

레이저 테일러드 블랭크 용접 품질 모니터링 시스템 개발

박현성, 이세현

Development of laser tailored blank weld quality monitoring system

H. Park, S. Rhee

한양대학교 기계공학부

ABSTRACT

On the laser weld production line, a slight alteration of the welding condition produces many defects. The defects are monitored in real time, in order to prevent continuous occurrence of defects, reduce the loss of material, and guarantee good quality. The measurement system is produced by using three photo-diodes for detection of the plasma and spatter signal in CO₂ laser welding. For high speed CO₂ laser welding, laser tailored welded blanks for example, on-line weld quality monitoring system was developed by using fuzzy multi-feature pattern recognition. Weld qualities were classified optimal heat input, a little low heat input, low heat input, and focus misalignment, and final weld quality were classified good and bad.

Key words : Laser welding, Monitoring, Plasma, Spatter, Keyhole, Fuzzy multi-feature pattern recognition

1. 서론

레이저를 이용하여 고속, 대량으로 용접을 하는 경우, 용접 품질을 확보하는 것이 중요하며, 레이저 용접 품질 검사 방법이 계속적으로 연구되고 있다. 특히 자동차 차체 경량화를 위해 적용되고 있는 테일러드 블랭크(tailored blank)와 같이 CO₂ 레이저를 사용하여 고속으로 용접을 하는 경우, 판재로 사용되는 박판의 상태, 레이저 출력, 보조가스의 유량, 용접속도

등 용접변수들의 변화에 의해 용접비드의 상태와 형상이 변화할 수 있으며, 이것이 용접 결함이 될 수도 있다. 또한 대량생산이 되면, 약간의 용접변수 변화는 불연속적인 비드 형상을 발생시키게 되고, 용접부의 강도가 변하게 되지만, 생산공정에서 작업자가 이를 육안으로 관측하기는 매우 어렵다. 따라서 레이저 용접을 하면서 발생하는 용접부의 결함을 실시간으로 검출해 내어야만 재료의 손실을 줄이고, 우수한 품질을 얻을 수 있다. 그러므로

용접부 품질을 판정하는 용접 품질 모니터링 시스템이 급격히 요구되어지고 있다.

레이저 용접 품질을 예측할 수 있는 방법으로는 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.

Chen 등²⁾은 용접부에서 나오는 자외선 신호와 적외선 신호를 동시에 계측하여 용접 품질을 판단하였으며, 레이저출력, 보조가스, 용접속도 등을 변화시켜 이에 따른 신호의 거동도 연구하였다. Beyer 등^{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 Miyamoto 등⁵⁻⁷⁾은 최대 파장감도가 적외선 파장대(950nm)인 포토 다이오드(photodiode) 두개를 각도를 다르게 하여 플라즈마를 계측한 후 용접 품질을 판단하는 연구를 수행하였다.

한편, 최근에는 Farson 등⁸⁾이 광신호와 음향방사 신호를 계측, ARMA모형을 사용하여 두 신호의 관계를 규명하였다.

그러나 이와 같은 신호들을 이용하여 용접부의 결함을 검출해내는 모니터링 알고리즘의 개발에 관한 연구는 많이 발표되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 자동차용 아연도금강판의 용접시 포토다이오드를 사용하여 용접속도, 레이저 출력 등의 용접변수 변화에 따른 플라즈마와 스패터를 측정, 그 신호들을 이용하여 결함을 검출해내는 알고리즘을 구성하여, 품질을 판단할 수 있는 레이저 용접 모니터링 시스템을 개발하고자 한다.

2. 플라즈마와 스패터의 계측 원리

레이저 용접에서 키홀(keyhole) 및 플라즈마는 레이저 에너지가 시편에 전달되는 과정에서 중요한 매개 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 스패터는 어느 용접에서나 그 정량적인 결과가 용접 품질에 큰 역할을 하게 된다. CO₂ 레이저 용접시에 발생하는 플라즈마의 파장범위는 190-400nm⁹⁾ 로부터 1600nm 이상의 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

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 전류신호를 전압으로 변환, 증폭하기 위한 앰프는 자외선 영역의 포토 다이오드와 적외선 영역의 포토 다이오드 각각에 적절한 회로를 구성하였다. 센서의 사양은 Table 1과 같다.

실험에 사용하는 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Specifications of the sensors

| | | |
|--|---------------|---------------|
| | UV Photodiode | IR Photodiode |
| 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 |

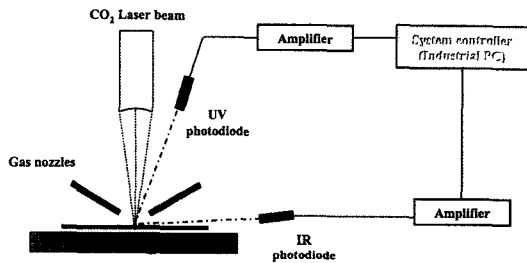


Fig. 1 : Schematic diagram of the laser weld monitoring system

UV센서의 경우에는 위쪽에 위치함으로써 키홀 내부 및 시편표면상의 플라즈마 광 강도를 함께 검출하게 된다. 본 실험에서 사용한 센서

| | Angle(°) | Distance(mm) |
|----|----------|--------------|
| UV | 73 | 260 |
| IR | 6 | 310 |

의 각도와 거리는 Table 2와 같다.

Table 2 Angle and distance of the sensors

측정된 신호를 PC로 받아들이기 위하여 데이터 획득장치(data acquisition board)를 사용하여 1000 samples/sec로 받아 저장시킨다. 실험에 사용한 레이저는 최대출력 6kW의 CW CO₂ 레이저이다.

4.퍼지 패턴인식 알고리즘

4.1 결함분류 및 판단규칙

플라즈마와 스패터의 광강도 신호는 레이저 출력, 용접속도, 시편의 상태등에 따라 신호가 변하게 된다. 맞대기(butt) 레이저 용접인 경우에 레이저 출력이 감소함에 따라서 UV, IR 센서의 신호, 모두가 감소하는 패턴을 나타낸다. 또한 맞대기용접과 상판용접(bead on plate)을 비교하여 보면, 상대적으로 같은 조건에서 상판용접의 신호가 더 크고, 균일하게 나옴을 알 수 있다. 따라서 입열량에 따라 신호가 변화와 초점이탈에 따른 신호변화에 착안하여, 기준신호에 대비한 신호의 크기를 평가하여 용접 품질을 판단하고자 한다.

본 연구에서 구성한 모니터링 시스템을 통해 판단하고자 하는 용접품질의 종류를 양호한 용접이라 할 수 있는 적정 입열(optimal heat input)과 약간의 입열 부족(little low heat input), 그리고 결함으로 분류할 수 있는 입열 부족(low heat input), 그리고 초점 이탈(focus misalignment)로 나누었다. 또한 양호한 용접이 이루어진 시편의 신호를 기준신호로 정한다. 이들 각각의 용접품질에 대비한 기준 신호와의 차이에 대한 상호 관련성은 다음과 같다.

먼저 적정 입열의 경우, 일단 시편의 뒷면까지 레이저의 입열이 전달되어 완전용입이 되기 위해서는 키홀의 크기가 적당해야 하고, 이때 측정되는 신호 또한 기준 신호와 거의 비슷한 신호가 나오게 된다.

따라서 기준신호의 위쪽이나 아래쪽으로 벗어나는 데이터의 수는 작게 된다.

약간의 입열 부족의 경우에는 용접부로 전해지는 레이저의 입열량이 적정량보다 약간 작게 되어 신호가 약간의 변동을 동반하게 되고, 기준 신호에 비해서 위쪽으로 벗어나거나, 아래쪽으로 벗어나는 신호들이 생성되게 된다. 그러나 이 경우의 용접품의 생산 적용 여부는 성형성 테스트인 에릭슨(Erichsen) 시험을 수행한 결과, 성형성에 있어서는 양호한 것으로

판명되어 최종적으로는 양호한 용접으로 결정하였다.

입열부족인 경우에는 용접부로 전해지는 레이저의 입열량이 어느 일정값 이하가 되어 용융기가 완벽하게 키홀을 형성하지 못하므로 용입이 시편의 뒷부분까지 이루어지지 못하고, 부분적으로 형성되게 된다. 이때, 신호의 변동을 동반하게 되고, 기준 신호에 비해서 일부가 위쪽으로 벗어나고, 상당히 많은 신호가 아래쪽으로 벗어나게 된다. 또한 레이저의 입열량이 상당히 줄어들어 거의 용접이 이루어지지 않은 경우에는, 측정 신호도 거의 아래쪽 기준을 벗어나게 된다.

초점 이탈의 경우에는 레이저의 초점이 정확히 용접선에 일치하는 것이 아니라, 후판 또는 박판쪽으로 치우치는 것이다. 따라서 이때는 어느 정도 상판용접의 경우와 유사하게 된다. 이 때의 신호는 UV와 IR의 신호는 키홀이 열려 아래쪽으로 누출되는 플라즈마나 스패터의 양이 없거나 줄어들므로, 전체적인 신호가 증가하게 된다.

이상의 결합분류를 정리하여 나타내면 Table 3과 같이 되고, 이것은 퍼지 패턴인식(fuzzy multi-feature pattern recognition)의 규칙베이스(rule base)가 된다.

Table 3 Relationships between weld quality and feature values

| Sensor Class | UV | | IR | |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | Upper | Lower | Upper | Lower |
| Optimal heat input | Low | Low | Low | Low |
| A little low heat input | Medium | Medium | Medium | Medium |
| Low heat input | Low | High | Low | High |
| Focus misalignment | High | Low | High | Low |

4.2 퍼지 소속함수

본 연구에서는 온라인으로 용접품질을 모니터링하기 위해서 퍼지 패턴인식을 품질 판단 모니터링 알고리즘으로 사용하였다. 기준 신호를 정하기 위하여 먼저 원하는 두께의 시편에 대한 좋은 용접품질을 얻을 수 있는 용접조건을 정한다. 본 실험에서는 1.5t와 0.7t의 아연도금강판의 이중두께 용접을 사용하였으며, 이때 가장 적정한 조건이 레이저 출력 6kW, 용접속도 7m/min의 상태였다. 정해진 적정조건에 대하여 3~6회 정도의 용접을 수행하여 그때의 각 센서에서의 신호를 받아 저장한다. 저장한 신호들을 각 신호별로 평균을 낸 후, 다시 필터링(filtering)하여 적정조건에 대한 기준 신호를 만들게 된다.

각각의 기준 신호들에 대하여 허용오차(tolerance rate)를 정하여 기준 신호에 곱한 후, 그 값들을 기준 신호에서 가감하여 허용오차 한도의 폭을 결정하게 된다. 본 연구에서는 허용오차를 0.3으로 정하였다. 결합을 판단하기 위해서는 기준 신호와 결합이 발생했을 때의 신호의 차이에 대한 정보를 퍼지화하여 주어야 한다. 이를 위해 허용한도에서 위쪽으로 벗어난 데이터의 수와 아래쪽으로 벗어난 데이터의 수에 대해 소속함수(membership function)를 정의한다.

테일러드 블랭크 공정에서는 용접된 시편의 성형성이 가장 중요한 품질 기준이 되는데 이를 위하여 에릭슨 시험시의 파단율(fracture ratio)을 통해 신호의 변화가 실제 용접품질에 미치는 영향을 알아내고자 하였다. 1.5-0.7t의 아연도금강판 용접의 경우 파단율 70%를 기준으로 양부를 판단하였다. 이는 에릭슨 테스트의 파단 형태가 용접부 혹은 열영향부에서 파단이 일어나는 것과 모재부에서 파단이 일어나는 것과의 경계점이라 할 수 있다. 모재부에서 파단이 일어나는 것은 용접부에는 문제

a가 없는 것으로 생각할 수 있기 때문에 이 점을 경계로 하였다. 따라서 각각의 신호와 에릭슨 테스트 결과를 기준으로하여 Fig. 2, Fig. 3과 같은 소속함수를 결정하게 된다.

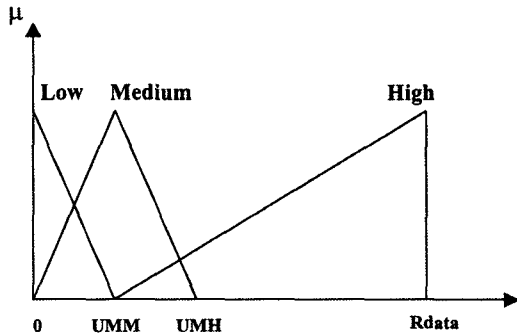


Fig. 2 Membership functions for upper data

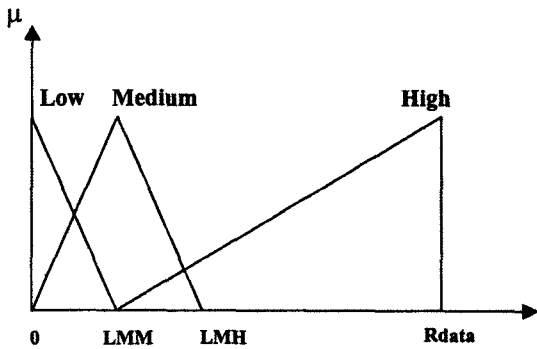


Fig. 3 Membership functions for lower data

한편, Fig. 2와 Fig. 3의 UMM, UMH, LMM, LMH는 식(1)부터 식(4)와 같으며, 이때의 F_{UMM} , F_{UMH} , F_{LMM} , F_{LMH} 는 Table 4와 같다.

- UMM = Rdata × F_{UMM} (1)
- UMH = Rdata × F_{UMH} (2)
- LMM = Rdata × F_{LMM} (3)
- LMH = Rdata × F_{LMH} (4)

여기서, Rdata는 판단하는 데이터의 수이며, F는 Rdata를 1로 정했을 경우의 비율이다.

Table 4 Factors for membership function

이 소속함수와 센서의 정확도를 나타내는

각 센서별 가중치¹⁰⁾, 그리고 이전의 규칙베이

| | UV | IR |
|-----------|-------|-------|
| F_{UMM} | 0.08 | 0.05 |
| F_{UMH} | 0.12 | 0.075 |
| F_{LMM} | 0.15 | 0.05 |
| F_{LMH} | 0.226 | 0.303 |

스를 이용하여 적정입열, 약간의 입열부족, 입열부족, 초점이탈등 각 용접품질에 대한 소속도를 구하게 된다. 이 소속도는 식(5)부터 식(8)까지와 같다.

$$\mu_{optimal} = W_{UV}(\mu_{UUL} + \mu_{ULL}) + W_{IR}(\mu_{UL} + \mu_{LL}) \quad (5)$$

$$\mu_{itte} = W_{UV}(\mu_{UUM} + \mu_{ULM}) + W_{IR}(\mu_{UM} + \mu_{LM}) \quad (6)$$

$$\mu_{low} = W_{UV}(\mu_{UUL} + \mu_{ULH}) + W_{IR}(\mu_{UL} + \mu_{LH}) \quad (7)$$

$$\mu_{focus} = W_{UV}(\mu_{UUM} + \mu_{ULL}) + W_{IR}(\mu_{UH} + \mu_{LL}) \quad (8)$$

여기서, w_{UV} 는 UV의 가중치로 0.65, w_{IR} 은 IR의 가중치로 0.35이며, 각각의 μ 는 규칙베이스에 따른 소속도를 나타낸다.

이와 같이 구한 각 용접품질의 소속도중 최고치를 나타내는 것을 현재의 용접품질로 결정하게 된다.

한편, 결함을 판단할 때에는 용접 초기와 용접이 끝나는 부분에서의 신호는 과도성으로 인한 불안정 신호가 있으므로 이를 제외시켜야 하며, 이때는 각 하드웨어의 특성을 고려하여 제거하는 신호의 수를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 500개의 과도신호를 제거하였다.

4.3 스패터 검출 알고리즘

용접에서는 일반적으로 스패터가 많이 발생하게 되면, 용접품질이 좋지 않은 것으로 간주한다. 스패터는 용융지(weld pool)로부터 어떤 원인에 의하여 용융금속의 일부가 밖으로 튀어나오는 것이다. 따라서 스패터가 발생하면 용접부가 불균일해질 가능성이 있다. 특히 스패터의 크기가 클 경우에는 실제로 용접부에 외부함몰(pit)등의 결함이 발생한다. 따라서 용

접합품을 모니터링할 때에 큰 스파터의 발생도 검출해 내야만 한다.

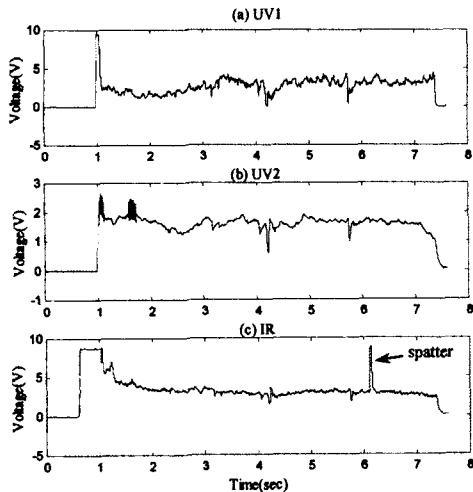


Fig. 4 Example of a spatter signals

스파터가 발생할 때는 Fig. 4에서와 같이 UV에서는 별다른 신호의 변동을 감지할 수 없으며, 적외선의 영역을 측정할 수 있는 IR센서의 신호에서만 신호의 급격한 변동이 나타난다. 스파터의 발생시에는 신호가 순간적인 펄스 신호가 나타남을 볼 수 있다. 이를 구분하기 위하여 먼저 신호처리 기법에서 사용하는 경향제거(trend removal)를 한다. 그리고 이 신호를 바탕으로 일반적으로 품질관리에서 사용되는 통계적인 제어허용오차(statistical control limit)인 3σ 를 적용하여 이 기준을 넘는 것을 스파터로 판단하게 된다. 이때 미세한 스파터는 실제 품질에 별다른 영향을 미치지 않으므로 일정시간 이상 허용오차를 넘는 것만을 스파터라 간주한다.

5. 결과 및 고찰

작성한 프로그램을 사용하여 아연도금강판에 대한 결함 판정을 수행하였다.

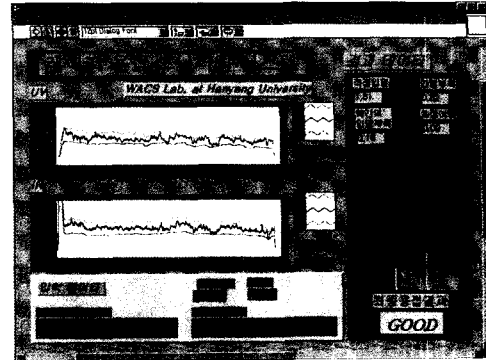


Fig. 5 Example of defect monitoring (optimal heat input)

Fig. 5는 적절한 조건에서 양호한 품질을 얻은 용접의 신호를 판정한 것이다. UV, IR의 신호 모두 위,아래의 흐린 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, 소속도는 각각 적정 입열이 1.81, 약간의 입열부족이 0.19, 입열부족이 0.82, 초점이탈이 0.00을 나타내게 된다. 가장 큰 소속도를 나타낸 것이 적정입열이므로 결과적으로

좋은 품질의 용접이 이루어졌음을 알 수 있다. 여기서 입열부족의 소속도가 높게 나온 것

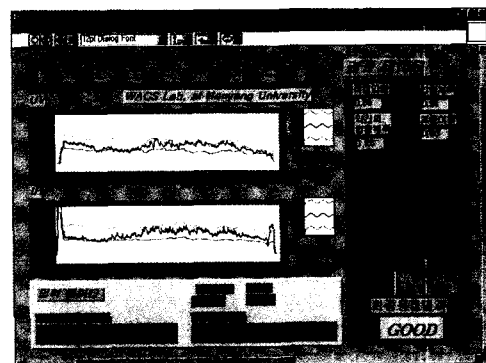


Fig. 6 Example of defect monitoring (little low heat input)

은 위쪽으로 벗어나는 것에 대한 규칙이 낮음(Low)으로 같기 때문이다.

Fig. 6은 레이저 출력이 약간 낮아졌을 경우를 판단한 것이다. 레이저 출력이 약간 줄어들어 인하여 플라즈마와 스패터의 거동에 변동(fluctuation)이 발생한다. 신호가 위, 아래의 허용범위를 일부 넘어가기 때문에 UV의 경우 위쪽 341개, 아래쪽 481개의 데이터가 벗어나고, IR역시도 일정 수준으로 벗어나게 된다. 이 경우에는 약간의 입열부족이 1.28로 가장 큰 소속도를 나타내었다. 따라서 용접 품질은 약간의 입열이 부족하지만 성형성에는 문제가 없기 때문에 좋은 용접으로 판명하게 된다.

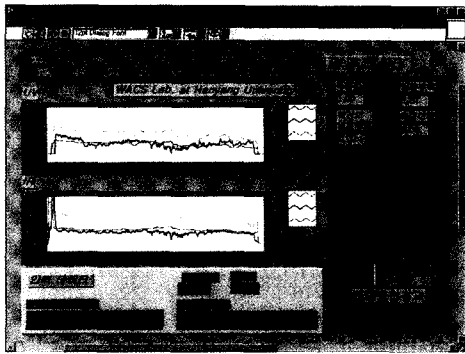


Fig. 7 Example of defect monitoring(low heat input, 4kW)

Fig. 7은 레이저 출력이 4 kW로 더욱 낮아졌을 경우를 판단한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 출력이 상당히 줄어들어 인하여 이면비드의 생성이 거의 이루어지지 않는다. 따라서 플라즈마와 스패터의 거동도 출력전압이 많이 낮아진다. 신호가 주로 아래의 허용범위를 넘어가기 때문에 UV의 경우 아래쪽으로 1764개의 데이터가 벗어나고, IR은 거의 모든 데이터인 3927개가 벗어나게 된다. 따라서 입열부족의 소속도가 1.57로 가장 높게 되고, 결과적으로는 용접 불량으로 판명하게 된다.

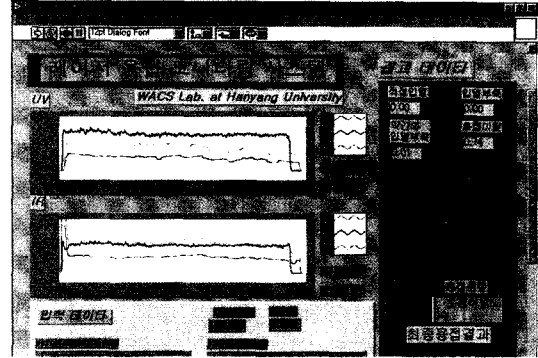


Fig. 8 Example of defect monitoring(focus misalignment)

Fig. 8은 초점이 치우친 경우의 신호를 판정한 것이다. UV와 IR의 신호는 증가하게 되어 주로 위쪽 한계를 벗어나게 된다. 따라서 초점이탈의 소속도가 0.74로 가장 높게 나와 결과적으로는 초점이탈의 용접불량이라 판정한다.

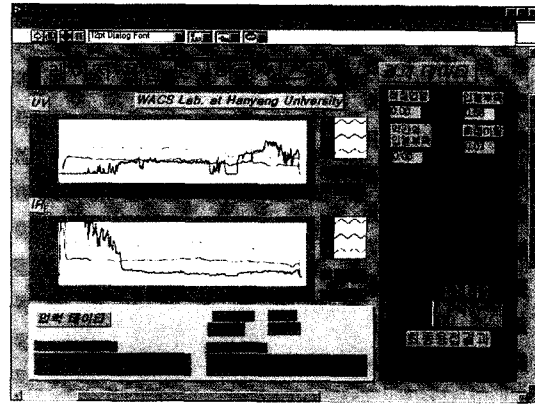


Fig. 9 Example of defect monitoring(too large gap)

Fig. 9는 알고리즘 작성시 고려하지 않았던 간극(gap)이 큰 경우이다. 맞대기 용접의 간극이 기준치보다 큰 경우 용접이 정상적으로 이루어지지 않게 되고, 그에따라 플라즈마와 스패터의 발생형태 또한 불안정하게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 신호도 불균일 하게 되고, 판단 결과도 용접불량인 입열부족으로 나타나게 된다. 따라서 본 알고리즘은 레이저 용

접시 중요한 요소중에 하나인 간극이 발생할 경우에 대해서도 추가적으로 결함의 발생여부를 판단할 수 있다.

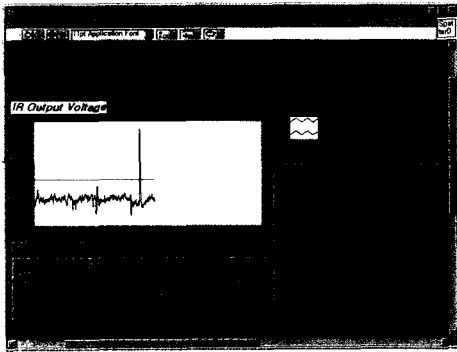


Fig. 10 Example of spatter monitoring

Fig. 10은 스패터 발생시의 판단 결과이다. 용접후 약 4.6초후에 비교적 큰 스패터가 발생하게 된다.

본 스패터 검출기는 스패터가 발생할 경우 스패터의 개수와 위치를 표시해 주게 된다. 여기서는 용접시 작점으로부터 약 286mm 떨어진 지점에서 스패터가 발생하였다.

이와 같이 아연도금 강판의 경우 퍼지 패턴 인식 알고리즘을 사용하여 레이저 출력이 변화하여 이면 비드가 제대로 생성되지 못하는 경우와 초점이 벗어난 경우, 그리고 스패터의 발생등 용접품질을 판정할 수 있었다. 본 프로그램은 아연도금 강판의 이중두께 용접을 대상으로 하였으나, 같은 알고리즘을 적용하여 기준신호만 바꾸면 냉연 강판등에도 적용할 수 있다. 또한 두께가 달라질 지라도 이 프로그램은 항상 적정조건에 대한 상대값을 가지고 판정을 하는 것이므로 다른 두께, 다른재질에도 사용할 수 있는 유연성이 강한 프로그램이다. 추후 이와 같은 모니터링 시스템을 레이저 용접비드의 형상과 크기를 예측하는 알고리즘¹¹⁾과 결합하여 구성한다면 더욱 완벽한 용접품질 모니터링 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

6. 결론

CO₂ 레이저 용접시 플라즈마와 스패터를 계측하여 모니터링 시스템을 구현한 결과, 포토다이오드를 이용하여 레이저 용접시 발생하는 플라즈마와 스패터 신호를 계측할 수 있었다. 또한 퍼지 패턴인식 기법을 활용하여 용접부의 품질을 판단할 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 이는 출력의 변화와 초점의 이탈로 생기는 용접부의 결함을 실시간적으로 모니터링할 수 있었다. 또한 스패터 검출 알고리즘을 만들어 용접 품질에 영향을 미칠 수 있는 스패터를 검출해내는 시스템을 제작하였으며, 이 두가지 알고리즘을 병합하여 테일러드 블랭크 용접의 품질 검사 시스템으로 적용할 수 있었다.

References

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, Journal of Japan Welding Society, 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, Journal of Japan Welding Society, Vol. 10, No. 2, (1992), pp. 239-245
 10. Hyunsung Park and Sehun Rhee : Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO₂ laser welding of galvanized steel, Optics & Laser Technology, Vol. 31, No. 2, (1999), pp.119-126
 11. Hyunsung Park, and Sehun Rhee : Estimation of weld bead size in CO₂ laser welding by using multiple regression and neural network, Journal of Laser Applications, Vol. 11, No. 3, (1999), pp.143-150