

접촉계면 반사 초음파의 음향 비선형 특성

Acoustic Nonlinear Characteristics of Ultrasonic Wave Reflected at Contact Interfaces

박병준*, 이태훈*, 김정석*[†], 장경영**

Byungjun Park*, Taehun Lee*, Chungseok Kim*[†] and Kyung-Young Jhang**

초 록 닫힘균열과 같은 고체-고체의 접촉계면에서 접촉 음향 비선형성을 평가하기 위해 벌크 투과파를 이용하는 기존의 전통적인 음향 비선형 기술의 경우 현장 적용하는데 있어서 송수신 탐촉자를 장착하기 위해 구조물 내부로 접근하는 것은 접근한계성의 어려움이 있다. 본 연구에서, 고체-고체의 접촉계면에서 음향 비선형성을 측정하기 위해 새로운 반사기법을 제안하였고 이는 대상재료의 동일한 면에서 송신과 수신을 하여 현장 적용성에 매우 편리한 기법이다. 이를 위해, 접촉압력에 대한 멱함수 모델을 통한 선형 그리고 비선형 강성을 추정하고 이를 기반으로 계면에서 반사된 초음파의 비선형 파라미터를 이론적으로 계산하였다. A16061-T6 시편에 대한 접촉압력에 따른 접촉계면 실험 결과들은 이론적인 예측과 매우 잘 일치하였으며 따라서 본 연구에서 제안된 반사모드 기술의 유효성을 검증하였다.

주요용어: 접촉 음향 비선형성, 반사파, 선형 접촉 강성, 비선형 접촉 강성, A16061-T6

Abstract In the field application of the conventional acoustic nonlinear technique using through transmission of bulk waves to evaluate the contact acoustic nonlinearity(CAN) in solid-solid contact interfaces like as in the closed crack, it has difficulty to access inner position for attaching the pulsing or receiving transducer. In the present study, a new reflection technique has been suggested to measure the acoustic nonlinearity in solid-solid contact interfaces, which uses both of pulsing and receiving transducers on the same side of target and so that it will be very useful for the field application. For this, based on the linear and the nonlinear contact stiffness estimated by the power-model of the contacting pressure, the nonlinear parameter of the reflected ultrasonic wave at the interfaces has been theoretically calculated. Experimental results in contact interfaces of A16061-T6 alloy specimens with loading pressure showed good agreement with the theoretical predictions, which proves the validity of the suggested reflection mode technique.

Keywords: Contact Acoustic Nonlinearity, Reflected Wave, Linear Contact Stiffness, Nonlinear Contact Stiffness, A16061-T6

1. 서 론

접촉 음향 비선형성(contact acoustic nonlinearity; CAN)이란 접촉계면에 초음파가 입사될 때 계면의 일시적 여단힘에 의한 파형의 왜곡과 접촉계

면의 비선형적인 압력-변위 관계에 의해 조화파가 발생하는 두 가지 현상으로 설명된다.

접촉계면의 일시적 여단힘 현상은 클래핑(clapping) 또는 키싱(kissing) 효과라 불리며, 이는 다이오드 모델로써 설명이 가능하다[1]. 입사 초

음파의 변위가 접촉계면의 틈새 간격보다 큰 경우 압축에 해당하는 초음파 성분 중 일부만 투과하게 되고 그 결과 투과파는 불연속부가 발생한다. 틈새 간격이 커짐에 따라 전체 신호 파형 중에 수신되는 부분의 크기는 점점 작아지게 되고, 파형의 왜곡에 따른 고조파가 발생한다. 틈새 크기와 고조파 성분의 크기 상관성 및 비선형 파라미터의 정량화와 그 유효성의 검증은 선행 연구자들에 의해 진행된 바 있다[2-6].

접촉계면의 비선형적인 압력-변위 관계에 의한 현상은 외부의 응력이나 열팽창에 의해 균열 면이 이미 접촉 상태인 닫힘성 균열에서 일어난다. 닫힘 균열에서 압축력 또는 전단력이 가해지게 되면 압력-변위 곡선은 연속체와 달리 비선형 관계로 나타난다. 이는 탄소성 Hertz 모델에 기초한 미세 표면돌출부(asperity)의 비선형 변형에 기인한 것으로 압력이 높아짐에 따라 미세돌출부 중에서 소성변형을 하는 부분과 탄성변형 하는 부분이 공존하기 때문에 나타나는 현상이다. 본 연구에서는 이러한 현상에 대해 주목하고 분석하였다[7].

이러한 접촉계면 비선형성은 재료 내부에 주로 발생하는 닫힘 균열에서 잘 나타날 수 있다. 이와 같은 균열에서는 초음파가 부분 투과, 반사가 되기 때문에 수신 신호가 작으며, 결함에서의 반사 신호를 이용하는 일반적인 초음파 기법을 사용하는 경우에는 결함에서의 반사 신호가 미약하므로 균열의 길이 및 위치를 평가하는데 어려움을 가진다. 따라서 균열의 비선형성 분석을 통해 기존 초음파 측정 방법으로 평가하기에 한계를 가지는 닫힘 균열을 평가하는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

선형 강성과 비선형 강성으로 정의된 닫힘균열의 비선형 응력-변위 관계에서 고조파의 발생은 선행 연구자들에 의해 연구된 바 있고, 실험적인 검증에 있어선 주로 투과법을 이용하여 해석하였다[2-6]. 사용 중인 실제 구조물의 내부로 측정 장치의 접근이 제한적이므로 기존 투과법은 현장 적용의 제약이 크다.

따라서 본 연구에서는 접촉계면에서 반사된 초음파의 비선형 음향 특성을 비파괴평가에 응용하기 위한 기초연구로 먼저 접촉계면에서 발생하는 비선형 음향특성 파라미터와 멱급수 강성 모델을

이론적 배경으로부터 도출하였고 이와 같은 특성을 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 접촉식 탐촉자를 이용해 경사 입사 반사 실험 장치를 구성하였으며 특성 검증에는 Al6061-T6을 이용하여 접촉 압력에 따른 기본주파수 성분, 2차 고조파 성분 그리고 비선형 파라미터의 변화를 평가하였다.

2. 접촉계면에서 음향 비선형 특성

닫힘 균열에서의 응력-변위 거동을 1차원 접촉 모델로 가정하면, 응력과 변위와의 관계는 응력 σ 가 특정 변위 u 에서 Taylor 급수 전개로부터 식(1)과 같이 전개가 가능하며 이 식으로부터 선형 강성 (K)과 비선형 강성 (K_n)을 식(2)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma(u_0 + \Delta u) &\approx \sigma(u_0) + (\Delta u) \left(\frac{\partial \sigma(u)}{\partial u} \right)_{u=u_0} + \frac{1}{2} (\Delta u)^2 \left(\frac{\partial^2 \sigma(u)}{\partial u^2} \right)_{u=u_0} \\ &= P_0 + K(\Delta u) + K_n (\Delta u)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$K = \left(\frac{\partial \sigma(u)}{\partial u} \right)_{u=u_0}, \quad K_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \sigma(u)}{\partial u^2} \right)_{u=u_0} \quad (2)$$

단일 주파수의 조화파에 대하여 다음 Fig. 1에 도식한 바와 같이 x방향으로 초음파가 접촉계면을 전파하는 경우 투과파 (u_T)와 반사파 (u_R)의 근사해를 구할 수 있다[7].

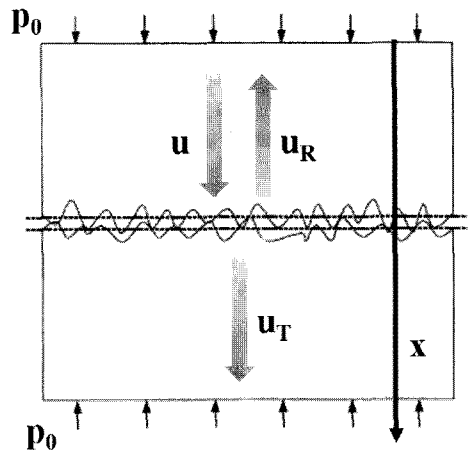


Fig. 1 Geometrical sketch of contacting rough interfaces

$$u_T(t) = \frac{2KA_0}{\rho c \omega \sqrt{1+4K^2/(\rho c \omega)^2}} \cos(\omega t - \delta_1) - \frac{K_n A_0^2}{\rho c \omega \{1+4K^2/(\rho c \omega)^2\} \sqrt{1+K^2/(\rho c \omega)^2}} \times \sin(2\omega t - 2\delta_1 + \delta_2) \quad (3)$$

$$u_R(t) = -\frac{A_0}{\sqrt{1+4K^2/(\rho c \omega)^2}} \sin(\omega t - \delta_1) + \frac{K_n A_0^2}{\rho c \omega \{1+4K^2/(\rho c \omega)^2\} \sqrt{1+K^2/(\rho c \omega)^2}} \times \sin(2\omega t - 2\delta_1 + \delta_2) \quad (4)$$

여기서 $\delta_1 = \tan^{-1}(\rho c \omega / 2K)$, $\delta_2 = \tan^{-1}(K / \rho c \omega)$ 이다.

A_0 는 입사 초음파 진폭, ρ 는 밀도, ω 는 각주파수 그리고 c 는 종파 초음파의 음속을 나타낸다. 이상으로부터 투과파와 반사파에서 입사주파수의 2배에 해당되는 고조파 성분이 나타남을 알 수 있으며, 그 진폭의 크기는 선형 계면강성뿐만 아니라 비선형 강성에 의존함을 알 수 있으며, 입사초음파의 주파수, 재료의 밀도, 음속 그리고 입사파 진폭에 의존함을 알 수 있다.

식(4)로부터 반사계수 R_c 는 다음과 같이 정해진다.

$$R_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4K^2}{\rho^2 c^2 \omega^2}}} \quad (5)$$

즉, 선형 강성 K 가 증가하면 R_c 는 감소하게 되는데, 이는 계면에서의 선형 강성이 증가할수록, 계면은 견고하게 닫히게 되고 반사파는 감소하게 된다는 것을 잘 나타낸다. 이때 밀도와 재료에서의 음속은 물성치에 해당하고, 각주파수 ω 는 측정 조건에 의해 결정되는 것을 감안할 때, 반사계수 R_c 의 측정을 통해 선형 강성 값 K 의 측정이 가능하다.

이상의 식들로부터 반사파에 대한 비선형 파라미터를 다음처럼 표현할 수 있으며 단립 정도를 나타내는 주요 파라미터로 사용할 수 있다.

$$\beta_R = \frac{A_2}{A_1^2} = \frac{K_n}{\rho c \omega \sqrt{1 + \frac{K^2}{\rho^2 c^2 \omega^2}}} \quad (6)$$

이들 비선형 파라미터는 주파수, 음향임피던스, 선형 및 비선형 계면강성에 의존하고, 입사진폭에는 독립적이기 때문에 균열의 상태를 평가하는데 있어 적합하다고 할 수 있다. 즉 계면에서 반사된 초음파로부터 기본파와 고조파 성분의 진폭을 측정하고 비선형 파라미터의 변화를 측정함으로써 접촉계면의 단립 정도를 정량적으로 평가하는 지표로 활용할 수 있다. 이 식에서는 수직 입사에 대하여 고려되었으나 실험에서는 반사법의 공간적인 제약으로 경사입사를 이용하였다. 최대한 수직입사를 고려해서 입사각을 최소화하였다.

한편 선형 강성과 압력과는 멱함수 관계(power-law relationship)로 표현되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$K = Cp^m \quad (7)$$

여기서, C 와 m 은 양의 값을 가지는 상수이면 C 와 m 은 실험적으로 외부 압력을 변화시키며 반사계수를 측정하고 선형 강성을 측정하여 압력과의 관계를 구한 후 최소자승법을 통해 근사 곡선을 추정함으로써 구할 수 있다.

$u = u_0$ 에 대하여 전개를 하면 다음과 같은 형태의 식을 얻을 수 있다.

$$p = p_0 + Cp_0^m(u - u_0) + \frac{1}{2}mC^2p_0^{2m-1}(u - u_0)^2 \quad (8)$$

따라서 압력에 의존하는 선형 강성과 비선형 강성은 다음과 같이 나타난다.

$$K_n(p_0) = \frac{1}{2}mC^2p_0^{2m-1} = \frac{1}{2}K \frac{dK}{dp_0} \quad (9)$$

식(8)과 (9)를 반사파 진폭의 식에 대입하면 기본주파수 성분(A_1), 2차 고조파 성분(A_2) 및 비선형 파라미터(β_R)는 다음과 같이 나타난다.

$$A_1 = \frac{A_0}{\sqrt{1+4(Cp^m)^2/(\rho c \omega)^2}} \quad (10)$$

$$A_2 = \frac{(\frac{1}{2}mC^2p^{2m-1})A_0^2}{\rho c \omega \{1+4(Cp^m)^2/(\rho c \omega)^2\} \sqrt{1+(Cp^m)^2/(\rho c \omega)^2}} \quad (11)$$

$$\beta_R = \frac{\frac{1}{2}mC^2p^{2m-1}}{\rho c\omega\sqrt{1+\frac{(Cp^m)^2}{\rho^2c^2\omega^2}}} \quad (12)$$

이 식을 이용하여 압력에 따른 선형, 비선형 강성의 변화와 그에 따른 투과계수, 반사계수, 비선형 파라미터의 변화를 관찰하기 위해 시뮬레이션을 실행하였다.

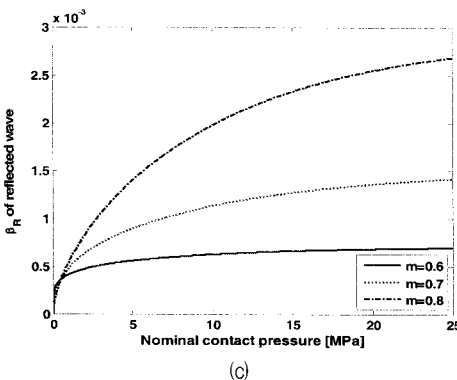
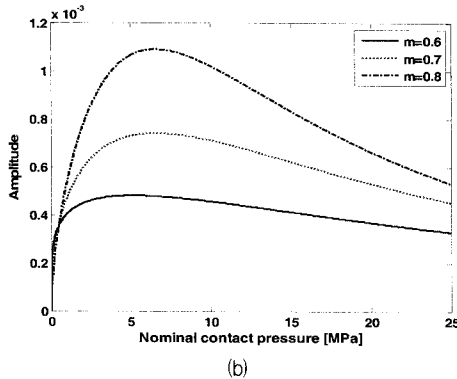
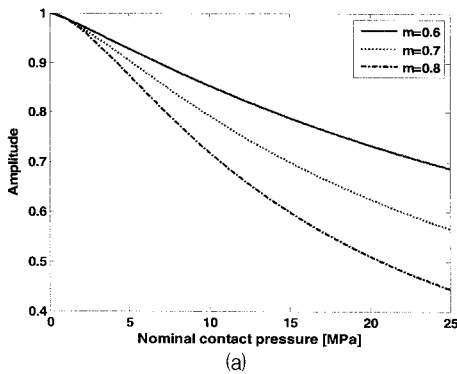


Fig. 2 Theoretical simulation results of (a) fundamental component, (b) 2nd harmonic component and (c) nonlinear parameter

초기 진폭 A_0 는 1로 두었으며, 음향 임피던스를 결정함에 있어 재료는 알루미늄으로 선정하였다.

먼저 m 이 0.6, 0.7, 0.8와 같이 변한다고 하였을 때 그에 따르는 결과는 Fig. 2의 (a), (b), (c)와 같다.

Fig. 2(a)에서 보이는 기본 주파수 성분은 접촉 압력이 높아질수록 점점 감소하는 형태를 보이고 있다. 이는 압력이 증가할수록 더욱 견고하게 닫히는 상태가 되기 때문에 반사 진폭은 감소하게 되는 것이다. 그럼에도 불구하고 Fig. 2(b)와 같이 2차 고조파 성분은 증가하다가 감소하는 형태로 나타난다. 이는 압력이 0인 상태에서는 열려있는 상태이기 때문에 반사가 최대가 되고 비선형성이 일어나지 않으므로 2차 고조파도 거의 없지만, 압력이 증가하면서 계면이 닫혀가고 이에 따라 비선형성이 증가하여 고조파의 크기가 증가하는 것을 의미하며, 압력이 더욱 증가하면 계면이 더 견고하게 닫히게 되어 반사파의 크기 자체가 감소하는 영향으로 고조파가 감소하게 된다. Fig. 2(c)는 비선형 파라미터의 변화를 보여주는데 비선형 파라미터는 입사파의 크기 변화에 영향을 받지 않으므로 비선형성만을 나타낸다. 압력이 증가하면서 초기에 비선형성이 크게 증가하다 점차 증가세가 약화되는 것을 볼 수 있다.

3. 실험 방법

3.1. 계측 시스템 구성

접촉계면에서의 음향 비선형 특성을 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 송신에는 중심 주파수가 1 MHz이고 0.5×1.0 inch인 탐촉자를 사용하였으며, 수신에는 고조파 성분을 보다 민감하게 측정하기 위해 송신 탐촉자에는 동일한 크기의 중심 주파수가 2.25 MHz인 협대역 탐촉자가 사용되었다. 수신된 초음파 신호로부터 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파 성분을 분리 및 측정하기 위해서는 톤버스트 형태의 협대역 신호가 유리하며, 이러한 버스트 형태의 초음파를 발생시키기 위해 RAM5000 SNAP(RITEC, USA) 시스템이 사용되었다. 이 장비는 이 비선형 초음파 연구에 필요한 여러 싸이클을 가진 긴 버스트 신호를 매우 큰 진폭으로 만들 수 있도록 설계되어 있다. 큰

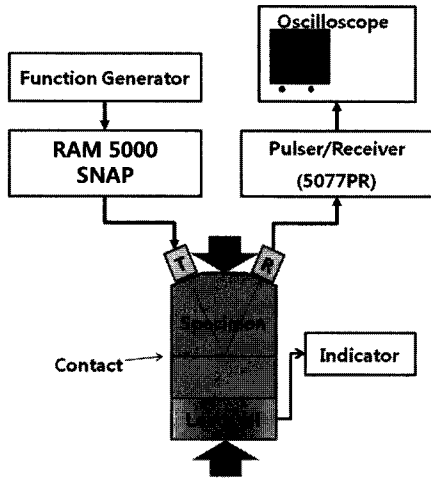


Fig. 3 Schematic diagram of measurement system for contact acoustic nonlinearity

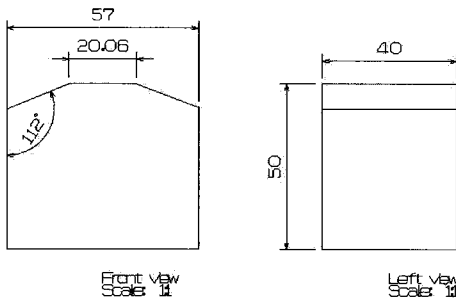


Fig. 4 Dimensions of upper test specimen for the measurement of interfacial stiffness

증폭신호를 탐촉자에 가해 줌으로써 높은 음압의 초음파를 발생시켜 비선형 음향효과를 크게 발생시킬 수 있다. 이 시스템을 통해 송신 탐촉자에는 1.1 MHz, 8 cycle의 톤버스트 형태의 인가신호가 가해졌다. 반사파는 별도의 펄서/리시버 5077PR (PANAMETRICS, USA)를 통하여 수신되었다.

실험은 유압 압력 장치를 이용해 0~5000 kgf의 하중을 가하면서 진행하며 반사파를 측정하여 주파수 분석을 통하여 기본 주파수 성분, 2차 고조파 성분, 그리고 비선형 파라미터 (β_R)을 측정하였다.

3.2. 시편

시편은 알루미늄 Al6061-T6을 사용하였다. Fig. 4는 접촉계면에서의 음향 비선형 특성을 실험적으로 검증하기 위하여 사용한 상부 시편의 형상

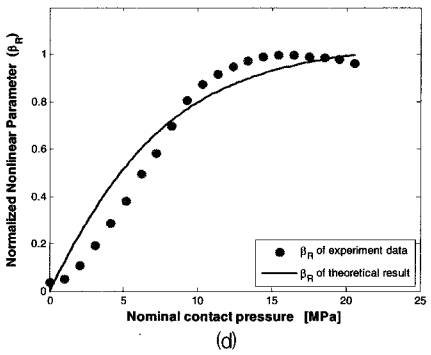
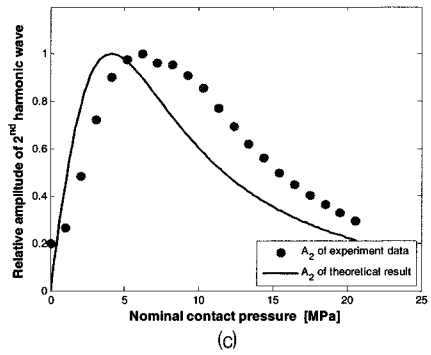
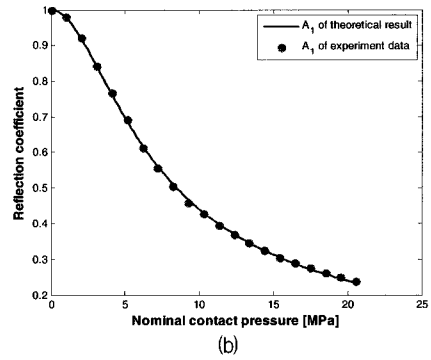
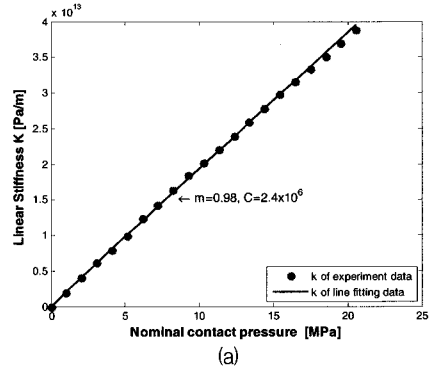


Fig. 5 Experimental and theoretical expectation results of reflected wave at contact interfaces. (a) Linear stiffness, (b) Reflection coefficient, (c) 2nd harmonic component (d) Normalized nonlinear parameter

과 치수를 나타낸다. 접촉계면을 형성하기 위한 시편으로 두 면을 맞닿게 해야 하므로 상부시편과 하부시편으로 두 개의 시편을 사용하였다. 먼저 실험 여건상에서 가능한 초음파 입사 각도를 수직에 가깝게 제작하였다.

4. 실험 결과

시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 먼저 측정된 반사계수(R_c)로부터 식(5)을 이용하여 선형 강성을 구한다. 그리고 떡급수 모델을 이용해 로그스케일로 선형 피팅하여 Fig. 5(a)와 같은 결과를 얻었다. 이로부터 떡급수 모델의 파라미터 $C=2.4 \times 10^6$, $m=0.98$ 을 구하고 식(10), (11), (12)를 이용하여 반사율, 2차 고조파 성분 그리고 비선형 파라미터의 압력에 대한 상대적인 변화를 측정하였다.

Fig. 5(b)는 선형 피팅에서 얻은 C , m 값을 바탕으로 구한 반사율과 실험값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5(c)는 2차 고조파 성분에 대해 실험 결과와 식을 통한 이론적 기대치 결과를 비교한 것이다. 각 결과는 최대값으로 정량화하였으며 경향이 잘 일치함을 볼 수 있다. 단, 피크점의 위치가 차이가 나는 것을 볼 수 있는데 이는 실험에서 경사 입사를 하였기 때문에 수평방향으로의 계면 강성에 대한 고려가 필요하지만 이론 모델에서는 수평 계면 강성을 고려하지 않았기 때문으로 보인다.

Fig. 5(d)는 비선형 파라미터에 대한 비교 결과로 2차 고조파 성분에 대한 계산 결과에서와 동일한 원인으로 실험 결과와는 약간의 차이를 보이나 상당히 모델과 유사한 결과라고 할 수 있다. 이로부터 앞에서 사용한 이론 모델의 타당성을 검증할 수 있으며, 접촉계면에서의 음향 비선형 특성을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서 선형 계면 강성과 압력과의 떡급수 모델을 통해 접촉계면 반사파에서의 2차 고조파 성분 발생을 이론적으로 모의실험하여 분석하였다. 또한, 실험적으로 한 쌍의 Al6061-T6 시편을 이용하여 두 접촉 계면에서의 음향 비선형 계

측시스템을 구축하고 접촉 압력에 따른 반사파의 음향 비선형 파라미터를 측정하였다. 실험을 통해 계면에서의 접촉 압력에 따른 고조파 발생을 확인하고 접촉계면 반사파에서의 비선형 파라미터를 측정하였다.

실험 결과, 일정 압력까지 2차 고조파는 증가하다가 감소하는 형태를 보이며 비선형 파라미터는 압력이 증가하면서 초기에 비선형성이 크게 증가하다 점차 증가세가 약화되었다. 이상의 결과는 계면 강성 값을 통해 구한 이론적으로 계산한 결과 값과 매우 유사함을 확인하였다.

결과적으로, 초음파의 비선형 음향 효과를 이용하여 접촉계면의 단합 정도를 검출하는 것이 효과적이며 구조물의 단합 균열 평가에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0007349)

참고문헌

- [1] I. Yu. Solodov, "Ultrasonics of non-linear contacts: propagation, reflection and NDE-applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 383-390 (1998)
- [2] I. Yu. Solodov, N. Krohn and G. Busse, "CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids," *Ultrasonics*, Vol. 40, pp. 621-625 (2002)
- [3] O. Buck, W. L. Morris and J. M. Richardson, "Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue crack," *Applied Physics Letters*, Vol. 30, No. 5, pp. 371-373 (1978)
- [4] S. Biwa, S. Hiraiwa and E. Matsumoto, "Pressure-dependent stiffness and nonlinear ultrasonic response of contacting surfaces," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-21 (2009)
- [5] 이태훈, 장경영, "초음파의 비선형 특성을 이용한 미세균열 평가", *비파괴검사학회지*

- Vol. 28, No. 4, pp. 352-357 (2008)
- [6] K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135 (2009)
- [7] S. Biwa, S. Nakajima and N. Ohno, "On the acoustic nonlinearity of solid-solid contact with pressure-dependent interface stiffness," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71, pp. 508-515 (2004)