

자동차용 고장력 TRIP강의 레이저 용접부 모니터링 및 품질 분류에 대한 연구

A study on monitoring and classification of laser weld quality in high tensile TRIP steel for car body

한양대학교 정밀기계공학과 박영환
기아자동차 차체생기팀 박현성
한양대학교 기계공학부 이세현

I. 서론

전 세계적으로 환경 보호에 대한 관심이 높아지고 있으며 그로 인해 세계 환경기구와 같은 단체에서는 차량용 배기가스의 규제가 심해지고 있다. 그러므로 전 세계의 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. 그러므로 많은 연구자들이 레이저 용접의 용접 모니터링의 기법을 제시하였다. 일반적인 모니터링 방법으로는 레이저 용접시 발생하는 음향방출, 소리, 광신호^{1,2,3)}와 같은 신호를 계측하여 다양한 알고리즘^{4,5,6)}을 이용하여 용접부 형상을 예측하거나 품질을 판단하는 기술이 개발되었다.

본 연구에서는 고장력강인 TRIP강의 레이저 용접시 발생하는 광신호를 계측할 수 있는 시스템을 구축하였고, 이를 통해 용접부 품질과 광신호와의 상관관계를 밝히며, 이를 뉴로-퍼지 알고리즘을 이용하여 용접부 품질을 분류하였다.

II. 실험방법

레이저 용접의 현상을 계측하기 위한 레이저 용접 시스템 및 모니터링 시스템은 Fig. 1과 같다. 모니터링 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. Wein의 변위법칙과 기존의 논문⁷⁾에 의하여 용접시 발생하는 플라즈마와 용융금속을 계측하기 위한 센서로는 자외선 영역대의 UV센서와 적외선 영역대의 IR센서가 사용되었다. UV센서는 플라즈마의 광강도를 계측하기 위한 것이고, IR센서는 용융금속과 스패터의 광강도를 계측하기 위한 것이다.

실험에 사용된 레이저는 3kW급 CO₂ 레이저로 TEM₀₀ 모드를 사용하였다. 발전기의 출력 방

법은 CW 모드이고 보조가스는 아르곤(Ar) 가스를 유량 15 ℓ/min로 하여 실험을 수행하였다.

실험조건으로는 용접속도를 2 m/min, 3 m/min, 4 m/min, 6 m/min, 8m/min의 5개 수준으로 나누어 실험을 실시하였다. 이 경우 각 조건의 단위 길이 당 입열은 각각 90 J/mm, 60 J/mm, 45 J/mm, 30 J/mm 그리고 22.5 J/mm이다. 용접시편으로는 TRIP ZnFe 도금강 1.2t를 이용하였고, 용접부 길이는 280 mm이었다. 용접방법은 맞대기 용접을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

Fig. 2에서는 TRIP ZnFe강의 인장시험의 결과이고 Fig. 3는 용접 속도에 따른 전면비드와 이면비드의 폭을 측정한 결과이다. TRIP ZnFe강의 경우 용접속도가 2, 3, 4 m/min에서는 모재에서 파단이 일어났고, 6와 8m/min에서는 용접부에서 파단이 발생하였으며, 용접부의 투입 입열이 작아짐으로 인해서 비드폭이 작아지고 있음을 알 수 있다.

위의 실험에서 나타난 각 센서의 계측신호는 입열이 큰 경우는 발생하는 플라즈마와 스패터의 광량이 많아지므로 센서에서 계측되는 전압신호가 높고 안정적이었다. 그러나 용접속도가 빨라지면 입열이 작아지므로 발생하는 광량이 줄고 키홀이 불안정하며 이로 인해 용접부의 용융금속이 불안정하기 때문에 발생하는 각 신호의 평균값이 작아지고 표준편차는 커진다. 그러므로 센서의 신호는 용접부의 키홀의 상태와 용융금속 및 스패터의 상태를 잘 표현하고 있고 이를 이용하여 용접부의 인장강도와 비드폭과는 큰 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

IV. 용접부 품질 분류 알고리즘

본 연구에서는 TRIP강의 레이저 용접에 대해 용접품질을 나타낼 수 있는 인장강도와 비드형상에 대한 예측 모델을 인공신경회로망으로 제시하고, 이를 퍼지 추론의 기법을 사용하여 용접품질을 정량적으로 판단하고 분류하는 알고리즘을 제시하였다. Fig. 4는 본 알고리즘에 대한 흐름도이다.

레이저 용접부의 용접부 특성을 모니터링 시스템의 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. 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.

예측된 인장강도 값과 이면비드를 이용하여 용접품질을 분류하기 위해서 퍼지 추론이론을 이용하였다. 이를 위하여 퍼지 추론시스템의 입력변수를 퍼지화하였다. 각 함수의 조합에 따라 용접품질을 7가지로 분류하였다. 분류된 Class와 각 함수와의 관계는 Table 1와 같으며 이것은 퍼지 규칙 베이스 (fuzzy rule base)가 된다. Class I, II, III은 인장강도 혹은 이면비드의 크기가 양호한 상태로 좋은 용접을 나타내며 나머지의 Class는 인장강도가 약하거나 이면비드의 크기가 약하여 용접 후 충분한 강도나, 비드형상의 불완전함이 발생한 경우로 나쁜 용접을 나타낸다.

신경회로망의 결과값을 퍼지 소속함수에 의해 소속함수 값을 구한다. 그리고 퍼지 룰베이스

에 의해 정의된 퍼지 소속함수를 이용하여 각 Class의 소속도를 구하게 된다. 각 Class의 소속도는 식(1)에 의해 구한다.

$$\mu_{class} = (w_L \ w_W) \cdot \begin{pmatrix} \mu_L \\ \mu_W \end{pmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 뒤의 행렬은 예측된 인장강도와 비드폭에 대한 소속함수의 값이고, 앞의 행렬은 퍼지 소속함수에 대한 가중치 배열(weight matrix)이다. 각 Class의 소속도 중에서 가장 큰 값을 용접품질의 Class로 분류한다.

Fig. 5는 위의 알고리즘을 이용하여 품질을 분류 용접부 품질을 판단하는 프로그램의 예이다. 그림은 Class II의 경우로서 인장강도의 값은 좋으나 이면비드 폭이 약간 부족한 경우이다. Fig. 5에서 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 Class의 소속도는 그 옆에 나타나 있으며 최종 용접품질이 하단 오른쪽에 표시되어 있다. 각 Class의 소속도 중에서 Class II의 소속도가 가장 높으며 최종 용접결과는 좋은 것으로 판단하였다.

V. 결론

레이저 용접시 발생하는 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 뉴로-퍼지 추론 알고리즘을 구성하였다. 최종적으로 분류된 품질의 Class를 이용하여 용접부의 결과를 판단하는 프로그램을 구현하였다.

VI. 참고문헌

1. M. C. Jon : Noncontact Acoustic Emission Monitoring of Laser Beam Welding, *Welding Journal* 63 (9), pp. 43s-48s, (1985)
2. 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)
3. D. Farson, A. Ali, Y. Sang : Relationship of Optical and Acoustic Emission to Laser Weld Penetration, *Welding Journal* 77 (4), pp.142s-148s, (1998)
4. 박현성, 이세현, 정경훈, 박인수 : 고풍력 CO₂ 레이저 용접시 포토 다이오드를 이용한 플라즈마와 스펙터 모니터링, *한국레이저가공학회지* 2 (1), pp. 30-37, (1999)
5. H. Park, S. Rhee : Development of a weld quality monitoring system in CO₂ laser welding by using photodiode, *Journal of Laser Applications* 13 (1) pp.12-18, (2001)
6. 이종명 : 색변조 기술을 이용한 레이저 가공공정 모니터링 시스템, *한국레이저가공학회지* 4 (2), pp.29-38, 2001
7. M. Ono, K. Nakada, S. Kosuge, : An Investigation on CO₂ Laser-Induced Plasma, *Journal of Japan Welding Society* 10 (2), pp. 239-245, 1992.

Table 1 Weld quality classification

Class	Tensile Strength	Bead Width	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	

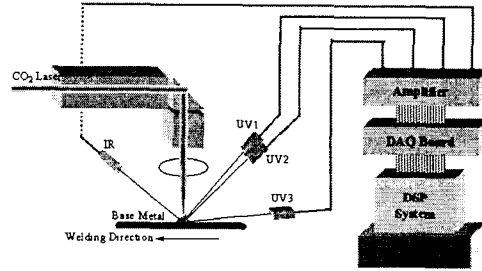


Fig. 1 Schematic diagram of monitoring system

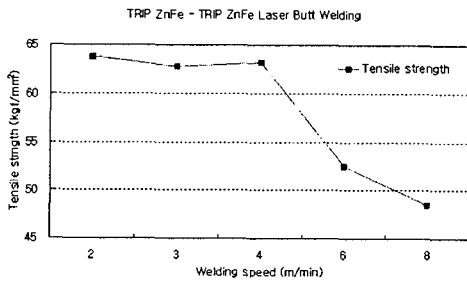


Fig. 2 Results of tensile test

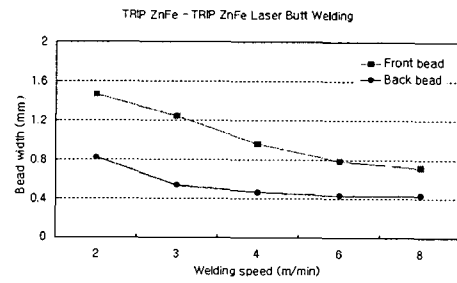


Fig. 3 Bead width according to welding speed

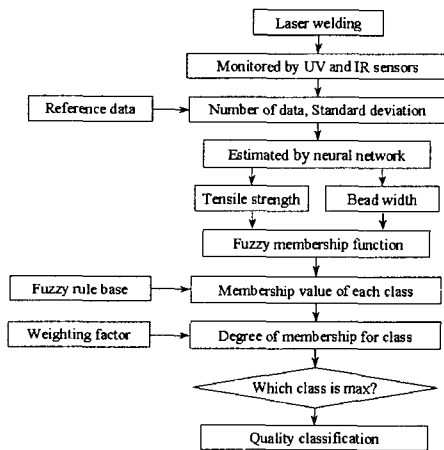


Fig. 3 Flow chart of classification process

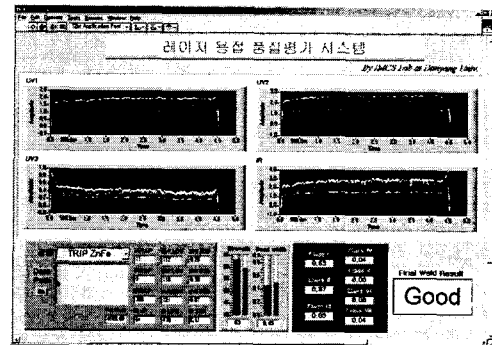


Fig. 5 Example of classification program (class II)