

레이저 용접에서 용접 공정 모니터링 기술

박영환

Weld Process Monitoring Technology in Laser Welding

Young Whan Park

1. 서 언

레이저(Laser)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 의 첫 머리 글자를 딴 단어로 복사의 유도방출에 의한 빛의 증폭현상이라는 의미를 갖는다. 레이저는 단색광, 평행광, 직진성, 가간섭성을 갖는 품질이 매우 높은 빛 에너지로서 집광하기 쉬운 특성을 가지므로 높은 에너지 밀도를 갖을 수 있다. 이를 이용하면 고밀도의 열원으로 용접을 비롯한 다양한 재료 가공에 사용이 가능한 특징을 갖는다¹⁾.

레이저를 용접의 열원으로 사용하면 높은 에너지 밀도의 점 열원을 이용한 용접으로 용접 품질이 우수하고, 가공속도가 매우 빠르며, 철강재, 알루미늄 및 마그네슘 합금, 플라스틱과 이종 접합 등 다양한 소재에 적용가능하기 때문에 많은 산업현장에서 사용되고 있다.

레이저 용접에서 용접부 품질 향상을 위하여 용접 공정을 모니터링 할 수 있는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다²⁾. 하나는 용접 전에 용접되는 재료 및 시스템의 상태를 감시하는 것이다. 두 번째는 용접 중에 발생하는 다양한 현상을 모니터링 하는 것으로 레이저 용접시 발생하는 다양한 현상을 이에 맞는 센서를 이용하여 계측하는 방법이다. 세 번째로는 용접 후 용접부의 결합 등을 모니터링 하는 것으로 접된 부위의 형상, 기공 등에 의한 불량 등을 외관검사 및 비파괴검사를 통해 검출하게 된다.

레이저 용접의 모니터링 기술은 크게 2가지 부분으로 구성된다. 하나는 다양한 센서를 이용한 하드웨어 시스템의 개발이며, 다른 하나는 계측된 신호 혹은 데이터를 이용하여 품질평가 혹은 용접부의 기계적 혹은 형상적 특성과 매칭시키는 기술이다. 본 논문에서는 레이저 용접의 모니터링 기술과 이를 활용한 데이터 처리 기술에 대하여 논하고자 한다.

2. 레이저 용접 모니터링 기법

2.1 음향신호를 이용한 모니터링

레이저 용접에서는 다양한 현상들이 발생한다. 대표적인 현상으로, 소리 (sound), 음향 (acoustic), 그리고 빛의 방출, 화상 (image), 플라즈마에 의한 용접부 주변의 전하의 변동 등이 있으며, 이러한 현상은 다양한 센서를 이용하여 계측한다³⁻⁵⁾.

음향신호를 이용하여 모니터링 하는 방법은 Fig. 1과 같다. 용접시 발생하는 신호중에서 소리 혹은 음파는 마이크로 폰을 이용하여 계측을 한다. 계측의 방법에 있어서 용이하며, 레이저의 가공 특성과의 밀접하게 관련되어 있어 모니터링에 쉽게 적용될 수 있다. 그러나 주변의 소음에 민감하게 작용하며, 노이즈나 외란 인자에 의한 잡음 신호의 발생이 쉬어 용접부 주변의 상황을 제어할 수 있는 공간에서 사용할 수 있다.

또 다른 모니터링 기법으로는 음향 방사를 계측하는 방법으로 레이저 용접시 발생하는 상변화, 기홀의 변동, 플라즈마 증기압 변동에 의해 발생하는 음향신호 혹은 스트레스 웨이브 (stress wave)의 변화를 계측하는 방법이다. 이러한 신호는 주로 음향방사 트랜스듀서 (acoustic emission transducer)를 이용하여 계측한

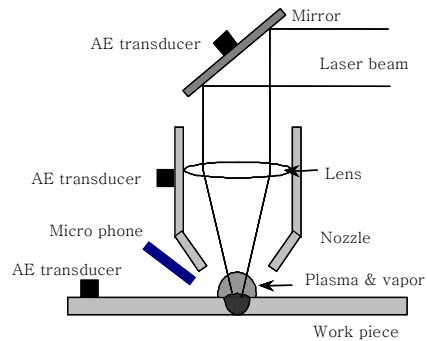


Fig. 1 Acoustic/sound emission detection method

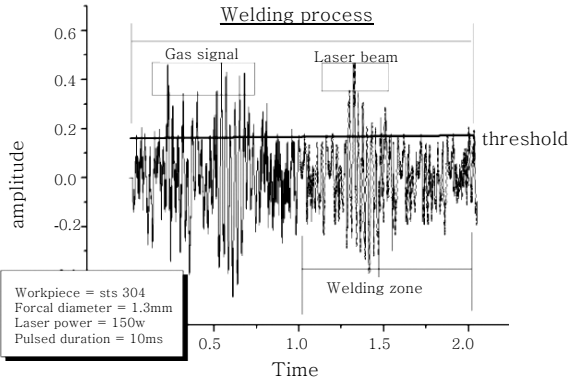


Fig. 2 Examples of Acoustic emission signal by AE transducer

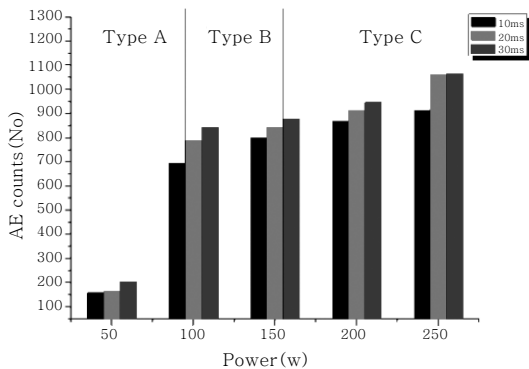


Fig. 3 Relation between AE count at high frequency (100~500Hz) and weld bead quality

다. 계측하는 위치는 주로 용접하는 재료, 보호가스 노즐이나 반사경 위 등에서 계측을 수행한다. 재료에서 직접적으로 계측하는 경우는 재료의 상변화를 그대로 계측하기 때문에 균열(crack), 용입 부족 등과 같은 결함을 정확하게 계측할 수 있지만 접촉식이라는 한계가 있다. 그리고 가공물의 상단 주변 예를 들면 보호가스 노즐이나 반사 거울에 부착하여 계측 방법은 키흔의 압력 변화에서 발생하는 신호를 계측하는 방법이다. 이 방법은 신호가 매우 미약하고, 재료와 센서간의 거리가 멀면 계측신호의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 2는 STS 304 0.2t에 대하여 350W급 Nd:YAG 레이저를 이용하여 출력과 pulse duration을 변화시키면서 용접하였을 때 방사되는 AE 신호의 예이다. 계측된 원 데이터를 바탕으로 다양한 신호처리 기법을 이용하여 변환하여 용접부의 특성과 비교함으로써 신호의 특성에 따른 용접부 품질을 유추할 수 있다. Fig. 3에서는 용접부의 특성을 Type A, B, C로 나누고 A는 용접이 이루어지지 않은 경우, B는 열변형 없이 용접 비드가 형성된 경우, C는 열변형이 있는 경우로 분

류하였다. 이 결과를 AE 신호의 FFT (fast fourier transformation)을 수행하여 100에서 500Hz의 신호와 용접 특성과를 비교하였다⁶⁾.

2.2 광신호를 이용한 모니터링

레이저 용접에서 발생하는 현상 중에는 용접중 발생하는 광신호를 계측하는 방법도 있다. 일반적인 레이저 용접에서 빛을 계측하는 방법은 크게 2가지 방법으로 나뉘는데 하나는 특정 파장 혹은 전체 파장에 대한 데이터를 얻는 방법이며 이것은 주로 포토다이오드나 분광기를 이용한다. 다른 하나는 영상신호를 얻는 방법으로 CCD 혹은 CMOS 카메라를 비롯한 각종 카메라를 이용하여 레이저 가공공정을 모니터링 하는 방법으로 계측 방법은 Fig. 4와 같다. 레이저 가공 시 발생하는 빛은 플라즈마와 용융된 재료의 온도에 의해 방출되는 빛이며 이것은 레이저 용접의 상태와 키흔 및 용융풀의 거동과 매우 밀접한 관계를 가지고 있어 일반적인 레이저 용접 모니터링 방법으로 주로 이용된다⁷⁾.

Fig. 5⁸⁾는 Nd:YAG 레이저 용접에서의 빛의 발광 스펙트럼과 이를 계측하기 위한 센서의 종류를 나타내

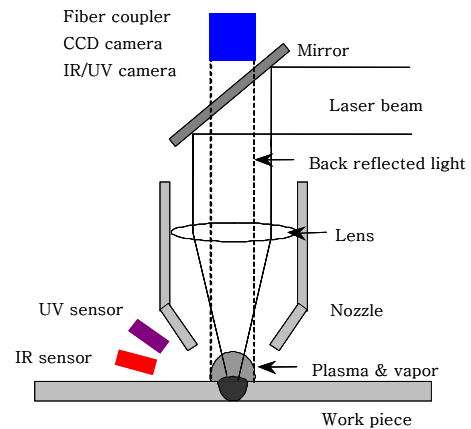


Fig. 4 Light and image detection method

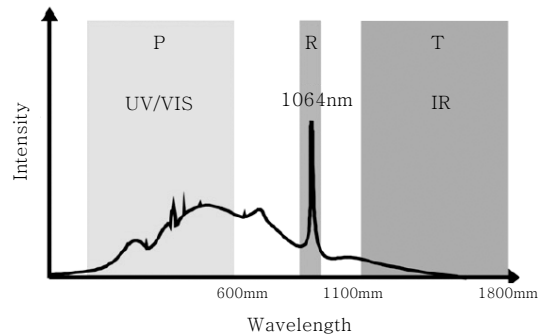


Fig. 5 The spectral range of photodiode sensor in Nd:YAG laser welding for monitoring

고 있다. 레이저 용접의 모니터링은 주로 플라즈마와 용융금속의 온도계측을 위한 센서들이 주로 사용된다. 플라즈마는 고온으로 UV(Ultra-violet) 혹은 가시광선 영역의 빛이 발생되기 때문에 이에 맞는 센서가 이용되며, Fig. 5에서는 P 영역의 반응 파장을 갖는 센서를 이용한다. 주로 플라즈마 플룸과 키홀의 거동을 계측할 수 있다. T 영역의 센서는 적외선 영역에서 방출되는 빛을 계측하는 센서로 주로 용접부의 평균 온도를 측정할 수 있다. R 영역의 센서는 키홀이나 용융풀의 거동 보다는 용접시 모재로부터 반사되는 레이저 빛을 계측하는 센서이다. 레이저 용접 모니터링에 있어서 특정 영역의 빛을 받기위하여 광학 필터 혹은 빔 스플리터(beam splitter)의 설계 혹은 효과적인 수광을 위한 렌즈 등의 광학계 설계가 요구된다.

Fig. 6은 플라즈마 계측을 위한 센서 신호와 이에 따른 비드의 형상을 보여주고 있다⁹⁾. 실험에 사용된 레이저는 6 kW, CO₂ 레이저 이며, 사용된 재료는 아연 코팅된 강판으로 겹치기 용접을 수행한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 용접시 기화된 증기가 용융부를 통해 배출됨으로 인해 험핑 형태의 비드가 형성되었으며, 이때 플라즈마 계측 신호의 원 신호와 0.05초 간격의 RMS 신호를 동시에 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 험핑 비드가 발생할 때와 안정적인 비드가 형성될 때는 다른 형태의 신호가 얻어지는 것을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 험핑비드 구간에서는 신호가 급격히 떨어지고, 이에 따라 RMS 값 역시 적어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 AA5182 알루미늄 1.4t 판재에 5356 용가와이어를 공급되는 공정에 대하여 용접 조건에 따른 광신호의 평균값의 변화를 보여주고 있다¹⁰⁾. 광신호의 평균값은 플라즈마의 광강도를 나타내며, 광신호의 분산값은 플라즈마 혹은 키홀의 안정도와 밀접하게 관련

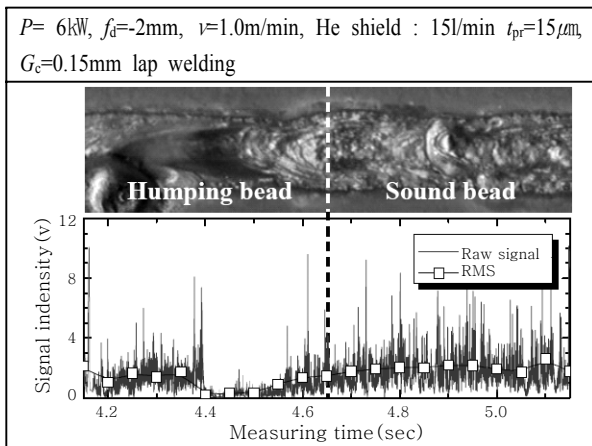


Fig. 6 Sensor signal and humping bead shape

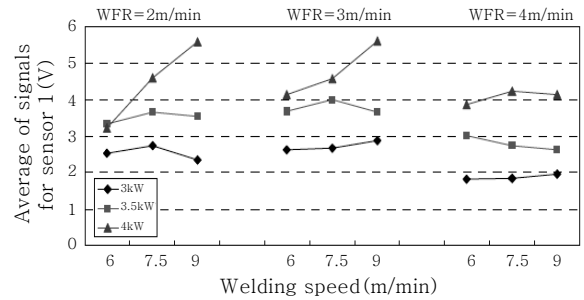


Fig. 7 Average of sensor signal according welding conditions in 5000 series aluminum laser welding with filler wire

된다.

이와 같이 용접시 발생하는 광신호를 계측하는 방법은 다양한 파장 영역대의 포토다이오드를 이용함으로써 많은 정보를 쉽고 싸게 얻을 수 있다는 장점이 있지만 용접부 내부에 발생하는 결함은 검출하기 어려운 단점이 있다.

2.3 카메라를 이용한 모니터링

카메라를 이용한 레이저 용접 모니터링을 하는 방법은 용접부 외부에서 카메라를 설치하여 용접부를 관찰하는 방법과 레이저와 동축으로 관찰하는 방법으로 나뉜다. Nd:YAG 레이저를 이용한 용접의 경우는 Fig. 8¹¹⁾과 같이 빔 스플리터를 이용하여 쉽게 동축으로 모니터링 할 수 있다. 이 경우 모니터링 카메라가 헤드내부에 장착되어 작고 쉽게 영상을 얻을 수 있으나 Nd:YAG의 1046 nm 파장을 제거하는 필터가 요구된다. CO₂ 레이저를 이용하여 용접하는 경우 빔 전송이 주구리 미러를 이용하기 때문에 동축으로 모니터링하기 어렵다. 이런 경우는 카메라를 외부에 설치하여 모니터링하며 이 경우 설치가 쉽고 편리하나 용접부와 계측 지점과의 각도에 의해 영상의 보정이 필요하다.

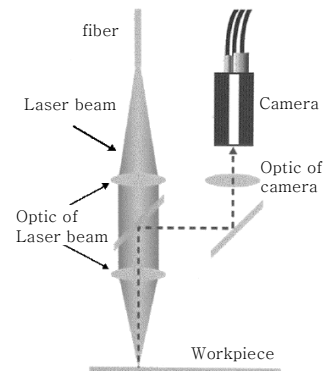


Fig. 8 Co-axial monitoring system for Nd:YAG laser welding

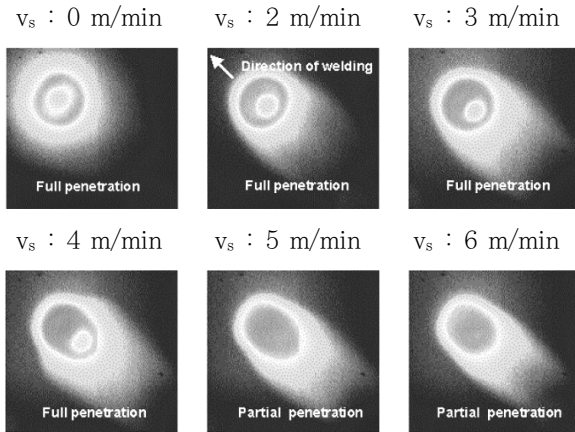


Fig. 9 Weld pool monitoring image using CMOS camera¹¹⁾

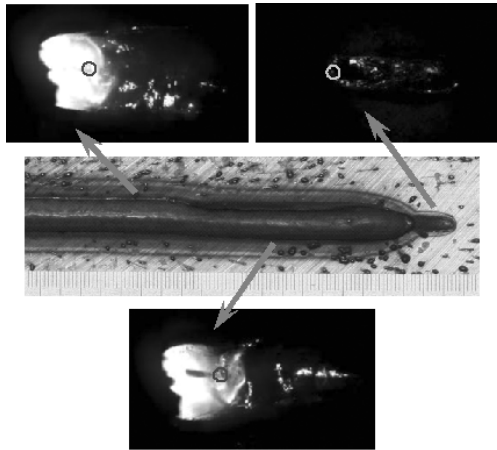


Fig. 10 Weld monitoring system in laser-arc hybrid welding

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 동축 모니터링 기법을 이용하여 3 kW Nd:YAG 레이저로 다양한 속도에 따라 모니터링을 수행한 결과이다¹¹⁾. 그림에서 보는 바와 같이 용접속도가 0 m/min인 경우는 용융풀과 키홀이 관찰되며, 용접 속도가 증가함에 따라 키홀의 밀면이 점점 뒤로 이동하는 것을 알 수 있다. 위의 실험 결과에서는 키홀의 밀면이 보이지 않는 경우에서 불완전 용입으로 판단하였으나, 다른 연구에 의하면 속도 증가에 의해 키홀의 밀면이 관찰되지 않아도 완전 용입이 형성된다고 보고되고 있다¹²⁾.

Fig. 10은 레이저 아크 하이브리드 용접에서 동축 모니터링 시스템을 이용한 결과이다. 초기 레이저만 조사되어 용접되는 경우와 중간 부분에서 아크가 형성되었으나 용적이행이 불안정한 상태, 그리고 후반부에서 안정된 아크의 형성과 키홀이 관찰되는 것을 볼 수 있다¹³⁾.

카메라를 이용하는 모니터링 하는 경우 일반적인 CCD (charge coupled device)는 초당 30 프레임

(frame)까지 측정이 된다. 이 경우 키홀이나 용융풀의 빠른 움직임을 관찰 할 수 없는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 고속 카메라를 이용하기도 하지만 실시간으로 그 결과를 보기 힘들고 많은 영상 이미지에 의해 데이터 처리에 시간이 오래 걸린다. 그리고 적외선 (infrared: IR) 카메라나 자외선 (ultraviolet: UV) 카메라를 이용하는 방법은 그 가격이 매우 비싸다는 단점이 있다.

2.4 분광분석을 이용한 모니터링

이외의 방법으로는 레이저 재료 가공시 발생하는 빛을 파이버 커플러 (fiber coupler)로 집광 및 전달하고 분광기 (spectrometer)를 이용하여 계측 하는 방법도 사용된다¹⁴⁾. Fig. 11은 CO₂ 레이저를 이용한 스테인레스 파이프 용접에서 발생하는 분광학적 특성으로 특정 스펙트럼선의 경우 금속원자의 여기에 의해서 발생되는 것이다¹⁵⁾. 이와 같이 분광기를 통해 얻어지는 정보는 용접시 플라즈마에서 여기되는 금속원자의 분석에 주로 사용된다. 그리고 특정 파장에서 시간에 따른 데이터 확보를 통하여 용접부의 품질을 예측하는 연구도 수행되고 있다¹⁴⁾. 분광기를 이용한 모니터링은 가격이 매우 비싸고, 샘플링 속도의 한계가 있다.

3. 모니터링을 이용한 품질 예측 기술

레이저 용접을 앞 장에서 기술한 다양한 기법을 이용하여 모니터링을 수행한다. 이러한 모니터링 신호는 용접부의 품질과 매우 밀접하게 관련되어있다. 그러므로 많은 연구자들이 모니터링 신호와 용접부 품질과의 매핑 기술을 이용하여 그 연관성을 찾고자 노력하고 있다.

Fig. 12는 DP 980 1.5t의 겹치기 레이저 용접에서 용접시 발생하는 소리신호를 계측하여 용입 깊이를 신경회로망을 이용하여 예측한 것이다. 9.97%의 평균 오

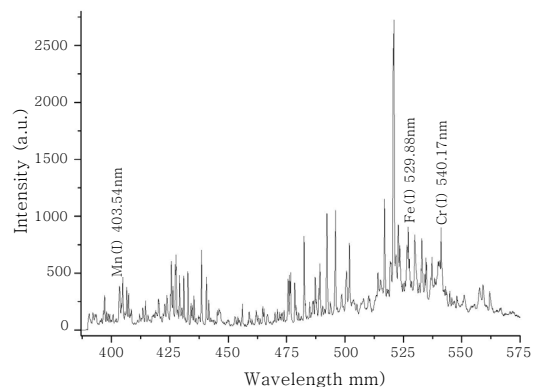
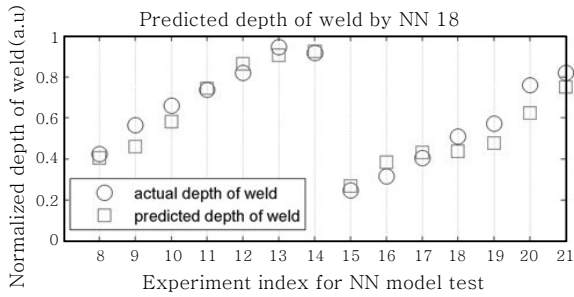
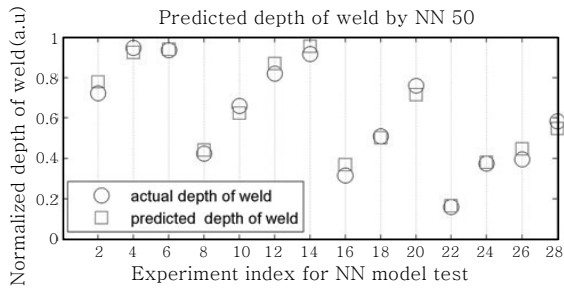


Fig. 11 Spectroscopic spectrum for light emission of plasma



(a) result from NN 18



(b) result from NN 50

Fig. 12 Weld penetration estimation using acoustic signal and neural network

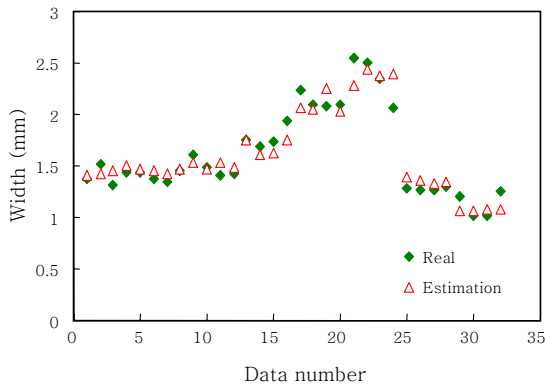


Fig. 13 Bead shape estimation using light signal and multiple regression analysis

차이를 갖는 예측성능을 가지고 있다¹⁶⁾.

Fig. 13은 6kW급 CO₂ 레이저를 이용하여 GA 강판 1.5t에 대하여 용접한 것을 2개의 각도가 다른 UV 포토다이오드와 1개의 IR신호를 이용하여 모니터링한 센서 신호를 이용하여 용접부 비드의 폭을 예측한 것이다. 예측을 위해서 사용된 방법은 다중 회귀모델을 사용한 것으로 예측성능이 우수한 것을 알 수 있다¹⁷⁾.

Fig. 14는 Disk 레이저를 이용한 알루미늄 판재의 레이저 용접에서 발생하는 플라즈마를 가시광선 영역의 포토다이오드를 이용하여 모니터링하고, 이를 이용하여 용접부 품질을 예측한 프로그램의 예이다. 적정 용접조건에서 얻어지는 플라즈마의 광강도를 이용하여 기준신

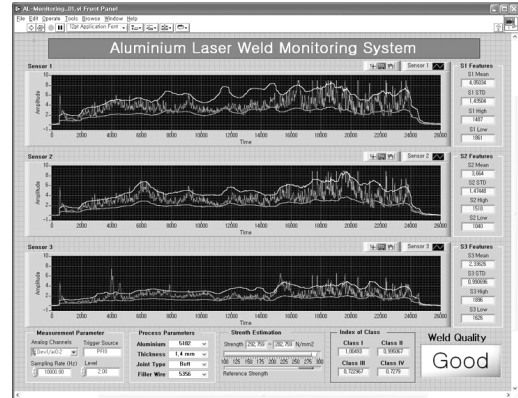


Fig. 14 Example of weld quality estimation program in aluminum laser welding

호의 상한과 하한을 작성하고, 새로운 용접 신호가 들어왔을 때, 얻어지는 신호의 패턴을 기준 신호와 비교하여 용접부의 품질을 판단하는 것이다. 패턴을 분석하는 방법으로는 퍼지 패턴 인식 기법을 이용하였다¹⁸⁾.

레이저 용접에서 용접 시스템에 대한 하드웨어적 모니터링 시스템을 구성하는 것도 매우 중요하다. 그뿐만 아니라 얻어진 다양한 신호들을 분석하여 용접 현상을 이해하고, 신호 처리 혹은 화상 처리 과정을 거쳐 우리가 원하는 정보를 찾아내느냐 또한 매우 중요하다. 이러한 소프트웨어적인 해석 및 평가 방법에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 한다.

4. 결 론

레이저 용접은 자동차, 전자, 조선, 철강 등 다양한 산업현장에서 사용되고 있다. 사용되는 범위가 넓어질 수록 품질 관리 및 용접부의 신뢰성 확보는 더욱 더 큰 이슈로 되고 있다. 이에 따라 레이저 용접 모니터링 기술에 대한 요구는 한층 더 높아지고 있으며, 이에 따라 산, 학, 연에서 그 중요성과 연구의 필요성이 제기되고 있고 또한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 모니터링 기술의 산업적 적용과 생산 현장에서의 활용을 통해 레이저 용접의 생산성과 경쟁력, 용접의 신뢰성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. J. F. Ready and D. F. Farson : LIA Handbook of Laser Material Processing, Laser Institute of America, 2001, 361-423
2. Kyoung-Don Lee : Quality Monitoring System for Tailored Blank Welding, Journal of KWS, **18-3** (2000), 32-40 (in Korean)
3. A. Sun, E. Kannatey-Asibu, Jr. and M. Gartner :

- Sensor System for Real-time Monitoring of Laser Weld Quality, *Journal of Laser Applications*, **11-4** (2001), 153-168
4. D. Farson, A. Ali and Y. Sang : Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration, *Welding Journal*, **77-4** (1998), 142s-148s
 5. 대한용접학회편 : 용접·접합 편람 III 공정 및 열가공, 대한용접학회, 2007, 150-152 (in Korean)
 6. S. H. Lee, J. U. Choi and J. E. Choi : Acoustic Emission Monitoring during Laser Spot Welding of Stainless Steel Sheets, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, **22-4** (2005), 60-67 (in Korean)
 7. J. D. Kim : Fundamental Study on the Weld Defects and Real-time Monitoring Method, *Journal of KWS*, **20-1**, (2002), 26-33 (in Korean)
 8. I. Eriksson, J. Powell and A. F. H. Kaplan : Signal Overlap in the Monitoring of Laser Welding, *Measurement Science and Technology*, **21-10** (2010), 1-7
 9. J. D. Kim and C. J. Lee : A Study on Characteristics of Plasma Emission Signals with Welding Conditions in CO₂ Laser, *Transactions of the KSME A*, **33-11** (2009), 1256-1261 (in Korean)
 10. Y. W. Park and S. Rhee : Monitoring of Laser Material Processing and Developments of Tensile Strength Estimation Model Using Photodiodes, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, **17-1** (2008), 98-108 (in Korean)
 11. J. Beersiek : A CMOS Camera as a Tool for Process Analysis not only for Laser Beam Welding, *Proceedings of ICALAO 01*, (2001), F 206
 12. J. H. Kim, C. H. Kim, J. H. Kim and S. Rhee : Coaxial Monitoring during Laser Lap Welding, *Proceedings of the KSME 2007 Spring Annual Meeting*, 241-245 (in Korean)
 13. Y. W. Park, S. Rhee and C. H. Kim : Development of Coaxial Monitoring System in Laser Arc Hybrid Welding for Automotive Body Application, *Journal of KWS*, **27-6** (2009), 587-594 (in Korean)
 14. S. Palanco, M. Klassen, J. Skupin, K. Hansen, E. Schubert, G. Sepold and J. J. Laserna : Spectroscopic Diagnostics on CW-laser Welding Plasmas of Aluminum Alloys, *Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy*, **56-6** (2001), 641-659
 15. A. Ancona, T. Sibillano and P. M. Lugara : Optical Plasma Spectroscopy as a Tool for Monitoring Laser Welding Processes, *Journal of Achievements in Materials and MAnufacturing Engineering*, **31-2** (2008), 402-407
 16. W. Huang and R. Kovacevic : A Neural Network and Multiple Regression Method for the Characterization of the Depth of Weld Penetration in Laser Welding Based on Acoustic Signatures, *Journal of Intelligent Manufacturing*, **22-2** (2011), 131-143
 17. H. Park and S. Rhee : Estimation of Weld Bead Size in CO₂ Laser Welding by Using Multiple Regression and Neural Network, *Journal of Laser Application*, **11-3** (1999), 143-150
 18. Y. W. Park and D. Kim : Optimization of Laser Welding Parameters in Aluminum Alloy Welding and Development of Quality Monitoring System for Light Weight Vehicle, *Materials Science Forum*, **706-709** (2012), 2998-3003



- 박영환 (朴永煥)
- 1972년생
- 국립부경대학교 기계공학과
- 레이저 용접, 용접공정 및 자동화
- e-mail : parkyw@pknu.ac.kr