

## 실시간 공정신호를 통한 용접공정 알고리즘에 관한 연구

윤진영\* · 이영민\*\* · 신순철\*\*\* · 최해운\*\*\*\*,†

\*한국생산기술연구원 용접접합연구실용화그룹

\*\*한국폴리텍VI대학 금형디자인과

\*\*\*한국과워트레인(주) 기술연구소

\*\*\*\*계명대학교 기계자동차공학과

### A Study on Welding Process Algorithm through Real-time Current Waveform Analysis

Jin Young Yoon\*, Young Min Lee\*\*, Soon Cheol Shin\*\*\* and Hae Woon Choi\*\*\*\*,†

\*Welding & join group, Kitech, Incheon 406-840, Korea

\*\*Department of Mold and Design, Korea Polytechnic VI, Daegu 703-721, Korea

\*\*\*Research Center, KAPEC, Daegu 704-946, Korea

\*\*\*\*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

†Corresponding author : hwchoi@kmu.ac.kr

(Received August 5, 2015 ; Revised August 10, 2015 ; Accepted August 26, 2015)

#### Abstract

The current waveform was analysed to monitor the weld quality in real time process. The acquired current waveform was discretely analysed for the top and bottom limits of peaks as well as the pulse frequency measurement. Fast Fourier Transform was implemented in the program to monitor the pulse frequency in real time. The developed algorithm or program was tested for the validation purpose. The cross-section of weld profile was compared to the current waveform profile to correlate the monitored signal and the actual parts. Pulse frequency was also used as auxiliary tool for the quality monitoring. Based on the results, it was possible to evaluate the quality of welding by measure the current waveform profile and frequency measurement.

Key Words : MAG welding, Real time, Current, Voltage, Weld monitoring

#### 1. 서 론

두 개 이상의 소재를 접합하여 단일 부품 또는 조립품으로 만드는 용접기술은 제조업의 핵심 생산기반 기술로써 자동차, 조선 및 다양한 분야에 활용되고 있다. 이중 용접의 핵심 기술은 용접부위와 인근 소재의 용접결합을 최소화하면서 신뢰도 높은 접합을 하는 것이며, 동시에 용접부에 높은 신뢰성을 확보해야 한다<sup>1)</sup>. 불활성 보호가스를 사용하여 용접하는 가스 메탈 아크(Gas metal arc welding, GMAW) 용접방법은 로봇을 이용한 자동화용접 분야에서 많이 적용되고 있는데, 대량생산되는 물품에 대해서 불량률 실시간으로 감시하기에 난해한 공정이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 용접자동화 공정에서는 실시간으로 용접상태를 감시(monitoring) 해주는 장치가 상용화되어 사용되고 있다. 공정 중 발생하는 용접결합을 모니터링하기 위한 방법으로는 전류, 전압의 상한 값과 하한 값을 이용한 검출, 주파수를 이용한 검출 그리고 스펙트럼 분석 방법 등이 있다<sup>2-4), 7)</sup>.

전류는 입열량을 결정하는 가장 중요한 인자이며, 공정 중 전류의 상한 값과 하한 값을 이용한 검출하여 입열량의 정부합을 간접적으로 인지할 수 있다. 필스아크용접의 경우는 Fig. 1과 같이 용접이 진행될 때 일정한 간격으로 필스를 발생시키고 전류도 규칙적인 특성을 나타내게 되고, 이에 상응하는 용융 와이어의 이행이 물리적으로 일어나야 한다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.4(2015) pp24-29

<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.4.24>

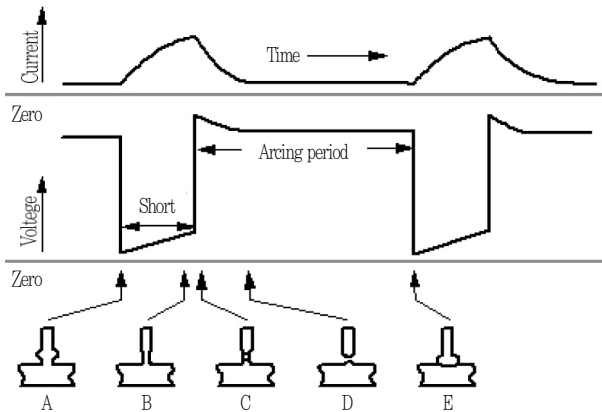


Fig. 1 Welding current and arc<sup>8)</sup>

이러한 전기적 물리적 특징을 이해하여 안정된 공정을 실현하고, 아크의 불안정요소를 최소화 하는 것이 공정모니터링과 제어의 목적이다. 이때 설정된 용접전류의 상한 값과 하한 값 범위 내에서 펄스변폭이 정해지는지를 지속적으로 모니터링 하면 공정을 안정화 할 수 있다.

Fig. 2에서 예시된 바와 같이 아크가 안정적으로 진행될 경우 전류의 파형이 규칙적으로 나타남을 볼 수 있다. 반면에 아크가 불안정한 경우에는 전류의 파형이 끊기거나 불규칙적인 형상으로 나타나게 된다. 이 특징을 이용하여 아크의 안정성을 파악하게 되고 용접이 정상적인 전류 범위에서 수행되었는지 모니터링을 할 수 있게 된다.

단위시간당 펄스 수(주파수)를 이용한 검출 방법은 전류의 상한 값과 하한 값을 이용하여 검출하는 방법의 한계점을 극복하는 방법으로서, 용접공정 중 설정된 전류 범위 이내 일지라도, 일정시간 불규칙한 펄스가 감지되는지의 여부를 판별하는 방법이다.

불규칙한 펄스파형은 소입열의 불균형으로 인한 비드

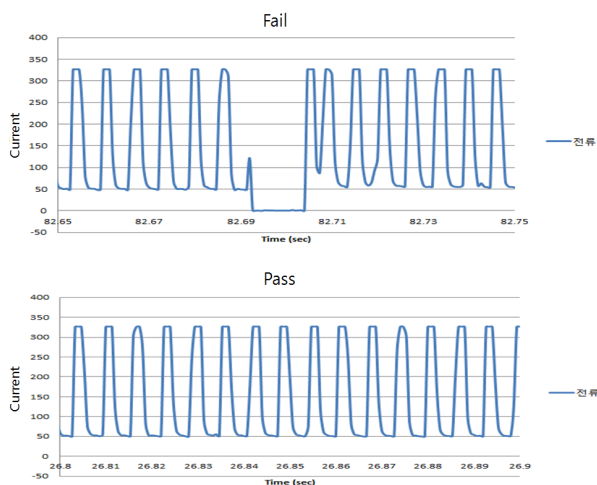


Fig. 2 Current waveform of stable and unstable arc

의 안정성을 저해하게 되는데, 이러한 결함을 찾아내기 위한 방법으로 일정시간동안 가해진 펄스를 실시간 고속 푸리에 변환을 이용한 분석을 통하여 안정적인 범위를 벗어나는지 파악한다. Fig. 3은 비드(Bead)의 폭이 가늘어지는 구간의 데이터를 측정해본 결과로서, 전류 파형분석의 결과 전류의 레벨은 안정된 구간에 존재하지만 주파수의 변동이 생긴 것을 확인 할 수 있다.

• 이산 푸리에 변환(Discrete fourier transform, DFT)

실시간 용접공정시 발생하는 전류파형의 스펙트럼 분석을 위해서 푸리에 변환 기법을 사용하였다. 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform, DFT)은 이산적인 입력 신호에 대한 푸리에 변환으로, 디지털 신호 분석과 같은 분야에 사용된다. 또한, 이산 푸리에 변환은 고속 푸리에 변환을 이용해 빠르게 계산할 수 있다.

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp[-j2\pi ux / N], \quad u = 0, 1, \dots, N-1$$

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} F(u) \exp[j2\pi ux / N], \quad x = 0, 1, \dots, N-1$$

• 고속 푸리에 변환(Fast fourier transform, FFT)

$$F(u) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \exp[-j2\pi ux / N] = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{ux}$$

본 연구에서는 활성가스를 이용한 GMAW(MAG)용접 중 발생하는 전류의 파형을 측정하여 아크의 안정성 및 접합부의 결함발생 여부를 판별하는 알고리즘을 개발하고 적용한 결과를 정리하였다.

연구 방법 및 단계로서 우선 용접공정의 전류신호를 실시간으로 측정하여 설정범위내(상한치와 하한치)의 전류 파형 유지여부를 관찰하여서 1차 불량품 여부를 판별하였다. 또한, 단위시간(0.5초)을 기준으로 하여 취합된 데이터의 주기 또는 주파수를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT) 기법으로 분석을 하여서 입열량 및 공정의 안정성 여부를 판별하였다.<sup>2,5,6)</sup> 이러한 검사기법

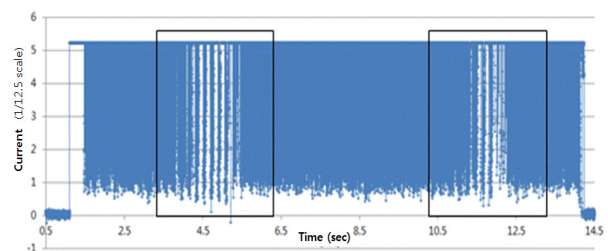


Fig. 3 Current waveform in welding process

의 신뢰성 확보를 위해서 실제 양품과 불량품의 경우의 FFT를 정량화하여 표준화를 하였으며, 이 표준의 신뢰성을 위해서 단면 및 외관관찰을 통한 상호관계성 검증도 실시하였다.

### 2. 실험의 방법

#### 2.1 실험재료 및 방법

본 연구에서 BOP(Bead on plate)테스트에 사용된 소재는 SAPH-440로 선정이 되었으며, 본 소재는 토크 컨버터의 하우징 소재로 사용이 되고 있다. 본 실험에서는 활성가스용접기(MAG)를 대상으로 실험을 진행하였다.

자동화 공정 과정에서 용접기는 Fronius 사의 장비로서 가변펄스 제어를 통해서 전압 21V 전류 210A 의 파라미터 내에서 자동화 공정이 수행되도록 설정이 되었다. 또한, 설정 펄스 주파수는 150~200Hz 사이의 범위로 초기 설정이 되었으며, 전류 및 전압신호를 취득하기 위해서 DAQ system (National Instruments, USB-6009), 전류감지 센서, 전압센서 및 PC로 구성이 되어 있다. 세부 실험 장비의 구성은 Fig. 4와 같다.

전류감지용 센서 (Hall effect sensor)를 사용하여 용접기의 토치부에 전류를 측정 할 수 있게 하였다. 홀 센서에서 측정된 전류는 전압 신호로 바뀌어서 DAQ USB-6009(이하 DAQ)의 차동 전류 측정에 입력이 된다. DAQ에서는 측정된 신호를 수집하여서 PC로 전송하게 된다. 전송된 데이터는 랩뷰(NI, LabVIEW)소프트웨어에 의해 분석 및 분류를 거치도록 설계 되었다.

#### 2.2 프로그램의 흐름도

DAQ 시스템을 통해서 측정된 신호는 두 가지 방법에 의해 판정을 받게 된다. 첫 번째로는 전류의 상한 값과

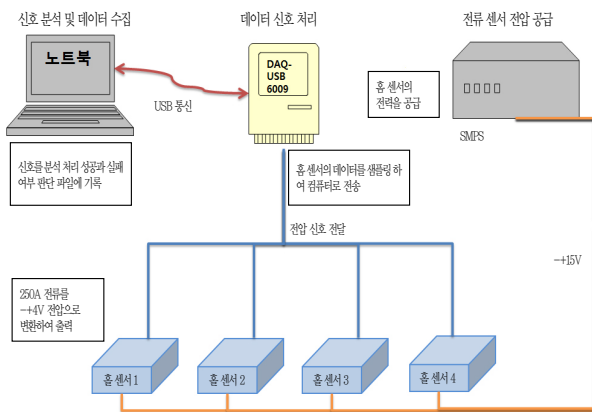


Fig. 4 Device configuration schematic

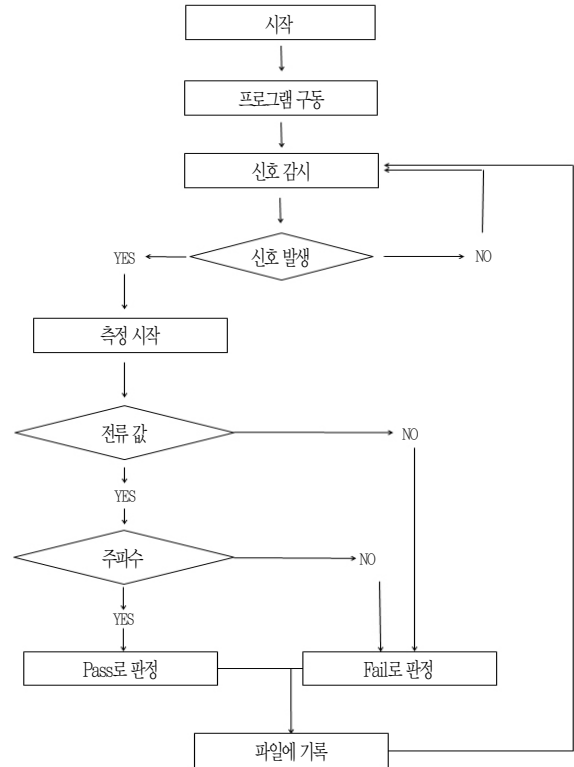


Fig. 5 Program flow chart

하한 값이 정상적인 파라미터 범위 안에서 수행되고 있는지를 분석하게 된다. 두 번째는 주파수가 안정적인 상태에서 접합이 수행되는지 판단하는 것이다. 두 가지의 방법에서 아무런 이상신호가 감지가 되지 않을 경우에는 통과 판정을 받게 된다.

두 가지 방법 중에서 하나라도 실패 판정을 받게 되면 그 데이터는 따로 분류해서 저장을 하게 되고 데이터를 분석하게 된다. 또한 신호 취득시 정상신호와 입력되는 노이즈는 Pre Noise Filter를 하드웨어 및 소프트웨어를 사용하여 최소화 하였다. 프로그램 구동은 실시간으로 이루어지면, 펄스 신호가 Trigger 신호보다 하한치일 경우는 대기모드로 준비하다가 Triggering 설정치 이상으로 전류가 감지되면 신호 측정을 시작 하도록 설계 되었다. 전체적인 프로그램의 흐름도는 Fig. 5에 나타내었다.

### 3. 실험의 결과

#### 3.1 BOP(Bead On Plat)실험(실험1)

초기조건 설정을 위해서 BOP 테스트의 실험 방법을 통해서 공정변수 초기설정을 하였다(실험1). 특히, 용접에 수행되는 용접진행속도, 와이어 공급속도, 전압, 전류,

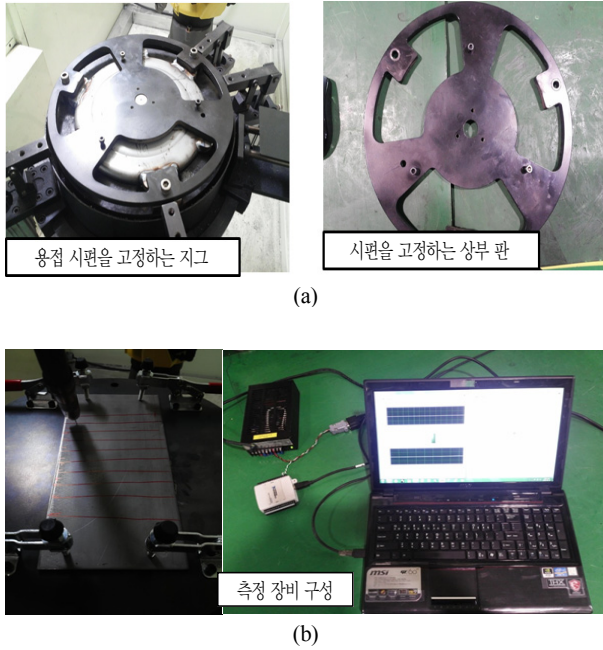
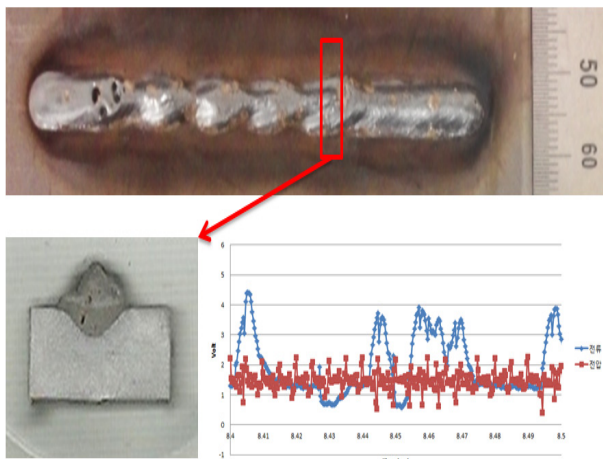


Fig. 6 Welding Monitoring System

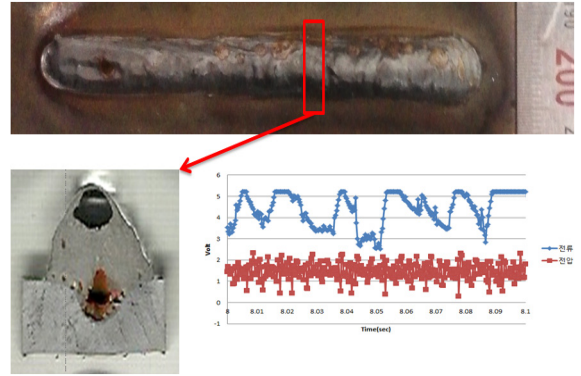
보호가스의 유량을 주 변수로 설정 하였다.

로봇 용접 장치를 사용하여 용접 속도변수는 50cm/min로 고정 하고, 전압변수 17V, 21V 그리고 25V의 세 가지 경우를 설정하고, 전류는 170A~250A 사이의 값을 순차적으로 증가시키는 방법으로 실험을 수행 하였다. 전류와 전압이 설정한계치를 넘어가는 경우 내부 기포 발생 및 비드 형상불량 등 용접 결함이 나타날 수 있으므로, 각 변수에 따른 입력치(신호)와 출력치(용접단면 형상)을 비교하였다.

실험을 위해서 고정용 지그를 사용하여 일정한 위치에 용접 시편을 고정하였으며 용접토치 진행 각도는 90도로 설정하였으며, 구축된 공정모니터링 장치를 구성하여 실험을 진행하였다(Fig. 6).



(a) 19V 150A Welding results



(b) 21V 270A Welding results

Fig. 7 Correlation of current waveform vs. weld profile

### 3.2 불규칙 전류 상태

전압과 전류에 따른 용접결과 단면을 Fig. 7에 정리 하였다. 설정전압 및 전류치가 통상적인 용접조건을 지나치게 벗어나는 경우 용접이 비 정상적으로 이루어졌으며, 비드 폭이 좁고 넓어짐(비드 불균형)이 반복되는 형태를 보여 주었다. 또한, 모니터링한 전류의 파형이 매우 불규칙적으로 나타남을 알 수 있었다. 특히, 21V 270A의 경우는 외관상 비드의 형상이 매우 불규칙적으로 관찰이 되었으며, 단면을 분석한 결과에서 다량의 기공(Blow hole)이 존재함이 확인 되었다.

### 3.3 양산 테스트

초기변수구간 설정을 위해 수행된 실험 1의 결과를 바탕으로 실제 용접공정에 적용하여 구축된 알고리즘을 테스트 하는 연구를 진행하였다(실험 2). 실험 1 적용의 경우, 최적화된 전류파형 주파수를 분석하면 용접전류의 펄스는 0초에서 1초 구간은 89Hz~150Hz로 상승되었고, 본 용접 구간인 1초에서 11.2초 구간은 전류펄스가 159Hz였다. 또한 마지막 구간인 11.2초~12.4초 구간에서는 159Hz에서 70Hz로 감소하였다.

모니터링 실험 결과 Fig. 8에서 보는 것처럼 용접불량이 발생한 부분은 용접이 시작되고 난 후 3초에서 6초 사이 구간이 대부분이다. 또한 전류 신호에서 감지된 불량

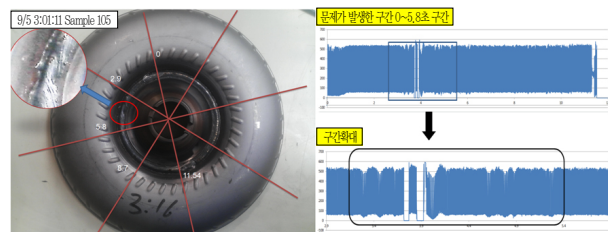
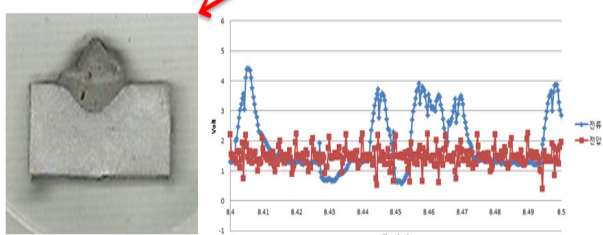


Fig. 8 Fault current waveform

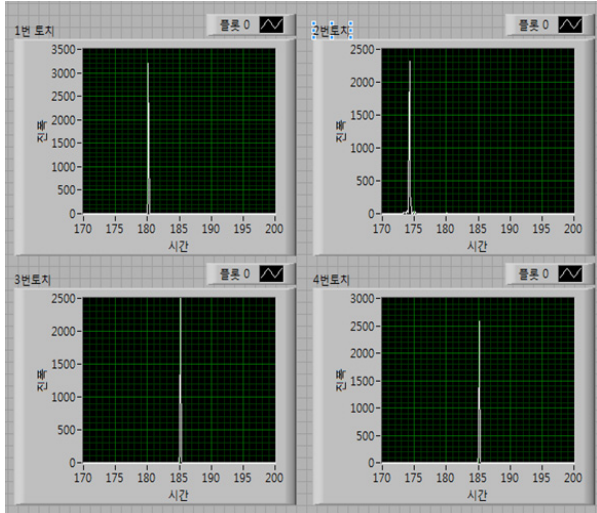


Fig. 9 Measurement of waveform frequency

이 발생한 구간도 3초에서 6초 사이 구간으로서 용접 샘플과 신호를 비교하면 펄스가 불안정해진 구간에서 불량 발생되는 것을 알 수 있었다. 이를 통해서 용접 신호와 실제제품의 연관성이 뚜렷함을 알 수 있었다.

구축된 알고리즘과 실험장치를 4개의 토치를 사용한 양산장치에 적용하였다. 실험 중 지속적으로 불량을 발생시키는 토치 2번의 전류 펄스 주파수를 분석하였다. 실험시 데이터 샘플링은 각 토치별 초당 1,600개를 취득하여 분석을 하였으며, 매 0.5초 단위마다 데이터를 취득한 후 FFT 분석 기법으로 분석하여 데이터를 누적하여 표기 하였다.

분석결과 2번 토치는 주파수 174Hz에서 용접모드가 이행되고 있는 것을 알 수가 있었으며, 정상적인 토치 (1,3,4번 토치)의 경우는 180~185Hz 범위에서 용접모드가 이행되고 있었다. 이를 통해서 실험 2의 경우 적정 주파수 범위가 180~185Hz 범위가 가장 안정적인 것으로 실험결과 알 수 있었다(Fig. 9).

Fig. 9의 경우는 용접이 안정화된 정상상태(steady state)를 보여주기 위해 주파수의 변동은 거의 없음을 나타내고 있으며, 주파수가 한 점에서 피크를 이루는 것은 주파수 분석범위가 170~200Hz로 설정하였기 때문인 것으로 판단 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가스 메탈 아크(Gas Metal Arc Welding, GMAW)용접 수행 중에 발생하는 전류파형과 펄스 주파수를 통해 용접의 품질을 실시간으로 판단할 수 있음을

알게 되었다. 용접결함을 검출 하는 방법으로 전류의 상한 값과 하한 값을 이용한 방법과 더불어 전류의 주파수 대역을 FFT기법을 사용 하였다. 이를 통해서 안정적인 범위 안에서 용접공정이 진행되는지에 대한 판단을 실험적 방법으로 증명하였다.

측정 대상은 상용 MAG 용접장치에서 진행하였으며, 우수한 용접이 이루어진 범위를 전압과 전류 파형을 분석하여 실험적 방법으로 설정 및 표준화 하였다. 도출된 조건을 바탕으로 알고리즘을 작성하였으며 안정적인 범위의 전류 및 주파수영역을 벗어나게 될 경우 불량을 검출하는 시스템을 구성하여 양산에 적용 하였다.

설정 값에서 벗어나는 용접 불량은 실제 생산이 이루어지고 있는 현장에서 실험을 해본 결과, 육안검사의 결과 값과 일치함을 알 수 있었다. 다만, 용접이 시작되는 구간의 불안정 아크는 외부노이즈 문제로 정확히 분별하기가 어려웠다. 즉, 용접이 진행된 0~0.2sec구간의 데이터는 신뢰성이 부족하므로 추후 추가적인 방법으로 보완하여 연구하여야 할 것으로 사료 된다.

#### References

1. Cho, S. M., Oh, D. S., Lee, H. B. and Lee, K. W., 1997, Evaluation of Arc Stability in GMAW by Arc Monitoring, *Journal of KWJS*, 27 (1), 8-13 (in Korean)
2. Hwang, D. S. and Gho, M. H., 2012, Development and Application of Realtime Weld Quality Monitoring System, *Journal of KWJS*, 30 (1), 44-50 (in Korean)
3. Kim, C. H., Kim, J. Y., Yu, H. Y. and Hong, S. H., 2007, Availability Verification of Feature Variables for Pattern Classification on Weld Flaws, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 16 (6), 62-70.
4. Shin, B. H. and Park, Y. D., 2009, Research Activities of the KWJS for Last 20 Years, *Journal of KWJS*, 27 (1), 8-13 (in Korean)
5. Cho, T. D. and Yang, S. M., 2000, A Study on On-Line Quality Monitoring Using Arc Light in Gas Metal Arc Welding, *Journal of KWS*, 18 (4), 82-86. (in Korean)
6. Kim, E. S., Joo, K. S., Jang, B. J. and Kang, K. Y., 2009, Detection of Defects on Welding Area Using Image Processing, *The Journal of the Korea Institute of Maritime Information & Communication Sciences*, 13 (5), 944-951.
7. Cho, S. M., 2003, Waveform Analysis for Quality Improvement of Arc welding in Automobile Industries, *J. of KWS*, 21 (7), 27-33 (in Korean)
8. Wiktorowicz, R. and Melton, G., 2013, Shielding Gas Selection for Controlled Dip Transfer, *TWI Bulletin*, May (2013. 5).



- 윤진영
- 1987년생
- 기계공학과
- 용접공학, FSW, 용접자동화
- e-mail : 0521jin@kitech.re.kr



- 신순철
- 1960년생
- 한국파워트레인(주) 연구소
- 기계공학, 열유체, 용접공학
- e-mail : soon.shin@kapec.com



- 이영민
- 1962년생
- 한국폴리텍VI대학 금형디자인과
- 레이저 및 용접공학, 금형CAM
- e-mail : yml123@hanmail.net



- 최해운
- 1972년생
- 계명대학교 기계자동차공학과
- 용접공학, 레이저용접, 용접자동화
- e-mail : hwchoi@kmu.ac.kr