

## 초음파에 의한 필렛 용접hil부의 표면결함 검출능에 관한 실험적 검증

박익근\* · 이철구\*

\* 서울산업대학교 비파괴평가기술연구소

### Experimental Verification on the Detectability of Surface Flaws at Fillet Weld Hills by Ultrasonic Method

Ik Keun Park\* and Chul Gu Lee\*

\* Research Institute of NDE Technology, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

#### Abstract

Ultrasonic nondestructive evaluation(UNDE) technique is commonly used for detecting inner defects in the materials. Recently, new methods are trying to apply for detecting surface and subsurface flaws using Rayleigh wave or creeping wave. These techniques, however, have following problems. Echo amplitude is remarkably affected by the surface conditions and discrimination of echo pattern is usually difficult because shear wave propagate in the material at the same time. We can apply surface SH-wave(which is horizontally polarized shear wave traveling along near surface layer) technique to detect surface flaws.

In this paper, directivity, distance amplitude characteristics and detectability of surface flaws at fillet weld hills of the 5 MHz and 2 MHz surface SH-wave are experimentally investigated. As a result of the study, it was found out that these techniques are valuable for the detection of fatigue cracks at fillet weld heels which can not be detected by other ultrasonic techniques such as angle beam technique and which are inaccessible for non-destructive testings e.g. MT(magnetic particle testing) or PT(liquid penetrant testing).

(Received October 5, 1999)

**Key Words :** Ultrasonic nondestructive evaluation, Surface SH-wave, Directivity, Distance amplitude characteristics, Fillet weld hill, Surface flaw, Detectability

#### 1. 서 언

지금까지 국내에 건설되어 거의 20-30년 가동되고 있는 발전설비, 석유화학 플랜트등 거대설비 기기들의 안전성에 대한 우려가 높아지고 있다. 이들 설비의 안전성 및 신뢰성 확보와 잔존수명예측을 위한 고감도, 고정도의 정량적비파괴진단 평가(quantitative nondestructive evaluation;QNDE)기법의 확립은 시급한 현안 과제이다. 특히, 각종구조물, 설비 및 기기의 유지보수가 중요시되고 있고 이들의 결함검출

의 정량화에 대한 검토가 강력히 요구되고 있다. 결함을 존재하고 있는 위치로부터 분류하면 표면결함(표면직하 결함도 포함) 및 내부결함으로 분류하는 것이 가능하다. 표면결함은 기계적성질에 미치는 영향이 크기 때문에 수명예측의 경우 표면결함의 검출 및 그 정량화가 중요하게 된다.

최근 표면SH(horizontally shear wave)초음파에 의한 표면 또는 표면직하 결함검출 기술 개발에 관한 연구가 급속도로 진전되고 있다<sup>1-4)</sup>.

표면 및 표면직하 결함검출을 위한 비파괴시험법으로는 자분탐상시험(MT), 침투탐상시험(PT) 또는 와

전류탐상시험(ET)등이 주로 적용되어 오고 있다. 그러나, 이들 방법으로는 검사하고자 하는 시험체의 종류나 형상에 크게 제한을 받으며, 결함의 깊이, 위치 및 높이를 정량적으로 평가하는 것은 곤란하다. 특히, 시험체에 접근이 불가능한 경우에는 적용할 수 없다. 이에 대해 주로 내부결합의 검출에 이용되어 온 초음파탐상시험이 표면결합의 검출에 적용하는 새로운 비파괴시험이 최근 시도되고 있다.

초음파에 의한 표면 및 그 근방의 결합검출을 검출하는 방법으로는 표면파(Rayleigh wave; 시험체 표면에 수직으로 진동하는 횡파와 약간의 종파성분이 공존하는 표면파), 크리핑파(creeping wave), 유도초음파(Lamb wave) 및 표면SH파가 유효한 것으로 기대되고 있다.

표면파는 시험체 표면에서 표면으로부터 1파장 정도의 깊이까지의 범위를 전파하기 때문에 주파수가 높은 경우는 음압이 표면근방에 집중하고 표면에 개구한 결함의 검출에 매우 유효하나 표면직하(subsurface) 결합검출은 불가능하고 주파수가 낮은 경우에 표면 아래 수mm 정도까지 초음파가 전파하고 표면직하의 결합검출이 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나, 기본적으로 표면파는 탐상면 위의 장애물이나 요철에 의한 감쇠가 크고 방해에코가 나타날 수 있기 때문에 표면상태의 영향을 받기 쉽다.

크리핑파는 송·수신은 비교적 용이하지만 횡파에 의한 반사파도 동시에 전파하기 때문에 탐상도형이 복잡해져 결함에코의 해석이 어렵고, 결함에서는 에너지의 일부가 연속적으로 SV(vertically shear wave)파로 모드변환(mode conversion)하여 전파하기 때문에 감쇠가 현저해진다. 그리고 유도초음파(Lamb wave)는 입자의 진동모드가 복잡하고 시험체의 두께와 주파수 등에 크게 영향을 받으며 박판의 경우에만 적용할 수 있는 한계가 있다.

이상의 방법에 비해 표면SH파에 의한 탐상법은 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하기 때문에 표면상황의 영향이 적고 다른 모드파가 동시에 존재하지 않기 때문에 표면 및 표면근방의 결합검출 및 평가에 유효한 것으로 보고되고 있다. 표면SH파는 모드변환이나 음속변위가 없고 거리에 의한 감쇠도 비교적 적으나 시험체 내부로 입사가 곤란하기 때문에 적절한 접촉매질의 선정이 매우 중요하다.

이상과 같이 필렛용접부의 루트부에서 발생하는 표면균열이나 경사로 존재하는 표면직하 균열결합 탐상에 사각탐상법을 적용할 경우 탐상불능 영역에 존재하거나 보강대가 있는 경우 형상의 영향에 의한 방해에코가 발생하여 결합평가에 많은 어려움이 예상되나 표

면SH파법을 적용하면 표면상태의 영향을 거의 받지 않고 필렛용접부의 루트부에서 발생하는 균열탐상에 유효할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 표면SH파 탐상에 의한 표면결합 검출능의 유용성을 실험적으로 검증하기 위해 표면SH파 탐촉자의 지향성, 거리진폭특성 등을 측정하고, 시험체의 표면에 가공한 깊이가 다른 슬릿형 결함, 경사슬릿형 결함 등의 거리진폭특성, 용접부의 표면 균열결합에 대한 표면SH파탐상의 결합검출능을 조사하고 향후 초음파탐상시험에 의한 표면 및 표면부근의 비파괴 검사 기준 제시를 시도하고자 한다.

## 2. 표면SH파 탐상의 특징

일반적으로 사각탐상에 이용되고 있는 횡파의 진동은 진동모드의 차로부터 SV파와 SH파로 나누어진다. Fig. 1과 Fig. 2는 SV파와 SH파의 전파양식을 나타내고 있다. 사각탐상에 사용되는 SV파의 탐상가능 범위는 주파수 5MHz의 경우 굴절각 35°~80° 정도이다. 그러나, 표면SH파는 Fig. 2와 같이 횡파를 직접 시험체중에 입사시키기 때문에 경계면의 영향을 적게 받아 필렛용접힐부까지 입사가 가능하게 된다.

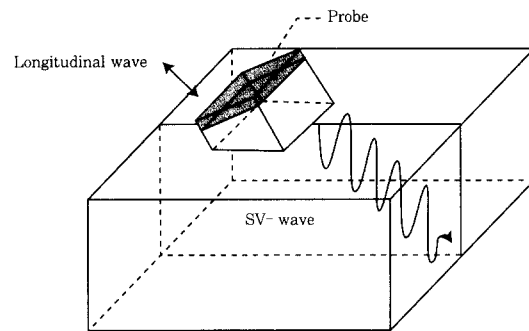


Fig. 1 Incidence of SV-wave

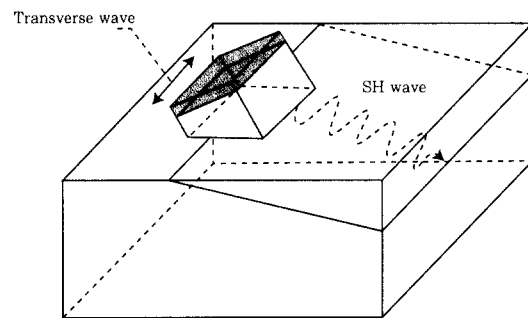


Fig. 2 Incidence of SH-wave

또, 균열로부터 반사의 경우는 모드변환이 일어나지 않기 때문에 탐상파형이 심플하여 해석이 용이하다. 그러나, 표면 SH파는 횡파를 직접 시험체중에 입사시키

기 때문에 초음파의 입사에 주의할 필요가 있고 적절한 점도와 음향임피던스를 갖는 접촉매질의 사용이 요구되고 있다.

각종 건축구조물이나 저장용기등의 필렛용접철의 루트부에서 발생하는 균열은 Fig. 3과 같이 용접열영향부를 따라 탐상면측을 따라 45~55° 경사로 발생하는 경우가 많다. KS B 0896(강용접부의 초음파탐상시험방법 및 시험결과의 등급분류방법)에 규정되어 있는 사각탐상법으로 탐상을 적용할 경우 필렛용접철의 루트부에서 발생하는 표면균열은 탐상불능 영역에 존재하거나 결함이 경사로 존재하는 경우 균열로부터 결함 에코의 검출이 어려울 뿐만 아니라 보강대가 있는 경우 형상의 영향에 의한 방해에코(무결함의 경우에도 에코가 발생하여 잘못된 판정을 하는 것)가 발생하여 결함평가에 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.

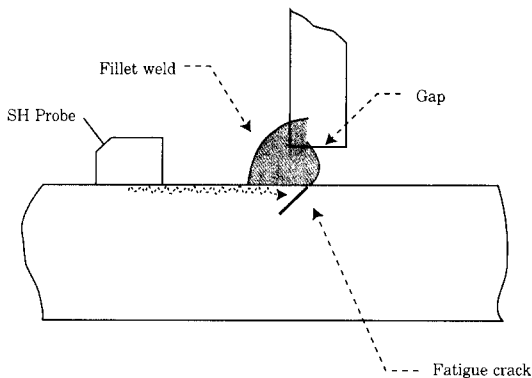


Fig. 3 Crack detection at heel of fillet weld

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에서 표면SH파에 의한 표면결함 검출을 위해 Fig. 4와 같이 펄스반사식 초음파계측시스템을 구성하였다. 초음파탐촉자는 Japan Probe(주)제의 표면SH파탐촉자 5C10×10SH-90 및 2Z10×10SH-90를 사용하였다. 초음파 비파괴계측시스템의 신호흐름도는 탐촉자에 수신된 초음파 파형은 초음파 탐상기에 A-scan mode로 표시되고 이 수신된 초음파 신호는 컴퓨터와 RS232C 방식으로 인터페이스되어실시간(real time) A-scan 표시된다.

접촉매질은 시험체에 탐촉자의 접촉압력이나 접촉상태, 접촉매질의 점성이나 음향임피던스, 접촉매질층의 두께 및 온도등의 영향에 따라 표면SH파의 변환특성이 달라질 수 있기 때문에 접촉매질로 日舍에세틸렌(주)제의 소니코트 SHN 10, 20, 30, 40, 50의 황파

전용 접촉매질을 사용하였다. 측정의 경우에는 무게 3kg의 추를 사용하여 에코를 안정화시키는 것으로 하였다.

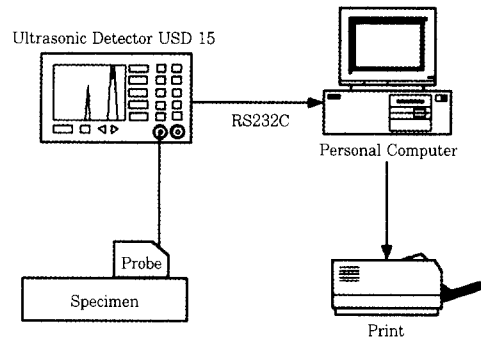


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

본 실험에 사용한 시험편은 기본적인 장비의 교정을 위해 STB-A1, STB-A2 표준시험편을 사용하였으며, Fig. 5과 같은 결함깊이가 다른 슬릿(Slit)형시험편(재질 SB410)과 Fig. 6과 같은 경사슬릿(Slit)형 시험편을 사용하였다. 기계가공에 의한 이 시험편의 결함깊이(높이)는 2.0mm로 하고 결함의 경사는 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70°로 하였다.

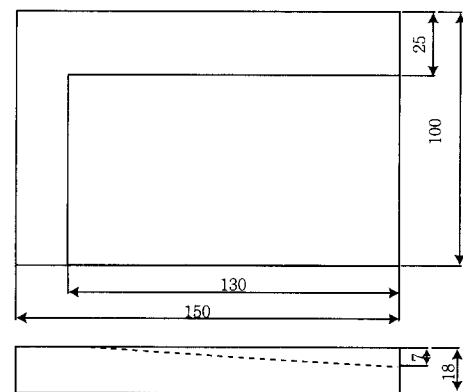


Fig. 5 Surface breaking slit

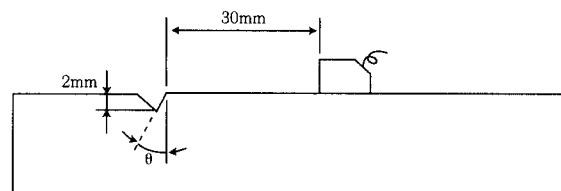


Fig. 6 Surface breaking slit of inclination(h=2mm)

그리고, SDH(Side Drill Hole)시험편, Sonaspection(주)에서 주문 제작한 초음파탐상시험용의 T이용접부의 용입불량 및 표면크랙 인공결함 시험편을 사용하였다.

### 3.2 실험방법

표면SH파탐촉자의 입사점은 탐촉자의 중앙눈금을 입사점으로하였으며, 측정범위의 조정방법은 STB-A1 표준시험편의 25mm면을 이용하여 측정범위를 조정한다. 측정범위 조정 후 표면SH파 에코의 지향성 측정은 Table 1의 2종류의 횡드릴구멍 SDH를 사용하고, Fig. 7와 같이 횡구멍 에코의 빔진행거리를 50, 30mm의 일정한 조건에서 최대에코높이를 측정했다. 에코높이의 측정은 깊이 1mm,  $\phi 1.5\text{mm}$ (각도  $88.2^\circ$  정도)의 SDH로부터의 최대에코높이를 CRT상에 80%로 조정하고 각각의 SDH에 대해 최대에코높이를 읽는다.

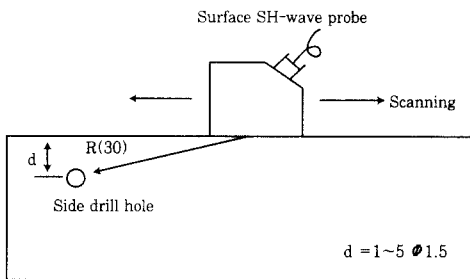


Fig. 7 Measuring method of echo amplitude

Table 1 Test specimens used for experiments (unit mm)

Type	Width	Thickness	Length	Dia. of SDH	Depth of Drill Hole	Depth Pitch
A	40	70	450	$\phi 3.0$	5~40	4
B	40	70	350	$\phi 1.5$	1~5	1

표면SH파 탐촉자의 거리진폭특성의 실험은 Fig. 8과 같이 STB-A2 표준시험편의 인공결함  $\phi 4 \times 4$ 로부터 10mm위치에 접촉매질(SHN 20)를 도포하고 표면SH파탐촉자를 약간 전후, 좌우, 목돌림주사를 하며 약 3kg의 일정한 하중을 5분정도 가하여 에코높이를 안정시키고 최대에코높이가 80%가 될 때 탐상기의 계인을 읽는다. 그 다음은 표준시험편(STB-A2  $\phi 4 \times 4$ )로부터 탐촉자위치를 10mm피치 증가하며 탐촉자-표준구멍간 거리 100mm까지 같은방법으로 최대에코높이를 측정한다.

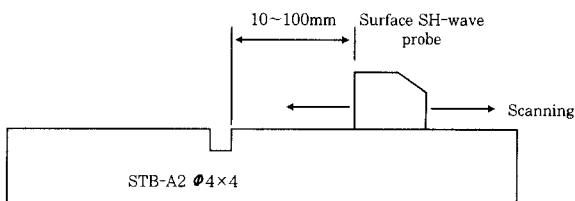


Fig. 8 Measurement of distance amplitude characteristics

표면에 개구한 슬릿결함 깊이와 에코높이와의 관계는 Fig. 5 및 Fig. 6의 시험편을 사용하였다. 용접부의 결함탐상을 위한 탐상감도의 조정은 STB-A2 표준시험편  $\phi 4 \times 4$ 의 탐촉자 선단거리를 40mm로 유지하고 접촉매질을 도포하고 에코높이가 안정될 때까지 유지한 채 에코높이를 50%에 조정한 후 + 6 dB 감도를 높이고 이것을 탐상감도로 한다.

용접부탐상은 Sonaspection(주)에서 제작한 맞대기이음용접부(specimen type:plate, Specimen ID PL4666)의 toe crack과 T이음용접부(specimen type:Tee, Specimen ID T4672)의 root crack, 용입불량(incomplete root penetration)등의 UT시험편을 사용하여 결함검출능을 조사하였다. 탐상방법은 전후, 좌우, 목돌림주사를 하면서 시험대상이 되는 루트부로부터 30~40 mm위치에 탐촉자를 놓고 표시기의 빔진행거리가 30~40mm위치에 나타나는 결함에 에코높이가 50%를 넘는 것은 용입불량이라 판단하고 이 결함에 대해 정밀평가를 수행하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

Fig. 9는 주파수 5MHz 및 2MHz 표면SH파탐촉자의 지향성 측정 결과를 나타내고 있다. 탐촉자 5C10 $\times$ 10A90-SH에서는 표면측의 지향성은 상당히 예리하고, 깊이 1mm,  $\phi 1.5\text{mm}$  SDH(각도 약  $88.08^\circ$ )에 최대에코가 얻어져 표면측의 음압이 가장 강한 것을 확인할 수 있었다. 최고에코높이를 기준으로 -6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약 5.2mm(각도 약  $80^\circ$ )였으며 최대에코높이에 -6dB 빔폭을 적용하면 약  $10^\circ$  이하의 지향각 범위를 가지고 있다. 깊이 4mm SDH(각도 약  $82.34^\circ$ )로부터의 에코는 급격(6dB)하게 저하하였다.

탐촉자 2Z10 $\times$ 10A90-SH의 경우는 5Z5 $\times$ 5A90-SH에 비해 비교적 넓은 지향각을 가지고 있기 때문에 깊이 10mm의 SDH의 경우 5Z5 $\times$ 5A90-SH에 비해 약 10dB정도의 감도차가 있었다. 최고에코높이를 기준으로 -6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약 7.7mm(각도 약  $75^\circ$ )였으며 최대에코높이에 -6dB 빔폭을 적용하면 약  $15^\circ$  이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

주파수 2MHz, 5MHz의 표면SH파탐촉자에서 반사원을 STB-A2  $\phi 4 \times 4$ 로 한 경우의 탐촉자-반사체 거리와 에코높이의 관계를 Fig. 10에 나타내고 있다. 2MHz와 5MHz의 탐촉자는 거리진폭특성이 다르게 나타나고 있으며 거리 100mm이상에서는 명확한 에코가 얻어지지않았다.

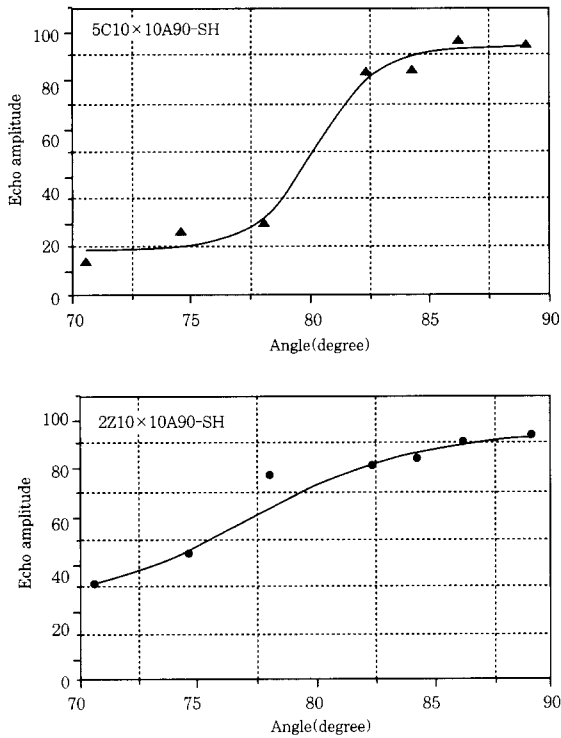


Fig. 9 Experimental results of directivity beam spread in 5MHz and 2MHz for surface SH wave probes

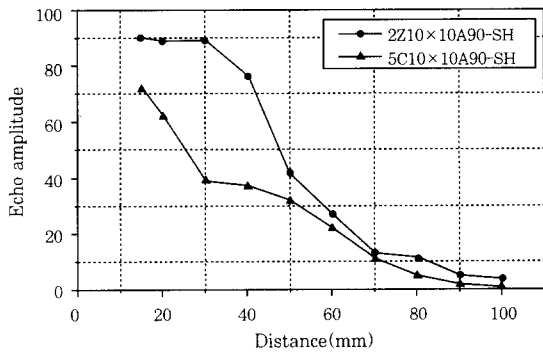


Fig. 10 Relationship between echo amplitude and distance (STB-A2 φ4×4)

Fig. 11은 슬릿 반사면의 경사각과 에코높이의 관계를 나타내고 있다. 슬릿결함은 기계가공에 의한 결함 깊이(높이)는 0.2mm, 0.5mm, 0.7mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 결함의 경사는 0, 10, 20, 30, 45, 60, 60, 70°이다. SH파가 반사면에 대해 수직(90도)로 입사할수록 에코높이는 높아진다. 반사면에서의 입사각이 90도 근방보다 떨어질수록 에코높이는 작아진다. 용접시험체에 존재하는 용입불량과 표면균열을 탐촉자 2Z5×5A90SH를 사용하여 탐상한 결과를 Fig. 12에 나타내고 있다.

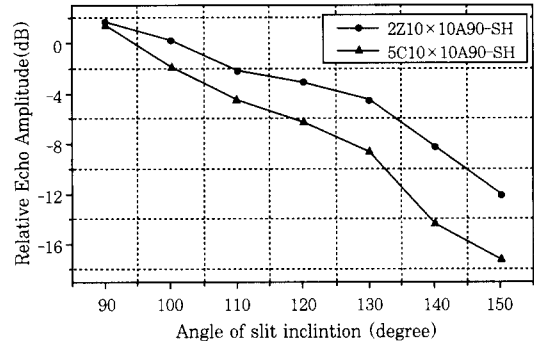
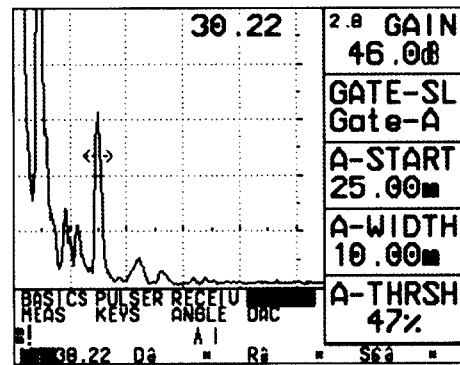
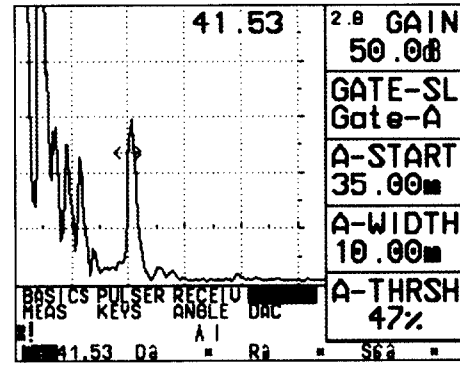


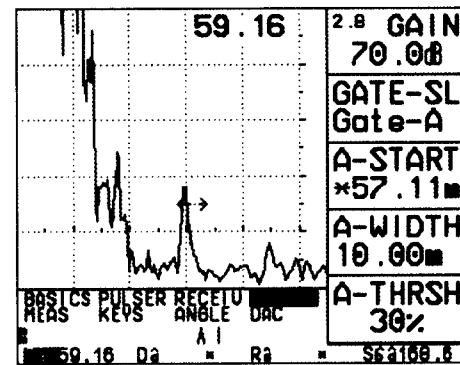
Fig. 11 Relationship between echo amplitude and oblique angle of slit using a surface SH wave probe



(a) Tee(Incomplete root penetration)



(b) Plate (Toe crack)



(c) Tee(Root crack)

Fig. 12 A-scan display for weld defect indication

Fig. 12(A)는 T이음 용접부에서 자주 발생할 수 있는 용입불량의 존재 유무를 초음파 탐상면의 반대측에서 검출한 결과로 용입불량의 초음파신호는 명확히 식별이 가능함을 보여주고 있다. Fig. 12(B) Plate(toe crack), (C) Tee(toe crack)는 일반 사각탐촉자(실측굴절각 77°)에 비해 4dB, 3.5dB 더 높은 탐상감도로 결합검출이 가능하였으며, MT, PT등의 검사를 위해 접근이 불가능한 곳이라든가 사각탐상에 의한 검사시 존재하는 탐상불능영역에 상관없이 표면크랙검출이 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

초음파탐상시험에 의한 표면 및 표면근방 결합검사 방법의 검사기준 제시를 위해 표면SH파탐촉자에 의한 표면결합 검출능을 실험적으로 검증한 연구결과는 다음과 같다.

1) 탐촉자 5C10×10A90-SH는 2Z10×10A90-SH보다 표면측의 지향성은 예리하고, 깊이 1mm,  $\phi$  1.5mm SDH(각도 약 88.08°)에 최대에코가 얻어져 표면측의 음압이 가장 강한 것을 확인할 수 있었다. 최고에코 높이를 기준으로 -6dB 한 SDH는 표면에서 깊이 약 5.2mm(각도 약 80°)였으며 최대에코높이에 -6dB 빔폭을 적용하면 약10° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

탐촉자 2Z10×10A90-SH의 경우는 5Z5×5A90-SH에 비해 비교적 넓은 지향각을 가지며 약15° 이하의 지향각 범위를 가지고 있다.

2) T이음 용접부에서 자주 발생할 수 있는 용입불량의 존재 유무를 초음파 탐상면의 반대측에서 검출한 결과로 용입불량의 초음파신호는 명확히 식별이 가능하였다. 용접부의 Plate(toe crack)과 Tee(toe crack)는 일반 사각탐촉자(실측굴절각 77°)에 비해

4dB, 3.5dB 더 높은 탐상감도로 결합검출이 가능하였으며, MT, PT등의 검사를 위해 접근이 불가능한 곳이라든가 사각탐상에 의한 검사시 존재하는 탐상불능영역에 상관없이 표면크랙검출이 가능함을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

아울러 본 연구의 실험에 적극적인 조언과 도움을 준 한국비파괴검사(주) 이 의종 사장님께 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 박 익근, 이 철구 : 초음파에 의한 필렛 용접부의 표면결합검출에 관한 연구, 1999년도 대한용접학회 춘계학술발표대회 개요집(1999), pp 183-188
2. 横野泰和, 南 康雄 : 表面下の缺陷の検出に關する基礎的檢討(第2報)-超音波探傷試験に關する檢討-, 非破壊検査, 39(11) (1990), pp 937-943
3. 高橋雅和 : 表面およびその近傍を伝播する波に關する實驗的檢討, 非破壊検査, 42(8) (1993), pp 448-454
4. 戸田裕己 : 鐵道車兩用車軸のフレットイグ疲労き裂の表面SH波による定量的評, 非破壊検査, 40(3) (1991), pp 158-164
5. 横野秀和, 南 康雄 : 表面SH波の特性と表面きずの検出に關する檢討, 平成5年度日本非破壊検査協會春季大會講演概要(1993), pp 101-102
6. 横野泰和, 南 康雄 : 表面SH波による表面下きずの定量評價に關する檢討, 平成6年度日本非破壊検査協會春季大會講演概要(1994), pp 1-6
7. 横野泰和, 南 康雄 : 廣帯域表面波探 触子による表面きずの評方法に關する檢討, 平成6年度日本非破壊検査協會春季大會講演概要(1994), pp 323-328