

## 고체-고체 접촉계면에서 경사입사 초음파의 반사·투과 특성 분석<sup>§</sup>

남태형\* · 김정석\* · 이태훈\* · 장경영\*\*† · 김노유\*\*\*

\* 한양대학교 자동차공학과, \*\* 한양대학교 기계공학부, \*\*\* 한국기술교육대학교

### Reflection and Transmission Characteristics of Oblique-Incidence Ultrasonic Waves at Solid-Solid Contact Interfaces

Taehyung Nam\*, Chungseok Kim\*, Taehun Lee\*, Kyung-Young Jhang\*\*† and Nohyu Kim\*\*\*

\* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

\*\* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

\*\*\* Korea Univ. of Technology and Education

(Received April 18, 2011 ; Revised May 17, 2011 ; Accepted May 18, 2011)

**Key Words:** Contact Interfaces(접촉계면), Ultrasonic Reflection(초음파 반사), Normal/Tangential Interfacial Stiffness(수직/수평 계면 강성), Oblique Incidence Ultrasonic wave(경사입사초음파)

**초록:** 고체-고체 접촉계면의 특성을 평가하기 위하여 초음파 수직 입사에 의한 반사·투과법이 주로 이용되어왔다. 하지만 수직입사방법은 용접부 검사와 같은 현장적용에 한계가 있는 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 초음파 경사입사법이 대안이 될 수 있다. 그러나 경사입사법의 경우, 초음파의 모드변환이 발생하고 수신신호는 접촉면의 수직 계면강성뿐만 아니라 수평 계면강성의 영향을 받으므로 이를 고려한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 경사입사에 따른 접촉계면에서의 초음파 반사와 투과특성에 대한 이론적 모델을 제안하였다. 그리고 경사입사에 대한 초음파 반사율 및 2 차 고조파 측정실험 결과 이론적 예측과 잘 일치함을 확인하였다. 결과적으로 경사입사법은 접촉계면 특성평가를 위한 효과적인 기법이라 할 수 있다.

**Abstract:** In order to evaluate the characteristics of solid-solid contact interfaces, reflection or transmission techniques involving normal-incidence longitudinal waves are generally used. However, these normal-incidence techniques are of limited use in field applications such as in the inspection of welded parts. The oblique-incidence ultrasonic technique may be an alternative for overcoming these problems. However, in this technique, the mode conversion at the contact interfaces should be taken into account along with the normal and tangential interface stiffness. In this study, we have suggested a theoretical model for oblique-incidence ultrasonic waves at the contact interfaces and analyzed their reflection and transmission characteristics. Experimental results showed that the measured reflection coefficient and second harmonic wave agreed well with the suggested theoretical model. Consequently, the oblique-incidence technique can be a promising method for evaluating the characteristics of the contact interfaces.

## 1. 서론

고체-고체 접촉계면의 접촉압력 및 계면의 특성을 나타내기 위한 방법으로 일반적으로 접촉계면 강성(K)이 고려된다. Drinkwater<sup>(1)</sup>는 실제 고체의 접촉계면은 거칠기를 가지고 있으며 이 거칠기에

의한 미세 돌출부의 영향을 접촉계면 사이의 변위와 하중의 관계를 나타낸 계면강성의 향으로 표현하는 스프링 모델로 간주 하였다. 그리고 접촉면 사이의 변위에 대한 접촉압력의 크기의 비를 계면강성으로 정의하였다. 또한 계면강성이 접촉압력에 따른 초음파 반사율의 변화로부터 정량화될 수 있고, 이로부터 계면의 접촉상태를 평가할 수 있음이 알려져 있다.<sup>(2-5)</sup>

한편, 계면강성은 압력과 변위 사이의 비선형적 관계로부터 선형계면강성과 비선형계면강성으로 구분되는데, 특히 비선형계면강성은 접촉계면에서

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, [kyjhang@hanyang.ac.kr](mailto:kyjhang@hanyang.ac.kr)

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 음향비선형성(CAN: Contact Acoustic Nonlinearity)을 정량적으로 표현할 수 있어서 CAN을 연구하는 여러 연구자들에 의해 이론 및 실험 연구가 수행되어 왔다.<sup>(6-9)</sup> CAN은 접촉계면에서 반사 또는 투과되는 초음파에 입사파와 같은 주파수 성분 이외에 2 배 주파수에 해당하는 2 차 고조파 성분이 발생하는 현상으로, 고조파 성분의 크기는 비선형 계면강성과 직접적인 관련을 갖는다.

하지만 앞선 연구들은 대부분 종파 수직 투과법을 이용한 연구에 국한되고 있다. 이는 수직 투과법의 경우 2 차 고조파 주파수에 해당하는 공진주파수의 탐촉자를 송신 탐촉자 반대면에 접촉시켜 사용할 수 있어 2 차 고조파 성분을 고감도로 수신하기 용이하기 때문이다. 그러나 이 방법은 피검사체를 사이에 두고 양쪽면에 탐촉자를 접촉시켜야 하기 때문에 고온 고압의 배관이나 노즐 등 내부접근이 불가능한 구조물에서의 적용이 곤란하다. 반면 수직 반사법의 경우에는 하나의 탐촉자로 송신과 수신을 하므로 현장적용성은 우수하나 공진형 탐촉자의 주파수특성상 송신주파수 성분에 비해 크기가 매우 작은 2 차 고조파 성분을 고감도로 수신하는 것이 어렵다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 이와 같은 문제를 극복하기 위해 초음파 경사 반사법을 제안한다. 이 경우 피검사체의 동일면에서 송신과 수신이 가능하여 현장적용성이 우수하면서도, 수신탐촉자로 2 차고조파 주파수의 공진주파수를 갖는 탐촉자를 사용하여 2 차 고조파에 대한 수신감도를 크게 할 수 있다. 또한 수직탐상이 어려운 용접부 검사도 가능하다. 즉, 2 차 고조파의 수신감도와 현장적용성 측면에서 모두 유리한 방법이라 할 수 있다. 하지만 이 경우, 접촉계면에서 초음파의 모드변환이 발생하며 반사율 및 투과율이 수직계면강성뿐만 아니라 수평계면강성의 영향도 받게 되므로 이를 고려한 해석적 연구가 추가적으로 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 접촉계면강성에 대해 선형성분과 비선형성분을 구분하고 또한 각각에 대해 수직성분과 수평성분을 구분하여 접촉계면에 경사 입사하는 초음파의 반사와 투과 크기에 대한 해석적 모델을 구하였다. 그리고 이를 이용하여 경사입사 각도 및 접촉압력의 변화에 따른 반사·투과율 및 2 차 고조파 성분의 크기 변화를 예측하였다.

다음으로, 이를 검증하기 위하여 경사입사 반사 실험장치를 구성하였으며, 접촉계면을 모사하기 위해 동일 재료의 블록시편 두 개를 접촉시켜 이

용하였다. 이 장치에는 외부로부터 접촉압력을 가변시킬 수 있도록 유압장치가 포함되어 있다. 그리고 수직과 수평의 계면강성을 구하기 위해 접촉압력의 변화에 따른 종파의 수직반사율과 횡파의 수직반사율을 측정하였다. 이렇게 구해진 수직과 수평 계면강성계수를 이론식에 대입하여 22.5°와 45°경사입사에서의 접촉압력의 변화에 따른 반사율 및 2 차 고조파의 크기 변화를 예측하고 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 이론

### 2.1 경사입사 종파의 반사·투과 특성

여기서는 초음파의 경사입사에 대한 계면에서의 반사 및 투과 특성을 구하기 위해 Fig. 1 과 같이 고체-고체의 계면에 경사입사 하는 종파에 대한 투과·반사 모델을 구하였다. 단일 주파수를 가지는 입사종파  $P^{(0)}$ 가  $\theta_0$ 의 입사각도를 가지고 계면을 통과하게 되면, 초음파는 경사입사에 대한 모드변환이 발생하여 반사종파  $P^{(1)}$ , 반사횡파  $P^{(2)}$ , 투과종파  $P^{(3)}$ , 투과횡파  $P^{(4)}$ 로 나뉘게 된다. 입사각에 대한 반사각, 굴절각은 스넬의법칙에 따른다.

한편 접촉계면에서의 압력-변위의 거동은 다음 식 (1)과 같이 테일러 급수의 2 차항까지 전개하여 근사시킬 수 있다.

$$\sigma(\mathbf{u}_0 + \Delta\mathbf{u}) \approx \sigma(\mathbf{u}_0) + \Delta\mathbf{u} \left( \frac{\partial p(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} \right)_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_0} + \frac{1}{2} (\Delta\mathbf{u})^2 \left( \frac{\partial^2 p(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}^2} \right)_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_0} \quad (1)$$

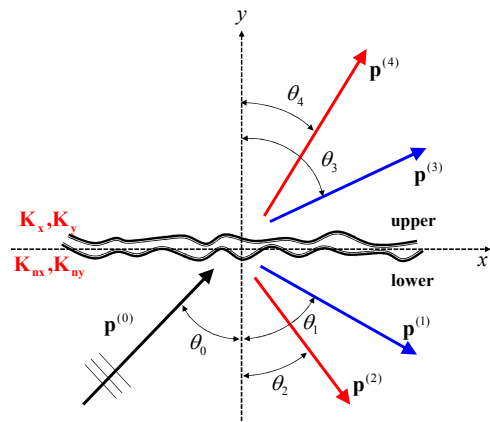


Fig. 1 two-dimensional model for analyzing the characteristics of reflection and transmission for the oblique incident longitudinal ultrasonic wave

여기서  $\mathbf{u} = \vec{u}_x + \vec{u}_y$  로, 접촉계면은 서로 독립적인  $x$  방향의 변위성분과  $y$  방향의 변위성분을 가지고 있는 2 차원 모델로 가정한다. 식 (1)로부터 접촉계면의 압력-변위관계의 선형 계면강성  $K$  와 비선형 계면강성  $K_n$  을 식 (2)와 같이 정의할 수 있다. 이들 각각은  $x$  축 성분에 대하여 수평 선형 계면강성  $K_x$  와 수평 비선형 계면강성  $K_{xn}$ , 그리고  $y$  축 성분에 대하여 수직 선형 계면강성  $K_y$  와 수직 비선형 계면강성  $K_{yn}$  으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} K_x &= \frac{\partial p(u_x)}{\partial u_x}, & K_{xn} &= \frac{\partial^2 p(u_x)}{\partial u_x^2} \\ K_y &= \frac{\partial p(u_y)}{\partial u_y}, & K_{yn} &= \frac{\partial^2 p(u_y)}{\partial u_y^2} \end{aligned} \quad (2)$$

그러면, 입사파의 진폭을  $A_0$  라 할 때, 반사종파, 반사횡파, 투과종파, 투과횡파 각 파동성분에서 입사 주파수와 같은 기본 주파수 성분의 진폭  $A_1, A_2, A_3, A_4$  와 음향비선형성에 의해 각 파동성분에 발생하는 2 차 고조파의 진폭  $A_{12}, A_{22}, A_{32}, A_{42}$  는 식 (3)과 (4)로부터 각각 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k_1(2\mu \cos^2 \theta_1 + \lambda) & -k_2 \mu \sin 2\theta_1 & -k_3(2\mu \cos^2 \theta_3 + \lambda) \\ k_1 \sin 2\theta_1 & k_2 \cos 2\theta_1 & k_3 \sin 2\theta_3 \\ K_y \cos \theta_1 & -K_x \sin \theta_1 & ik_3(2\mu \cos^2 \theta_3 + \lambda) + K_y \cos \theta_3 \\ -K_x \sin \theta_1 & -K_x \cos \theta_1 & ik_3 \mu \sin 2\theta_3 + K_x \sin \theta_3 \\ -k_4 \mu \sin 2\theta_4 & & \\ -k_4 \cos 2\theta_4 & & \\ ik_4 \mu \sin 2\theta_4 + K_y \sin \theta_4 & & \\ -ik_4 \mu \cos 2\theta_4 - K_x \cos \theta_4 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} -k_0(2\mu \cos^2 \theta_0 + \lambda) \\ k_0 \sin 2\theta_0 \\ K_y \cos \theta_0 \\ K_x \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} k_1(2\mu \cos^2 \theta_1 + \lambda) & -k_2 \mu \sin 2\theta_1 & -k_3(2\mu \cos^2 \theta_3 + \lambda) \\ k_1 \sin 2\theta_1 & k_2 \cos 2\theta_1 & k_3 \sin 2\theta_3 \\ K_y \cos \theta_1 & -K_x \sin \theta_1 & ik_3(2\mu \cos^2 \theta_3 + \lambda) + K_y \cos \theta_3 \\ -K_x \sin \theta_1 & -K_x \cos \theta_1 & ik_3 \mu \sin 2\theta_3 + K_x \sin \theta_3 \\ -k_4 \mu \sin 2\theta_4 & & \\ -k_4 \cos 2\theta_4 & & \\ ik_4 \mu \sin 2\theta_4 + K_y \sin \theta_4 & & \\ -ik_4 \mu \cos 2\theta_4 - K_x \cos \theta_4 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{yn}[A_3 \cos \theta_3 + A_4 \sin \theta_4 - A_0 \cos \theta_0] \\ +A_1 \cos \theta_1 - A_2 \sin \theta_2 \\ K_{xn}[A_3 \sin \theta_3 - A_4 \cos \theta_4 - A_0 \sin \theta_0] \\ -A_1 \sin \theta_1 - A_2 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  각 파동성분의 파수이고,  $\lambda$  와  $\mu$  는 라미상수이다. 기본주파수 성분의 진폭에는 선형강성계수가 관계되고, 2 차 고조파성분의 진폭에는 비선형강성계수가 관계되는 것을 알 수 있다.

## 2.2 계면강성의 측정법

계면강성은 접촉계면 표면의 상태 및 접촉압력에 의존하는 값으로 실험적으로 구해야 한다. 이

를 구하기 위한 방법으로 수직 입사하는 초음파에 대한 반사율을 이용한다. 즉, 앞에서 얻은 식 (3) 은 입사각  $\theta_0=0$  을 대입하면 다음 식 (5)와 같이 수직입사 종파에 대한 반사종파와 투과종파의 진폭을 나타내는 식으로 간략화 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k(2\mu + \lambda) & -k(2\mu + \lambda) \\ K_y & ik(2\mu + \lambda) + K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_3 \end{bmatrix} = A_0 \begin{bmatrix} -k(2\mu + \lambda) \\ K_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $k(\lambda + 2\mu) = \rho c_l \omega$

여기서 파수는 입사파, 반사파, 투과파에서 동일하므로 구분 없이  $k$  로 표시하였다. 식 (5)로부터 반사파와 투과파의 진폭을 입사파 진폭에 대한 상대적인 비율로 구하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_0 \\ A_3 \\ A_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 - i \frac{2K_y}{\omega \rho c_l} \\ \frac{2K_y}{\omega \rho c} \\ 1 - i \frac{2K_y}{\omega \rho c_l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{1 + \frac{4K_y^2}{\rho^2 c_l^2 \omega^2}} \\ \frac{2K_y}{\rho c \omega \sqrt{1 + \frac{4K_y^2}{\rho^2 c_l^2 \omega^2}}} \\ \frac{2K_y}{\rho c \omega \sqrt{1 + \frac{4K_y^2}{\rho^2 c_l^2 \omega^2}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_l \\ T_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

이 관계를 이용하여 수직 선형 계면강성계수  $K_y$  를 다음 식 (7)과 같이 수직 입사종파에 대한 반사율  $R_l$  을 측정함으로써 구할 수 있게 된다.

$$K_y = \frac{\rho c_l \omega}{2} \sqrt{\frac{1}{R_l^2} - 1} \quad (7)$$

마찬가지로 수평 선형 계면강성계수  $K_x$  에 대해서는, 수직 입사하는 횡파에 대한 관계식으로부터 유도할 수 있고, 그 결과는 다음 식 (8)과 같다.

$$K_x = \frac{\rho c_t \omega}{2} \sqrt{\frac{1}{R_t^2} - 1} \quad (8)$$

이 같은 결과는 1 차원 수직입사 가정에 의해 유도된 타 문헌의 결과와 일치한다.<sup>(6)</sup> 이렇게 하여 수직 종파 반사율  $R_l$  과 수직 횡파 반사율  $R_t$  로부터 선형 계면강성계수  $K_y, K_x$  를 구하고, 이를 식 (3)에 대입하면 임의의 각도로 경사 입사하는 종파에 대한 반사 및 투과파의 진폭을 구할 수 있다.

한편, 식 (4)를 이용하여 2 차 고조파 발생성분의 크기를 구하기 위해서는, 비선형 강성계수  $K_{yn}$  과  $K_{xn}$  을 알아야 한다. 이를 위해 다음 식 (9)와 같은

계면강성과 접촉압력 사이의 관계식을 이용한다.<sup>(7)</sup>

$$K = Cp^m, K_n = \frac{1}{2}mC^2 p^{2m-1} \quad (9)$$

여기서, K는 선형강성계수,  $K_n$ 은 2차의 비선형 강성계수를 나타내며, C와 m은 실험적으로 구하는 상수이다. 이 식은 접촉압력이 증가하면 계면강성이 증가하는 것을 나타내며 이는 계면이 점점 닫혀지게 된다는 것을 의미한다. 또한 접촉압력이 증가하면 반사율은 감소하게 되는데 이는 앞의 식 (7)과 (8)에서 예상할 수 있는 바와 같다.

이와 같은 관계로부터 접촉압력의 변화에 따른 반사율의 변화를 구하면 식 (7)과 (8)로부터 선형 강성계수의 변화를 구할 수 있고, 이를 식 (9)에 의해 곡선맞춤하면 상수 C와 m을 결정할 수 있으며, 결과적으로 비선형강성계수도 구할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 이렇게 구한 선형과 비선형 계면강성계수들을 식 (3)과 (4)에 대입하여 임의의 입사각에 대한 반사파의 크기 및 2차 고조파의 크기를 예측하고, 이를 실험적으로 검증하고자 하였다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 계측 시스템의 구성

수직입사 종파 반사율, 수직입사 횡파 반사율 측정과 경사입사 종파에 대한 반사율 및 2차 고조파 측정 실험을 위하여 Fig. 2와 같은 계측시스템을 구성하였다. 접촉압력의 증가에 따른 반사율을 측정하기 위하여 유압장치를 이용하여 하중을 인가하고 로드셀을 이용하여 하중의 크기를 측정하였다. 접촉압력의 크기는 하중을 하중인가 면적으로 나눈 평균압력 값을 이용하였다. 단일 주파수의 협대역 신호를 발생시키기 위하여 RAM-5000

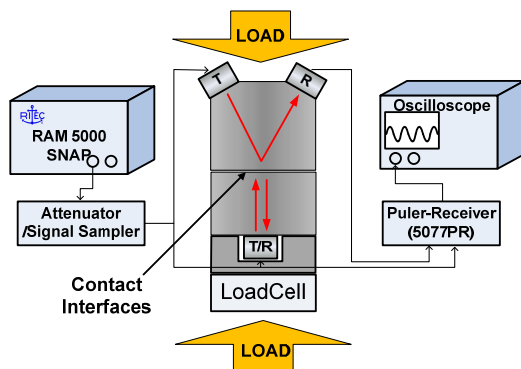


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

SNAP(RITEC) 장비를 이용하여 톤버스트 신호를 발생시켰다. 사용한 탐촉자로는 수직입사에 대하여 2.25 MHz 공진주파수를 가지는 종파 및 횡파 탐촉자(PZT)를 이용하였으며, 경사입사 실험에서는 송신부에 2.25 MHz 종파 탐촉자, 수신부에 5 MHz 종파 탐촉자를 이용하였다. 수신 신호는 디지털 오실로스코프(LECROY WS452)를 이용하여 모니터링하고 A/D 변환된다. 2.25 MHz 기본주파수 성분의 크기로부터 반사율 값을 구하였으며, 측정된 반사율 값은 식 (7)과 식 (8)에 대입하여 선형 계면강성계수  $K_y$ 와  $K_x$ 의 값을 구하였다. 여기서 초기에 하중을 인가하고 제거하는 과정에 발생하는 히스테리시스<sup>(9)</sup>의 영향을 최소화 하기 위하여 10회 이상 하중 인가/제거과정을 거친 후 실험을 진행하였다. 그리고 경사 입사하는 종파에 대한 반사신호의 기본주파수 성분의 크기와 2차 고조파 성분의 크기를 구하고, 식 (3)과 (4)를 통하여 예측한 결과와 비교하였다.

#### 3.2 시험 시편

임의의 각도로 입사하는 초음파의 경사입사 반사율을 시험하기 위하여 22.5°, 45°의 각도로 초음파가 입사 할 수 있도록 알루미늄 블록을 제작하였다. 사용된 시편의 재질은 Al-6061T6을 이용하였으며, 접촉면은 #600 사포를 이용하여 연마하였다.

### 4. 실험 결과

#### 4.1 선형 강성계수의 측정

수직입사 종파와 수직입사 횡파를 이용하여 실험적으로 구한 반사율 값 및 이로부터 계산한  $K_y$ ,  $K_x$  값을 Fig. 3에 나타내었다.

여기서 압력의 증가에 따른 반사율 값을 구하기 위하여 압력별로 측정된 반사율의 크기를 초기 0 MPa의 자유계면에서의 반사율의 크기로 정규화하였다. 접촉압력 증가에 따른 계면강성  $K_y$ ,  $K_x$ 의 값은 비선형적인 관계를 나타내었으며, 이는 접촉계면의 변위와 접촉압력 사이에 비선형적인 관계가 있음을 반증한다.

#### 4.2 경사입사 시뮬레이션

Fig. 4는 22.5° 및 45°의 경사입사 시편을 이용하여 실험적으로 측정된 반사율 값과, 식 (3)을 이용하여 이론적으로 예측한 반사율 값을 비교한 그림이다. 실험결과가 이론 예측 결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

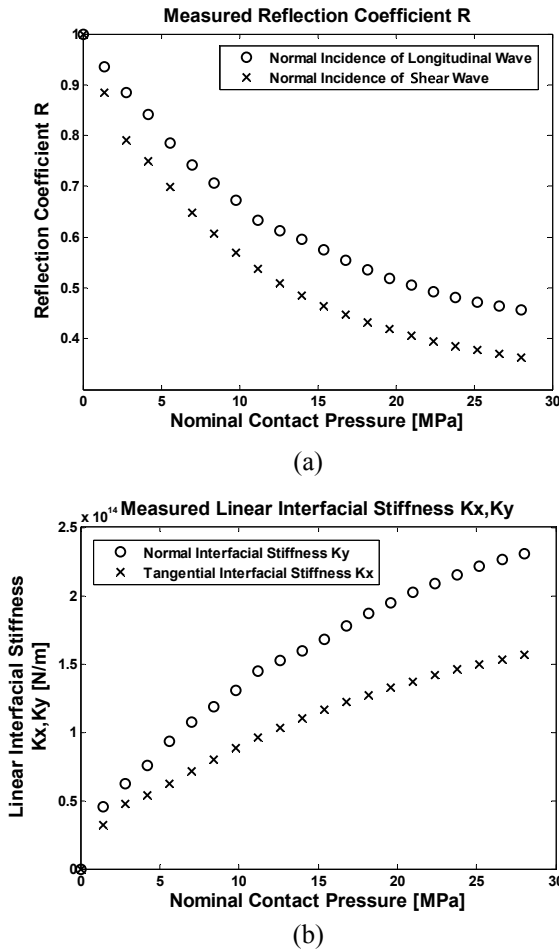


Fig. 3 (a) Reflection coefficient of normal incident longitudinal wave and shear wave, and (b) The measured linear interfacial stiffness  $k_x$ ,  $k_y$  as a function of nominal contact pressure

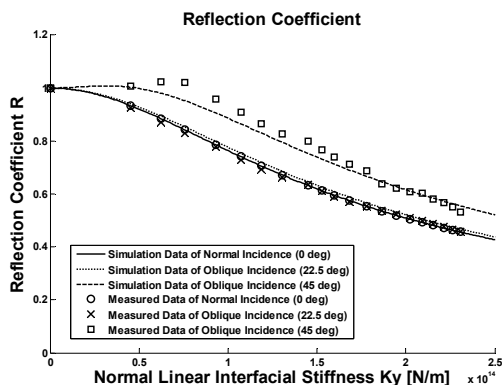


Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental result of ultrasonic reflection coefficient as a function of nominal linear interfacial stiffness

또한 압력에 따른 반사율 값은 22.5°경사입사의 경우 종파수직입사의 경우와 비교하여 거의 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 입사각도 22.5°에서의 종파 반사특성은 종파 수직입사의 경우와 매우

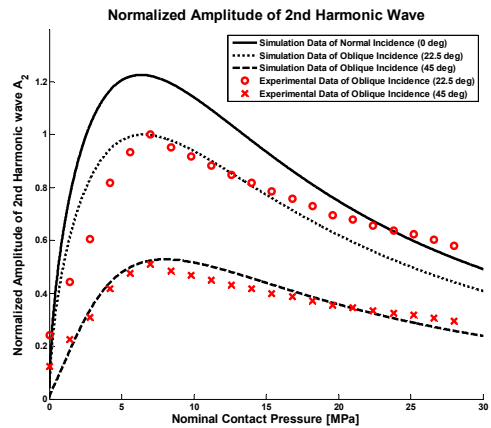


Fig. 5 Normalized amplitude of 2<sup>nd</sup> harmonic wave as a function of nominal contact pressure at each incidence angle

유사한 반사 특성을 지니고 있음을 의미한다. 반면에 45°입사의 경우 수직입사와 비교하여 20% 이상 큰 반사율 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 입사각도가 작은 경우에는 수직입사로 가정하여도 무방하지만 입사각도가 커지면 수평계면강성의 영향이 커져서 수직입사 모델로는 정확한 해석이 안 된다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 식 (4)를 통하여 이론적으로 예측한 종파 수직입사, 종파 경사입사에 대한 반사 2 차 고조파 성분의 크기와 22.5°, 45°경사입사에 대한 실험결과를 나타낸다. 여기서 2 차 고조파의 크기는 22.5°의 경사입사에서의 피크 값으로 나누어 상대적인 값으로 비교하였다.

시뮬레이션 결과 22.5°의 경사입사에서는 2 차 고조파의 크기가 수직입사와 비교하여 20% 작게, 45°경사입사에서는 55% 작게 발생하는 것으로 예측되었다. 하지만 압력의 증가에 따른  $A_{12}$  성분의 발생 경향성 및 2 차 고조파의 크기가 최대가 되는 접촉압력은 수직입사의 경우와 비교하여 차이가 없었다. 한편 경사입사에 대한 실험결과는 이론 예측 결과와 잘 일치함을 보여주었다. 또한 2 차 고조파의 크기는 접촉압력에 따라서 열림상태 (0MPa)에서는 최소값을 보이다가 접촉압력이 증가하여 부분단힘상태(10MPa)로 변함에 따라 최대값을 보이고 그 후에 접촉압력이 더욱 증가하여 완전 단힘상태로 변하면서 점점 감소하는 경향을 보였다. 이것은 접촉계면에서의 음향 비선형성의 특징을 잘 보여주는 것이며, 이 같은 결과는 본 연구에서 제안하는 경사입사 반사법이 접촉계면에서의 음향 비선형성평가에 적용 가능성을 입증한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 고체-고체 접촉면에 경사 입사하는 초음파의 반사 및 투과 특성을 분석하기 위한 이론적 모델을 제시하였으며, 이를 이용하여 경사 입사하는 종파가 접촉면에서 반사될 때 입사주파수와 동일한 기본주파수 성분의 반사진폭과 계면에서의 음향비선형성에 의해 발생하는 2 차 고조파 성분의 진폭을 예측하였다. 그리고 예측결과는 실험을 통하여 검증되었다. 그 과정에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 22.5°와 45°의 경사입사에 대한 반사율이 이론 예측결과와 실험결과가 잘 일치하였으며, 이로부터 제안한 모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

(2) 22.5°의 경사입사 종파에 대한 반사율은 수직입사 종파의 경우와 비교하여 3% 미만으로 큰 차이가 없었다. 이는 작은 각도의 경사입사의 경우 수직 계면강성의 영향을 크게 받으며 수평계면강성의 영향은 매우 적은 것으로 생각할 수 있다. 반면에 45°의 경사입사에 대한 결과는 수직입사의 경우와 비교하여 큰 반사율을 가지며, 이는 입사각이 큰 경우에는 그 반사파의 크기를 정확히 예측하기 위해서는 수직-수평계면강성의 영향을 모두 고려해야 한다는 것을 의미한다.

(3) 경사입사 종파에 대한 2 차 고조파 발생크기는 수직입사에 비해 작은 값을 나타내었지만 접촉압력의 증가에 따른 고조파성분의 크기변화는 그 경향이 수직입사의 경우와 유사하였다. 다만 2 차 고조파의 크기가 작을수록 수신하기는 어려워지므로 2 차 고조파 성분 분석에서는 입사각은 가급적 작게 하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안하는 경사 입사에 대한 반사파 측정 기법은, 기존에 이용하기 힘들었던 반사파를 통한 2 차 고조파 측정을 가능케 하고 현장 적용성을 향상시켰다는 점에서 접촉면에서의 음향비선형 평가를 통한 접촉계면 상태 평가에 매우 유용한 기법이라 할 수 있다. 그러나 현장 적용을 위하여는 향후 실제 균열에 대한 적용연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 방사선기술개발사업 첨단비파괴검사기술개발 분야의 연구지원으로 이루어졌습니다. (2008-2003505)

## 참고문헌

- (1) Drinkwater, B. W., Dwyer-Joyce, R. S. and Cawley, P., 1996, "A Study of the Interaction Between Ultrasound and a Partially Contacting Solid-Solid Interface," *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 452, pp. 2613~2628.
- (2) Baltazar, A., Rokhlin, S. I. and Pecorari, C., 2002, "On the Relationship Between Ultrasonic and Micromechanical Properties of Contacting Rough Surfaces," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 50, pp. 1397~1416.
- (3) Biwa, S., Suzuki, A. and Ohno, N., 2005, "Evaluation of Interface Wave Velocity, Reflection Coefficients and Interfacial Stiffnesses of Contacting Surface," *Ultrasonics*, Vol. 43, pp. 495~502.
- (4) Biwa, S., Hiraiwa, S. and Matsumoto, E., 2007, "Stiffness Evaluation of Contacting Surfaces by Bulk and Interfaces Waves," *Ultrasonics*, Vol. 47, pp. 123~129.
- (5) Shin, B. S., 1977, "Contact Pressure Measurement Using Ultrasonic Waves," *Trans. Of the KSME A*, Vol. 17, No. 3, pp. 153~158.
- (6) Solodov, I. Y., 1998, "Ultrasonics of Non-Linear Contacts: Propagation, Reflection and NDE-Applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 383~390.
- (7) Biwa, S., Nakajima, S. and Ohno, N., 2004, "On the Acoustic Nonlinearity of Solid-Solid Contact with Pressure-Dependent Interface Stiffness," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71, No.1, pp. 508~515.
- (8) Jhang, K. Y., 2009, "Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non-Destructive Assessment of Micro Damage in Material: A View," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123~135.
- (9) Kim, J. Y., Baltazar, A., J. W. and Rokhlin, S. I., 2006, "Hysteretic Linear, and Nonlinear Acoustic Responses from Pressed Interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 6436~6452.