IV는 두 인자 모두 약간 부족한 경우로서 양호한 경우나 혹은 불량한 경우가 섞여있을 수 있다. 그러나 용접부 품질의 안전성을 고려하여 이런 경우는 모두 불량으로 처리하였다. Class V의 경우는 인장강도는 약간 부족하지만 이면비드 폭이 잘 발생하지 않는 경우이다. 이 경우는 이면비드가 잘 형성되지 않았으므로 성형과 같은 후공정에서 찢어짐과 같은 문제가 발생할 수 있다. Class VI은 이면비드는 약간 부족하나 인장강도는 낮은 경우이다. 이 경우 완전용입이 발생하였으나 용접부 내부의 결함, 예를 들면 기공이나 언더컷과 같은 결함에 의해 인장강도가 낮게 나오는 경우이다. Class VII는 두 인자 모두 불량한 경우로 용접입열이 낮은 경우 발생된다. 그러므로 Class IV~VII는 모두 용접품질이 불량한 것으로 판단한다.

신경회로망의 결과값을 퍼지 소속함수에 의해 소속함수 값을 구한다. 그리고 퍼지 룰베이스에 의해 정의된 퍼지 소속함수를 이용하여 각 Class의 소속도를 구하게 된다. 각 Class의 소속도는 식(6)에 의해 구한다.

$$\mu_{class} = (w_L \; w_W) \cdot \begin{pmatrix} \mu_L \\ \mu_w \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (3)에서 μ_{Class}는 각 Class의 소속도이고, $(w_L \; w_W)$는 각 퍼지 소속함수에 대한 가중치 배열(weight matrix)이다. 본 논문에서는 가중치 배열을 $(w_L \; w_W)=(0.6, 0.4)$로 하였다.

각 Class의 소속도 중에서 가장 큰 값을 용접품질의 Class로 분류하게 되고 구하여진 Class가 I~III인 경우는 최종 용접부 품질을 Good으로, 그렇지 않는 Class에 대해서는 Bad로 판단한다.

3.3 용접부 품질 분류 프로그램

3.1절과 3.2절에 의한 알고리즘을 통해 얻어진 결과에 대한 예가 Fig. 13~Fig. 16에 보여주고 있다. Fig. 13은 Class I의 예이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 센서에서 계측된 신호와 기준신호가 표시되어 있다. 각 센서의 신호

중 가운데 신호가 실제 계측된 신호이고 밖의 두 신호는 기준신호이다. 기준 신호의 범위를 벗어난 데이터의 개수는 밑에 표시되어 있고, 이를 이용하여 예측된 강도와 비드폭 그리고 강도와 비드폭의 기준값은 그래프 및 값으로 하단부 중앙에 표시되어 있다. 이것을 기준으로 구한 각 Class별 소속도는 그 옆에 나타나 있으며 최종 용접품질이 하단 오른쪽에 표시되어 있다. 각 Class의 소속도중 Class I의 소속도가 1.0으로 가장 크다. 그러므로 이 용접은 적정한 용접강도와 비드폭을 갖은 것으로 간주되며 최종 용접결과는 좋은 것으로 판단하였다.

Fig. 14는 Class II의 경우로서 인장강도의 값은 좋으나 이면비드 폭이 약간 부족한 경우이다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 Class II의 소속도가 가장 높으며 최종 용접결과는 좋은 것으로 판단하였다. Fig. 15와 16은 Class V와 Class VI의 경우로서 Fig. 13과 14에서 얻어진 신호보다 낮음을 알 수 있다. 이 경우는 인장강도나 이면비드가 기준값보다 낮으며, 이 경우 모두 최종용접 품질은 나쁜 것으로 판단하였다.

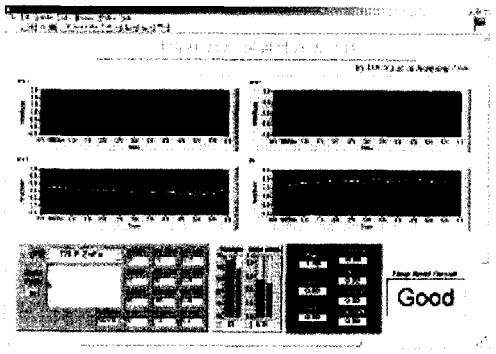

Fig. 13 Example of classification program (class I)

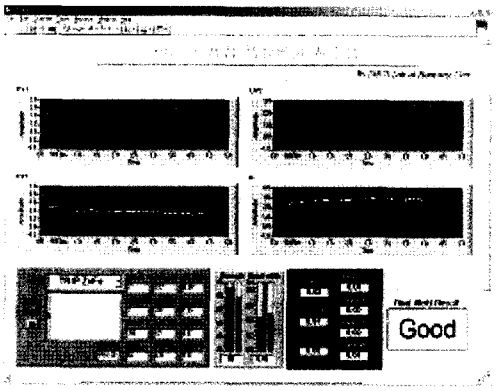

Fig. 14 Example of classification program (class II)

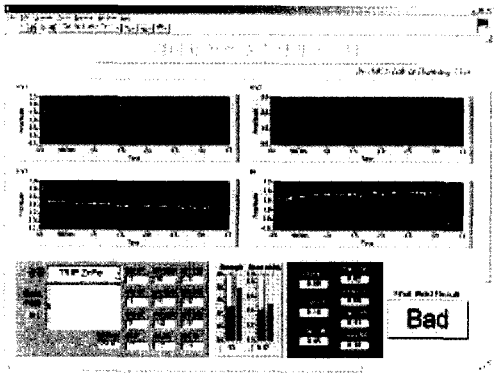

Fig. 15 Example of classification program (class V)

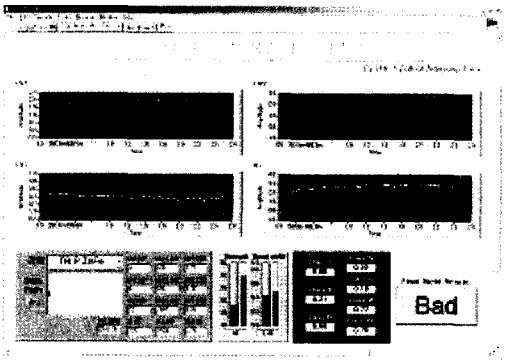

Fig. 16 Example of classification program (class VI)

4. 결 론

레이저 용접시 발생되는 플라즈마와 용융금속을 계측하기 위하여 각도가 다른 3개의 UV 센서와 IR센서를 이용하여 계측하였다. 이를 각 용접 조건에 따라 변화하는 광 강도를 계측하여

용접 조건에 따른 신호의 변화를 알아내고, 각 용접조건에 따른 비드 형상과 인장강도에 대한 평가를 하였다. 이 실험결과를 토대로 하여 레이저 용접부의 품질을 나타낼 수 있는 인자인 인장강도와 이면비드 폭을 예측할 수 있는 인공신경회로망 모델을 제시하였고, 이를 통해 용접부 품질을 7가지로 분류 할 수 있는 퍼지 추론 알고리즘을 구성하였다. 최종적으로 분류된 품질의 Class를 이용하여 용접부의 결과를 판단하는 프로그램을 구현하였다.

후 기

본 논문은 청정생산기술사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. M. C. Jon, Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding , Welding Journal, Vol. 63, No. 9, pp. 43-48, 1985.
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, pp. 113-122, 1991.
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, pp.142-148, 1988.
4. 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.
5. K. Mori, H. Sakamoto, and I. Miyamoto, "Detection of Weld Defects in Tailored Blanks," Journal of Japan Welding Society, 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. D. Farson, A. Ali, and Y. Sang, "Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration," Welding Journal, Vol. 77, No. 4, pp.142s-148s, 1998.
9. 박현성, 이세헌, 정경훈, 박인수, 고출력 CO_2레이저 용접시 포토 다이오드를 이용한 플라즈마와 스패터 모니터링 , 한국레이저가공학회지, 제 2 권, 제 1 호, pp. 30-37, 1999.
10. H. Park and S. Rhee, Estimation of weld bead size in CO_2 laser welding by using multiple regression and neural network, Journal of Laser Applications, Vol. 11, No. 3, pp.143-150, 1999.
11. H. Park and S. Rhee, Development of a weld quality monitoring system in CO_2 laser welding by using photodiode , Journal of Laser Applications, Vol. 13, No. 1, pp. 12-18, 2001.
12. 이종명, 색변조 기술을 이용한 레이저 가공공정 모니터링 시스템 , 한국레이저가공학회지, 제 4 권, 제 2 호, pp.29-38, 2001
13. M. Ono, K. Nakada, and S. Kosuge, An Investigation on CO_2 Laser-Induced Plasma, Journal of Japan Welding Society, Vol. 10, No. 2, pp. 239-245, 1992.