

표면파의 음향 비선형성과 실험적 특성 검증

Acoustic Nonlinearity of Surface Wave and Experimental Verification of Characteristics

이재익*, 권구도*, 이태훈*, 장경영**†

Jaek Lee*, Goodo Kwon*, Taehun Lee* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 본 연구의 목적은 탄성 표면파에서의 비선형 거동의 이론적 배경을 소개하고 실험적으로 검증하는 것으로서, 이론상의 표면파의 비선형 파라미터는 벌크파에서와 같이 전파된 표면파의 2차 고조파 성분과 기본파 성분 크기의 비에 의존한다. 이를 검증하기 위해 접촉식 탐촉자를 이용한 측정 시스템을 구축하였고, 표면파 전파거리와 인가전압 크기를 변화시키며 알루미늄 6061 합금의 비선형 파라미터를 측정하였다. 또한, 비선형 파라미터를 측정함에 있어서 주파수 의존적 감쇠의 영향을 고려하였다. 이러한 과정을 통한 결과는 탄성 표면파의 비선형 파라미터가 인가전압의 크기에 독립적이며, 2차 고조파 성분의 크기는 전파거리에 선형적으로 의존할 것이라는 이론적 예측과 일치한다.

주요용어: 표면파, 음향 비선형성, 비선형 파라미터, 고조파 성분

Abstract The goal of this study is to introduce the theoretical background of acoustic nonlinearity in surface wave and to verify its characteristics by experiments. It has been known by theory that the nonlinear parameter of surface wave is proportional to the ratio of 2nd harmonic amplitude and the power of primary component in the propagated surface wave, as like as in bulk waves. In this paper, in order to verify this characteristics we constructed a measurement system using contact angle beam transducers and measured the nonlinear parameter of surface wave in an Aluminum 6061 alloy block specimen while changing the distance of wave propagation and the input amplitude. We also considered the effect of frequency-dependent attenuation to the measurement of nonlinear parameter. Results showed good agreement with the theoretical expectation that the nonlinear parameter should be independent on the input amplitude and linearly dependent on the input amplitude and the 2nd harmonic amplitude is linearly dependant on the propagation distance.

Keywords: Surface wave, Acoustic Nonlinearity, Nonlinear Parameter, Harmonic Generation

1. 서론

표면파는 고체 표면을 따라 약 1파장 정도의 깊이 이내에서 표면을 따라 진행하는 탄성파로 그 전파특성은 표면지역 한 파장 내외의 물성에 따라 결정되므로 표면의 결함이나 물성의 평가에 유용하게

사용될 수 있다. 그러나 기존 벌크파에서와 마찬가지로 표면의 열화나 미세균열 평가 등에의 적용에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 표면파의 비선형 음향특성을 응용하려는 노력이 시도되고 있다[1].

한편 비선형 음향은 재료의 부식, 피로 등에 의

한 열화나 단합균열과 같은 미세균열의 검사에 유용한 것으로 기대되고 있는 분야로, 이에 관한 이론적 모델링과 실험적 모델검증을 통하여 새로운 비파괴 평가법으로 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[2,3]. 그러나 표면파에서의 비선형 특성에 관한 연구는 아직 시작 단계에 불과하며 구체적인 측정기법의 개발과 검증 등 세부기술에 대한 연구가 필요하다.

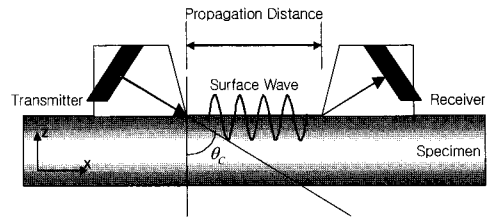


Fig. 1 Critical angle of surface wave

본 연구에서는 이와 같은 표면파의 비선형 음향 특성을 비파괴 평가에 응용하기 위한 기초연구로 먼저 표면파의 비선형 음향특성 파라미터를 이론적 배경으로부터 도출하고, 이의 특성을 실험적으로 검증하고자 하였다. 그리고 이를 위해 접촉식 탐촉자를 이용한 표면파의 음향 비선형 파라미터 측정장치를 구성하였으며, 특성 검증에는 전파거리 변화와 인가전압의 변화에 따른 비선형 파라미터의 변화를 관찰하는 방법을 적용하였다. 실험에서는 시편으로 알루미늄 6061 합금 블록을 사용하였다.

또한 장거리 전파거리에서 표면파 진폭의 주파수의존적 감쇠가 비선형 파라미터 측정에 영향을 미치므로 이의 영향을 보정하는 방법이 제시되었다.

2. 이론

2.1. 표면파의 임계각

Fig. 1과 같이 재료의 표면에서 특정 입사각(임계각)으로 초음파를 입사시키면 표면으로부터 수 파장의 깊이에 에너지가 분포하는 표면파가 발생된다. 이때의 임계각은 식 (1)로 정의되는 스넬의 법칙으로 구할 수 있다[4].

$$\sin\theta_c = \frac{c_1}{c_2} \quad (1)$$

여기서 c_1 과 c_2 는 각각 wedge의 초음파 종파 속도와 시험편에서의 표면파 속도를 의미하며, θ_c 는 임계각을 의미한다. 강이나 알루미늄 등의 재료에서 표면파는 $60^\circ \sim 65^\circ$ 의 임계각을 갖는다.

2.2. 표면파의 음향 비선형 특성

반무한 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파의 경우 그 변위성분은 진행방향인 x축과 이에 수직

인 z축의 성분만을 고려하면 된다. 이 때 각 방향에 대한 변위 포텐셜은 다음 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다[4].

$$\varphi = Be^{-kqz} e^{ik(x-ct)} \quad (2)$$

$$\psi = Ce^{-ksz} e^{ik(x-ct)} \quad (3)$$

여기서, $q = \sqrt{1 - (\frac{c}{c_L})^2}$, $s = \sqrt{1 - (\frac{c}{c_T})^2}$

그리고, c_L 과 c_T 는 각각 종파와 횡파에서의 초음파 속도를 의미하며, k와 c는 각각 표면파의 파수와 전파속도이다.

식 (2)와 (3)를 이용해 각 방향의 변위 성분을 구하면

$$u_x = k(iBe^{-qz} - sCe^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (4)$$

$$u_z = -k(qBe^{-qz} - iCe^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있으며, 응력-변형을 관계를 이용하여 각 방향의 응력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_x = -k^2 E(Be^{-qz} + isCe^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (6)$$

$$\sigma_z = -kE(-q^2 Be^{-qz} + isCe^{-sz})e^{ik(x-ct)} \quad (7)$$

여기서 E는 영률(Young's modulus)이다.

다음으로 경계면에서의 응력이 0인 조건을 이용해 식 (6)과 (7)의 계수를 정리하면 변위성분은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_x = ksC(e^{-qz} - e^{-sz}) \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$u_z = ikC(sq e^{-qz} + e^{-sz}) \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

u_x 와 u_z 에는 종파와 횡파 성분이 모두 기여한다. 그런데, 매질이 등방성이고 2차의 약한 음향 비선형성을 갖는 경우 횡파의 음향 비선형성은 3차 탄성계수(최저 차수의 비선형 탄성계수)의 대칭성으로 인해 소멸하게 되므로, 표면파의 음향 비선형성은 종파성분만이 기여하게 된다[5]. 따라서 표면파의 음향 비선형 특성은 종파에서의 그것과 유사하게 나타난다[1,6]. 즉 표면파의 음향 비선형성으로

인해 발생하는 2차 고조파의 진폭 성분을 A_2 라 할 때, A_2 는 다음과 같이 기본파 성분의 진폭의 제곱에 비례한다.

$$A_2 \propto \frac{\beta k^2 x A_1^2}{8} \quad (10)$$

여기서 A_1 은 기본파의 진폭, β 는 매질의 음향 비선형 파라미터이다. 한편 재질의 변질에 따른 음향 비선형특성의 변화에 주목하는 경우에는 식 (11)과 같이 순수히 2차 조화성분(A_2)과 기본파 성분(A_1)의 진폭비만으로 결정할 수 있는 파라미터 β' 을 이용할 수 있으므로 여기서는 이 파라미터를 측정하여 분석하고자 한다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (11)$$

이 파라미터는 파수 k 와 전파거리 x 가 일정할 때 재료의 변질을 상대적으로 비교하는데 편리하다. 그러나 전파거리가 변한다면 β' 은 다음의 관계에서 알 수 있듯이,

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \propto \frac{\beta k^2 x}{8} \quad (12)$$

전파거리 x 에 비례한다는 점에 유의해야 한다.

2.3. 표면파의 감쇠

표면파는 진행거리가 늘어남에 따라 확산이나 산란 등으로 인해 음압이 감소하는데, 특히 주파수에 의존하는 감쇠의 경우 기본파 성분과 고조파 성분에서의 영향이 달라서 비선형 특성의 정확한 평가가 어려워진다. 따라서 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 다음과 같은 방식으로 이를 보정하였다.

먼저 일반적으로 전파거리에 따른 감쇠는 식 (13)과 같이 표현할 수 있다[7].

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha_0 x} \quad (13)$$

여기서 A_0 는 초기 진폭, A 는 거리 x 의 위치에서 감쇠된 진폭의 크기를 의미하며, α_0 가 감쇠계수이다. 한편 고조파는 표면파가 전파하면서 연속적으로 발생하는 성분들이 중첩되어 전파 거리에 따라 성장하게 되는데, 여기에 감쇠를 고려하면 임의의 거리 x 에서의 고조파 진폭은 다음식 (14)와 같이 나타낼 수 있다[8]. 여기서 $\beta_0 = \beta k^2 / 8$ 이고, A_1 은

감쇠가 없는 기본파의 진폭을 나타낸다.

$$A_2 = \frac{\beta_0 A_1^2}{-(2\alpha_1 - \alpha_2)} \{ \exp(-2\alpha_1 x) - \exp(-\alpha_2 x) \} \quad (14)$$

본 연구에서는 기본파 성분과 고조파 성분의 감쇠 보정을 식 (15) 및 (16)과 같이 수행하였다.

$$A_{1c} = \frac{A_1}{\exp(-\alpha_1 x)} \quad (15)$$

$$A_{2c} = \frac{-(2\alpha_1 - \alpha_2) A_2 x}{\{ \exp(-2\alpha_1 x) - \exp(-\alpha_2 x) \}} \quad (16)$$

이 때 α_1 과 α_2 는 각각 기본파 성분과 고조파 성분의 감쇠계수이며, A_{1c} 와 A_{2c} 는 보정후의 기본파 및 고조파 성분의 진폭이다.

3. 실험

3.1. 실험장치 구성

표면파의 음향 비선형 특성을 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 신호발생기에서 발생된 신호를 게이트 증폭기(gate amplifier)를 이용하여 증폭시켜 발신 탐촉자로 송신한다. 수신 신호는 프리앰프(pre-amplifier)를 이용해 증폭시킨 후 디지털 오실로스코프에서 A/D 변환되고 컴퓨터에서 주파수 분석되었다. 주파수 분석에서는 푸리에 변환을 이용하여 기본파 성분의 크기와 2차 고조파 성분의 크기를 구하고, 이로부터 비선형 파라미터 β' 를 계산하였다.

탐촉자는 웨지결합형 탐촉자(Panametrics)를 사용하였으며, 발신에는 2.25 MHz 탐촉자를, 수신에는 5 MHz 탐촉자를 사용하였다.

웨지는 스틸용으로 제작되어진 경사각 66°의 제품을 사용하였다.

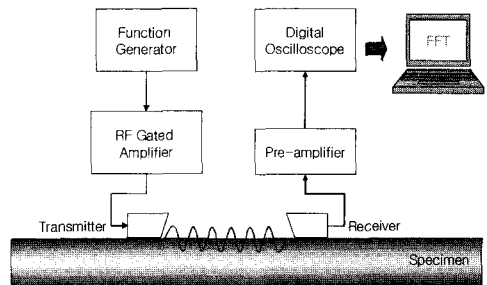


Fig. 2 Schematic diagram of measurement system

3.2. 시편

시편은 150x600x50 mm의 알루미늄 6061 블록을 사용하였다. 알루미늄 6061의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of Aluminum 6061

Hardness, Brinell	30.0
Ultimate Tensile Strength	124 MPa
Tensile Yield Strength	55.2 MPa
Elongation at Break	25.0 %
Modulus of Elasticity	68.9 GPa
Fatigue Strength	62.1 MPa

4. 실험 결과

Fig. 3과 Fig. 4는 수신된 파형과 이를 FFT처리하여 얻은 주파수 스펙트럼을 예시한 것이다. 고조파 검출을 용이하게 하기 위해서는 송신파를 협대역 신호로 하는 것이 매우 유리한데, 이 연구에서는 이를 위해 송신파형으로 핸닝 윈도우(hanning window)로 변조한 2.25 MHz 톤버스트 신호를 이용하였고 Fig. 3에 그 형태가 잘 나타나고 있다. 버스트의 길이는 10주기로 하였다.

Fig. 4의 주파수 분석 결과에서는 기본주파수인 2.25 MHz 성분과 2차 고조파 주파수인 4.5 MHz 성분이 잘 검출되고 있음을 알 수 있다.

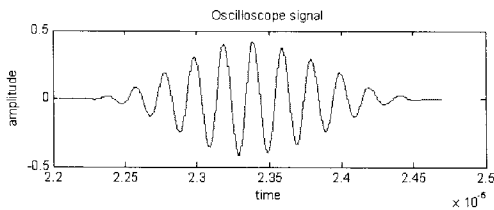


Fig. 3 Sample signal of received waveform

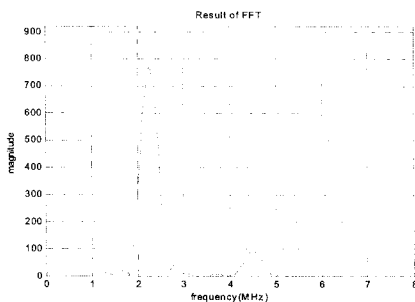


Fig. 4 Sample spectrum of signal shown in Fig. 3

한편 실험적으로 구하는 비선형 파라미터가 실제 표면파의 음향 비선형성을 반영하는지, 그리고 이론적 경향과 일치하는지를 검증하기 위해 본 연구에서는 두 가지 실험을 실시하였다. 하나는 인가 전압의 변화에 따른 β'의 변화를 확인하는 것이며, 또 하나는 전파거리의 변화에 따른 β'의 변화를 확인하는 것이다.

즉, 인가전압을 크게 하면 기본파의 크기가 커지고, 식 (10)에서와 같이 2차 고조파의 크기가 기본파 크기의 제곱에 비례하여 커져야 한다. 그러나 식 (11)에서 알 수 있듯이 β'은 기본파 크기의 변화에 관계없이 일정해야 한다. 한편 전파거리가 증가하면 식 (12)에서 언급했듯이 β'은 선형적으로 증가해야 한다.

Fig. 5는 먼저 인가전압의 변화에 대한 실험 결과로 A₁²의 크기 변화에 따른 A₂의 크기의 변화를 보여준다. 게이트 증폭기에서 출력되는 전압을 변화시키며 A₁과 A₂의 크기를 측정하였으며, 동일한 조건하에서 2회 반복 측정하였다. 실험결과 A₁²와 A₂ 사이에 선형적 관계가 있음을 알 수 있고, 기울기에 해당하는 β'이 일정함을 확인할 수 있다. 이는 측정된 2차 고조파 성분이 식 (11)의 관계와 잘 일치하고 있음을 입증한다.

다음으로 전파거리에 따른 β'의 변화를 관찰하기 위해 전파거리를 70 mm에서부터 150 mm까지 10 mm의 간격으로 변경해가며 실험을 2회 진행하였다. Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. (a)와 (b)는 송수신 거리를 변화시켰을 때 기본주파수 성분의 크기 및 2차 고조파 성분의 크기가 어떻게 변화하는지 나타낸 것이며, (c)는 앞서 측정한 기본파와 고조파의 크기로부터 식 (11)에서 정의된 파라미터 β'을 구하여 나타낸 것이다.

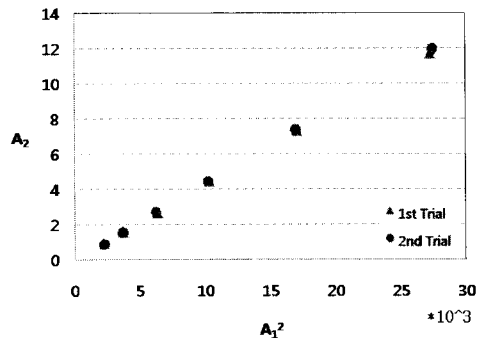


Fig. 5 Experimental results : A₁² vs. A₂

거리의 증가에 따른 β' 의 대체적인 증가를 확인할 수 있으며, 이는 식 (12)로부터 예상한 결과와 일치한다. 다만 일정 거리 이상에서는 증가의 추세가 약해지는데, 이는 전파거리에 따른 감쇠효과 때문으로 사료된다. 즉, 기본파의 크기는 거리의 증가에 따라 감소하고, 2차 고조파의 크기는 증가하다가 감소하는 현상을 보이는데, 이는 비선형성에 의한 2차 고조파 성분이 전파거리의 증가에 따른 누적 성장 효과로 초기에 증가하다가 주파수 의존적 감쇠분이 이보다 더 커지면 그 크기는 감소하기 때문에 나타나는 현상이다. 이런 효과는 비선형 파라미

터 측정에 오류를 유발할 수 있다. 따라서 다음 절에서 이에 대한 보상을 시도하였다.

한편 진폭의 감소는 기하학적 확산에 의해서도 일어날 수 있는데 이런 단순 확산에 의한 진폭감쇠는 주파수에 의존하지 않기 때문에 본 논문의 주파수 의존적 감쇠 보정에서는 고려하지 않았다.

4.1. 주파수 의존적 감쇠에 대한 보정

주파수에 의존하는 진폭감쇠를 보정하기 위해 우선 기본파 2.25 MHz와 2차 고조파 4.5 MHz 성분의 진폭감쇠를 측정하였다. 그 후 식 (13)의 양변에 자연로그를 취해 1차식으로 변형하여 Fig. 7과 같이 거리에 따른 곡선맞춤을 통해 감쇠계수를 구하였다. 그 결과 $\alpha_1 = 0.001, \alpha_2 = 0.004$ [1/mm]의 감쇠계수를 얻을 수 있었으며, 이는 표면파의 감쇠계수가 주파수의 제곱에 비례한다는 이론과도 일치한다[9].

Fig. 8은 식 (15)와 (16)에 의해 보정한 A_1 과 A_2 그리고 이로부터 구한 β' 을 나타낸다.

Fig. 6의 보정전 결과와 비교해 보면 A_1 성분의 거리에 따른 진폭의 저하현상이 상당 부분 완화되어 전파거리에 무관하게 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. A_2 성분은 보정전에 비해 보다 거리에 따른 증가 추세가 뚜렷하게 나타났다. 그러나 전파거리가 큰 경우 증가 추세가 다시 약해짐을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 확산 현상에 의한 것으로 생각되며, 확산에 의한 진폭 감쇠는 본 논문에서 사용한 보정으로는 그 영향을 상쇄시키지 못한다.

동일한 이유로 β' 역시 전파거리 증가에 따른 선형적 증가추세가 분명하게 나타났지만, 먼 거리에서는 확산감쇠의 영향으로 증가 추세가 약해진다.

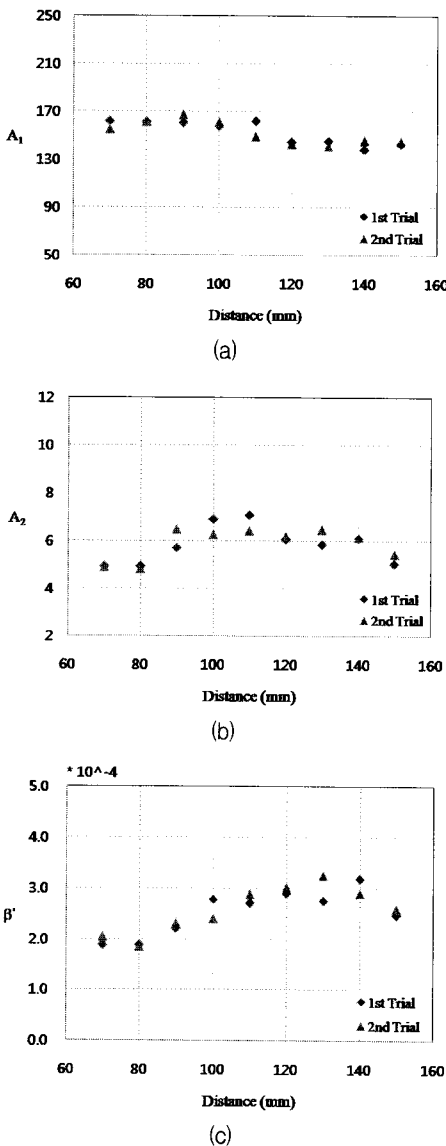


Fig. 6 Experimental results as the propagation distance increases : (a) A_1 , (b) A_2 , (c) β'

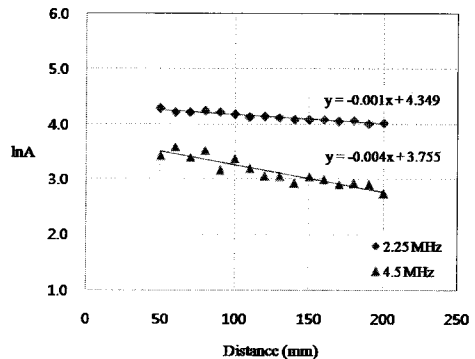


Fig. 7 Estimation of attenuation coefficient

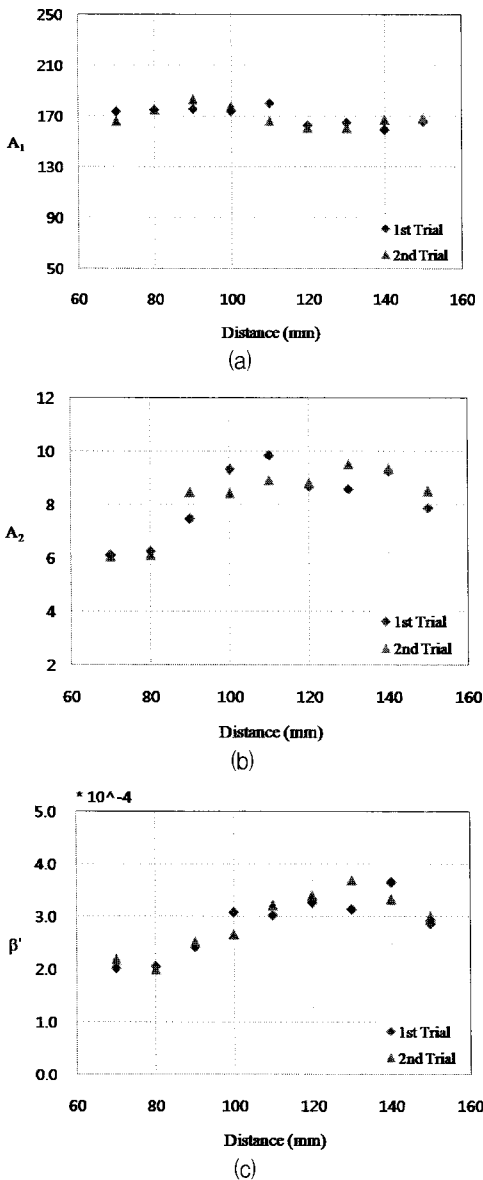


Fig. 8 Results of compensation of attenuation : (a) A_1 , (b) A_2 , (c) β'

5. 결론

- 1) 표면파의 비선형성에 대한 발생 메커니즘을 정리하였고, 비선형 성분의 크기는 전파된 표면파의 2차 고조파 성분 (A_2)과 기본주파수 성분(A_1)의 진폭비만으로 측정되는 파라미터 β' 으로 표현할 수 있다.
- 2) 접촉식 탐촉자를 이용하여 표면파의 비선형 특성을 측정하기 위한 측정장치를 구성하였으며,

이를 이용하여 표면파의 음향 비선형 특성을 검증하였다. 먼저 인가전압의 변화에 따른 파라미터 β' 의 변화를 실험한 결과 인가전압의 변화와 무관하게 일정하게 측정되었으며 이는 이론 예측과 일치하였다. 또한 전파거리 변화에 따른 파라미터 β' 의 변화를 실험한 결과 전파거리에 선형적으로 의존함을 확인할 수 있었다. 이 또한 이론예측과 일치한다.

- 3) 주파수 의존적 감쇠는 기본파와 고조파의 진폭에 서로 다른 영향을 미친다. 따라서 기본파와 고조파의 진폭 측정에 의한 비선형 파라미터 측정에서 이를 보정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이의 보정방법을 제시하였으며 기본파와 고조파의 감쇠계수를 직접 측정하여 보정한 결과, 이론적 예측과 일치하는 효과를 얻을 수 있었다. 그러나 전파거리가 클 경우 보정 효과가 떨어졌으며, 이는 기하학적 확산에 의한 진폭 감쇠를 고려하지 않은 때문으로 사료된다. 따라서 확산 감쇠까지 보정하는 기법에 대한 연구가 필요하다.

이상에서 표면파에서의 비선형 성분 발생과 그 거동을 실험적으로 확인하였으며, 향후 이 기법이 표면재질의 열화 또는 표면 미세결함의 검출에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-313-D00010)

참고문헌

- [1] J. Herrmann, J. Y. Kim, L. J. Jacobs, J. Qu, J. W. Little and M. F. Savage, "Assessment of material damage in a nickel-base superalloy using nonlinear Rayleigh surface waves," Journal of Applied Physics, Vol. 99, Issue 12, (2006)
- [2] K. Y. Jhang "Application of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," IEEE Transaction on Ultrasonics, Frequencies, and Frequency Control, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548, (2000)

- [3] T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Evaluation of micro crack using nonlinear acoustic effect," *Journal of KSNT*, Vol. 28, No. 4 pp. 352-357, (2008)
- [4] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, pp. 44~49 and 90-92, Cambridge University Press, USA, (1999)
- [5] A. N. Norris, "Symmetry conditions for third order elastic moduli and implications in nonlinear wave theory," *Journal of Elasticity*, Vol. 25, No. 3, pp. 247-257, (1991)
- [6] E. A. Zabolotskaya, "Nonlinear propagation of plane and circular Rayleigh waves in isotropic solids," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 95, No. 5, pp. 2569-2575, (1992)
- [7] D. E. Bray and R. K. Stanley, *Nondestructive Evaluation - A Tool in Design, Manufacturing and Service*, pp. 74-75, CRC Press, (1997)
- [8] P. J. Vella, T. C. Padmore and G. I. Stegeman, "Nonlinear surface-wave interactions: parametric mixing and harmonic generation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 5, pp. 1993-2006, (1974)
- [9] C. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications*, pp. 123-124, Academic Press Inc., (1989)