http://dx.doi.org/10.7735/ksmte.2016.25.1.48

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2283-4846(Online) / ISSN 2233-6036(Print)

비접촉 SH-EMAT을 이용한 TIG용접부 건전성 평가

박태성[a], 박영환[b], 박익근[a*]

Evaluation of the Integrity of TIG Welding Using Non-Contact SH-EMAT

Tae Sung Park[a], Yeong Hwan Park[b], Ik Keun Park[a*]

[a] *Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea*
[b] *Department of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Pusan 48513, Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 27 January 2016
Revised 14 February 2016
Accepted 14 February 2016

Keywords:
Non-Contact
SH-EMAT
TIG Welding
Phased Array-UT
Radiographic Testing
Integrity

ABSTRACT

An EMAT can be used to reliably detect defects as it serves as a non-contact transducer with the ability to transmit ultrasonic waves into specimens without couplant. Moreover, an EMAT can easily generate desired waves by altering the design of the coil and magnet. This study proposes an SH-EMAT to evaluate the integrity of the TIG welding part. A stainless steel was welded using the TIG welding method. The welding current was varied to create artificial defects. Both the PA-UT and the RT were applied to verify the defect size. The experimental results generated by using the EMAT were compared with those methods. The amplitude was observed to decrease with an increase in the defect size. These results confirmed that the presence of defects can be reliably detected by attenuation of signal amplitude. The results demonstrated that the proposed method is suitable for evaluating the integrity of TIG welding.

1. 서 론

용접은 금속의 가용성을 이용하여 두 개의 금속을 그 용융 온도 이상으로 가열하여 접합하는 야금학적 체결법으로, 교량, 토목, 건축, 기계, 압력용기, 석유화학, 항공기 및 원자력 설비 등 광범위하게 사용되고 있어 고도로 발달해 가는 현대 산업 분야에서 용접은 더욱 중요시되고 있다. 특히 TIG(tungsten inert gas)용접은 LNG 선박, 항공기, 화학플랜트 등 산업현장에서 일반적으로 기밀, 수밀, 유밀 및 정밀을 필요로 하는 분야에서 널리 사용되고 있으며, 비소모식 용접으로 비철금속의 용접에 일반적으로 사용되며, 대부분의 금속을 접합할 수 있어 다양한 산업분야에서 널리 사용되고 있다[1]. TIG용접은 비소모성 텅스텐으로 된 전극봉과 모재 사이에 아크를 발생시켜 토치를 통하여 Ar과 같은 불활성 가스의 흐름을 지속시켜 용접부를 대기의 오염으로부터 보호하여 발생된 아크열로 용접하는 방법으로서 용접 입열의 조정이 용이하고 기계적 성질 및 내부식성이 우수하고 용접부 변형이 적고 타 공정에 비하여 재료 절감이 가능하며 자동화에 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 상변화에 의한 용융부 재질의 변화, 열에 의한 상변화로 인해 균열이 발생하기 쉽고, 높은 입열에 의해 열영향부가 커지고 용접부에 기공이 발생할 소지가 있다[2]. 이러한 결함들은 제품의 품질 및 신뢰성에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 용접부의 결함을 정량적으로 평가하는 것은 구조물 전체의 건전성 및 안정성 측면에서 매

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6332
Fax: +82-2-977-4507
E-mail address: ikpark@seoultech.ac.kr (Ik Keun Park).

우 중요하다.

용접부 내부에 발생하는 결함을 비파괴적으로 평가하는 방법으로는 방사선투과시험법, 초음파탐상법 등이 주로 사용되고 있다. 방사선투과검사법은 피폭 등의 문제 뿐만 아니라 실시간 처리의 어려움으로 인해 초음파탐상법이 이를 대체할 수 있는 기법으로 많이 사용이 되고 있다[3]. 하지만 기존의 초음파 탐상법에는 주로 압전형 탐촉자를 이용하는 접촉식 방법으로 넓은 영영의 검사에는 시간 소요가 많고 자동화와 현장 적용에 어려움이 많다[4]. 또한 접촉 시 방법은 접촉매질, 접촉압력, 표면상태 등에 따라 검사결과가 달라져 신뢰성 저하의 원인이 된다[5]. 이러한 접촉식기법의 문제점을 해결하고 검사의 자동화 및 현장 적용성을 높이기 위해서 다양한 비접촉식 검사 기술들이 주목을 받고 있다. 현재 적용되고 있는 비접촉식 초음파검사기법으로 EMAT(electro magnetic acoustic transducer), 레이저초음파, 공기 결합 트랜스듀서 등이 대표적이다. 그 중에 EMAT은 코일과 자석을 이용하여 전자기적인 특성을 이용하여 비접촉식으로 초음파를 송·수신하는 방식으로서 자석과 코일의 배열을 달리함으로서 다양한 모드의 초음파를 쉽게 송·수신 할 수 있다. 특히 모드 변환이 없고 분산특성이 단순하여 신호해석이 다른 초음파 모드에 비해 쉬운 SH(shear horizontal)파를 쉽게 송·수신 할 수 있어 기존의 접촉식 SH파를 적용할 때 발생하는 검사 속도 및 신뢰성 저하의 문제를 해결함으로써 검사의 자동화 및 현장 적용성을 향상 시킬 수 있다[6].

따라서 본 연구에서는 기존의 접촉식 초음파 기법의 한계를 극복하고 검사의 자동화 및 현장 적용성을 높일 수 있는 SH-EMAT을 이용하여 TIG용접부에 발생하는 결함을 검출할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

2. 관련이론

도체가 전기장 내에 놓이면 도체내의 이온들은 전기장에 의한 영향과 전자들과의 충돌이 일어난다. 전기장 내에서 이온들은 전자들과 반대방향으로 운동하며, 전자들과의 충돌에 의하여 전자들이 갖고 있던 운동량을 전달받는다. 이러한 운동량 전달에 의한 힘은 전기장에 의해서 받는 힘의 크기와 거의 같고 방향만 반대이므로 전기장 내에서 받는 힘은 무시할 수 있다. 그러나 자기장 B_0가 전기장 내에 있는 도체에 가해지면 도체내의 전자들과 이온들은 식 (1)과 같이 Lorentz 힘을 받게 된다 (Fig. 1 참조). EMAT에 의한 초음파 송수신에는 3가지의 메커니즘으로 설명되어질 수 있다. 이것은 수신효율과 송신효율이 바이어스 자속밀도 B_0에 비례하는 로렌츠효과와 바이어스 자화 M_0에 비례하는 자화효과, 그리고 자왜정수에 비례하는 자왜효과(magnetostrictive effect)이다. 자왜효과는 강자성체 재료의 외부에서 자기장을 가하면 자구(magnetic domain)의 재배열이 일어나면서 자기변형이 발생하는 현상이다. 로렌츠효과는 도체 내에서, 자왜효과는 강자성체에 존재한다[7-10].

EMAT을 도체에 접근시키면 도체는 EMAT에 의해 자화되고 코일에 교류전류를 흐르게 하면 코일은 공기 중에 자기장을 형성하며 도체표면을 거쳐 도체내로 자기장이 발생한다. 도체내의 자기장은 맥스웰 방정식과 전자기적 경계조건에 의해 구해질 수 있다. 도체내의 자장 H는 바이어스 자장과 작용하는 합성 체적힘 f로 구한다. f는 로렌츠힘 $f(L)$, 자화력 $f(M)$, 자왜력 $f(MS)$의 합성 힘이 되며, 각각 다음 식으로 표현된다.

$$f^{(L)} = J_e \times B_0 \tag{1}$$

$$f^{(M)} = (\nabla H)\cdot M_0 \tag{2}$$

$$f^{(MS)} = \nabla\cdot(e\cdot H) \tag{3}$$

여기서, J_e는 도체 내에 발생하는 와전류이며, 변위전류를 무시한 맥스웰 식($J_e = rotH$)으로부터 얻어진다. e는 자왜정수 텐서로서 자장 H_k에 의해 발생하는 자왜응력 σ_{ij}로 식 (4)와 같다.

$$e_{k,ij} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial H_k} \tag{4}$$

합성 체적힘 f의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla\cdot T + f \tag{5}$$

여기서 u는 초음파 입자의 변위이며, T는 응력 텐서이다.

EMAT에 의해 자화된 영역에 초음파가 들어오면 도체내의 자장은 초음파의 변위 u에 의해 설명되고, 이것을 통해 다음 식의 부가적인 전기장 E와 자기장 B가 도체 내에 생성된다.

$$E = \sigma^{-1}J + \frac{\partial u}{\partial t}\times B_0 \tag{6}$$

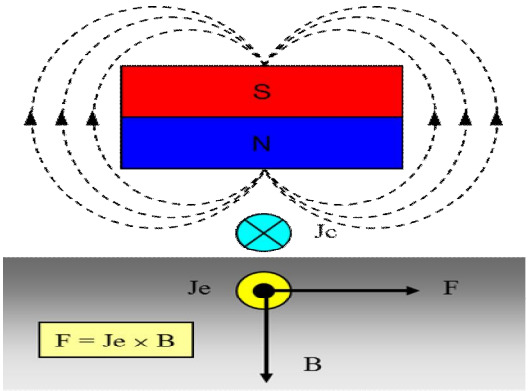

Fig. 1 Wave generation mechanism of the EMAT

$$B = \mu_0 \mu \cdot (H - M_0 \nabla \cdot u) + e \cdot \epsilon \tag{7}$$

여기서, J는 전류밀도, σ는 전기전도율, μ_0는 투자율, μ는 비투자율 텐서이다. 또한 $e_{ij,k}$는 수신에 대한 자왜정수 텐서로서 초음파의 왜곡 ϵ_{ij}에 의한 자속밀도의 변화율 B_k을 표시하면 다음과 같다.

$$e_{ij,k} = \frac{\partial B_k}{\partial \epsilon_{ij}} \tag{8}$$

식 (6)과 (7)은 맥스웰의 방정식 $rotE = \partial B/\partial t$, $rotH = J$를 사용하여 도체내의 자장 H와 전기장 E가 얻어진다. 이것은 식 (9)와 (10)의 진동하는 도체표면에 대한 경계조건을 만족하고, EMAT의 코일이 공기 중에서의 전기장, E^{air}와 자장, H^{air}로 변환된다.

$$n_0 \times (E^{air} - E) = V_n (B_0^{air} - B_0) \tag{9}$$

$$n_0 \times (H^{air} - H) + n' \times (H_0^{air} - H_0) = 0 \tag{10}$$

여기서, n_0와 n'은 각각 초기상태와 초음파가 파동하는 상태의 도체표면에 법선방향이 되고, V_n은 표면에 수직방향으로의 입자속도가 된다. 최종적으로 E^{air}와 H^{air}가 EMAT의 코일에 수신된다.

EMAT을 이용한 SH파의 발생은 로렌츠힘을 이용한 경우 전파방향에 대해 수직인 면내의 힘을 일정 간격마다 힘의 방향을 180°로 반전하여 피검체에 전달한다. 따라서 Fig. 2와 같이 자석의 극성을 반전시킨 배열형 자석이 필요하고, 각 자석 간격이 SH파의 파장의 1/2이 된다. EMAT의 구동 주파수 결정은 센서 배열의 자석 간격에 따라 결정된다[11].

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

Fig. 3은 EMAT을 이용하여 SH파를 발생시키기 위한 시스템의 개략도를 나타내고 있다. WIS사의 EMAT은 Spiral 코일의 형태로 구성되어 있으며, 고출력 초음파 펄서/리시버(Ritec, RAM1000)를 이용하여 EMAT을 가진하게 된다. 발생된 SH파는 동일한 형태로 제작된 수신용 EMAT으로 수신되어 증폭기(pre-amplifier)에서 증폭된 후 펄서/리시버의 수신입력단자로 연결된다. 수신신호는 다양한 신호처리 및 저장을 위해 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9374M)로 출력되어 신호의 평균화 및 주파수 분석 등을 수행할 수 있도록 구성하였다. 여기서, EMAT의 자석간격은 2.6 mm로 파장은 자석 간격의 두 배인 5.2 mm이다. EMAT 센서는 Fig. 3과 같이 용접부를 중심으로 한쪽에는 송신 센서를 다른 한쪽에는 수신 센서를 위치시키고 결함의 유무 및 크기에 따라서 초음파의 수신 진폭을 측정할 수 있도록 배치하였다.

일반적으로 SH-EMAT에 의한 초음파 발생시 Fig. 4의 이론적 SH파의 분산선도에서 확인 할 수 있듯이 다양한 모드(n=0,1,2,3)의 SH파가 발생된다. 본 연구에서는 시험체의 두께에 따라서 속도의 변화가 없는 n0 모드를 사용하여 결함 탐상을 수행하였다. n0 모두만을 선택적으로 수신하기 위하여 자석 간격의 두 배인 5.2 mm의 기울기를 가지는 파장선을 긋고 n0 모두가 발생할 수 있는 fd 조건을 확인하였다. n0 모드가 발생되는 fd 값은 1.2로 주파수를 1.2 MHz로 설정하여 실험을 진행하였다.

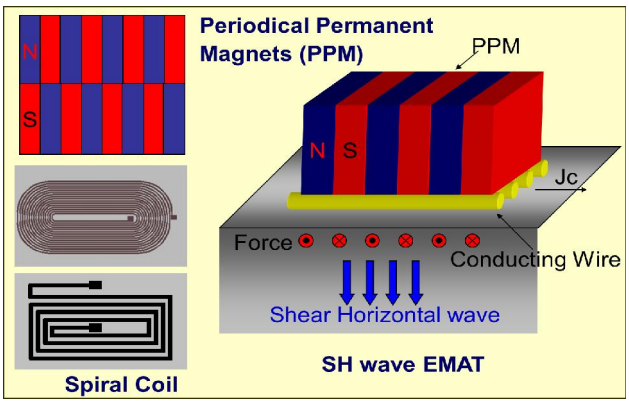

Fig. 2 Structure and coil of the general EMAT for the SH wave

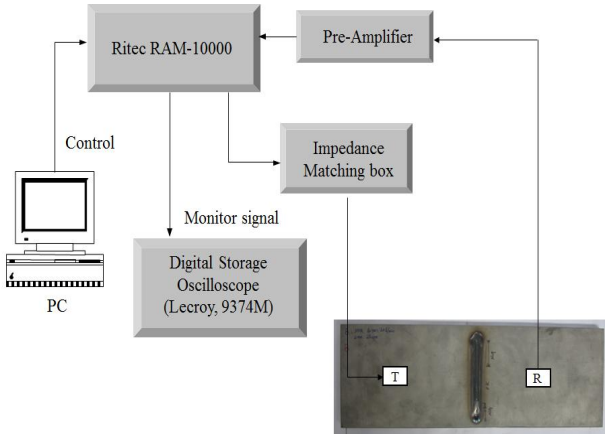

Fig. 3 Schematic diagram of SH-EMAT system

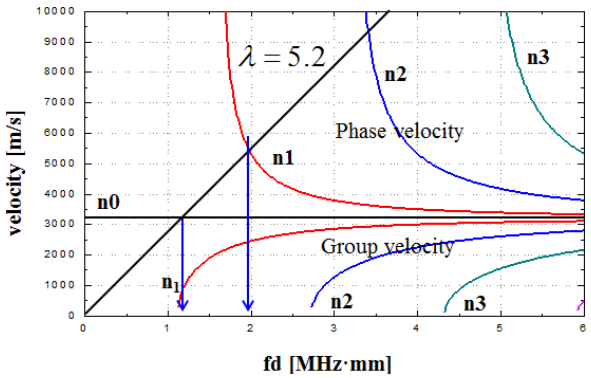

Fig. 4 Dispersion curve for SH-wave

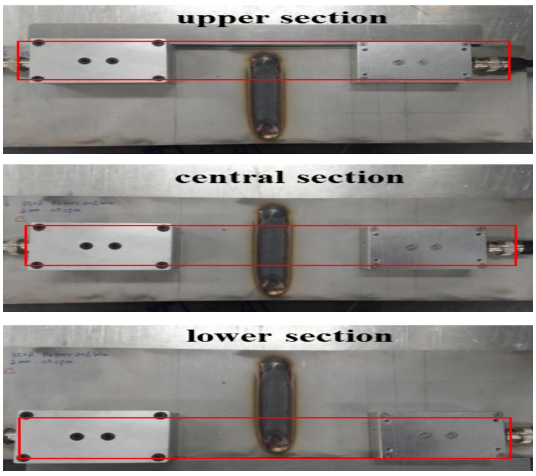

Fig. 5 Arrangement of transducer

Table 1 TIG welding condition

Electrode	DCSP ϕ3.2 2% Th-W 60º
Arc length	2 mm
Gas flow rate	Ar 100% 20 L/Min
Welding speed	23 cpm
Welding current	200 A, 300 A, 400 A

용접부 전 범위를 검사하기 위하여 센서를 Fig. 5와 같이 시험체의 상단부, 중앙부, 하단부로 이동하면서 각 지점에서 각각 3번씩 수신 진폭을 측정하였다. 또한 결함 유무 및 크기를 확인하기 위하여 기존의 용접부 검사에 많이 활용이 되고 있는 방사선 투과시험법과 방사선투과검사를 대체하기 위하여 최근 많이 사용이 되고 있는 위상배열탐상 기법을 수행하고 결함의 유무 및 크기에 따른 초음파 수신 강도를 비교하였다.

3.2 시험편

본 연구에서 사용된 STS304 강을 TIG용접법을 이용하여 용접하였다. 시험편의 두께는 10 mm이며, 길이는 300 mm, 폭은 100 mm 제작하였다. 용접 시 전극의 종류, 전류의 세기, 보호가스의 유량, 아크의 길이, 용접속도를 조절하여 TIG용접 시 최적의 조건을 선정하고 인공적으로 결함을 발생시키기 위하여 다른 조건들은 동일하게 하고 용접부에 품질에 가장 크게 영향을 미치는 전류를 제어함으로서 용접부 내부에 인공적인 결함이 발생될 수 있도록 하였다. Table 1은 각각의 시험편에서의 용접 조건을 나타내고 있다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 결함이 발생되지 않는 최적의 용접 조건을 선정하

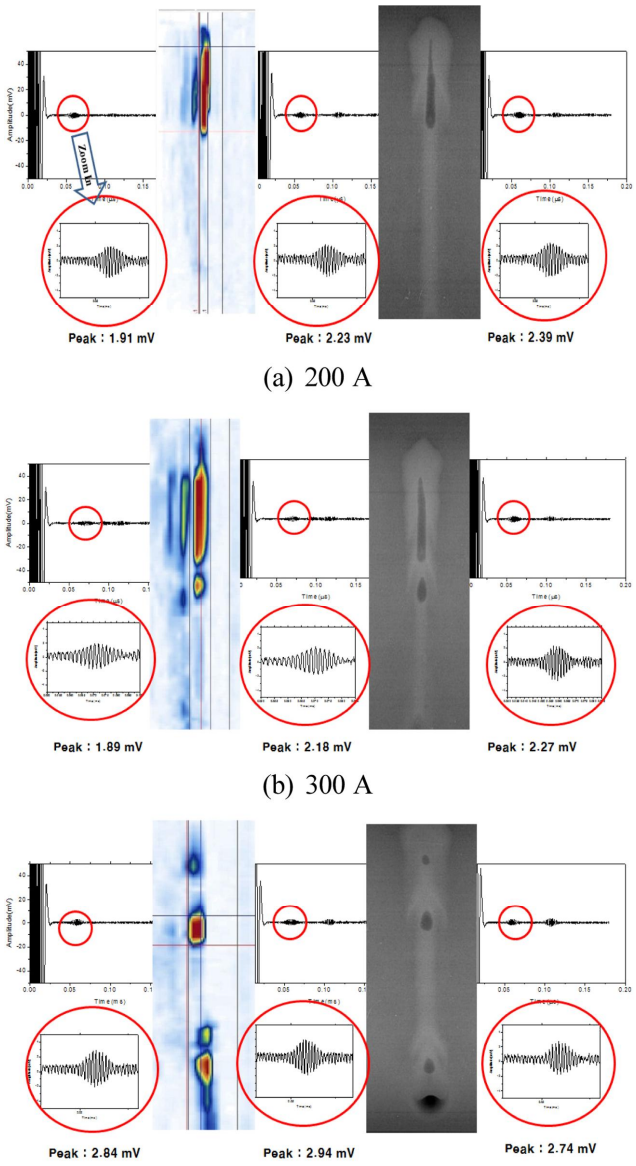

Fig. 6 Measurement of amplitude according to the location of transducer

고 SH-EMAT을 이용하여 결함을 모니터링하기 위하여 용접전류를 변화시켜 결함이 발생하도록 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 결함 유무 및 크기를 정확하게 확인하기 위하여 위상배열 초음파 탐상법 및 방사선투과검사법을 이용하여 결함의 위치 및 크기를 확인하였다. Fig. 6은 위상배열 탐상법 및 방사선 투과검사를 통해 얻어진 내부 결함의 이미지 및 각각의 위치에서 수신된 초음파의 진폭을 나타내고 있다. 왼쪽의 신호부터 각각 상단부, 중앙부, 하단부의 신호를 나타내고 있다. Fig. 6의 방사선투과검사 및 위상배열 초음파 탐상법을 사용하여 획득된 이미지에서 확인 할 수 있듯이 결함이 발생되지 않는 최적 용접 전류에서 용접 전류를 변화시킨 경우 내부에 결함이 발생되었음을 확인할 수 있다. 용접 조건

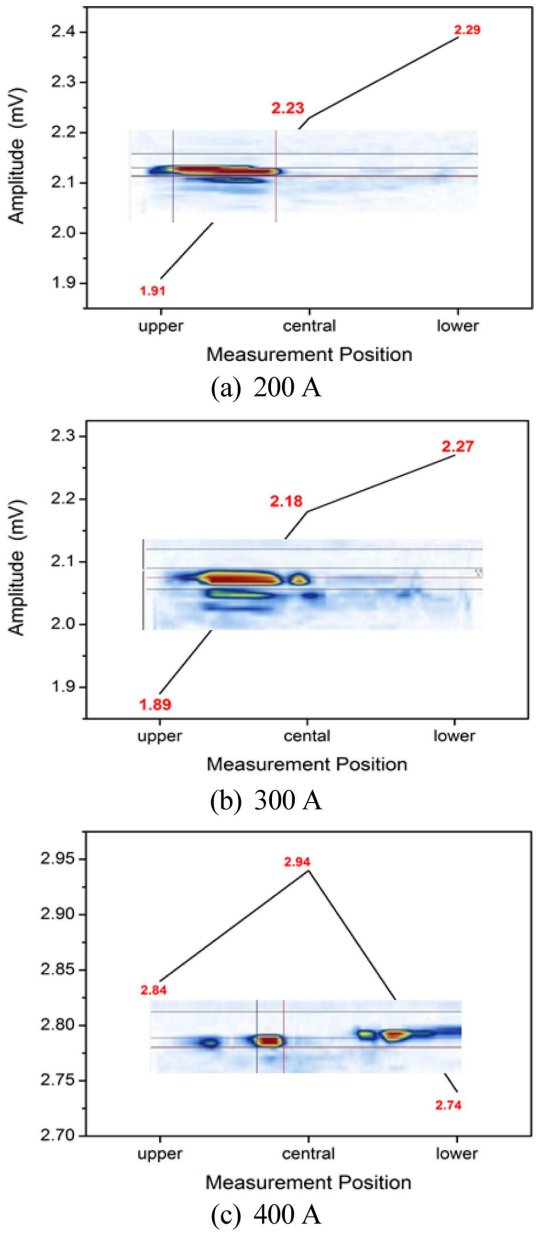

Fig. 7 Change of the amplitude according to the defects size

에 따라 발생된 인공적인 결함을 EMAT의 투과법을 이용하여 진폭의 변화를 확인하였다.

Fig. 7은 결함의 크기와 위치에 따른 수신 신호의 진폭의 변화를 확인하기 위하여 각각의 위치에서의 수신 신호의 진폭의 변화를 나타내었다. Fig. 7(a)에서 확인할 수 있듯이 시험체의 상단부에 결함이 있는 위치에서는 신호의 진폭이 1.91 mV로 측정되었으며 결함의 끝단부가 걸쳐있는 중앙부에서는 2.23 mV, 결함이 존재하지 않는 하단부에서는 2.29 mV를 나타내었다. 이는 결함부에서 수신 신호의 감쇠로 인해 결함이 큰 경우는 신호의 반사가 많이 일어나 진폭이 작아지고 반대로 결함이 상대적으로 작은 경우에는 투과파의 강도가 상대적으로 크게 나타난 것이다. 용접 전류가 300 mA, 400 mA의 경우에도 각각의 결함이 존재하는 위치에서 수신 진폭의 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 결함의 크기가 상대적으로 큰 경우에 수신 강도의 진폭이 작은 결함의 비해 작게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 접촉식 초음파 기법의 한계를 극복하기 위하여 비접촉식 기법 중에 하나인 EMAT 기법을 이용하여 TIG 용접부에서 발생하는 결함을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 검사의 자동화 및 현장 적용성을 높이기 위하여 모드 변환이 없고 신호의 해석이 간단한 SH-EMAT을 적용하여 결함의 유무와 크기에 따른 수신 신호의 변화를 실험적으로 확인하고 기존에 용접부 결함 검출에 사용하고 있는 방사선투과검사 및 위상배열 초음파 탐상법을 이용하여 실제 결함의 크기를 측정하고 EMAT에 의해 수신된 신호 결과와 비교 검토한 결과 결함의 크기에 따른 수신 진폭의 상관성을 확인할 수 있었다. 이를 통해 기존의 현장 적용성 및 자동화에 한계를 가지고 있는 방사선투과검사 및 위상배열초음파 탐상법을 대체하고 기존 초음파 기법의 신뢰성 저하 문제를 해결할 수 있는 기법이라 판단된다.

후 기

이 논문은 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Kim, J., Kim, B., Lee, C., Kim, Y., Park, Y., 2015, Study on The Status of Welded Parts According to The Types of Shielding Gas in TIG Welding, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 14:2 38-43.

[2] Song, K., Yoo, H., Lee, C., 1994, A Technical Report on the Evaluation of the Integrity for the TIG Welded Spacer Grid, Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI/RT-448/94.

[3] Yoon, S., Kim, J., Song, K., Cha, Y., 2006, The Development of Automatic Inspection System for Flaw Detection in Welding Pipe, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 15:2 87-92.

[4] Jhang, K., Kim, H., Cerniglia, D., Djordjevic, B., 2001, Non-contact Ultrasonic Nondestructive Evaluation/Inspection using Laser Generation and Air Coupled Transducer, Conference Proceeding of

The Korean Society of Mechanical Engineers, 86-92.

[5] Park, I., Lee, C., Kim, H., Park, T., Kim, Y., Cho, Y., Song, W., Ann, H., 2005, Non-contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments, Journal of The Korean Welding & Joining Society, 23:5 8-43.

[6] Lee, J., Park, I., Kim, Y., Kim, D., 2011, Evaluation of Thickness Reduction in Steel Plate by Using SH-EMATs, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 31:1 47-52.

[7] Ahn, B., Kim, Y., Kim, Y., Lee, S., 2004, Development of an EMAT System for Detection Flaws in Pipeline, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 24:1 15-21.

[8] Murayama, R., 2002, A Survey of Electromagnetic Acoustic Transducer, Journal of Japanese Society for Nondestructive Inspection, 51:2 63-67.

[9] Hirao, M., Ogi, H., 2002, Noncontact Monitoring of a Process with Electromagnetic Acoustic Resonance, Journal of Japanese Society for Nondestructive Inspection, 51:2 79-82.

[10] Ahn, B., Kim, Y., Kim, Y., Lee, S., 2000 Characteristics of Magnetostrictive Sensor for Detecting the Flaws in Pipe, 20:1 46-53

[11] Hirao, M., Ogi, H., 2003, EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements, Springer Science Business Media, New York.