

표면 SH파 모드의 분산특성 해석과 그 응용

이 상용*, 박 익근*, 윤 중학*, 노 승남*, 안 형근**

* 서울산업대학교 기계공학과

** 세안기술(주) 기술연구소

A Study on the Application and Dispersion Characteristics Analysis of Surface SH-wave Mode

Sang Yong Lee*, Ik Keun Park*, Jong Hak Yun*, Seung Nam No*
and Hyung-Keun Ahn**

* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National Univ. of Technology

** Sae-An Engineering Co. Ltd

Abstract

A new flaw detection technique using by SH angle beam method has been discussed. The SH-wave is horizontally polarized shear wave and the surface SH wave has a characteristic of traveling along near surface layer. The surface SH wave technique is valuable for the detection of fatigue cracks at fillet weld heels which cannot be detected by other ultrasonic technique such as angle beam technique and The dispersion curves of it has simple characterization. In this work, using these beneficial chraterization, quality evaluation of spot weld with ultrasonic sound intensity of SH-wave passing through nugget area of spot weld are verified experimentally.

Keywords: ultrasonic wave(초음파), SH-wave(수평 횡파), spot weld(점용접), velocity(음속), dispersion curve(분산선도)

1. 서론

점(spot) 용접의 경우 최적용접조건인 신속한 결정과 재현성이 있는 용접, 즉, 신뢰성 있는 용접 제품을 확보하려면 용접시 용접전류의 변동에 수반하는 너깃(nugget) 면적의 변화를 실시간으로 측정이 가능해야 한다. 용접품질 중에서 접합강도에 결정적으로 영향을 미치는 너깃직경의 정량적 측정기법에 대한 연구보고는 매우 적고, 대부분 단면 관찰이나 박리시험 등에 의한 파괴시험(chisel or peel testing)에 의존하고 있다.

표면 SH파는 레일리파나 크리핑파보다 투과성이 뛰어나고, 표면 SH파에 의한 탐상법은 음파의 진동방향이 탐상면과 평행하기 때문에 표면상황의 영향이 적고 종파로의 모드변환이 발생하지 않아 표면 및 표면근방의 결함검출 및 평가에 유효한 것으로 보고되고 있다. 또한 SH파는 박판에서 단조로운 분산양식을 가지고 있고, 분산선도상의 주파수-두께축의 전 구간에 같은 속도를 가지는 모드가 존재하여 박판의 탐상에도 SV파와 같이 까다로운 분산양식에 제약을 받지 않는다.^[1-4]

본 연구에서는 점 용접부의 접촉면적에 따른 초음파 전달 효율로 인한 음압의 차이를 측정하였고, C-scan 화상 데이터와 SH파를 이용하여 얻은 데이터와 비교하였다. 이상의 박판 점 용접부에 대한 실험을 통하여 SH파를 이용한 점 용접부 품질평가 기법으로의 기초적인 접근을 시도하고자 한다.

2. 표면 SH파탐상의 특징

일반적으로 용접부의 결함검출을 위한 초음파탐상은 SV파에 의한 사각탐상시험이 널리 이용되고 있다. 이 경우 Fig. 1에 나타낸바와 같이 진동자에 종파를 발생하고 재료에 초음파가 입사하는 경우에 횡파로 변환된다. 이 진동방향의 횡파는 SV파라 불린다. 사각탐상에 사용되는 SV파의 탐상 가능 범위는 주파수 5MHz의 경우 굴절각 $35^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 정도이다. SH파는 Fig. 2와 같이 탐상면과 평행방향에 진동하는 횡파이며, SH파는 탐촉자의 폭 방향으로 진동하는 횡파진동자를 이용하여 진동자로부터 발생한 횡파를 높은 점성의 접촉매질을 통하여 시험체에 전달시킨다. 또 굴절각을 90° 에 가깝게 되도록 하면 SH파는 탐상면에 따라서 효율 좋게 전달시킬 수 있다.

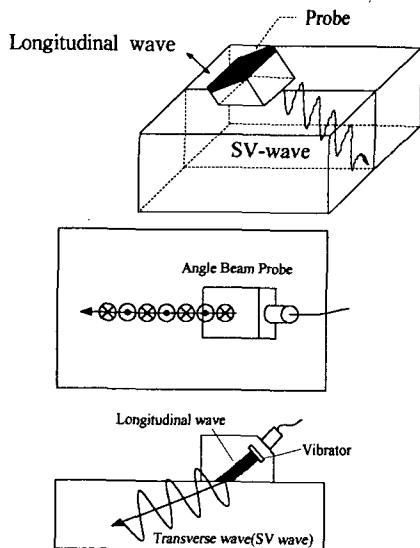


Fig. 1 Incidence of SV-wave and SV angle beam inspection method

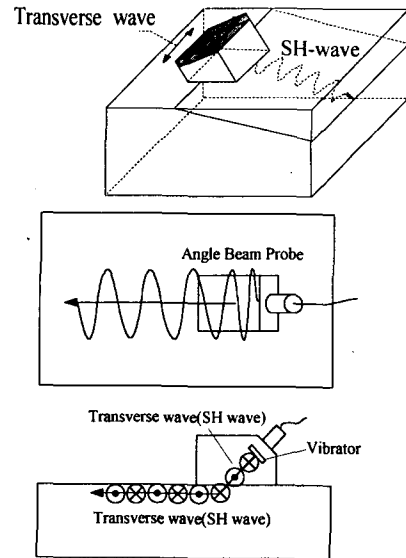


Fig. 2 Incidence of SH-wave and SH angle beam inspection method

3. SH파의 특징과 박판에서의 SH파 분산 특성

평판에서 존재하는 램파 모드 중에는 SH모드로 알려진 시간-조화파의 운동 또한 존재한다. 수평 횡파란 판내에 어떤 SH모드들에 의해 층의 표면에 평행한 입자 진동을 가지며 전달되는 파이고, Fig. 1에서와 같이 x_3 방향으로 입자 변위를 가지며 x_1 방향으로 진행한다.

물리적으로 SH계의 모드는 x_3 방향으로 분극되어 (x_1, x_2) 평면을 따라 위-아래로 반사되는 벌크파들이 층 표면의 자유경계조건을 만족하는 각도로 기울어져 진행되는 것이라고 생각할 수 있다. 등방체에 대하여 입자 변위영역(particle displacement field) $u(x,t)$ 는 나비에의 운동 변위방정식(Navier's displacement equation of motion)을 만족해야 한다.

$$\mu \nabla^2 u(x, t) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u(x, t) = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

SH 모드들에서는 $u_1(x, t) = u_2(x, t) = 0$ 으로

보고, x_3 요소의 입자 변위 벡터들만을 고려한다. x_3 변위 요소의 진동 형태를 나타내는 방정식에서 실제 물리적 변위 벡터영역인 실수부만을 고려하여, 주요 경계조건

$\tau_{23}(x_1, x_2, t) |_{x_2=\pm h} \equiv 0$ 을 적용하면 다음과 같이 분산방정식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{\omega^2}{C_T^2} - \frac{\omega^2}{c_p^2} = \left(\frac{n\pi}{2k}\right)^2 \quad (2)$$

이 방정식은 주파수-두께 fd 항에 대한 위상속도 c_p 에 대하여 쉽게 풀어낼 수 있다.

(여기서 $d=2h$, $\omega=2\pi f$)

$$c_p(fd) = \pm 2C_T \left\{ \frac{fd}{\sqrt{4(fd)^2 - n^2 C_T^2}} \right\} \quad (3)$$

SH모드들의 차단주파수는 식(3)의 분모를 0으로 하여 찾을 수 있고, n 번째 차단주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$(fd)_n = \frac{nC_T}{2} \quad (4)$$

식(2)의 분산방정식의 양변을 미분하고, $\frac{d\omega}{dk}$ (군속도의 정의)에 대하여 정리하면

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{k C_T^2}{\omega} \quad (5)$$

k 에 대해 풀어서 식(5)에 대입하여 간단히 하면 군속도 분산방정식은 다음과 같다.

$$c_g(fd) = C_T \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{n}{2}\right)^2}{\left(\frac{fd}{C_T}\right)^2}} \quad [fd \geq (fd)_n] \quad (6)$$

Fig. 4는 분산방정식을 이용하여 얻은 횡파속도 $C_T = 3.1 \text{ mm/s}$ 를 갖는 알루미늄판에서의 위상

속도와 군속도의 분산선도이다.

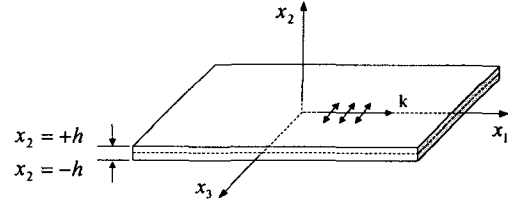


Fig. 3 SH wave mode propagation

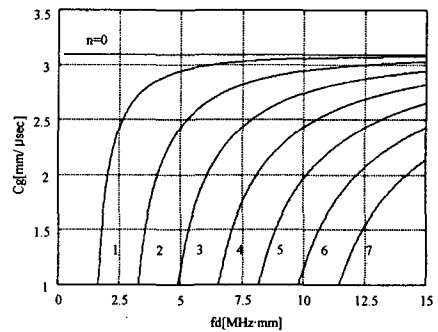
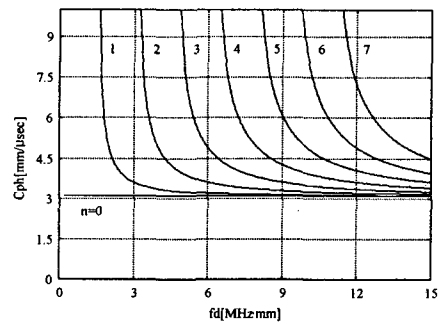


Fig. 4 SH mode phase & group velocity dispersion curves for an aluminum layer

4. 실험장치 및 방법

4.1. 실험장치

본 연구에서는 SH파 펄스반사식 초음파 계측시스템으로 디지털 초음파탐상기(Kraut-Kraumer, USD-15)를 사용하였으며, 초음파 탐촉자는 Japan Probe사의 5C10×10A90-SH, 5Z5×5A90-SH를 사용하였으며, 접촉매질로는 Nichigon Acetylen사의 횡파 전용 접촉매질을 사용하였다.

탐촉자에 수신된 초음파 파형은 초음파 탐상기

에 A-scan mode로 표시되고 이 수신된 초음파 신호는 컴퓨터와 RS232C 방식으로 인터페이스 되어 A-scan 표시되며, 초음파 탐촉자에 수신된 초음파 파형은 디지털스토리지 오실로스코프(Lecroy, 9374M)에 RF-signal로 표시되어 초음파 파형의 실시간 계측에 의해 스펙트럼해석, 음속이나 감쇠 등의 측정이 가능한 계측시스템을 Fig. 5와 같이 구축하였다. 박판 점(spot) 용접부의 품질평가를 위한 SH파의 데이터와의 비교 데이터를 얻기 위하여 Hitachi사의 my-scope C-scan 장비를 이용하였다.

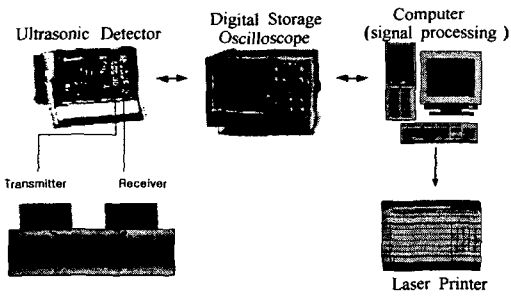


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

시험편 제작을 위한 점 용접재료는 알루미늄과 아연도금 강판을 사용하여 이중재의 점 용접 시험편을 제작하였고, 재료의 두께는 0.8mm이며, 가압력은 350kgf로 하였다. Table 1은 점 용접 시험편의 용접 조건을 나타낸 것이다.

박판 점 용접부의 품질평가방법으로 pitch-catch법을 이용하였다. 초음파가 점 용접 너겟(nugget)부를 통과하여 이음판으로 전달되는 효율은 디지털 초음파 탐상기를 통해 수신된 신호를 디지털 오실로스코프로 전송하여 나타난 RF-signal의 음압을 측정하였다. C-scan 장비를 이용하여 화상데이터를 얻어 각 조건에 따른 시험편에 대한 음압측정 데이터와 비교하였다.

4.2. 박판 점 용접부의 결함검출

Fig. 6은 박판 점 용접부의 C-scan 결과를 나타내고 있다. 용접전류 11kA인 (b)에 비해 용접전류 10kA의 경우 접합상태가 좋지 않은 것을 확인할 수 있으며, (c)(d)(e)순으로 점점 용접상태가 나빠져 가는 것을 나타내고 있다. Fig. 7은 Fig. 6에서 나타난 각 용접부에 대해 표면 SH파를 이용하여

전달효율에 따른 RF-signal을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 나타난 접합상태에 따라 전달효율이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8는 각 시험편에 대하여 전달된 음압에 따라 표시된 최대 피크(peak)를 탐상기상의 80%에 맞췄을 때의 음압값들을 측정하여 나타낸 것이다. Fig. 6, 7, 8에 나타난 바와 같이 점 용접부의 접합상태에 따른 표면 SH파의 에너지 전달 효율을 이용하여 점 용접부의 품질평가가 가능할 것이라고 본다.

Table 1 weld conditions of spot weld specimen

specimen No.	Current (kA)	Time (cycle)	Pressure (kgf)
A1	10	10	350
A2	11	10	350
A3	12	10	350
A4	13	10	350
A5	14	10	350



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 6 C-scan image for spot weld parts

참고문헌

- [1] Joseph L. Rose, "Ultrasonic Wave in Solid Media", cambridge, (1999), pp 241-261
- [2] 박 익근, 안 형근, "렘파 모드의 시간-주파수 해석", 한국공작기계학회논문집, Vol. 10, No.1, 2001, pp. 133-140
- [3] 高橋 雅和, "表面およびその近傍を伝播する波に関する実験的検討", JSNDI, 42-8, 1993, pp 448-454
- [4] 高橋 雅和, "表面及びその近傍を伝播する超音波に関する実験的検討(II)", NDI 資料 21431

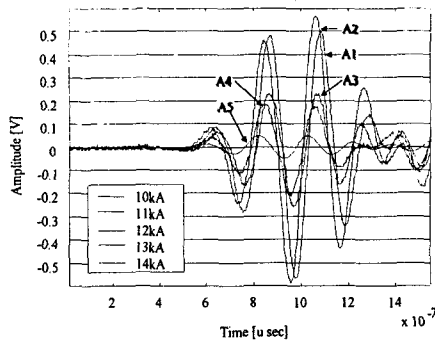


Fig. 4.3 RF-signal through spot welded parts

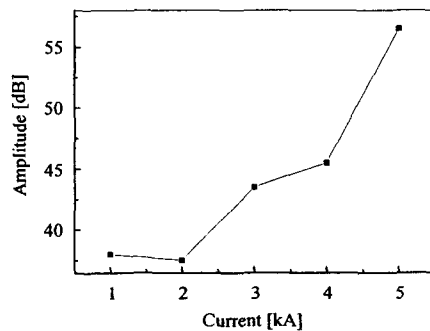


Fig. 4.4 Amplitude of 80% peaks

5. 결론

본 연구에서는 표면SH파 분산특성을 해석하고 박판에서 간단한 분산양식을 갖는 특성을 이용하여 박판의 단일 겹치기 점 용접의 품질검사가 가능함을 실험적으로 검증하였다. 어떤 재료의 점 용접부에 대하여 기준이 되는 용접점에 대한 에너지 전달효율을 측정하고, 다른 점 용접부에서의 에너지 전달효율과 비교함으로써 점 용접부의 품질검사가 가능할 것이다.