

본 연구는 대한검사기술(주)의 연구비 지원하에 수행된것임을 밝히며 협조해주신 분들께 감사드립니다.

초음파에 의한 SM45C/STS410재의 접촉압력측정에 관한 연구

이 원*, 윤인식**, 유영철***, 정 의 섭****

A Study on Contact Pressure Measurement of SM45C/STS410 Materials by Means of Ultrasonic Waves

Won Yi*, In-Sik Yun**, Yeong-Chul Yu***, Eui-Seob Jeong****

ABSTRACT

The contact pressure in jointed plates was measured by means of an improved ultrasonic technique. In order to get calibration curve, the relationship between contact pressure and ratio of boundary and bottom echo of normal beam probes were obtained for the calibration blocks with various surface roughness. The ratio of boundary and bottom echoes were measured for the upper/under plates locally compressed with uniform pressure, and the distribution of contact pressure was obtained. The measured pressure has a good agreement with results of FEM analysis. Thus the proposed ultrasonic method in this work is very useful to measure the contact pressure.

Key Words: Ultrasonic Wave(초음파), Contact Pressure(접촉압력), Normal Probe (수직탐촉자), Sound Pressure(음압), Sound Velocity(음속), Incident Wave(입사파), Numerical Analysis(수치해석), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서 론

최근 교량, 화학공장등과 같은 대형구조물의 붕괴 및 안전사고의 증가로 비파괴검사의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 이에따라 산업의 여러 분야에서 가동전·중 및 정기적인 검사에 많이 적용되는 비파괴검사⁽¹⁾가 기술적으로 더욱 발전하게 되었으며, 특히 비파괴검사법중에서 초음파검사는 용접부의 균열검출⁽²⁾, 재료의 물성평가⁽³⁾⁽⁴⁾,

서로 접촉된 두물체간의 정량적 접촉압력 측정에 이르기까지 여러분야에 폭넓게 사용되고 있다.

기계구조물이나 장치의 결합부를 강도평가할 때에 두 물체간의 접촉압력 상태를 정확히 파악하는 것은 공학적으로 대단히 중요하며, 이에 대한 연구로는 탄성론에 의한 이론적 해석방법⁽⁵⁾, 유한요소법과 경계요소법에 의한 수치해석적 방법⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 측압편⁽⁸⁾ 및 초음파에 의한 실험적 방법⁽⁹⁾ 등으로 크게 분류할 수 있다. 이러한 방법중에서

* 송실대학교 기계공학과
 ** 송실대학교 대학원/대한검사기술(주)
 *** 송실대학교 대학원
 **** 송실대학교 대학원

해석적인 방법은 접촉면의 기하학적 형상등으로 인하여 정확한 모델링이 곤란하고, 실험적인 방법은 시험편의 가공이나 측정정밀도에 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러나 초음파법⁽¹⁰⁾을 이용하는 방법은 측정면의 상태를 손상하지 않고 접촉압력을 측정하여 정량적 비파괴평가 (Quantitative Non-Destructive Evaluation : QNDE)를 할 수 있는 장점을 가지고 있으며 Hara⁽¹¹⁾, Minakuchi⁽¹²⁾ 등에 의한 연구가 있다.

Hara⁽¹¹⁾ 등은 상·하 평판이 금속/금속인 경우와 금속/비금속인 경우의 접촉문제에 대해서 초음파를 이용하여 접촉압력을 측정할 수 있음을 나타내었다. Minakuchi⁽¹²⁾ 등은 상·하 평판을 SM45C/SM45C재로 하여 압축하중 하에서 접촉면과 저면의 초음파에코를 이용하는 방법으로 접촉압력을 정량적으로 측정하였다. 그러나 지금까지의 연구에서는 상·하 평판이 SM45C/SM45C재로 이루어진 동종재질에 대한 것이 대부분이며, SM45C/STS410재와 같은 이종금속의 접촉압력측정에 관한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 결합체(SM45C/STS410)의 접촉면과 저면으로부터의 초음파 에코특성을 이용하여 상·하 평판의 접촉압력을 결합상태하에서 정량적으로 구하는 방법을 확립하고자 하였다. SM45C/STS410재의 접촉압력을 정량적으로 측정하기 위해서 접촉부 표면 거칠기를 여러단계로 변화시킨 교정 블록을 압축하여 상블럭에 부착된 수직 탐촉자로 접촉면으로부터 수신되는 에코 높이를 일정하게 하였을 때의 저면에코 높이를 측정하였다. 측정된 에코높이비와 하중의 관계로부터 교정곡선을 구하여 시험편의 표면거칠기 변화에 따른 초음파에코특성을 확인하였다.

결합상태하에 있는 상·하 평판의 한쪽 방향에 부착된 수직탐촉자로 접촉면으로부터 수신되는 에코높이를 일정하게 하였을때에 저면에코 높이를 측정하였다. 이런 측정 결과에 교정곡선의 결과를 적용하여 상·하 평판간의 접촉압력을 정량적으로 구하였다. 구한 실험결과를 유한요소법으로 구한 수치해석결과와 비교하여 본 측정법의 실용성이 검토되었다.

2. 초음파 측정법의 원리

기계가공된 상·하 평판의 접촉부를 미시적으로 보면 Fig. 1과 같은 실제 접촉부분과 공극 부분으로 구성되어 있다. 이와 같은 평판(I)상에 수직 탐촉자를 부착하여

초음파를 입사파 음압(평면파) P_0 로 접촉면에 수직입사시키면 일부는 접촉면으로부터의 반사파 음압 P_1 으로 수신되고 나머지는 평판(II)의 저면에서 반사된 투과파 음압 P_2 로 수신된다.

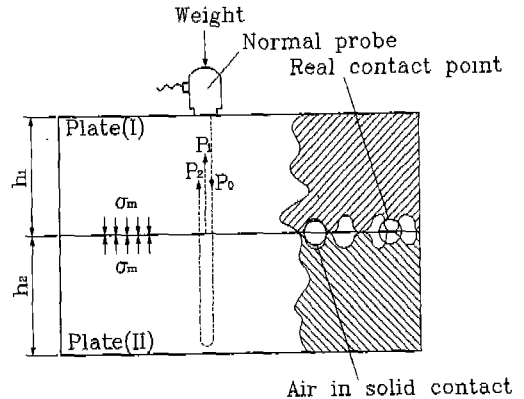


Fig. 1 Contact condition in upper/under plates and transmission of ultrasonic wave

접촉면에서의 실제접촉면적과 접촉압력 σ_m 의 관계는 접촉부 근방이 탄성적인 경우에 비례하고 소성적인 경우에도 접촉압력이 작으면 근사적으로 비례하게 된다⁽¹²⁾. 즉 σ_m 이 크면 일정한 입사파 음압 P_0 에 대하여 반사파 음압 P_1 은 선형적으로 감소하며, 투과파 음압 P_2 는 증가한다. 따라서 위의 가정이 성립한다고 하면 P_0 , P_1 , P_2 의 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$P_1 = C_1 R P_0 \tag{1}$$

$$P_2 = C_2 (1 - R^2) P_0 \tag{2}$$

$$R = 1 - C_3 \sigma_m (0 \leq C_3 \sigma_m \leq 1) \tag{3}$$

여기서 C_1, C_2, C_3 는 상·하 평판의 초음파 감쇠, 접촉부 표면 거칠기, 재질등에 의해 결정되는 상수이다. 또한 평판(I)과 평판(II)는 서로 다른 재질이지만 음향임피던스의 차가 미소하여 음향임피던스의 차를 고려하지 않으면 음압반사율 R 은 실제로 접촉하는 고체접촉상태의 접촉부에서 $R \approx 0$, 비접촉부에서 $R \approx 1$ 이 된다. 또 식 (2) 중의 $1 - R^2$ 은 접촉면에 있어서 음압의 왕복통과율을 나타낸다. 식(3)을 식(1), (2)에 대입하고 P_1, P_2 의 비를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{C_2 P_0 (2C_3 \sigma_m - C_3^2 \sigma_m^2)}{C_1 P_0 (1 - C_3 \sigma_m)} \quad (4)$$

또 식(4)는 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{P_2'}{P_1'} &= \frac{P_2 / (1 - C_3 \sigma_m)}{P_1 / (1 - C_3 \sigma_m)} \\ &= \frac{C_2 P_0 (2C_3 \sigma_m - C_3^2 \sigma_m^2) / (1 - C_3 \sigma_m)}{C_1 P_0} \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 2는 P_1, P_2, P_1', P_2' 의 상호관계를 그림으로 나타낸 것이다. P_1' 의 값은 P_1 을 $1/(1 - C_3 \sigma_m)$ 배한 값이며, P_1 의 A점이 P_1' 의 B점 음압이 된다. 따라서 P_1' 의 값은 접촉압력 σ_m 이 변화하여도 항상 일정한 값 $C_1 P_0$ 가 된다. P_2' 값은 P_2 를 $1/(1 - C_3 \sigma_m)$ 배한 값이며, P_2 의 C점이 D점의 음압이 된다. 그러므로 식(5)의 P_2'/P_1' 의 값을 평가기준으로 하면 결함상태하의 상·하 평판간의 접촉압력을 간단하게 정량적으로 측정할 수 있다. 식(5)에서 알 수 있듯이 입사파 음압 P_0 는 상쇠되므로 본 측정법은 수직탐촉자의 접촉방법이나 접촉매질⁽¹³⁾ 등에 의한 입사파 음압의 영향을 받지 않기 때문에 접촉압력을 정확히 측정할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

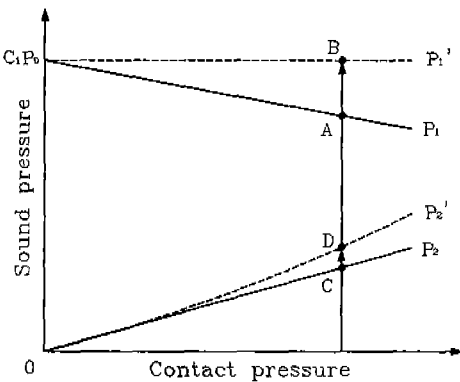


Fig. 2 Behavior between reflected wave sound pressure and transmitted wave sound pressure

Fig. 1의 P_0, P_1, P_2 의 관계는 Fig. 3과 같이 초음파 탐상기의 CRT상에 에코높이의 거동으로 나타난다.

$h_1, h_1 + h_2$ 는 각각 수직탐촉자로부터 상·하 평판의 접촉면과 저면까지의 거리이다.

H_{10} 는 무부하시, H_1, H_2 는 부하시의 에코 높이를 나타낸다. 음압은 에코 높이와 비례관계에 있으므로 에코 높이를 이용하여 식(5)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_R = \frac{H_2'}{H_1'} = \frac{H_2(H_{10}/H_1)}{H_1(H_{10}/H_1)} \quad (6)$$

여기서 H_1', H_2' 는 각각 H_1, H_2 를 H_{10}/H_1 배한 값이며 H_1' 는 H_{10} 와 같다. 즉 식(6)은 부하시의 에코높이 H_1 이 항상 무부하시의 H_{10} 가 되도록 게인을 설정했을 때에 수신되는 저면이 에코 높이 H_2' 의 값과 접촉압력 σ_m 의 관계를 나타내고 있다. 따라서 본 측정법에서는 에코 높이비 E_R 의 값을 평가기준으로 하여 접촉압력 σ_m 을 구한다.

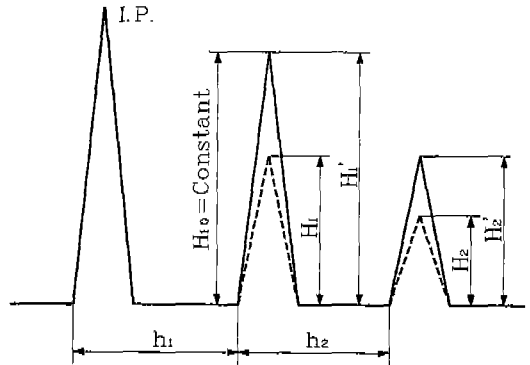


Fig. 3 Behavior of echo height of ultrasonic wave

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 4와 같다.

사용한 주요장비는 초음파탐상기, 탐촉자, 만능재료시험기, Guide plate이며 장비 각각의 주요 사양은 다음과 같다.

초음파 탐상기 : USD-10

탐촉자 : 수직 탐촉자(주파수 2MHz, 진동자직경 ϕ 10 mm)

만능재료시험기 : 최대용량 - 150kN

Guide plate : 재질(STD11), 열처리(HR 60), 최소 설계하중 : 55kN

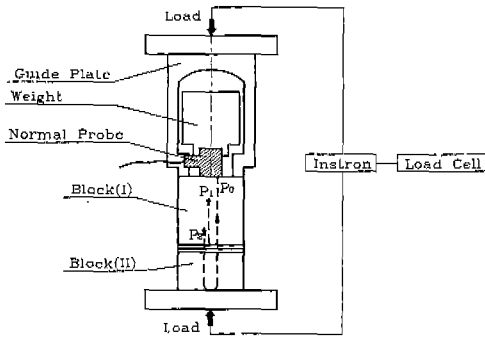


Fig. 4 Schematic diagram of apparatus

3.2 교정블럭의 압축실험

결합상태하에 있는 상·하 평판의 접촉압력을 초음파탐상기를 이용하여 정량적으로 측정하기 위해서는 미리 접촉부 표면거칠기가 에코높이비에 미치는 영향을 조사해 둘 필요가 있다. 이를 위해서 Fig. 5와 같은 교정블럭을 제작하였다. 교정블럭(I), (II)는 상블럭을 SM45C, 하블럭을 STS410재로 하고, 이들 접촉면은 연삭가공후 래핑에 의해 표면 거칠기를 여러 단계로 변화시켰다. Table 1은 실험에 사용한 여러가지 교정블럭의 표면상태와 기계적 성질을 나타낸다. 본 실험을 하기 위해서는 수직 탐촉자를 사용하여 초음파탐상기를 교정하는 것이 중요하다. 교정에 있어서는 적용할 만한 유사 관련코드가 없어 저면에

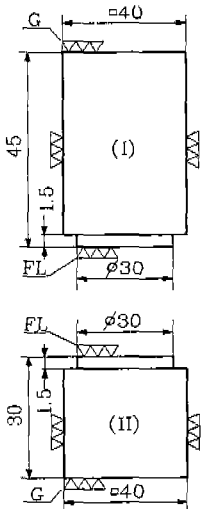


Fig. 5 Configuration and size of calibration blocks

코방식으로 하블럭의 제1저면에코를 초음파탐상기의 CRT상의 시간축에 75mm로 하여 제2저면까지 나타내었다. 에코의 측정시에는 접촉면에서 반사파 음압이 안정되게 얻어지도록 3.25N으로 일정하게 압착하고, 접촉매질로는 기계유를 사용하였다.

Table 1 Surface condition and mechanical property of calibration blocks

No.	Blocks	Materials	Surface condition	
			Roughness (μmR_{max})	Machining method
1	(I)	SM45C	1.2	Lapping
	(II)	STS410		
2	(I)	SM45C	1.5	
	(II)	STS410		
3	(I)	SM45C	2.0	
	(II)	STS410		
4	(I)	SM45C	2.5	
	(II)	STS410		

교정 블럭은 접촉면압이 가능한 한 일정하게 되도록 압축하고, 부하 크기는 로드셀로 검출하였다. 또 초음파탐상기의 CRT상에 나타나는 저면에코 높이 H_2 는 접촉면에코높이 H_1 이 항상 100%가 되도록 게인을 설정하여 측정하였다.

3.3 상·하 평판의 압축실험

본 측정법의 실용성을 검증하기 위해 Fig. 6과 같은 상·하 평판의 시험편을 이용하여 결합상태하에서 접촉압력을 측정하였다. 압축하중은 전하중이 W 인 등분포압력 P 가 작용하며, E, ν 는 각 평판의 종탄성계수 및 푸아송비이다.

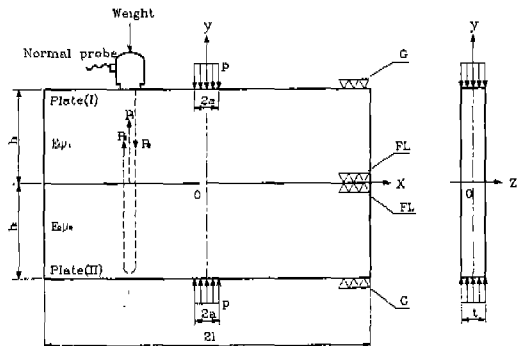


Fig. 6 Configuration of upper/under plates

상·하 평판의 치수는 $2l = 160mm$, $h_1 = 45mm$, $60mm$, $h_2 = 30mm$, $t = 30mm$ 이며 판의 상·하면은 연삭가공후 접촉면에 대해 표면거칠기가 $2.5\mu m R_{max}$ 가 되도록 래핑을 하였다. Table 2는 판의 치수, 기계적성질, 표면상태를 나타낸다.

접촉압력측정은 Fig. 6과 같이 판의 상·하면에 단면치수가 폭 $2a = 20mm$, $t = 30mm$ 의 강제압축블럭을 설치하여 하중 $W = 19.6kN$ 으로 압축하였다.

이때 하중의 크기는 로드 셀로 검출하였다. 결합상태하에 있는 평판(I)상에 수직탐촉자를 $3.25N$ 으로 일정하게 압축하였다.

하평판의 저면에서 반사되어 온 저면에코높이는 Table 2의 No.1에 대해 수직탐촉자를 $x = 20, 25, 30, 35mm$ 의 각 위치에, Table 2의 No.2에 대해서는 수직탐촉자를 $x = 20, 25, 30, 35, 40mm$ 의 각 위치에 부착하여 접촉면에코높이 H_e 이 항상 100%가 되도록 계인을 설정하여 측정하였다.

Table 2 Mechanical property and size of upper/under plates

No.	Plate	Materials	h_1 h_2 (mm)	E(GPa)	ν	Surface condition		
						Roughness ($\mu m R_{max}$)	Flatness deviation (μm)	Machining method
1	I	SM45C	45	206	0.3	2.5	0.9	Lapping
	II	STS410	30	200	0.3		1.0	
2	I	SM45C	60	206	0.3		1.0	
	II	STS410	30	200	0.3		0.9	

4. 결과 및 고찰

4.1 교정블럭의 측정선도

Fig. 7은 Table 1의 교정블럭을 압축하여 평균접촉압력 σ_m 과 에코높이비 E_R 를 구한 교정곡선이다.

횡축의 σ_m 은 교정블럭의 접촉면압을 균일분포로 간주하고 압축하중 W 를 교정블럭의 접촉면적 ($225\pi mm^2$)으로 나눈 값을 나타낸다.

또 표면 거칠기는 교정블럭(I), (II)의 접촉부 표면거칠기의 평균값을 사용하였다. 같은 σ_m 에 대하여 표면거칠기가 거칠수록 E_R 은 작아지며, 같은 표면거칠기에 대하여 σ_m 의 증가에 따라 E_R 은 커지는 경향을 나타낸다.

E_R 과 σ_m 에 관한 교정곡선의 결과는 1~2kN의 저하중

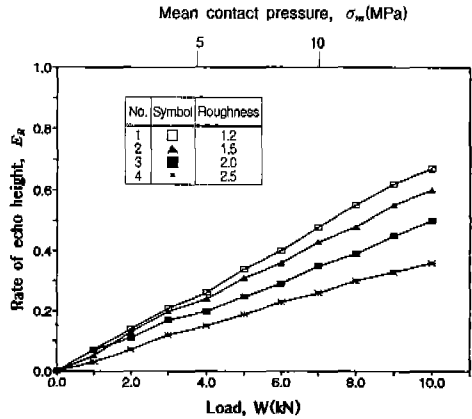


Fig. 7 Relation between mean contact pressure and echo height ratio(calibration curves)

에서는 약간 산포되는 경향이 나타나며 특히 접촉부 표면 거칠기가 $2.0\mu m R_{max}$ 일 경우의 1kN하중에서 E_R 의 값은 접촉부 표면 거칠기가 $1.5\mu m R_{max}$ 일 경우보다도 높게 나타나고 있다. 2kN에 있어서도 $1.2\mu m R_{max}$ 와 $1.5\mu m R_{max}$ 의 E_R 의 차가 거의 없이 나타나며 이는 시험편의 평면도 등에 의한 미소한 가공오차와 서로 접촉된 시험편이 안정적으로 되기 위한 부하의 범위로 생각된다.

표면 거칠기가 $2.0\mu m R_{max}$ 일 경우에는 전체적으로 데이터가 다른 표면거칠기에서의 데이터들 보다 선형적이지 못하며 표면 거칠기가 $2.5\mu m R_{max}$ 일 경우가 가장 선형적임을 알 수 있다. 즉 접촉부 표면거칠기가 $2.5\mu m R_{max}$ 에서 저면으로부터 수신된 에코높이비 H'_2 는 σ_m 의 증가와 함께 거의 직선적으로 증가하였다. 교정곡선의 결과는 Fig. 2의 음압 P'_2 의 거동과 유사한 경향을 나타내고 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 교정곡선의 결과

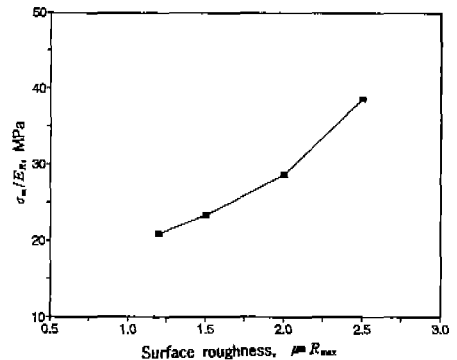


Fig. 8 Relation between surface roughness and σ_m/E_R

로 표면 거칠기와 σ_m/E_R 의 관계를 나타낸다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 표면 거칠기가 거칠어짐에 따라 σ_m/E_R 의 값은 증가해 가는 경향이 있다.

본 실험에 의한 결과로 0.3~0.5kN 간격으로 2~10kN 범위의 접촉압력을 정량적으로 구할 수 있었다.

결합 상태하의 상·하 평판간의 접촉압력을 정량적으로 구하기 위해서는 Fig. 8로부터 평판의 접촉부 표면 거칠기에 상당하는 σ_m/E_R 의 값을 이용하면 된다.

또한 평균 접촉압력 σ_m 과 에코높이비 E_R 의 관계는 수직탐촉자의 성능에 따라 다르므로 결합판간의 접촉압력을 측정할 시에는 미리 교정곡선이 구해져 있는 수직탐촉자를 이용할 필요가 있다.

4.2 상·하 평판의 측정곡선

상·하 평판에 압축력이 가해지면 접촉압력의 분포는 Fig. 9와 같이 나타나게 된다. 여기서 하평판의 접촉압력 분포는 상평판과 같고 대칭으로 나타나게 되므로 상평판의 접촉응력분포만 나타내었다.

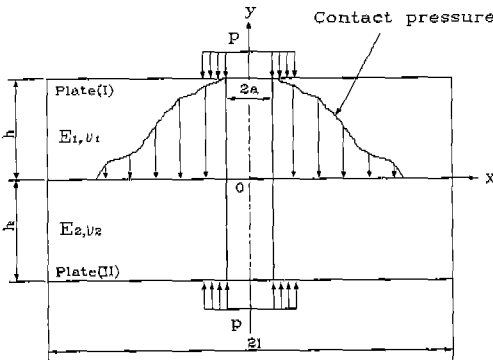


Fig. 9 Distribution of contact pressure in experimental model

Table 2에서 판두께비가 다른 경우에는 음파의 전파거리가 다르기 때문에 음압 P_1 과 P_2 가 변화한다. 그러나 본 측정법에서는 접촉압력을 음압 P_1 과 P_2 의 변화에 의한 에코높이비로 평가하고 있기 때문에 판두께 h_1 만이 다를 경우에는 음압 P_1 과 P_2 의 변화에 의한 접촉압력의 영향은 작은 것으로 간주하였다. 판두께 h_2 가 다를 경우에는 상·하 평판에 대한 판두께와 같은 두께의 불력에 의한 교정결과를 적용하여 접촉압력을 구할 필요가 있다.

본 측정법은 접촉면과 저면에코 높이를 이용하고 있기 때문에 에코가 중첩되면 접촉압력의 측정에 어려움이 있

다. Fig. 10은 수직탐촉자를 평판(I)상에 부착하였을때 접촉면에코와 저면에코가 중첩되는 예를 나타낸다.

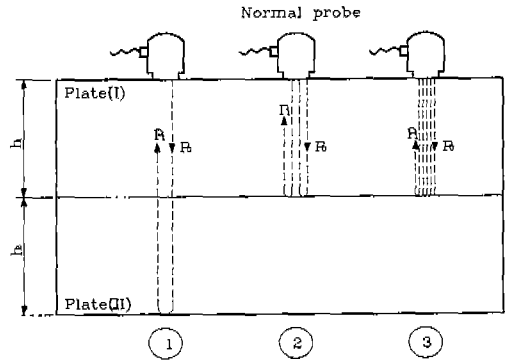


Fig. 10 Echo path of contact surface and bottom

판두께비 h_2/h_1 이 정수배가 될 경우 저면에코 ①은 접촉면의 다중에코 ②, ③과 혼합되기 때문에 상·하 평판간의 접촉압력을 측정할 수 없다. 이와같은 판두께비의 경우는 수직탐촉자를 평판(I)상이 아니라 평판(II)상에 부착하여 접촉압력을 측정하면 된다.

Fig. 11은 Table 2에 대해 각 접촉압력 측정위치에서 구해진 에코높이비 E_R 의 측정결과이다. Fig. 6에서 부착 위치로부터 멀어짐에 따라 E_R 의 값은 작아진다.

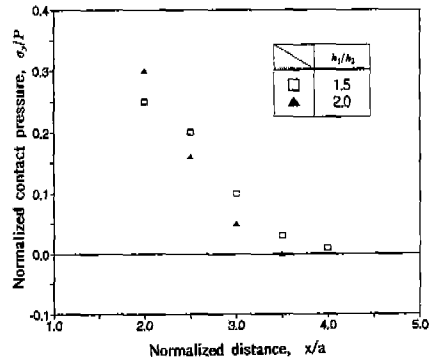


Fig. 11 Relationship between distance and ratio of echo height for upper/under plates

판두께비가 각각 $h_1/h_2 = 1.5, 2.0$ 인 경우 $x/a = 3.9, 4.9$ 의 위치에서 E_R 의 값이 0으로 무부하시와 같은 접촉면의 분리점이 되고 있음을 알 수 있다.

Table 2의 상·하 평판에 대한 접촉압력분포는 Fig. 11의 측정곡선 결과에 접촉부 표면거칠기가 $2.5\mu m R_{max}$

인 Fig. 7의 No.4 교정곡선결과를 적용하여 구하였다.

Fig. 12는 각각 Table 2에 나타난 상·하 평판에 대한 접촉압력분포의 결과를 나타낸다.

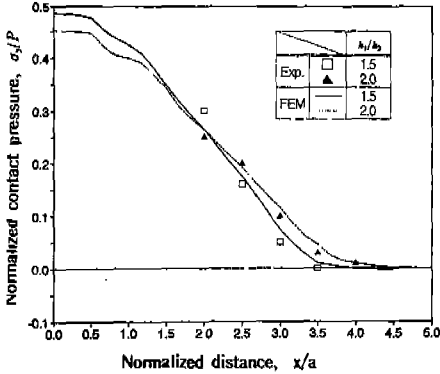


Fig. 12 Contact pressure distribution of upper/under plates

□, ▲의 기호는 판두께비 $h_1/h_2 = 1.5, 2.0$ 인 경우의 실험결과이며 실선은 유한요소법으로 해석한 결과로 실험결과와 상당히 잘 일치한다. 그러나 접촉압력이 작은 영역에서는 실험결과에 의한 접촉면의 분리점이 계산결과보다도 부하부에 가까운 위치에서 일어남을 알 수 있다. 이것은 시험편을 가공할 때 평면도 및 가공상의 오차로 인하여 접촉면의 분리점이 수치해석 결과보다 가까워졌다고 생각할 수 있다.

접촉압력이 작은 경우에 측정정밀도의 문제는 있지만 본 측정법은 결합상태하에 있는 상·하 평판간의 접촉압력을 높은 정밀도로 측정할 수 있는 방법이라고 생각한다.

향후 본 논문에서 제안한 초음파측정법을 더욱 정량화시키기 위해서는 크게 다음과 같은 3가지 부분에 대한 고찰 및 보완이 필요하다고 사료된다.

- (1) 대상체의 두께별(10mm ~ 100mm)에 대한 실험 및 이에 대한 고찰.
- (2) 수직탐촉자의 주파수변화(1MHz, 4MHz, 5MHz)에 대한 실험 및 이에 대한 고찰.
- (3) 정량적으로 래핑가공을 할 수 있는 기술의 확보.

5. 결론

결합상태하에 있는 SM45C/STS410재의 접촉압력을 정량적으로 측정하기 위해 접촉면과 저면으로부터의 에

코특성을 이용한 초음파법을 제안하였다. 이를 위하여 상·하 교정블럭으로 접촉부표면거칠기가 저면과 접촉면으로부터의 에코높이비에 미치는 영향을 조사하고, 결합상태하에 있는 상·하 평판의 접촉압력측정을 하여 구한 실험결과를 유한요소법에 의한 수치해석결과와 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SM45C/STS410재에 대하여 초음파 에코특성에 의한 접촉압력의 정량적 측정 및 해석결과로부터 이중금속의 접촉압력해석에 대한 가능성을 제시하였다.
- (2) 접촉압력이 작은 영역을 제외하면 실험결과와 유한요소법에 의한 수치해석결과와 상당히 잘 일치하며 본 측정법의 실용성이 증명되었다.
- (3) 본 측정법은 결합상태하에 있는 상·하 평판의 접촉압력을 간단히 정량적으로 측정할 수 있으며, 수직탐촉자의 부착방법이나 접촉매질등에 의한 입사파음압의 영향을 받지 않기 때문에 접촉압력을 정확히 측정할 수 있다.
- (4) 상·하 평판의 판두께비가 정수배가 되어 저면으로와 접촉면으로부터의 다중에코가 중첩될 경우는 상·하 평판간의 접촉압력은 측정할 수 없다.

참고 문헌

1. ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec.XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," 1995.
2. S. J. Song and L. W. Schmerr, "Ultrasonic Flaw Classification in Weldments using Probabilistic Neural Networks," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 11, pp.395~406,1995.
3. 이준현, "Line-Focus-Beam 초음파 현미경을 이용한 금속복합재료의 피로손상에 관한 연구," 비파괴검사학회지, 제13권 제2호, pp.40~47,1993.
4. 정현조, "초음파 속도와 미시역학 모델을 이용한 고급 세라믹스의 비파괴적평가," 비파괴검사학회지, 제14권 제2호, pp.90~100,1994.
5. S. P. Timoshenko, J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," McGraw-Hill., pp.414,1951.
6. S. S. Wang, I. Choi, "The Interface Crack Behavior in Dissimilar Anisotropic Composites Under Mixed-Mode Loading," J. Appl. Mech.

- Vol. 50, pp.179~183,1983.
7. J. W. Hutchinson, M. E. Mear, J. R. Rice, "Crack Paralleling an Interface Between Dissimilar Materials," J. Appl. Mech., Vol. 54, pp.828~832,1987.
 8. 水口, 小泉, 涉谷, "側壓ピンによる接觸壓力測定法の改良," 非破壊検査, 31-11, pp.843~848,1982.
 9. 水口, 小泉, 吉峯, "超音波による接觸壓力測定," 非破壊検査, 32-12, pp.956~963,1983.
 10. 이 원, 윤인식, 정의섭, 유영철, "초음파에 의한 SM45C/STS410재의 접촉압력측정에 관한 연구," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집(I), pp.41~46,1995.
 11. 原, 大石, "超音波による金屬パンチと非金屬板間の接觸壓力測定," 日本機械學會論文集 A, 51-471, pp.2426~2650,1985.
 12. 水口, 吉峯, 小泉, 萩原, "超音波による接觸壓力測定(定量測定法について)," 日本機械學會論文集 A, 50-453, pp.953~958,1984.
 13. 김영환, 윤인식, 이성식, 이정기, 김호철, "접촉식 초음파 시험에서 접촉매질의 영향에 관한 고찰," 한국비파괴검사학회 추계 학술발표회 논문집, pp.206~211,1996.