Check for updates

Journal of Sensor Science and Technology
Vol. 28, No. 6 (2019) pp. 371-376
http://dx.doi.org/10.5369/JSST.2019.28.6.371
pISSN 1225-5475/eISSN 2093-7563

용접 불량 검사를 위한 음향공진 검사 장치 개발

염우정[1] · 김진영[2] · 홍연찬[1] · 강준희[2,+]

Development of Acoustic Resonance Evaluation System to Detect the Welding Defects

Woo Jung Yeom[1], Jin Young Kim[2], Yeon Chan Hong[1], and Joonhee Kang[2,+]

Abstract

We have developed an acoustic resonance inspection system to inspect the welding defects in the mechanical parts fabricated using friction stir welding method. The inspection system was consisted of a DAQ board, a microphone sensor, an impact hammer, and controlled by a PC software. The system was developed to collect and analyze the sound signal generated by hitting the sample with an impact hammer to determine whether it is defective. In this study, 100% welded good samples were compared with 95%, 90%, and 85% welded samples, respectively. The variation of the completeness in welding did not affect the visual appearance in the samples. As a result of analyzing the natural frequencies of the good samples, the five natural frequency peaks were identified. In the case of the defective samples, the frequency change was observed. The welding failure detection time was fast enough to be only 0.7 seconds. Employing our welding defect inspection system to the actual industrial field will maximize the efficiency of quality inspection and thus improve the productivity.

Keywords: Acoustic Resonance, microphone sensor, Natural frequency, Nondestructive test

1. 서 론

기계장치의 제작에 필수적인 요소인 용접방법으로는 아크 용접이 대표적으로 사용되고 있다. 가장 일반적인 방법이며, 용접하고자 하는 모재와 용접봉 사이에 아크를 발생시켜 용접봉을 녹여 접합하는 방식이다. 아크 용접은 작업이 간단하고 기계적 화학적 후 처리가 불필요해 많이 사용되는 방법이다. 그러나 용접 부위가 미세 하거나 작업자의 능력에 따라 품질이 좌우되는 단점이 있으며, 열 변형, 수축, 응력에 의한 균열 등이 발생되는 단점이 있다. 이에 비해 마찰 교반 용접은 아크 용접 법과 비교해 볼 때 매우 작은 변형과 고강도의 양호한 용접 품질을 나타내는 용접 방법이어서, 특히 자동차 부품 제조 분야에서 많이 사용하고 있다[1].

[1] 인천대학교 전자공학과 (Department, Incheon National Unversity)
119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea
[2] 인천대학교 물리학과 (Deparment of Physics, Incheon National Unversity)
119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea
[+]Corresponding author: jhkang@inu.ac.kr
(Received : Oct. 28, 2019, Revised : Nov. 19, 2019, Accepted : Nov. 20, 2019)

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

그러나 기본적으로 용접 방법이 갖는 문제점은 용접 부위의 품질 검사가 곤란하다는 점이다. 즉 육안 검사 이외에 내부 검사가 어렵기 때문에 이를 검사하기 위한 다양한 방법들이 사용되고 있다. 그 중에서 대표적인 방식으로는 비전 검사 방식이 있다. 용접 이미지를 취득하여 영상 분할, 윤곽선 추출, 특징 값 추출, 패턴인식 등의 순서를 통해 용접 불량을 검출하고 있다[2,3]. 비전 검사 방식의 경우에는 비전이라는 특성상 외부 환경에 매우 민감하며, 이를 적절하게 통제하여야 하는 문제점이 있다. 특히 가공 라인의 경우에는 절삭유, 분진, 가공 후 발생한 이물질이 매우 많은 열악한 환경이며, 비전검사 시에 이러한 이물질이 제품에 부착되어 있는 경우에는 오 판정을 할 확률이 매우 높아지기 때문에 가성 불량(양품을 불량으로 판정 하는 경우)이 발생할 확률이 매우 높아진다는 단점이 있다.

뿐만 아니라 ICT 기술의 발달과 더불어 스마트 팩토리 구축이 산업계의 화두로 떠오른 이후로 초음파를 이용한 용접 불량 검출을 위한 연구가 진행되었다[3,4]. 초음파 검사의 경우에는 초음파의 특성상 매질을 반드시 거쳐야 하기 때문에 용액에 담그고 측정을 진행하여야 하며, 세척 과정이 별도로 추가 되어야 하므로 이로 인한 검사 시간의 증가가 필수적으로 발생한다. 방사선 검사의 경우에는 검사 장비가 매우 고가이며, 특히 방사선 물질이 인체에 해롭기 때문에 전문가를 반드시 확보해야 하는 문제점이 있다. 기업에서 쉽게 도입하기

어려운 문제점이 있다. 또한 방사선 검사의 경우에는 제품 하나하나 방사선 사진을 찍어 분류를 해야하기 때문에 빠른 검출에 문제점이 있다. 이외에도 변위 센서 (LVDT), 압전형 힘 센서와 압전형 변위 센서를 이용한 측정을 통해 용접 불량을 검출하는 연구가 진행되었다[5]. 변위 센서의 경우에는 본 연구에서 측정하고자 하는 제품의 불량을 찾기에 적합하지 않았다. 이 외에도 전통적인 방법인 자분 탐상 검사[6], 와류 탐상 검사[7] 등의 다양한 방법으로 문제점을 찾아내는 연구들이 진행되었다. 자분 탐상 검사는 반드시 자분이 제품의 틈새로 침투하도록 하기 위한 프로세스가 필요하며, 자분이 침투된 부분을 확인하기 위한 인력이 필요하며, 최종적으로 세척 공정이 추가되어야 한다. 와류 탐상 검사의 경우에는 표면의 크랙은 확실하게 측정할 수 있으나, 내부에 있는 크랙은 측정이 불가능한 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 마찰 교반 용접 방법으로 용접한 부품의 불량을 빠르고 쉽게 검사 할 수 있는 검사 장치를 디자인하고 개발하여 자동차 공조장치 부품의 시험에 적용하였다. 이를 위하여 음향공진 검사방법을 적용하였다. 음향공진 방법은 테스트 샘플의 고유 진동수를 분석하여 용접 불량 여부를 판단하는 방법으로 1초 이내의 매우 빠른 검사 시간과 자동화 구성이 간단한 장점을 가지고 있다.

음향공진 방법을 활용하기 위해서는 측정하고자 하는 샘플의 고유진동수를 확인하여야 한다. 고유 진동수는 임팩트 해머를 사용한 테스트를 통해 알 수 있다.

이러한 진동 모델을 수학적 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$f(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \tag{1}$$

수식 (1)에서 m은 질량, c는 댐핑 계수, k는 강성 계수이다.

수식 (1) 미분 방정식은 다음과 같은 특성 방정식을 만족한다.

$$ms^2 + cs + k = 0 \tag{2}$$

수식 (2)에서 s는 복소수 값을 갖는 진동수 변수이다. 수식 (2)와 같은 특성 방정식은 다음과 같은 두개의 복소수 근을 가지게 된다.

$$\lambda_{1,2} = -\sigma \pm j\omega \tag{3}$$

수식 (3)에서 σ 는 mode1에 대한 감쇠 요소를 나타내며, ω 는 mode1에 대한 감쇠 고유진동수 이다. 따라서 완전한 식은 수식 (4)와 같다.

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \tag{4}$$

수식 (4)를 통해 물체의 고유 진동수를 찾아낼 수 있다[8].

고유 진동수 분석을 통해 마찰 교반용접으로 용접된 기계부품의 불량 여부를 측정하기 위한 검사 장치를 개발하였다. 이를 위해 용접 불량 샘플의 고유 진동수를 측정하기 위한 DAQ장치를 개발하였으며, 측정된 신호를 산업현장에서 빠르게 분석할 수 있는 분석 소프트웨어를 개발 하여 운용하였다.

2. 용접불량 검사장치 설계 및 제작

2.1 검사 장치 구성

본 연구에서는 용접 불량을 검출하기 위한 검사 장치를 개발하였으며 그림 1은 검사 장치 구성도를 나타내고 있다. 용접 불량을 검출하기 위해 용접 샘플에 진동을 발생시키기 위한 수동 해머(PCB 806C03)를 사용하였으며, 진동 정보를 취득하기 위해서 마이크로폰(PCB 1130F20) 을 사용하였다.

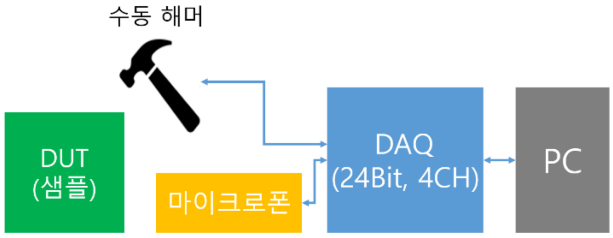

Fig. 1. Diagram of the test setup

DAQ와 분석 소프트웨어는 본 연구에서 개발하였다.

2.1.1 하드웨어 설계

그림 2는 하드웨어 회로도를 나타내고 있다. 본 연구에서는 산업에서 많이 사용하는 IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric) 방식의 마이크로폰(모델명130E20)과 IEPE 방식의 힘 센서를 내장한 수동 해머(모델명 086C03)를 사용하였다. 마이크로폰은 샘플을 타격하였을 때 샘플의 고유진동수를 측정하기 위해 사용되는 센서이며, 수동 해머는 샘플에 타격하여 진동을 발생시키는 역할을 담당한다.

힘 센서는 수동 해머에 내장 되어있으며, 데이터 수집 트리거로 사용된다. IEPE방식의 장점은 센서를 구동하기 위해서 반드시 필요한 전원선과 신호선을 함께 공유 함으로써 2 wire 만으로 사용 할 수 있기 때문에 간편한 연결과 유지보수 면에서 큰 장점이 있어 산업에서 많이 사용하고 있는 방식이다. 본 연구에서 개발한 DAQ하드웨어는 IEPE 방식의 센서를 사용하도록 하기 위해서 IEPE드라이버(DC 18V, 2mA 전원공급) 회로를 내장하였다. 24-bit 분해능을 위해 ADS1278 ADC칩을 탑재하였다. 응용분야에 따라 3축(X,Y,Z)센서를 사용하여야 할 필요가 있기 때문에 4채널을 구현하였다. 멀티 채널로 부터 데이터 수집을 원활히 하기 위해서 본 연구에서는 32-bit MCU (STM32F407ZET)을 사용하여 DAQ 회로를 구성하였다. 본 연구에서는 DAQ 하드웨어의 통신 방식으로 TCP/IP 방식을 채택하였다. 8채널을 구성하고 한다면 두개의 DAQ를 사용하면 되기 때문에 TCP/IP방식은 매우 유용한 방법이라 할 수 있다. 또한 DI/O 입출력 회로를 탑재하여 입력 4채널과 출력 4채널의 IO 를 구성하였다. DI(디지털 입력)는 외부 신호와

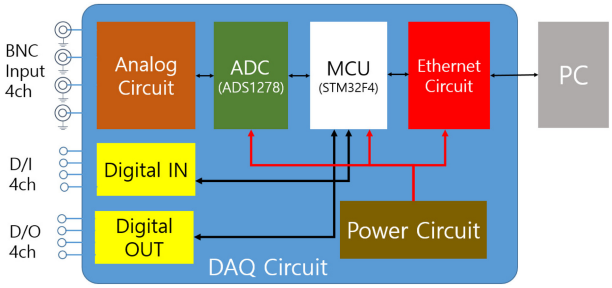

Fig. 2. DAQ Hardware Diagram

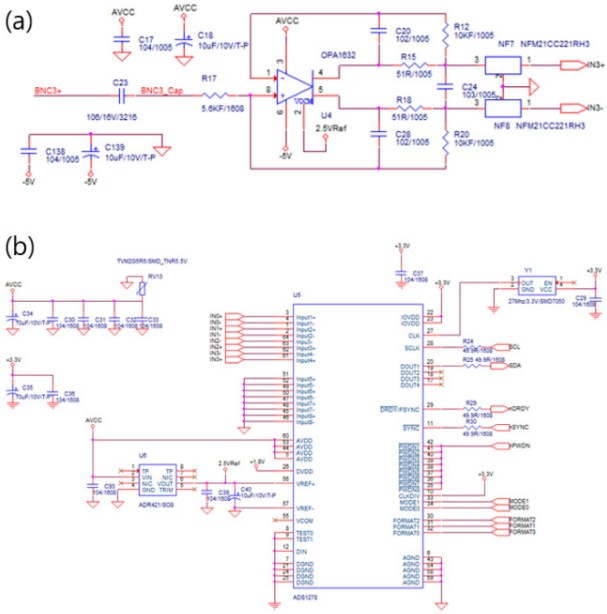

Fig. 3. ADC circuit diagram of the DAQ. (a) Analog Input circuit. (b) ADC circuit.

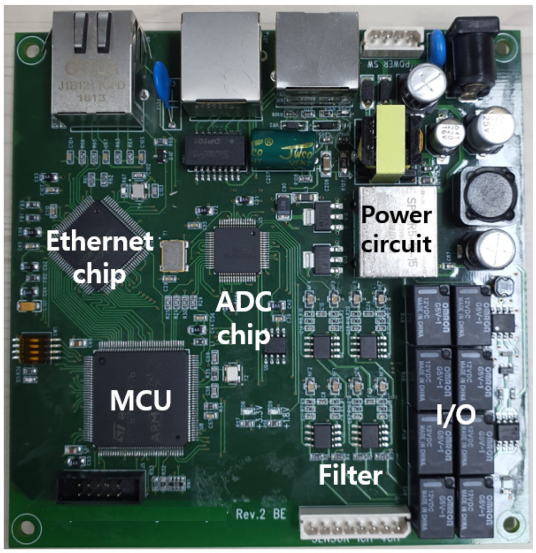

Fig. 4. Photograph of the DAQ PCB board. The board in compact design had the size of 110 mm × 110 mm.

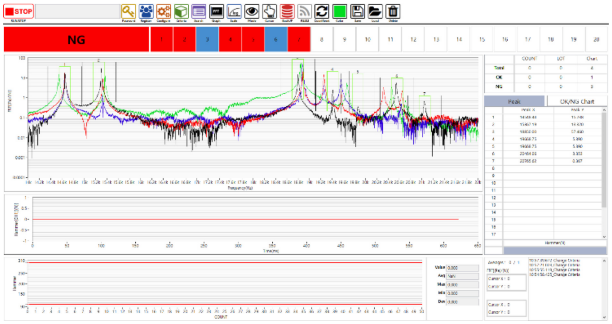

Fig. 5. Snapshot of the main screen of the software. The software was designed to be user friendly for the production line workers.

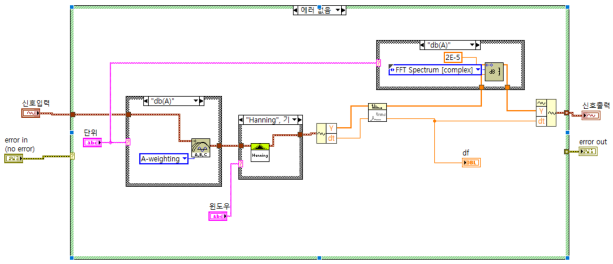

Fig. 6. Block diagram of the FFT converting algorithm of the software.

연동하기 위해서 사용하고, DO(디지털 아웃)는 판정결과 등을 사용자에게 피드백 하기 위해 주로 사용된다.

그림 3은 (a)아날로그 입력부와 (b)ADC 회로부의 회로도를 나타내고 있다.

그림 4는 회로 설계를 바탕으로 제작한 DAQ 하드웨어의 PCB 보드 모습을 나타내고 있다. 제작한 PCB 보드의 사이즈는 110 mm × 110 mm 이며 컴팩트한 디자인을 구현하였다. 센서 입력 커넥터는 현장에서 가장 많이 사용하는 BNC 타입의 커넥터를 적용하였다.

2.1.2 분석 소프트웨어

그림 5는 본 연구에서 개발한 분석 소프트웨어의 모습을 나타내고 있다. 분석 소프트웨어는 산업 현장에서 빠르게 양불 판정을 수행할 수 있도록 구성하였으며, 고유진동수를 측정하고 20개까지 공차 영역을 설정할 수 있도록 개발 하였다. 소프트웨어 개발 툴은 National Instrument사의 Labview 를 사용하였다. Labview는 GUI기반의 강력한 프로그램 개발 툴이다. 본 연구에서 개발한 소프트웨어는 해머에 내장된 힘 센서를 통해 얼마의 힘으로 가진 하였는지도 확인할 수 있도록 하였으며, 고유진동수 추세 및 진폭 값 등도 쉽게 확인 할 수 있도록 개발하였다. 실제 현장에서 작업자 또는 관리자들이 쉽게 조작하고 이해할 수 있도록 디자인 하였다.

그림 6은 측정된 신호를FFT연산하기 위한 소프트웨어의 블

록 다이아그램을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접불량 테스트

본 연구에서는 용접 불량 여부를 판단하기 위해서 자동차 공조 장치에 들어가는 기계 부품을 가지고 테스트를 진행하였다. 용접 불량을 테스트한 제품은 원통 형태이며, 원통의 윗부분과 아랫부분이 마찰 교반 용접 되는 형태이다. 용접이 정상적으로 이루어지지 않은 불량인 경우 내구성이 떨어지므로 향후 공조 장치의 고장으로 연결 될 가능성이 매우 크다. 그림 7에는 본 연구에서 사용된 제품의 용접 부위가 보여지고 있다. 그림 7에서 보여지는 제품은 모자처럼 생긴 부품을 원통 위에 용접하고 표면을 가공하여 매끈하게 만드는 공정을 거친 후의 모습이다. 이러한 후 가공을 하고 난 후 제품은 용접 불량이 발생하여도

Fig. 7. The image of the test sample. The smooth welding line is shown. There was no visual appearance difference between the good welded and the ill welded parts.

Fig. 8. Photograph of the setup to test the welding quality of the welded part. A manually operated hammer was used with a microphone located near the test sample.

용접이 되지 않는 부분이 육안으로는 구분이 되지 않았다. 테스트 샘플은 그림 7과 같이 원둘레를 따라 용접이 이루어지며, 100%, 95%, 90%, 85%로 용접된 샘플들을 사용하여 불량 제품의 구분이 가능한지 테스트를 진행하였다. 제품의 용접 불량 테스트를 수행하기 위한 테스트 방법은 그림 8에 보여지고 있다. 마이크로폰을 테스트 샘플 근처에 위치하고 수동 해머를 사용하여 축 방향으로 샘플을 타격하여 제품의 고유 진동수를 측정하였다.

3.2 측정 결과

그림 9는 양품 (100% 용접)의 측정결과를 나타내고 있다. X축은 진동수(Hz)를 나타내며 14,000 Hz 에서부터 22,000 Hz의 진동수 범위를 나타내고 있다. 용접 불량 검사를 한 양품 샘플의 경우에는 총 7개의 고유 진동수 피크가 형성되는 것을 알 수 있다. 각각의 피크 주파수는 14,653 Hz, 15,295 Hz, 18,796 Hz, 19,415 Hz, 19,862 Hz, 20,543 Hz, 21,043 Hz 로 나타났다. 불량과 양품의

기준이 되는 영역을 공차영역이라 정의 하며 본 연구에서는 양품 10개의 고유진동수를 측정하여 공차 영역을 설정하였다. 생산 시 제조 오차 등이 있을 수 있기 때문에 양품의 피크값을 포함하는 공차 영역의 설정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 측정결과 진동수 피크에서 +/- 100Hz를 공차영역으로 설정하였다. 총 7개의 공차 영역을 설정하였다. 이 공차 영역을 벗어나서 피크가 형성 되는 경우에는 불량으로 판정할 수 있다. 1번 공차의 하한 값은 14,553Hz 이고, 상한 값은 14,753Hz 이며 2번 공차의 경우 하한 값은 15,159Hz 이었고 상한 값은 15,359Hz 이었다. 3번 공차의 하한 값은 18,696 Hz 이었고 상한 값은 18,896 Hz 이었다. 4번 공차의 하한 값은 19,314Hz 이었고 상한 값은 19,514 Hz 이었다. 5번 공차의 하한 값은 19,762 Hz 이었고 상한 값은 19,962Hz 이었다. 6번 공차의 하한 값은 20,443Hz 이고, 상한 값은 20,643Hz 이다. 마지막으로 7번 공차의 하한 값은 20,943Hz 이고 상한 값은 21,143 Hz 이다.

불량 샘플의 경우는 각각 95%, 90%, 85%만 용접된 샘플을 가지고 실험을 진행하였다. 불량 샘플에 대한 주파수 분석 측정결과를 그림 10에 나타내었다. 85% 용접 샘플의 경우 14KHz 대역(공차1)과 15KHz대역(공차2)에서 진동수 변위가 발생하였다. 이는 고유 진동수가 변한 것임을 알 수 있다. 그림 11에는

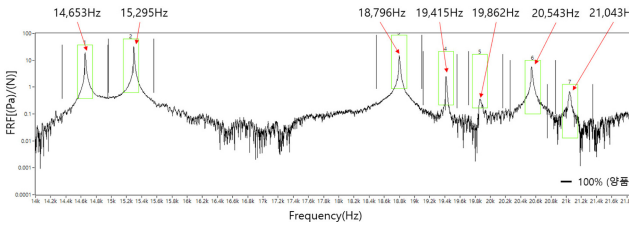

Fig. 9. The frequency spectrum of the test result for the sample with 100% welding.

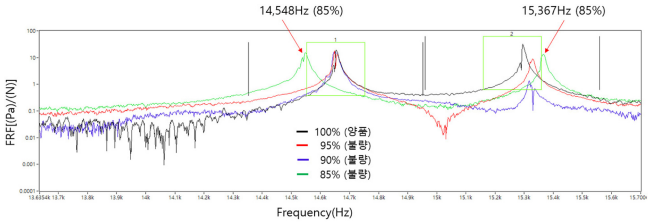

Fig. 10. The frequency spectrum of the test results for the sample with 100%, 95%, 90%, and 85% welding in the frequency range of 13.6 kHz – 15.7 kHz. Note the frequency shifts near 14 kHz and 15 kHz for the ill welded samples.

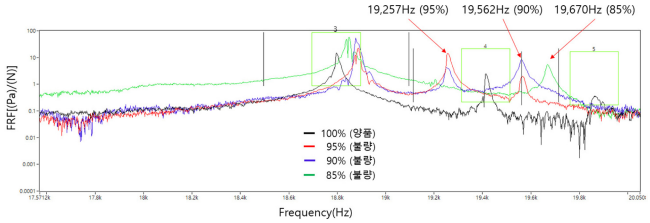

Fig. 11. The frequency spectrum of the test results for the sample with 100%, 95%, 90%, and 85% welding in the frequency range of 17.5 kHz – 20 kHz. Note the frequency shifts near 18.8 kHz, 19.4 kHz for the ill welded samples.

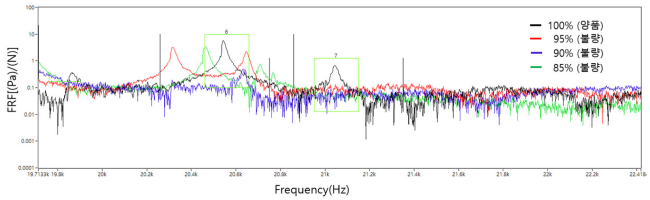

Fig. 12. The frequency spectrum of the test results for the sample with 100%, 95%, 90%, and 85% welding in the frequency range of 19.7 kHz – 22.4 kHz. Note the frequency shifts near 21 kHz for the ill welded samples.

17.5 KHz로 부터 20 KHz까지의 대역에 대한 측정결과를 나타내었다. 18.8KHz 대역(공차 4)에서는 95%, 90%의 제품에서 진동수 변위가 발생하였으며, 80% 제품에서는 피크가 형성되지 않았다. 19.9KHz 대역(공차 5)의 경우에는 95%, 90% 제품에서 진동수 변위가 발생하였다. 20KHz 대역 (공차5)에서도 95%, 90%, 80% 제품에서 진동수 변위가 발생하였다. 그림 12는 21KHz 대역(공차 7)에서 95%, 90%, 85% 제품의 피크가 형성되지 않은 것을 알 수 있다.

표 1은 각 공차 영역에 따른 진동수를 나타내었다. 또한 양품 샘플과 불량 샘플 간의 진동수 편차를 기록 하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 용접이 100% 이루어진 양품 샘플을 기준으로 불량 샘플들은 7개의 공차 영역 중 2개 이상에서 기준 값을 벗어나는 결과를 나타냈다. 95% 용접 샘플의 경우에는 모두 4번, 5번, 6번, 7번 공차를 벗어나는 결과를 나타냈으며, 90% 용접 샘플의 경우에는 4번, 5번 공차를 벗어나는 결과를 나타냈다. 마지막으로 85% 용접 샘플의 경우에는 1번, 4번, 5번, 7번 공차를 벗어 나는 것을 알 수 있었다. 불량 제품의 경우에는 정상품 대비 각각의 공차 영역에서 100Hz 이상의 진동수 변위를 보여주었다. 이를 바탕으로 용접이 정상적으로 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다.

Table 1. Peak positions of the 7 frequency orders for the samples with various welding qualities. The f_0, f_1, f_2, f_3 are the resonance frequencies of the 100%, 95%, 90%, 85% welding samples, respectively.

orders	f_0 (Hz)	f_1 (Hz)	f_0-f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_0-f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_0-f_3 (Hz)
1	14,653	14,648	5	14,646	35	14,548	105
2	15,295	15,329	-34	15,317	78	15367	-72
3	18,796	18,885	-89	18,876	-18	18,850	-54
4	19,415	19,257	157	19,562	-147	19,668	-254
5	19,862	19,564	298	19,562	300	19,668	194
6	20,543	20,315	228	20,631	-88	20,464	79
7	21,043	21,282	-239	21,107	-64	20,765	278

본 연구를 통해 개발한 불량 검출 장치를 사용하여 용접된 부위의 불량 판정을 하기까지는 약 700 msec 의 짧은 시간이 소요 되었다. 1초 이내의 매우 빠른 속도로 불량 판정이 가능함을 알 수 있었다. 다른 비파괴 검사 방식인 초음파, 자분 탐상 방법은 매질 적용, 측정, 세척, 판정 등의 다양한 공정이 필수적(수십 초에서 수분 소요)이어서 음향공진 방법처럼 빠른 측정이 불가능하다. 음향 공진 검사 방식의 가장 큰 장점이 바로 빠른 검출 시간과 간단한 시스템 구성 이라 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰 교반 용접 방법으로 용접한 자동차 부품의 용접 불량을 검출하기 위한 검사기를 개발하였다. 용접 불량을 검출하기 위해 음향공진 분석 방법을 사용하였으며, 이를 위해 마이크로폰과 임팩트 해머를 사용하여 테스트 샘플의 고유 진동수를 분석하였다.

측정결과 100% 용접이 된 양품과 불량품 (95%, 90% 85%) 간의 고유 진동수 변위를 확인할 수 있었으며, 1초 이내의 매우 빠른 시간 안에 불량 제품을 검출 할 수 있어서 산업현장에 적용 된다면 품질 및 생산성 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 이러한 불량 패턴을 통계분석하여 불량의 유형을 사용자에게 피드백 해주는 알고리즘을 탑재하는 연구를 진행하고자 한다. 이러한 피드백 정보가 있다면 연구개발 및 제품생산에 큰 도움이 될 수 있어 용접 불량 검사 시스템을 도입한 기업의 경쟁력이 강화 될 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] Y. Kim, "Future of the Friction Stir Spot Welding Technology for Non-Ferrous Metal", *J. Weld. Join.*, Vol. 30, No. 3, pp. 4-14, 2012.

[2] E.-G. Kim and I.-M. Park, "A Study on Technology for Automatic Inspection of Welding Faulty of Vessel's Parts", *J. Korean Soc. Ind. Converg.*, Vol. 17, No. 4, pp. 255-264, 2014.

[3] S. W. Son, D. H. Kim, and S. Rhee, "Study of Defect Detection for Ultrasonic Welding using Pattern Recognition", *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, pp. 112-112, 2017.

[4] H. Woo, and J. Kim, "Development of fault signal detection system for ultrasonic welding process", *Proc. Inst. Electron. Inf. Eng.*, pp. 621-624, 2017.

[5] T. H. Kim, J. Yu, S. Rhee, and Y. W. Park, "Development of Intelligent Monitoring System for Welding Process Faults Detection in Auto Body Assembly", *J. Weld. Join.*, Vol. 28, No. 4, pp. 81-86, 2010.

[6] S. H. Yun and G. S. Park, "A Study on the Method of Magnetic Flux Leakage NDT for Detecting Axial Cracks", *J. Korean Magn. Soc.*, Vol.21, No.1, pp.23-31, 2011.

[7] S. Jeong, G. Kim, and H. Lee, "Inspection technology of crack of crankshaft using Eddy Current Testing", *Proc. Korean Soc. Automot. Eng.*, pp.2889-2892, 2010.

[8] Chang-Guen Oh, Kyung-Il Park, Sok-Chu Park, "Calculating Method of FRF Sub-structure Mode Synthesis Method", *J. Korean Soc. Of Marine Eneinnering.*, Vol.39, No.4, pp.393-398, 2015.