

GMAW에서 아크 빛을 이용한 실시간 용접품질 모니터링에 관한 연구

조택동* · 양상민**

* 충남대학교 공과대학 기계설계공학과
** 충남대학교 공과대학 대학원 기계설계공학과

A Study on On-Line Quality Monitoring Using Arc Light in Gas Metal Arc Welding

Taik Dong Cho* and Sang Min Yang**

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea
** Mechanical Design Engineering, Graduate School of Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

Abstract

Gas metal arc welding(GMAW) is regarded as one of the best candidate for welding automation in industrial joining application. It is important to monitor the weld quality for the high performance weld automation. In GMAW, weld quality is closely related to arc stability especially. In this paper, arc light signal is measured and spectrum analyzed to detect the variation of the weld quality. The FFT of the signal showed that the amplitude variance of FFT power spectrum was very large in poor weld process such as the decrease of weld bead width and height. The results show that it is possible to detect the weld defect position in weld process.

(Received April 17, 2000)

Key Words : Fast fourier transform, Signal processing, Weld quality control, Gas metal arc welding(GMAW), Arc voltage signal, Arc light sensor

1. 서 론

용접자동화를 수행하기 위해서는 용접선 추적과 더불어 용접품질을 모니터링 하는 것이 중요하다. 용접 품질은 용접이행과정과 아크의 안정성이 중요 요인으로 용접전압, 용접전류, contact tip과 모재사이의 거리 그리고 와이어 송급속도 및 차폐가스(shield gas) 등이 영향을 미친다. 용접전압 및 전류 신호의 균일성은 아크의 안정성을 보장할 것이고 이는 용접의 품질의 균일성을 수반할 것이다. 기존의 연구에서 용접 중 이러한 신호의 특성을 해석하여 용접 품질의 모니터링을 수행하여 왔다.

용접품질을 실시간 모니터링하는 방법으로는 카메라

를 이용하여¹⁾ 용접비드의 폭을 측정하거나 적외선 센서를 이용하여 용접부의 표면온도, 냉각률 그리고 방사에너지등을 측정하여 용접 품질을 예측하는 방법 그리고 용접전압과 전류 신호의 변화를 시간영역에서 해석하는 방법이 이용되고 있고, 용접 후 용접품질을 측정하는 방법으로는 비파괴검사법²⁾이 이용되고 있다. 비파괴검사법은 재료가 갖는 물리적 특성을 이용하여 검사 대상물의 성질, 상태, 내부구조 등을 분석하는 방법이다. 전자는 카메라로 얻은 용접 영상에 대한 정보를 처리하는데 많은 시간이 소요되고 용접환경에 따라 영상처리 조건이 복잡해짐으로써 고가의 하드웨어 및 소프트웨어가 필요하며, 후자는 용접 후 용접품질을 검사하는 것으로 용접을 수행한 후 수정 보완하는 것이므로 용접결합부의 실시간 보상이 어렵다.

용접신호의 주파수 영역에서의 해석은 디지털 신호 처리의 급속한 발전으로 가능해 졌으며, 이 분야의 연구개발은 더욱 더 활성화 될 것으로 예상된다. 디지털 신호처리 기술은 현재 통신(communication), 음성 신호(speech signal processing), 디지털 영상처리(digital image processing) 등 많은 분야에서 응용되고 있으며 그 응용분야는 계속 확대되는 추세이다. 이와 같은 디지털 신호처리 분야의 발전은 1965년 DFT(Discrete Fourier Transform)를 효과적으로 계산할 수 있는 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘의 출현으로 시작되었다. 디지털 신호처리 분야에서 가장 중요한 FFT 알고리즘은 DFT의 계산에 필요한 계산량을 현저하게 줄인 알고리즘으로서 신호처리 알고리즘의 실시간 구현을 가능하게 하였다⁴⁾.

Wang⁵⁾등은 아크 전압의 신호변화 및 FFT 신호처리를 이용하여 용접결함을 판단하였으나 이것은 전 주파수 영역에서 스펙트럼의 크기가 급격히 변화하는 주파수를 해석한 것으로 용접 중 결함여부를 실시간으로 판단하기 어려우며 용접 결함부의 정확한 위치 검출이 어렵다.

본 논문에서는 용접 결함부의 위치를 검출하기 위한 모니터링 변수로서 용접 중 발생하는 아크 빛의 강도를 이용하였다. 이는 용접 중 발생하는 아크 빛의 강도를 주파수 영역에서 정량적으로 해석하여 아크가 안정한 경우(균일한 용접 비드 생성)와 아크가 불안정한 경우(용접비드의 단락과 겹침등)를 비교 판단함으로써 용접결함이 발생하는 용접부의 위치를 인식하는 것이다.

2. 아크 빛의 주파수 분석

FFT 변환은 시간영역의 함수를 주파수영역의 함수로 변환시켜 주파수 영역에서 시스템의 출력신호를 분석하는데 사용한다. 특히, 주기적인 이산신호일 경우에는 DFS(Discrete Fourier Series)를 이용하여 주파수 영역에서의 분석이 가능하지만, 실제 시스템에서 이용하는 이산신호는 비 주기적인 경우가 대부분이다. 비 주기적인 신호에는 신호의 존재구간이 제한된 유한기간신호(finite duration sequence)가 있다. 유한기간 신호를 주파수 영역에서 분석하기 위하여 유한기간 신호의 유한기간을 주기신호의 1주기로 정한다면, 유한기간 신호 $x(n)$ 은

$$x(n) = \begin{cases} x(n+N), & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{other } n \end{cases} \quad (1)$$

이다. 이 경우 $x(n)$ 의 DFS인 $X(k)$ 의 1주기를 유한기간 함수 $x(n)$ 의 변환 $X(k)$ 라고 하면 $X(k)$ 는 $x(n)$ 의 DFT이다. 이와 같이 DFT는 유한기간 신호를 주파수 영역의 이산신호로 변환하여 처리 가능하도록 하는 방법이다. 유한 기간신호 $\{x(n), n = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1\}$ 에서 $\{x(n)\}$ 의 DFT는

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$W_N^{nk} = \exp(-j2\pi nk/N) \quad (3)$$

이다. 여기에서 N 은 입력신호의 주기이다.

주파수의 변화에 따른 푸리에 계수의 변화를 스펙트럼이라 하며 이것은 어떠한 신호에 포함되어 있는 주파수 성분의 분포를 구하는 것으로 기존의 연구에서는 스펙트럼의 크기 변화가 급격한 주파수를 이용하여 용접결함을 분석하였다. 그러나 이것은 off-line에서 해석하는 것이며 용접결함의 유형만을 결정할 뿐 용접결함이 발생하는 위치를 검출하기 어렵다.

Fig. 1은 용접 중 아크 빛의 신호를 주파수 영역에서 해석하기 위해 FFT 신호처리를 수행한 결과로 아크 빛의 파워스펙트럼 값은 저 주파 영역($w=0$)에서 최대의 크기를 갖고 이는 분석구간내의 신호를 모든 주파수에 대해 적분한 값으로 정상적인 용접의 경우 균일한 아크가 발생하기 때문에 매 샘플시간마다 최대 파워 스펙트럼의 크기는 용접이 진행되는 동안 일정한 값을 가진다. 그러나 비정상적인 용접이 진행되는 경우, 즉 용접 비드의 불연속이나, 비드의 폭이 감소하는 경우 및 용접 비드의 겹침 현상이 발생하는 경우는 아크 빛이 일정하게 발생하지 않기 때문에 매 샘플시간마다 최대 파워 스펙트럼의 크기는 불균일하며 정상적인 용접을 수행하는 경우보다 현저히 큰 값을 갖는다. 이것은 CdS 센서가 아크 빛의 밝기에 따라 저항의 변화가 발생함으로써 출력전압의 크기가 변화하는 특성

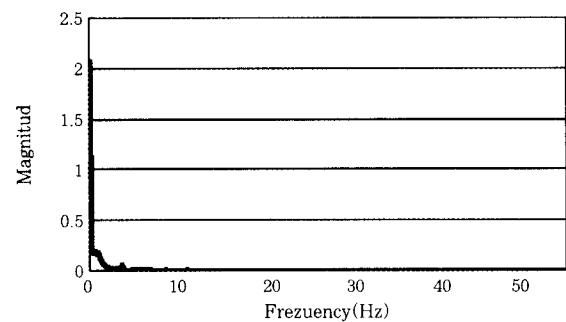


Fig. 1 FFT frequency spectrum of arc light signals at the welding condition of 20V, 500mm/min wire speed rate, and 10mm/s travel speed

을 이용한 것이다. 이러한 결과로부터 매 샘플시간마다 파워 스펙트럼의 크기를 비교, 분석함으로써 용접 비드의 불량 발생 위치를 검출할 수 있다. 실시간 FFT는 상용프로그램의 FFT 함수로 최대 파워 스펙트럼만을 추출하도록 변형하였다.

용접전압의 변화에 따른 용접 중 아크의 빛을 측정하여 주파수 영역에서 해석을 하였다. 용접전압, 전류 및 아크 빛은 3KHz로 샘플링하였다.

본 연구에서는 용접 중 획득한 아크 빛의 출력 값을 $N=64$ 개의 샘플링 수를 이용하여 용접 시작시간으로부터 0.12초($N=64$) 이후부터 데이터가 입력될 때마다 실시간으로 FFT 분석을 수행하였고 매 분석마다 최대 파워스펙트럼 값을 추출하였다. 용접전압이 증가함에 따라 아크 빛의 출력값과 FFT 파워스펙트럼의 값은 감소하였다. 아크가 안정한 경우(용접비드가 일정한 경우), FFT 파워스펙트럼의 값은 일정한 크기를 유지하였으나 아크가 불안정한 경우(용접비드의 폭이 감소하거나 단락등)는 FFT 파워스펙트럼의 값이 크게 증가하였다. 용접비드의 단락이나 비드의 폭이 감소하는 위치에서 이러한 현상은 지속적으로 발생하였다.

3. 실험 장치

본 연구에 사용된 용접기는 Miller 사의 MIG/TIG 겸용 shopmaster 300이며, Ar 가스와 용접와이어 지름은 1.2mm, contact tip과 모재사이의 거리는 20mm, 용접속도는 10mm/s, 와이어 이송속도는 500mm/min, 용접전압은 20~25V의 범위내에서 실험하였다. 주파수 해석을 하기 위한 용접전압, 용접전류 및 아크 광도의 측정은 3KHz로 샘플링하였고 시편의 이송은 100Hz로 제어하였다. 시편의 이송을 위하여 ac 서보 모터가 장착된 1 축 ball-screw 형의 테이블을 이용하였다. 용접시편은 두께 6mm의 일반구조용 압연강재(SS41)로서 폭 20mm, 길이 300mm인 시편에 용접을 하였다.

아크광의 측정을 위해 광 도전형 센서(CdS)를 이용하였다. 광 도전형 센서에 광이 미치게 되면 광자의 에너지를 얻어 전자가 가전자 내에서 전도대 레벨에 전자·정공대가 생겨 전기전도율이 증가하게 됨으로써 전기저항이 변화하는 것이다. 즉, 아크 광도가 증가하면 비례적으로 전기전도율이 증가하므로 전기저항이 감소하게 됨으로써 출력전압이 감소한다. 따라서 아크가 형성되지 않는 경우에 입력전압에 가까운 출력전압을 발생하고 용접 중 아크가 발생하면 아크 빛에 의해 출력전압이 감소하게 된다.

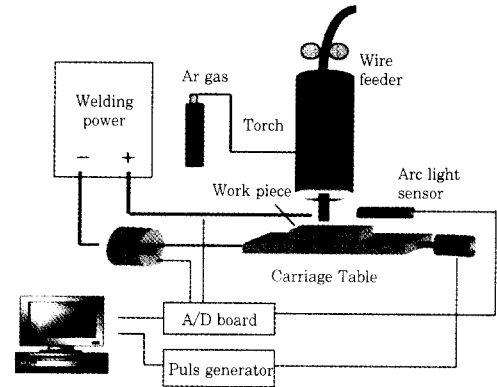


Fig. 2 Schematic diagram of the experiment setup

4. 실험결과 및 고찰

기존의 연구에서 수행되었던 주파수영역에서의 분석 방법은 임의의 주파수에서의 파워스펙트럼의 크기가 변화하는 것을 이용하여 용접불량이 발생했음을 예측하는 것으로 만족해야 했으나 본 실험에서는 매 샘플 시간마다 FFT 분석을 수행함으로써 실시간으로 용접 불량 발생 위치를 검출할 수 있도록 하였다.

Fig. 3(a)는 용접전압 20V, 와이어 이송속도 500 mm/min, 용접전류 175A인 경우로 정상적인 용접이 수행되는 경우 아크 빛은 2V이내의 출력 값을 얻을 수 있으며 이 결과로부터 용접의 결합 위치를 인식하기 어렵다. Fig. 3(b)는 용접 전류의 신호로 용접비드의 폭이 급격히 감소하는 위치에서 신호의 크기가 급격히 변화하였으나 비드의 폭이 증가하거나 겹치는 부분은 신호의 크기가 변화하지 않음으로써 부분적인 용접결함부만을 예측할 수 있었다. Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)에서 보여준 CdS 센서의 신호를 매 샘플시간마다 FFT 처리하여 최대 파워 스펙트럼의 크기만을 분석한 결과로 용접 비드의 변화가 발생하는 부분에서 최대 파워 스펙트럼의 크기는 급격히 증가함으로써 용접의 위치가 48mm와 71mm인 지점에서 2~3mm동안 용접 비드가 불균일하게 생성되었음을 알 수 있었고 61mm와 64mm에서 비드의 높이 및 폭이 감소하였다. FFT 파워스펙트럼의 크기가 초기에 크게 발생한 것은 용접와이어가 contact tip으로부터 이송되어 시편에 도달하기 전 시간 영역으로 아크의 발생 지연과 불안정한 아크가 생성되었기 때문이다.

Fig. 4는 용접전압을 23V, 용접전류는 190A로 증가한 경우로 용접이행모드는 단락이행모드가 주를 이루고 있고 부분적으로 임상용적 이행이 형성되었다. 아크강도의 출력값을 FFT 수행한 결과 26mm와 52mm에서 파워 스펙트럼의 크기가 정상적인 용접수행의 경

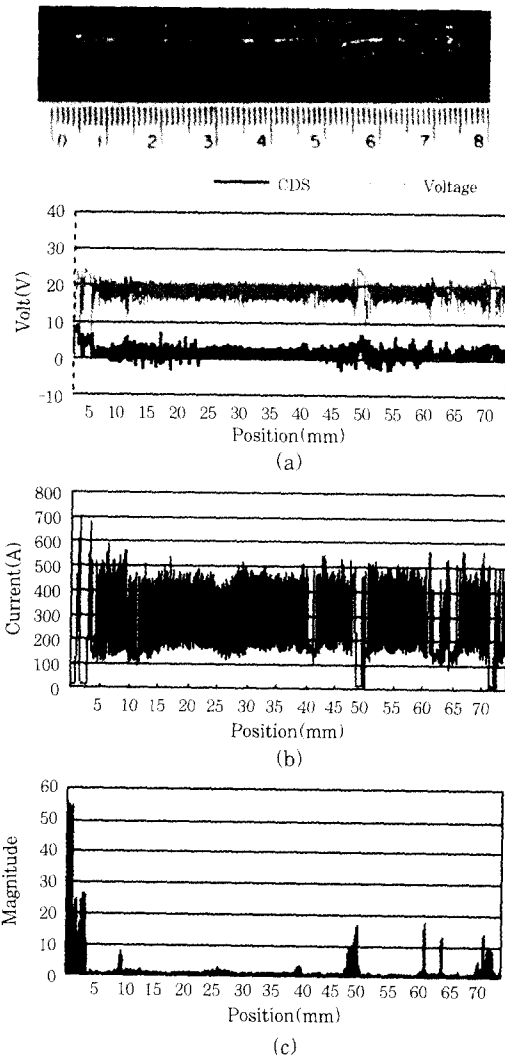


Fig. 3 (a) voltage and arc light signals (b) current signal (c) FFT frequency spectrum of arc light signal at the welding condition of 20V, 500mm/min wire speed rate, and 10mm/s travel speed

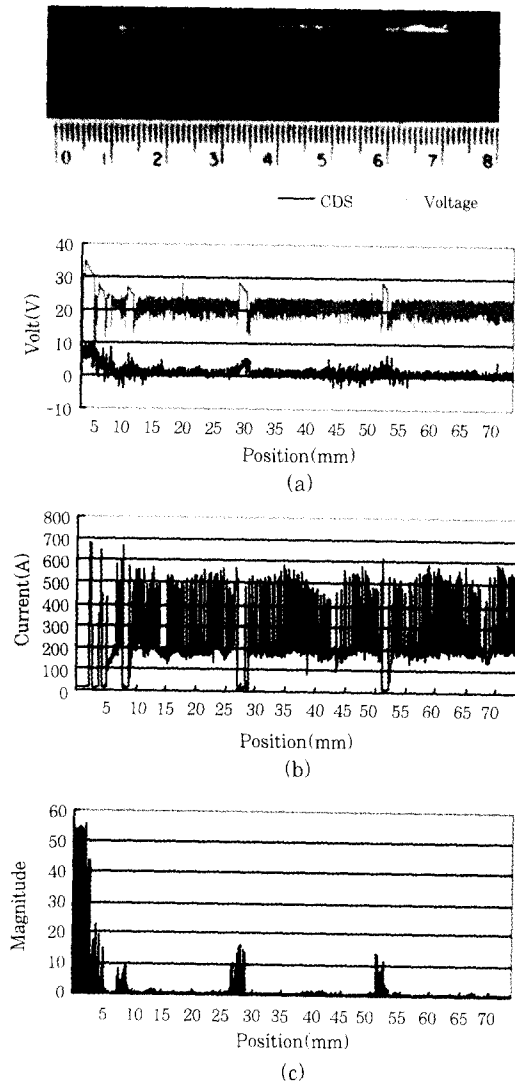


Fig. 4 (a) voltage and arc light signals (b) current signal (c) FFT frequency spectrum of arc light signal at the welding condition of 23V, 500mm/min wire speed rate, and 10mm/s travel speed

우보다 현저히 증가함을 알 수 있었고 용접 비드는 26 mm와 52mm에서 1~2mm 동안 비드의 폭이 감소하였다.

Fig. 5는 용접전압 25V, 용접전류 210A로 증가하였으며 단락이행모드에서 입상용적이행 모드로 이행되는 과도기적 현상이 나타났고 아크의 강도에 대한 파워 스펙트럼의 크기는 용접전압의 크기에 비례하여 균일하게 감소하였으며 용접결합은 발생하지 않았다. 이러한 최대 파워스펙트럼의 크기는 정상적인 용접이 수행되는 경우 용접전압과 전류의 크기가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

기존의 연구에서는 아크전압 또는 전류의 크기 변화

를 이용하여 용접결합부를 인식하였으나 본 연구에서는 용접 중 획득한 아크 빛의 출력 값을 N=64개의 샘플링 수를 이용하여 용접 시작시간으로부터 0.12초 (N=64) 이후부터 데이터가 입력될 때마다 실시간으로 FFT 분석을 수행하였고 매 분석마다 최대 파워스펙트럼 값을 추출함으로써 용접결합이 발생하는 용접부의 위치를 인식할 수 있었다. 아크 빛의 출력값을 FFT 분석한 결과 최대 파워 스펙트럼의 크기는 정상적인 용접(비드가 균일한 경우)이 수행되는 동안 균일하였으나 비드의 불연속이나 비드의 폭이 좁아지는 용접결합이 발생한 지점에서 최대 파워 스펙트럼의 크기는 정상적인 용접이 수행하는 경우보다 현저히 증가하였다. 실험결과로부터 아크 빛의 파워 스펙트럼을 이용한 알고리즘은 용접결합의 위치를 실시간으로 찾을

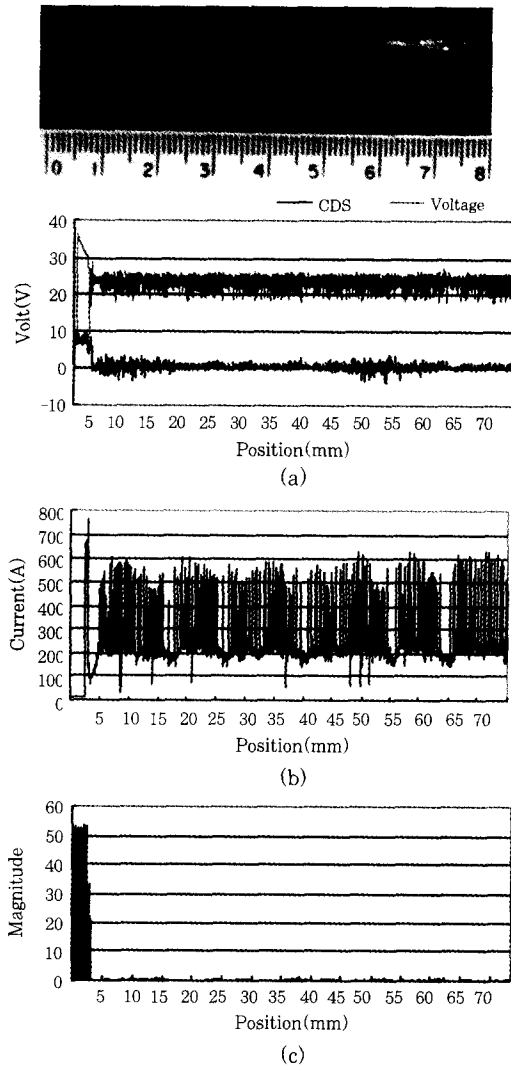


Fig. 5 (a) voltage and arc light signals (b) current signal (c) FFT frequency spectrum of arc light signal at the welding condition of 25V, 500mm/min wire speed rate, and 10mm/s travel speed

수 있었으며 향후 최대 파워스펙트럼이외의 파워스펙트럼 크기 변화를 고려하여 용접결합의 형태를 분석하면 용접결합을 실시간으로 보상할 수 있는 용접 자동화 시스템의 개발에 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. R. Kovacevic, Y.M. Zhang and L.Li, "Monitoring of Weld Joint Penetration Based on Weld Pool Geometrical Appearance", *Welding Journal*(1996), pp.317s~329s
2. 정선국, "초음파센서를 이용한 용접품질의 원격측정", *대한용접학회지*(1998), pp 17~25
3. M. Ushio, W. Mao, "Dynamic characteristics of an arc sensor in GMA welding in droplet transfer mode : Study of improvement of sensitivity and reliability of arc sensors in GMA welding (3rd report)", *Welding International*, Vol 12, No. 4(1998), pp.272~281
4. Brigham, E., O., "The Fast Fourier Transform and its Application," Prentice-Hall, (1988)
5. W. Wang, S. Liu, J. E. Jones, "Flux cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization", *Welding Journal*, November(1995), pp.369s~377s
6. 신현욱, 최용범, 성원호, 장희석, "GMAW에서 와이어 송급속도의 변동이 아크안정성에 미치는 영향에 관한 연구", *대한용접학회지*, Vol. 13, No.4(1995), pp.340~356
7. S. Adolfsson, G. Bolmsjo, I. Claesson, "On-Line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*(1999), pp.59s~73s