

필렛 용접부의 비접촉 초음파 검사 기법

박익근* · 이철구* · 김현목** · 박태성*** · 김용권**** · 조용상***** · 송원준***** · 안형근*****

*서울산업대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원

***서울산업대학교 산업대학원

****서울산업대학교 에너지환경대학원

*****한전 전력연구원

*****포항산업과학연구원

*****세안기술(주)

Non-contact Ultrasonic Inspection Technology of Fillet Weldments

Ik-Keun Park*, Chul-Ku Lee*, Hyun-Mook Kim**, Tae-Sung Park***, Yong-Kwon Kim****, Yong-Sang Cho*****, Won-Joon Song***** and Houn-Kun Ahn*****

*Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

**Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

***Graduate School of Technology, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

****Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

*****Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

*****Research Institute of Industrial Science and Technology, 32 Hyoja-Dong, Nam-Ku, Pohang, Korea

*****Sae-An Corp., 481-10 Gasan-Dong, Geumcheon-Gu Seoul, 153-803, Korea

Abstract

The non-destructive Inspection of the fillet weldment has difficulties due to its geometrical complexity and uneasy access. The surface shear horizontal wave (SH-wave), however, has been successfully applied to the detection of cracks on the surface and sub-surface of the fillet weldment heel part. The conventional ultrasonic inspection using the surface SH-wave is usually a contact method using piezoelectric transducer. Thus, it is not suitable for a field application because the reliability and repeatability of inspection are significantly affected by test conditions such as couplant, contact pressure and pre-process. In order to overcome this problem, a non-contact SH-wave inspection method using EMAT is propose. The experimental results with this non-contact method are compared with those with a conventional ultrasonic method in fillet weldment with slit type defects. It is shown that the non-contact inspection technique requires simple procedure and less time in the fillet weldment inspection.

* Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received April 6, 2005)

Key Words : Fillet weldments, Surface crack, Ultrasonic, SH-wave, EMAT

1. 서 론

시험체의 표면 및 표면직하의 비파괴검사방법에는 자분탐상시험(MT), 침투탐상시험(PT), 와전류탐상시험(ECT) 등이 있다. 이들 검사방법은 검사하고자 하는

시험체의 종류나 형상에 크게 제한을 받기 때문에 결함을 정량적으로 평가하는 것이 곤란하며, 특히 시험체에 접근이 불가능한 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 주로 내부결함 검출에 사용되고 있는 초음파탐상시험을 표면결함 검출에 적용하는 비파괴검사가 적용되고 있으나¹⁾, 기존의 방법은 대부분 압전형 탐촉자를

이용하는 접촉식 방법으로 접촉매질, 접촉압력, 표면상태 등에 따라 검사결과가 달라져 신뢰성이 저하되는 원인이 되고 있다. 최근에는 이러한 접촉식 초음파검사기법의 한계를 극복하기 위해 비접촉 초음파검사기법들이 개발되고 있다²⁻⁴⁾.

대표적인 비접촉 초음파검사기법의 하나로서 EMAT (electro magnetic acoustic transducer)는 1968년 Wallace⁵⁾가 기존의 접촉식 초음파검사기법에서는 불가피한 접촉매질을 사용하지 않고 전자력을 이용하여 금속 검사체의 표면에서 수 mm정도 떨어져 초음파를 발·수신하는 연구결과를 보고하였다.

1970년대에 이르러 R. B. Thompson은 로렌츠 힘과 자왜효과를 이용한 EMAT의 구동원리를 설명하였으며, 1980년대에는 B. W. Maxfield에 의해 급속히 연구가 진행되고 있다⁶⁻⁸⁾.

EMAT은 기존의 압전소자를 이용하는 PZT와는 달리 비접촉으로 초음파를 발생하고 수신하는 것이 가능하다. 외부 자계로 도체 표면에 근접시키면 발생하는 자왜효과에 의해 도체가 가진되고 또한 역과정으로 초음파를 수신하게 된다. 따라서 도전체에 한정하여 초음파를 발생시킬 수 있다. EMAT의 중요한 특징으로는 첫째, 비접촉검사가 가능하여 검사체의 표면처리가 불필요하고 코팅이나 보호막을 제거하지 않아도 된다. EMAT으로 가능한 비접촉 거리는 약 10 mm 정도까지이며 대부분 1 mm이하에서 작동한다. 둘째, 발생이 어려운 다양한 초음파의 모드를 발생시킬 수 있다. EMAT에 의해 발생하는 초음파의 모드는 주로 유도초음파(guided wave)이지만 자석과 코일의 형상과 배열을 조절하여 SH파와 같은 초음파 모드를 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 각종 건축구조물, 발전 플랜트 설비 등에 다양하게 이용되는 필렛 용접부의 표면결함탐상에 EMAT을 적용하였다. 필렛 용접부의 힐(heel)부에는 표면에서 용접열영향부를 따라 45°~55°의 경사로 균열이 발생하는 경우가 많다. 이러한 검사부위는 일반적으로 검사자의 접근이 어렵고, 기학적복잡성 때문에 Rayleigh파 또는 Creeping파를 적용하는 기존의 표면파를 이용하는 초음파검사기법으로는 탐상이 불가능하다. 그러나 표면SH파는 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하게 진동하며 전파하기 때문에 표면상태에 영향을 적게 받고 진동모드가 간단하여 필렛 용접부의 힐부에 존재하는 표면크랙과 같은 결함검출에 유용하다. Fig. 1은 필렛 용접부를 전파하는 표면파의 종류별 전파경로를 보여준다. 그러나, 기존의 압전소자를 이용하는 접촉식 표면SH파법은 횡파를 직접 시험체중에 전달하기 때문에 고점성의 접촉매질을 사용해야 하며, 탐상조건이 까다로워 현장적용성이 떨어지고 검사자동화에

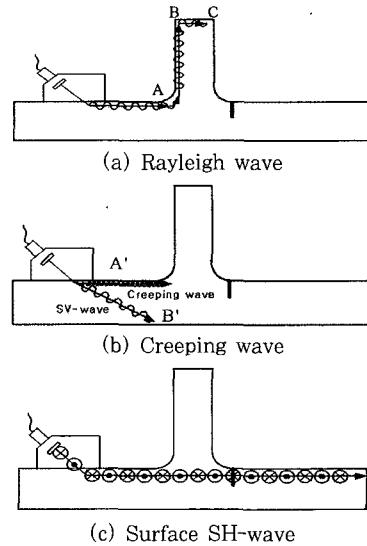


Fig. 1 Propagation direction of each surface wave types at fillet weldments

어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 표면 SH파를 비접촉으로 발수신하는 것이 바람직하다. 따라서 필렛 용접부의 검사신뢰성을 향상시키기 위해, 현장 접근의 제한성, 표면의 전처리 과정, 용접 비드 제거, 접촉매질의 공급과 같은 검사환경을 극복할 수 있는 비접촉 초음파검사기법을 제안하고, 유용성 유무를 실험적으로 검증하여 실용성 있는 비접촉 초음파검사기법을 개발하고자 한다.

2. EMAT에 의한 표면SH파의 발생

도체가 전기장내에 놓이면, 도체내의 이온들은 전기장에 의한 영향과 전자들의 충돌이 일어난다. 전기장내에서 이온들은 전자들과 반대방향으로 운동하며, 전자들과의 충돌에 의해 운동에너지를 전달받는다. 이러한 운동에너지 전달에 의한 힘은 전기장에 의해 받는 힘의 크기와 거의 같고 방향만 반대이므로 전기장내에서 받는 힘은 무시할 수 있다. 그러나 자기장 B_0 가 전기장내에 있는 도체에 가해지면 도체내의 전자들과 이온들은 식(1)과 같이 로렌츠 힘을 받게 된다.(Fig. 2참조)

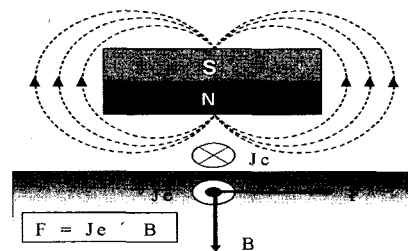


Fig. 2 Wave generation mechanism of the EMAT

EMAT에 의한 초음파 발생 및 수신은 3개의 메카니즘으로 설명될 수 있다. 첫째는 발신표면과 수신표면이 바이어스 자속밀도 B_0 에 비례하는 로렌츠 효과, 둘째는 바이어스 자화 M_0 에 비례하는 자화효과, 셋째는 자왜정수에 비례하는 자왜효과이다. 로렌츠 효과는 도체내에서 존재하며, 자왜효과는 강자성체에 존재한다^{2,3,5}.

EMAT을 도체에 접근시키면 도체는 자화되고, 코일에 교류전류를 통과시키면 공기 중에 자기장을 형성하여 도체표면을 거쳐 도체내에 자기장이 발생한다. 도체내의 자기장은 Maxwell 방정식과 전자기적 경계조건에 의해 구할 수 있다. 도체내의 자장 H 는 바이어스 자장과 작용하는 합성 체적력 f 로 구한다. f 는 로렌츠 힘($f^{(L)}$), 자화력($f^{(M)}$), 자왜력($f^{(MS)}$)의 합성력이며, 각각 다음의 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_e 는 도체 내에 발생하는 와전류이며, 변위전류를 무시한 Maxwell 방정식, $J_e = \text{rot}H$ 으로부터 얻어진다. e 는 자왜정수 텐서로서 자장 H_k 에 의해 발생하는 자왜응력 σ_{ij} 로 식(4)와 같다.

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

또한, 합성 체적력 f 의 운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서, u 는 초음파입자의 변위이며, T 는 응력텐서이다.

EMAT에 의해 자화된 영역에 초음파가 들어오면 도체내의 자장은 초음파 변위 u 로 설명되고, 이것으로부터 추가적인 전자장 E 와 B 가 도체내에 작용된다.

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

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

여기서, J 는 전류밀도, σ 는 전기전도율, μ_0 는 투자율, μ 는 비투자율텐서이다. 또한 $e_{ij,k}$ 는 수신에 대한 자왜정수

텐서로서 초음파의 왜곡 ε_{ij} 에 의한 자속밀도의 변화를 B_k 를 표시하면 식(8)과 같다.

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

식(6)과 식(7)은 Maxwell 방정식, $\text{rot}E = \partial B / \partial t$ 와 $J = \text{rot}H$ 를 사용하여 도체내의 자장 H 와 전기장 E 가 얻어진다. 이것은 식(9)와 식(10)의 진동하는 도체표면에 대한 경계조건을 만족하고, EMAT의 코일이 공기 중에서의 전기장 E^{air} 와 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_0 와 n' 는 각각 초기상태와 초음파가 진동하는 상태의 도체표면에 법선방향이고, V_n 은 표면에 수직 방향인 입자속도이다. 최종적으로 E^{air} 와 H^{air} 가 EMAT의 코일에 의해 수신된다.

로렌츠 힘을 이용하여 SH파를 발생하는 경우, 전파 방향에 대해 수직인 면내의 힘을 일정 간격마다 힘의 방향을 180°로 반전하여 전달한다. 따라서 Fig. 3과 같이 자석의 극성을 반전시킨 배열형 자석이 사용되고, 자석의 간격이 SH파의 1/2파장이 된다. EMAT의 구동 주파수는 자석의 배열간격에 의해 결정된다^{4,5}.

3. 실험장치 및 조건

3.1 접촉식 표면SH파 검사시스템

Fig. 4는 접촉식 표면SH파를 이용하여 필렛 용접부를 탐상하기 위해 구성한 펄스반사식 초음파검사시스템의 구성도이다. 압전형 초음파탐촉자는 초음파탐상기에

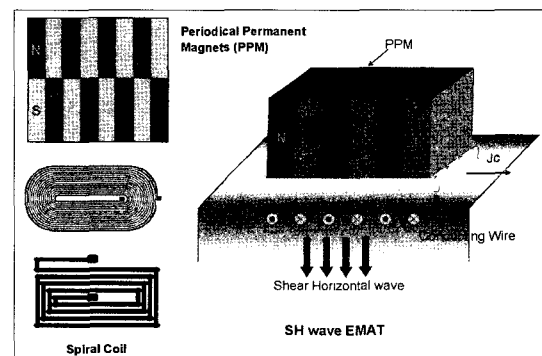


Fig. 3 Structure and coil of the general EMAT for the SH wave

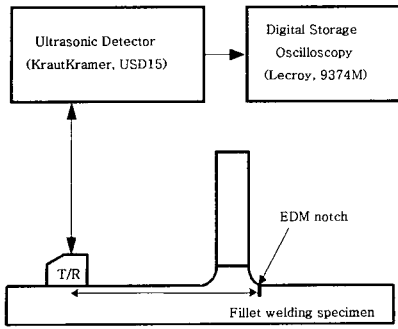


Fig. 4 Experimental setup for contact surface SH-wave

의해 구동되고, 수신된 표면SH파는 탐상기에 A-Scan 모드로 표시된다. 수신된 신호는 디지털 오실로스코프에 RF신호로 나타난다. 사용된 SH탐촉자는 Japan Probe사의 5C10×10SH-90을 사용하였다. 접촉매질은 탐촉자의 접촉압력이나 접촉상태, 접촉매질의 점성, 음향임피던스, 사용온도 등에 따라 SH파의 입사효율 및 변환특성이 달라질 수 있기 때문에 횡파전용 접촉매질(日슴아세틸렌, SHN-B25)을 사용하였다. 접촉매질의 점도는 32g/cm·s이다. 수신에코의 안정화를 위해 접촉압력을 1kg의 추로 2분동안 유지하도록 하였다. 탐촉자와 탐상기의 기본적인 보정에는 STB-A1이 사용되었다. 또한 다른 표면파와의 비교를 위해 Rayleigh 파 탐촉자(KrautKramer, 5MHz)와 Creeping파 탐촉자(KrautKramer, 1MHz)를 사용하였다.

3.2 비접촉식 표면SH파 검사시스템

Fig. 5는 EMAT을 이용하여 표면SH파를 발생시키기 위한 검사시스템의 구성도이며, Fig. 6은 검사시스템의 사진이다. SH파를 발생하기 위한 EMAT은 Fig. 3과 같이 Spiral 코일로 구성되어 있으며, 고풍력 초음파 발수신기를 이용하여 톤버스트신호로 가진한다. 발생된 표면SH파는 동일한 형상의 수신용 EMAT으로 수신되고 프리앰프에서 증폭된 후 발수신기의 수신입력

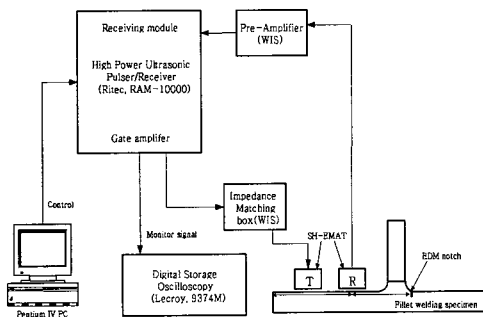


Fig. 5 Experimental setup for SH-EMAT

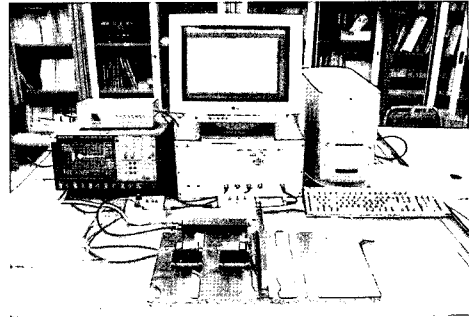


Fig. 6 Scene of the experimental setup

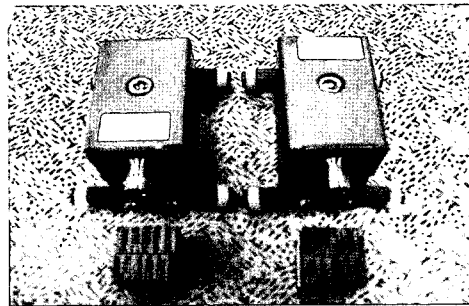


Fig. 7 Shape of EMATs and magnetics

단자로 연결된다. 수신신호는 다양한 신호처리 및 저장 을 위해 디지털 오실로스코프로 출력되어 신호의 평균화 및 주파수분석 등을 수행할 수 있도록 구성하였다. 실험에 사용된 EMAT의 자석간격은 2.15 mm로 파장은 4.3 mm이다. Fig. 7은 SH파 송·수신용 EMAT 과 자석의 형상을 보여준다.

3.3 필렛 용접부 시험편

Fig. 8은 필렛 용접 시험편의 치수와 형상을 나타내며, 필렛 용접부의 한쪽 힐부에는 길이가 다른 EDM

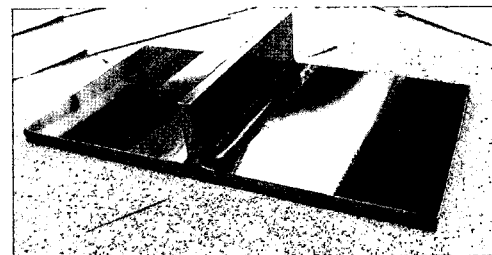
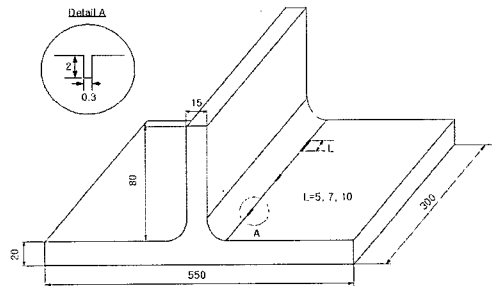


Fig. 8 A specimen of fillet weldment

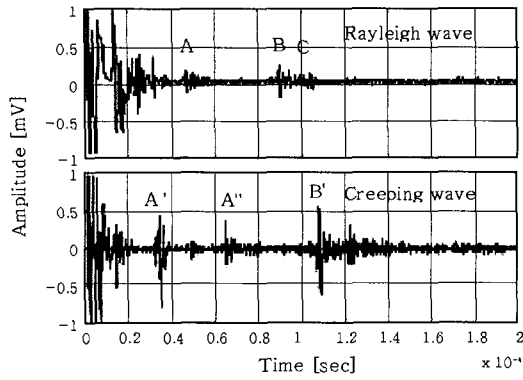


Fig. 9 RF-signal of Rayleigh wave and Creeping wave in the fillet weldment

노치를 가공하였다. 노치의 깊이는 2 mm이며, 폭은 0.3mm이고, 길이는 각각 5, 7, 10 mm이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 접촉식 표면SH파 결함 탐상

Fig. 9는 Rayleigh파와 Creeping파를 이용하여 필렛 용접부를 탐상한 경우의 수신신호이다. 각각의 신호는 필렛 용접부의 끝단에서 20 mm 떨어진 위치에서 탐상하였다. Rayleigh파는 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 파가 진행하기 때문에 A, B, C에 대한 신호가 Fig. 9에서와 같이 나타나지만 결함에 대한 신호는 검출되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 Creeping파는 Fig. 1(b)에서와 같이 파가 진행하기 때문에 Creeping파에 의한 결함 신호가 Fig. 9의 A'와 같이 검출되지만 A''와 같이 다중 반사 에코와 SV파에 의한 결함 신호인 B'가 함께 검출되어 탐상도형이 복잡해져 결함신호에 대한 판독에 어려움이 있다.

Fig. 10은 표면SH파를 이용하여 필렛 용접부의 끝단에서 45mm 떨어진 위치에서 탐상한 결과이다. 다른 표면파와는 달리 EDM 노치에서 반사된 신호만이 단일하게 나타나 결함신호의 판별이 상당히 용이함을 확인할 수 있다. 또한 EDM 노치의 길이가 증가할수록 결함신호의 진폭이 증가되었다. EDM 노치 길이에 따른 진폭의 변화는 시험편의 자유단면에서 45 mm 떨어진 위치에서 수신된 신호를 기준감도로 설정했을 때 Fig. 12와 같이 증가하는 경향을 나타냈다.

4.2 비접촉식 표면SH파 결함 탐상

EMAT은 일반적인 압전형 탐촉자와는 달리 방향성이 없이 송·수신되기 때문에 탐촉자들의 배치를 주의해야 한다. Fig. 11은 수신용 EMAT를 필렛용접 허부

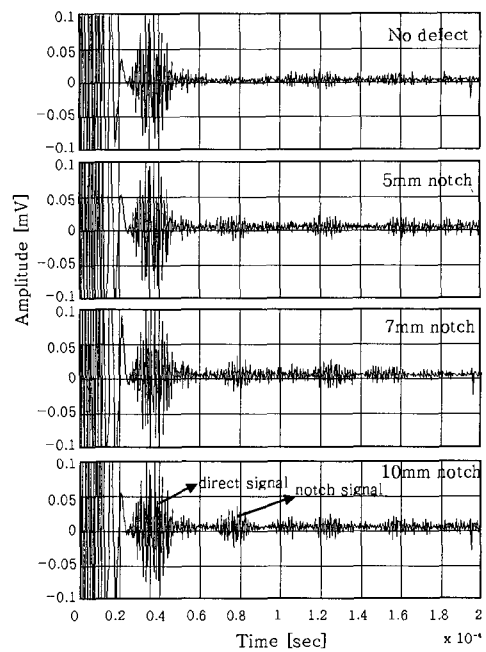


Fig. 10 RF-signal of contact surface SH-wave in the fillet weldment

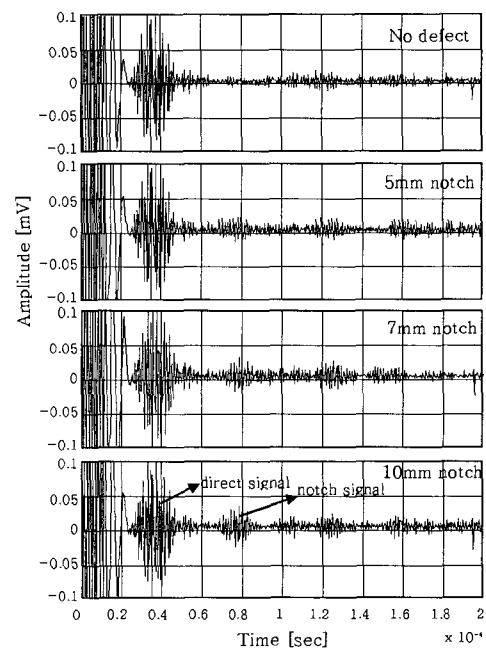


Fig. 11 RF-signal of EMAT in the fillet weldment

끝단에서 13 mm 떨어진 위치에서 수신한 신호이다. 이때 송신자와 수신자의 간격은 102 mm이다.

따라서, 35 μsec부근에 나타난 신호는 송신자에서 수신자로 직접 수신된 신호(direct signal)이며, 75 μsec 부근에 나타난 신호는 전파시간과 음속으로부터 계산된 전파거리가 47 mm이므로 EDM 노치에서 반사된 신호로 판단된다. 이때 SH파의 음속은 3100 m/sec이다. 또한 Fig. 10의 결과와 같이 건전부에서는 결함신호가

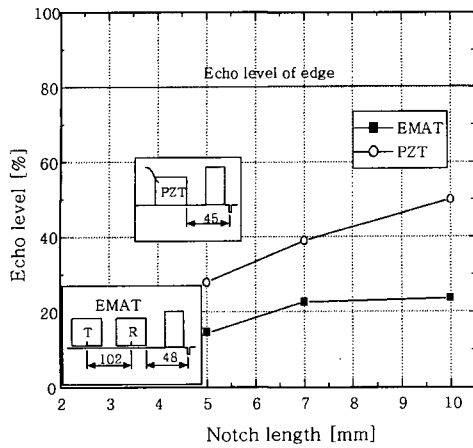


Fig. 12 Comparison of receiving sensitivity along to the EDM notch length

나타나지 않았으며, EDM 노치의 길이가 증가할수록 수신되는 결함신호의 진폭도 증가되었다. Fig. 12는 EMAT과 압전탐촉자의 결함길이에 따른 수신감도 변화를 나타낸다. EMAT의 기준감도는 자유단의 끝단 신호를 CRT의 80% 에코레벨로 기준하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 일반적인 탐상법으로 결함검출이 어려운 필렛용접이음의 heel부를 효과적으로 탐상하기 위해 비접촉 SH-EMAT법을 제안하였으며, 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

접촉식 표면SH파는 Rayleigh파나 Creeping파와는 달리 표면직하로 전파하기 때문에 필렛용접이음의 heel부에 존재하는 결함검출이 가능하였으나, 탐상조건이

까다로운 단점으로 인해 검사 자동화 및 현장적용에는 한계가 있다.

반면, 비접촉의 SH-EMAT을 적용할 경우, 비접촉의 장점으로 탐상조건이 기존의 표면SH파법에 비해 상대적으로 편리하여 검사자동화에 유용하다고 판단되며, 특히 필렛용접이음의 heel부와 같은 구조물에는 효과적인 탐상기법으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Ik Keun Park, Hyun Mook Kim, Chul Gu Lee, Euy Jong Lee, "Experimental Varification on the Detectability and Quantitative Evaluation of Surface Flaws Using Surface SH-Wave Ultrasonic Method(Part 2)", KSNT/FC9910 (1999), 100-112 (in Korean)
- Bong Young Ahn, Young Joo Kim, Young Gil Kim, Seung Seok Lee, "Development of an EMAT System for Detecting Flaws in Pipeline", Journal of KSNT, 24-1 (2004), 15-21 (in Korean)
- R. Murayama, "A Survey of Electromagnetic Acoustic Transducer", J. JSNDI, 52-2 (2002), 63-67
- M. Hirao and H. Ogi, "Noncontact Monitoring of Fa Process with Electromagnetic Acoustic Resonance", J. JSNDI, 51-2 (2002), 79-82
- M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry Noncontacting Ultrasonic Measurements", Kluwer Academic Publisher, (2003)
- J. S. Lim, R. B. Thompson, "Precise velocity measurement using EMAT's", KSNT/SC0009, 54-58, (2002)
- B. W. Maxfield, C. M Fortunko, "Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers(EMATs), Materials evaluation, 41-12 (1983), 1399-1408
- B. W. Maxfield, A. Kuramoto, K. Hulbert J "Evaluating EMAT Designs for Selected Applications", Materials evaluation, 45-10 (1987), 1166-1183