

레이저 테일러드 브랭크 용접의 실시간 품질판단 및 통계프로그램에 관한 연구

박영환[†] · 이세헌* · 박현성**

A study on the real time quality estimation in laser tailored blank welding

Park Young Whan, Sehum Rhee and Hyunsung Park

Key Words : laser welding(레이저 용접), photodiode (포토다이오드), keyhole (키홀), plasma(플라즈마), molten metal(용융금속), fuzzy multi-feature pattern recognition (퍼지 패턴인식)

Abstract

Welding using lasers can be mass-produced in high speed. In the laser welding, performing real-time evaluation of the welding quality is very important in enhancing the efficiency of welding. In this study, the plasma and molten metal which are generated during laser welding were measured using the UV sensor and IR sensor. The results of laser welding were classified into five categories such as optimal heat input, little low heat input, low heat input, focus off, and nozzle change. Also, a system was formulated which uses the measured signals with a fuzzy pattern recognition method which is used to perform real-time evaluation of the welding quality and the defects which can occur in laser welding. Weld quality prediction program was developed using previous weld results and statistical program which could show the trend of weld quality and signal was developed.

기호설명

Rdata : reference data for estimation
Rstd : standard deviation of reference data
F : ratio of fuzzy membership variable to R
 μ : fuzzy membership value
 μ_{class} : degree of membership for weld quality class
W : weight matrix

1. 서론

레이저 용접은 고 에너지 빔 용접으로 그 생산성과 용접 품질의 우수함 때문에 점차로 그 사용이 확대되고 있다. 특히 자동차 산업에서, 이중 두께의 테일러드 브랭크 (Tailored Blanks) 용접 등에 레이저 용접이 적용되고 있으며 그 중요성이 날로

커지고 있다.

레이저용접에서 출력의 변화나 용접속도의 변화, 보조가스의 유량이나 취입방향, 모재의 절단 상태 등은 플라즈마와 용융금속의 생성에 영향을 주고 이는 용접부 비드의 형상과 관계가 있다. 레이저 용접이 대량의 생산에 적용될 때, 레이저 용접의 품질 확보와 생산성의 증대를 위해 용접 품질을 실시간으로 판단하는 알고리즘 및 시스템의 개발이 필요하다. 또한 이를 통계적으로 처리하여 레이저 용접의 상태 변화를 예측하는 프로그램의 개발의 필요성이 요구되어지고 있다.

지금까지의 용접 모니터링 이론으로는 Beyer¹⁾ 등은 레이저 용접 중 발생하는 플라즈마 신호와 sound 신호를 계측하였고, Farson²⁾ 등은 광신호와 음향방사 신호를 계측, 두 신호간의 관계를 규명하였다. Rhee³⁾ 등은 플라즈마와 스펙터를 계측하여 용접 비드의 크기를 회귀분석과 신경회로망으로 예측하였고, Miyamoto⁴⁾ 등은 각도가 다른 10개의 UV photodiode 를 이용하여 플라즈마를 계측하고, 용입 깊이를 예측하는 방정식을 유도하였다.

[†] 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

* 한양대학교 기계공학부

** 기아자동차주식회사 생기개발팀

본 연구에서는 퍼지 패턴인식 알고리즘을 이용하여 용접 품질을 판단할 수 있는 시스템을 구축하였고, 용접 결과 및 신호의 변화를 직관적으로 볼 수 있는 통계프로그램과 이를 통해 용접 결과를 예지할 수 있는 프로그램을 구현하였다.

2. 레이저 용접 모니터링 이론

금속 표면상에 고출력 레이저를 조사하는 경우, 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, 키홀내의 레이저 빔의 난반사에 의해 재료는 더 많은 에너지를 흡수한다. 이로 인해 용융된 금속은 기화하여 플라즈마를 형성하게 되고 이것은 레이저 빔이 키홀내로 들어가는 것을 막게된다. 이 때 키홀내의 용융금속이 유동하고 열전달 되어 레이저 용접의 과정이 수행된다.

그러므로 레이저 용접에서 키홀의 형성과 플라즈마의 생성, 용융금속의 유동은 용접 품질에 큰 영향을 주게 된다. 플라즈마는 자외선 영역부터 근적외선 영역까지의 빛을 방출하지만 주로 자외선 영역대의 빛을 방출하며, 용융금속은 적외선 영역대의 빛을 방출한다. 이 빛을 계측함으로써 플라즈마와 용융금속, 키홀의 거동을 모니터링 할 수 있고, 용접 품질과의 상관성을 알아 낼 수 있다.

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에서 사용된 실험 장치는 크게 4 개의 부분으로 나누어진다. 우선 레이저 용접기와 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 용융금속을 계측할 수 있는 포토다이오드(photodiode)가 붙어 있는 센서부, 계측된 신호를 증폭시키는 증폭기(amplifier), 그리고 이를 신호 처리할 수 있는 컴퓨터(system controller)로 구성되어 있고 그 구성은 Fig. 1 과 같다.

6kW 급 CO₂ 레이저 용접기를 이용하여 용접을 할 때, 플라즈마의 파장 범위인 190 - 400 nm 의 빛을 감지하기 위해 UV 센서를 용융금속을 계측하기 위하여 IR 영역대의 센서를 이용하였다. 이는 증폭기와 데이터 획득 장치(data acquisition board)를 통하여 컴퓨터에 저장되고 신호처리된다.

Fig. 1 에서 보는 바와 같이, UV 센서의 위치가 다른 각도로 되어있다. 이것은 각도가 낮은 UV1 센서는 시편 위에 생성되는 플라즈마의 광량을 계측하기 위한 것이고, 높은 각도의 UV2 센서는 시편 위의 플라즈마 뿐만 아니라 키홀내의 광 강도도 함께 측정하기 위한 것이다.

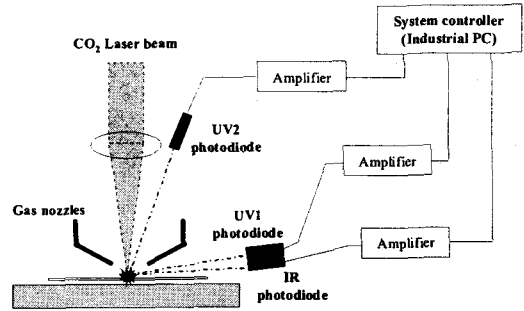


Fig. 1 Schematic diagram of monitoring system

3.2 실험조건

용접 변수와 신호와의 관계를 고찰 하기 위하여 2 종류의 실험을 수행하였다. 먼저, 레이저 출력과 용접 속도의 변화에 따른 실험에서, 실험 방법으로 반복이 있는 이원배치법을 이용하였다. 레이저의 출력은 4.5kW 부터 6kW 까지 0.5kW 간격으로 4 수준으로 나누었고, 용접 속도는 3m/min 부터 4m/min 까지 0.5m/min 간격으로 3 수준으로 나누었다. 용접길이는 320mm 이고 보조가스는 헬륨(He)을 이용하였고 유량은 55-20 ft³/h 를 사용하였다.

또 다른 실험으로는 노즐 위치에 따른 신호변화를 위해 실험을 수행하였다. 실험조건은 레이저의 출력은 5.4kW, 용접 속도는 2.5m/min, 보조가스는 헬륨으로 유량은 60 - 30 ft³/h 으로 하여 가스 노즐의 위치를 정상상태로부터 좌우로 각각 1mm, 2mm 씩 움직여 가며 신호 변화를 측정하여 보았다. 시편으로는 차체용 테일러드 브랭크 용접에 적용되고 있는 고장력강을 이용하였다.

3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 2 와 Fig. 3 은 용접 변수에 따른 신호 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 2 에서 레이저의 출력이 커짐에 따라 그 신호가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 용접 입열이 커지는 조건인 레이저의 출력이 커질수록 발생하는 플라즈마와 용융금속이 많아 지기 때문이다. 이것은 표면 비드이 입열량이 커질수록 커지는 것과 관계가 깊음을 알 수 있다. 그런데 출력 증가에 따라, UV2 신호와 IR 의 신호의 경향은 증가하는 반면 UV1 신호는 감소하는

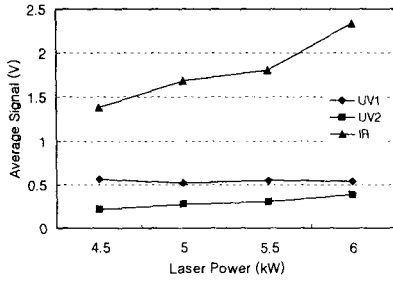


Fig. 2 Average signals according to laser power

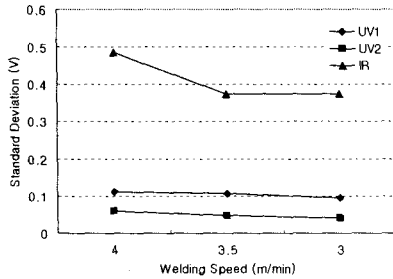


Fig. 3 Standard deviation of signals according to welding speed

모습을 보이고 있다. 이것은 보조가스가 상판위의 플라즈마를 제거하는데 있어서 생기는 불규칙성에 의한 것으로 사려된다.

Fig. 3 에서는 용접 속도가 느려지면 표준편차 값이 작아지는데 이것은 모재에 생성되는 키홀의 생성 시간과 관계가 있다. 용접 속도가 느리면 키홀의 생성이 안정적으로 이루어 질 수 있는 시간이 충분히 확보되므로 안정적인 신호 변화가 생성됨을 알 수 있다.

Fig. 4 과 Fig. 5 는 노즐의 위치 변화에 따른 각 센서의 평균 전압과 표준 편차를 나타낸 것이다. 각 신호의 평균값과 표준 편차값 모두 정상상태를 중심으로 노즐의 방향이 멀어 질수록 커지고 있다. 이 원인은 노즐의 위치가 정상 위치로부터 멀어짐으로 인하여 플라즈마를 효과적으로 제거하지 못하므로 인하여 키홀의 생성에 영향을 주어 플라즈마와 용융금속의 형성에 영향을 주기 때문이다. 그러므로 UV1 센서는 상판위의 플라즈마를 계측하고 IR 센서는 용융금속을 계측하는 것이기 때문에 노즐의 영향에 대해 민감하게 반응하게 된다. 그러나 UV2 는 키홀 내부를 바라보고 있기 때문에 상대적으로 적은 영향을 받으므로 신호 변화가 적다.

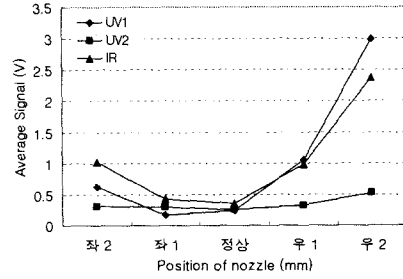


Fig. 4 Average signals according to nozzle position

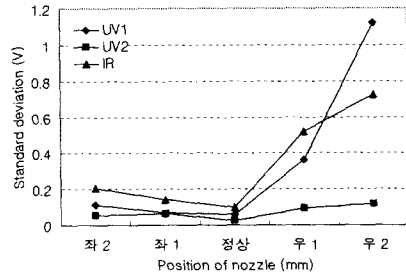


Fig. 5 Standard deviation of signals according to nozzle position

4. 용접 모니터링 알고리즘

4.1 결함 분류 및 판단 규칙

계측된 신호와 용접 품질은 비선형적 관계를 맺고 있기 때문에, 이 신호를 용접 품질을 판단하

기 위해서는 비선형이나 패턴 인식의 방법을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 용접 품질을 예측하는 방법으로 퍼지 패턴인식 알고리즘(fuzzy multi-feature pattern recognition algorithm)을 이용하였다.

앞의 실험 결과를 바탕으로 레이저 용접의 품질을 5 가지로 분류하였다. 양호한 용접은 적정입열 (optimal heat input) 과 약간의 입열 부족(little low heat input)으로 그리고 불량한 용접은 입열부족 (low heat input), 초점미탈 (focus off), 노즐 이상 (nozzle change)으로 구분하였다.

패턴 인식의 기준이 되는 기준 신호는 적정 용접 조건의 신호를 이용하여 상한과 하한 신호로 만들게 된다. 그리고 새로운 용접이 이루어 졌을 때, 패턴을 구분하는 인자 (feature)로 기준 신호에 대하여 실제 신호의 이탈개수와 기준 신호의 표준편차와 실제 표준 편차의 상대적 크기를 사용하였고, 이들 인자와 용접 품질과의 관계를 이용하여 규칙 베이스(rule base)를 정의하였다. 규칙 베이스

는 Table 1 과 같다. L 은 Low 를, M 과 H 는 Middle High 를 의미한다.

우선 적정입열의 경우는 측정되는 신호는 매우 안정적이고 기준신호와도 비슷한 신호가 나오게 된다. 그러므로 기준 신호의 한계를 벗어나는 경우도 적으며, 신호도 일정한 신호를 얻을 수 있어 표준 편차 또한 적다. 약간의 입열 부족한 경우 판재에 가하여 지는 입열량은 적정 입열의 경우보다는 적다. 이로 인해 신호의 변화가 생기는데, 기준 신호보다 위나 혹은 아래로 벗어나는 경우가 많이 생기게 표준편차 역시 적정 입열 때 보다는 커지게 된다.

입열이 부족한 경우에 있어서는 레이저의 입열량이 적어 용융금속 및 플라즈마의 생성이 잘 일어나지 않는다. 이런 경우는 측정되는 신호는 기준신호의 아래쪽 한계를 대부분 넘게 되고, 신호의 편차도 적게 된다. 초점이탈인 경우는 레이저의 초점이 용접선과 일치하지 않기 때문에 부분부분 용접이 되는 경우이다. 이 경우는 용접선과 초점이 일치하는 경우는 용접이 되어 정상적인 신호가 얻어지지만, 그렇지 않은 부분은 용접이 되지 않아 낮은 신호가 얻어진다. 전체적인 신호를 볼 때는 신호의 요동이 크므로 표준 편차의 값도 커지게 된다. 노즐 이상인 경우는 Fig. 4 와 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 각 센서에서 얻어지는 신호의 평균값과 표준편차 값이 크므로 기준신호 보다 위쪽으로 많은 신호가 벗어나게 된다.

Table 1 Fuzzy rule base

Sensor	UV1			UV2			IR		
	Upper	Lower	STD	Upper	Lower	STD	Upper	Lower	STD
Optimal heat input	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Little low heat input	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Low heat input	L	H	L	L	H	L	L	H	L
Focus off	L	H	H	L	H	H	L	H	H
Nozzle change	H	L	H	H	L	H	H	L	H

4.2 퍼지소속함수

퍼지 패턴인식 알고리즘을 용접의 품질 판단에 이용하기 위해서는 퍼지 소속함수가 정의 되어야 하는데 이를 위해서 먼저 기준신호를 만들어야 한다. 기준 신호는 적정 용접조건인 신호를 이용하는데, 본 연구에서는 6kW 3m/min 와 5.5kW 3m/min

의 용접 조건에서 얻어진 신호를 이용하였다. 두 용접조건에서 표면 비드의 평균값은 1.774mm 와 1.756mm, 이면 비드는 1.5mm 와 1.35mm 로 용접 결과가 매우 좋았다. 이 조건인 신호를 이용하여 각 센서별로 필터링하고, 각 신호별로 1.3 을 곱하여 상한 한계와 0.7 을 곱하여서 하한 한계를 주어 기준 신호를 작성한다. 또한 표준편차의 경우는 하한 한계 신호의 표준 편차 값을 기준 표준 편차 값으로 하였다.

위에서 정의한 기준신호를 이용하여, 각 레이저 용접 조건에서 얻어진 신호와 기준 신호의 상, 하한의 한계를 넘어가는 신호의 개수와 기준 표준 편차와 얻어진 신호의 표준 편차의 비를 이용하여 소속함수를 정의 하였다. 그리고 용접 결과는 이면 비드의 평균폭이 0.85mm 를 기준으로 하여 판단하였다. 이면 비드의 평균폭이 0.85mm 이하인 경우, 이면 비드의 상태가 불균일하고 물결무늬의 모습을 보이고 있는 반면 0.85mm 이상인 경우 이면 비드의 모습이 직선적이고 일정하기 때문이다. 이를 기준으로 하여 소속함수를 정의 하였다. 정의된 소속 함수는 Fig. 6~8 과 같다.

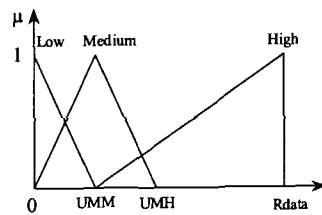


Fig. 6 Fuzzy membership function for upper data

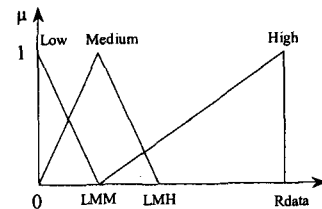


Fig. 7 Fuzzy membership function for lower data

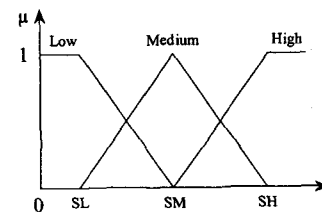


Fig. 8 Fuzzy membership function for standard deviation

Fig. 6~8 에서 UMM, UMH, LMM, LMH, SL, SM,

SH 는 식 (1) - (6) 과 같다.

$$\begin{aligned} \text{UMM} &= \text{Rdata} \times F_{\text{UMM}} & (1) \\ \text{UMH} &= \text{Rdata} \times F_{\text{UMH}} & (2) \\ \text{LMM} &= \text{Rdata} \times F_{\text{LMM}} & (3) \\ \text{LMH} &= \text{Rdata} \times F_{\text{LMH}} & (4) \\ \text{SL} &= \text{Rstd} \times F_{\text{SL}} & (5) \\ \text{SM} &= \text{Rstd} \times F_{\text{SM}} & (6) \\ \text{SH} &= \text{Rstd} \times F_{\text{SH}} & (7) \end{aligned}$$

여기서 Rdata 는 판단하는 데이터의 수를 Rstd 는 기준 신호의 표준편차 값이다. 그리고 F 는 Rdata 와 Rstd 가 1 일 때의 비율이다

각 용접결과에 대해 각 센서별로 위, 아래의 이탈개수와 표준 편차의 소속함수 값을 앞에서 정한 규칙베이스의 규칙에 따라 소속함수로부터 구하게 된다. 이를 이용하여 앞에서 분류된 5 개의 용접 결과에 대한 소속도를 구하게 된다. 이때, 각 센서가 갖는 신뢰도에 따라 각 센서별로 가중치를 두어 소속도를 구하게 된다. 각 용접 품질에 대한 소속도는 식 (8) 과 같다.

$$\mu_{\text{Class}} = W \cdot \begin{pmatrix} \mu_{U1U} + \mu_{U1L} \\ \mu_{U2U} + \mu_{U2L} \\ \mu_{IRU} + \mu_{IRL} \\ \mu_{U1S} \\ \mu_{U2S} \\ \mu_{IRS} \end{pmatrix} \quad (8)$$

W 는 가중치 행렬로 $W=(0.2 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.4 \ 0.3 \ 0.3)$ 이다. 그리고 식 (8) 의 뒤의 행렬에서 앞의 3 열은 각 센서별로 기준신호의 상한과 하한으로 벗어난 개수의 소속함수 값의 합이고, 뒤의 3 열은 각 센

서별로 표준편차에 의한 소속함수의 값이다.

(8)식으로 각 용접 품질별로 소속도를 구하고 이중 소속도가 가장 큰 값을 용접 품질로 결정하게 된다.

5. 레이저 용접 품질 평가 프로그램

5.1 용접품질 모니터링 프로그램

Fig. 9 는 모니터링 프로그램으로 적정입열의 예이다. Fig. 9 의 그래프에서 굵은선이 용접시 얻어진 신호이고, 그 위, 아래에 있는 선이 기준 신호이다. Fig. 9 에서 그래프 옆에 있는 숫자가 각 신호가 기준신호를 벗어난 개수를 의미하고 그래프 밑의 숫자는 기준 표준 편차값과 현재 신호의 표준 편차 값을 나타낸다. Fig.9 에서 보는 바와 같이 각 센서별로 기준 신호의 값을 벗어나는 신호의 개수는 거의 없고, 표준 편차도 적은 것을 알 수 있다. Output data 부분에서 각 용접 품질의 소속도가 표시되어 있는데, 이중 적정입열의 소속도가 가장 크므로 용접 품질은 적정입열이 선택되었고, 용접 결과는 Good 으로 판정하였다

5.2 국부적 결함 판단 프로그램

퍼지 패턴 인식 알고리즘은 전체적인 신호변화를 이용하여 용접의 품질을 판단한다. 그러나 레이저 용접시 전체적인 신호에는 크게 영향을 주지 못하거나 혹은 특정 센서에만 반응하여 퍼지 알고리즘으로 판단이 불가능한 국부적 결함이 발생한다. 대표적인 예로 스파터에 의한 결함과 순간적으로 플라즈마의 생성이 없어지므로 인해 이면 비드가 끊어지는 경우이다. 이런 경우 판재를 성형할 때 국부적 결함이 발생한 부분이 끊어지거나 찢어질 수 있다. 그러므로 이를 결함으로 판단하여야 한다.

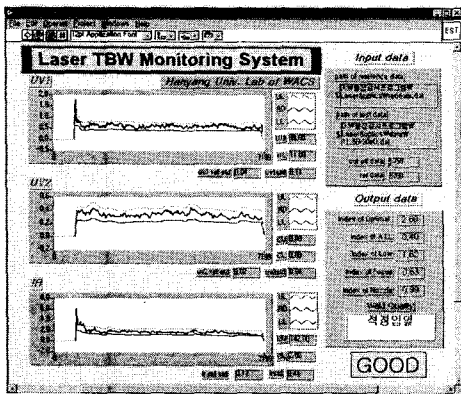


Fig. 9 Example of monitoring program

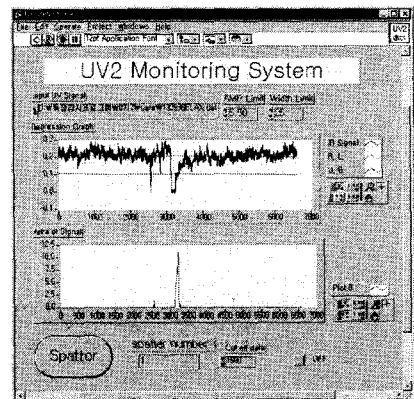


Fig. 10 Example of localized defect detecting

순간적인 플라즈마의 소멸로 인해 이면비드가 생성되지 않는 경우는 UV 센서만이 반응하게 된다. 그러므로 두개의 센서중 키홀 내부의 상태를 잘 표현하는 UV2 신호를 이용하여 신호처리기법을 이용하여 국부적 결함을 판단하였다. Fig.10 는 국부적 결함을 판단하는 프로그램의 예이다.

6. 용접 품질 통계 프로그램

Fig. 11 은 일정 기간 동안의 용접 생산품에 대한 용접결과를 표시한 것이다. 설정된 기간내의 생산한 강종의 종류와 용접횟수, 그리고 양품, 불량품의 수, 각각의 양품율등을 표시한다. 또한 용접결과를 생산시간에 대하여 표시하여 시간이 지남에 따라 신호가 어떻게 변화하는지를 볼 수 있는 그래프를 전진과 후진, 각각에 대하여 그리도록 작성하였다. 이는 하루동안의 용접품질의 변화와 그에 따른 각 센서의 신호변화, 그리고 레이저 출력의 변화등을 보고 분석할 수 있도록 한 것이다.

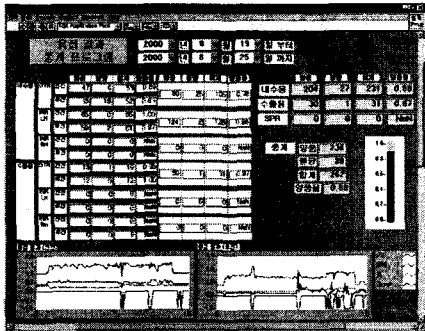


Fig. 11 Example of statistical program

7. 결론

본 연구에서는 레이저 용접 품질을 예측하기 위한 방법으로 광센서를 이용하여 용접 상태를 모니터링 하였다. 용접 비드의 형상과 밀접한 연관이 있는 플라즈마와 용융금속을 UV 센서와 IR 센서를 이용하여 계측하였고, 계측된 신호와 용접 변수와의 상관관계를 규명하였다. 이를 바탕으로, 퍼지 패턴 인식 기법을 이용하여 레이저 용접 품질을 적정 입열, 약간의 입열 부족, 입열부족, 초점미탈, 노즐이상으로 분류하고, 용접 결과를 판단 하였다. 그리고 과거의 용접 결과를 이용하여 용접 품질을 예지 할 수 있는 프로그램을 구현하였고, 또한 중앙 통제 작업의 초기 작업으로 용접

결과와 신호의 변화를 직관적으로 볼 수 있는 통계 프로그램을 개발하였다.

후 기

본 연구는 2001 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) W. Gatzweiler, D. Maischner, and E. Beyer, 1988, "On-line Diagnostic for Process control in Welding in CO2 Lasers", *High Power CO2 Laser System & Applications*, SPIE 1020, pp.142-148.
- (2) F. D. Farson, A. Ali, Y. Sang, 1998, "Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration", *Welding Journal*, Vol 77, No. 4, pp.142s-148s.
- (3) H. Park, and S. Rhee, 1999, "Estimation of Weld Bead Size in CO2 Laser Welding by using Multiple Regression and Neural Network", *Journal of Laser Applications*, Vol. 11, No. 3, pp.143-150.
- (4) T. Inoue, I. Miyamoto, K. Ono, K. Adachi, and Y. Matsumoto, 1999, "In-Process Monitoring of Penetration Depth in 20kW-class CO2 Laser Welding of Thick Section.", *Proceedings of ICALEO 1999*, Section E, pp.34-42.