

## 접촉식 탐촉자를 이용한 초음파 비선형 파라미터의 측정에서 시스템에 의존하는 고조파 성분의 영향

### Effect of System Dependent Harmonics in the Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by Using Contact Transducers

최익황\*, 이재익\*, 권구도\*, 장경영\*\*†

Ik-Hwang Choi\*, Jaelk Lee\*, Goodo Kwon\* and Kyung-Young Jhang\*\*†

**초 록** 재료의 미세열화를 측정하는 비파괴검사법으로 초음파의 비선형파라미터 측정기법이 최근 주목받고 있다. 하지만 그 크기가 매우 작기 때문에 여러 측정 인자들로부터 영향을 받아 일관성 있는 측정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 접촉식 탐촉자를 이용한 초음파 비선형파라미터의 측정에서 측정시스템에 의존하는 인자들의 영향을 연구하였다. 그 결과 탐촉자 접촉압력과 인가전압이 충분히 클수록 시스템 비선형성의 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이 연구의 결과는 정확한 비선형파라미터의 측정을 위한 실험조건을 설정하는 방법으로서 유용하게 사용될 것이 기대된다.

**주요용어:** 초음파 비선형파라미터, 접촉압력, 접촉식 탐촉자, 시스템 비선형성, 재료의 비선형성

**Abstract** Ultrasonic nonlinearity has been considered as a promising method to evaluate the micro damage of material; however, its magnitude is so small that its measurement is not easy. Thus, in this study, we investigate the effects of such experimental system dependent factors in the measurement of ultrasonic nonlinear parameter by using contact PZT transducer. Experimental results showed that the effect of system dependent nonlinearity is reduced when the contact pressure and transducer input voltage are sufficiently large. These results will be very useful to find out the proper experiment condition to measure rather accurate nonlinear parameter.

**Keywords:** Ultrasonic Nonlinear Parameter, Contacting Pressure, Contact Type Transducer, System Dependent Harmonic, Material Dependent Harmonic

#### 1. 서론

탄성파의 비선형적 거동은 부식, 피로 등 열화에 의한 재료의 미시구조적 변질을 평가할 수 있는 인자로 주목받고 있다[1-3]. 탄성파 비선형성의 특징적 현상은 탄성파가 재료를 통해 전파하면서 기본주파수 성분 이외에 고조파 성분이 발생한다는 것이다. 비선형성 측정은 전파된 신호의 기본주파

수 성분과 2차 고조파 성분의 크기의 비율로부터 측정하고, 이 비율을 상대적인 비선형파라미터  $\beta'$ 로 정의한다. 그리고 열화 발생 전후의  $\beta'$ 를 측정하여 비교함으로써 재료의 열화도를 평가할 수 있다[4,5].

그런데 이론적인 비선형 파라미터는 재료에 의해 발생하는 고조파 성분만이 고려되어야 하지만 실제에서는 재료에 의한 고조파 성분뿐만 아니라 탐촉

자를 포함하는 전기적인 시스템 등에 의해 발생된 고조파 성분들 까지도 비선형 파라미터측정에 포함된다. 또한 접촉식 탐촉자를 사용할 경우 탐촉자와 시편사이의 접촉압력이 일정하지 않다면 불안정한 접촉상태로 인해 불필요한 파형이 발생하고 이에 따른 여분의 비선형성분이 발생될 수 있다.

따라서 실제로 측정되는 비선형성은 순수 재료의 비선형성보다 과다하게 평가될 수 있으며, 일반적으로 재료의 비선형성에 의해 발생되는 고조파의 크기가 매우 작기 때문에 측정결과에 큰 영향을 미칠 수 있다[6]. 그러나 열화발생 전후의 비선형 파라미터를 비교하여 열화를 평가하는 경우, 즉 상대적인 비선형파라미터의 변화만이 중요한 경우에는 시스템 의존적 비선형성이 일정하다면 그 존재 자체는 무방할 것이다.

하지만 지금까지 이런 시스템 의존적 성분의 영향에 대한 평가는 거의 이루어진 바가 없다. 그래서 본 연구에서는 일반적으로 초음파 비파괴검사에 사용되는 접촉식 탐촉자를 이용하여 비선형 파라미터를 측정하는데 있어 이런 시스템 의존적 비선형성이 얼마나 존재하고 그 성질은 어떠한지에 대해 조사하고자 하였으며, 이의 영향을 억제하기 위한 방법을 강구하고자 하였다.

이를 위해 이 논문에서는 먼저 접촉식 탐촉자와 시편사이의 접촉압력 변화가 비선형 파라미터의 측정에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고, 이로부터 안정된 측정을 위한 접촉압력의 조건을 찾았다. 여기에는 앞선 연구에서 개발된 탐촉자 접촉압력 제어용 공압장치가 사용되었다[7]. 그리고 탐촉자, 탐촉자의 접촉상태, 신호발생기 및 수신장치, 신호처리장치 등을 포함하는 전체 측정시스템의 비선형성을 조사하기 위하여 송수신 탐촉자를 서로 맞대어 수신한 신호에서의 고조파 성분을 측정하였으며, 탐촉자 인가전압 변화에 따른 거동을 분석하였다. 또 비교를 위해 동일한 시스템에 알루미늄 시편을 추가하여 수신한 신호의 고조파 성분을 측정하였다. 또 이런 분석결과로부터 열화발생 전후의 상대적인 비선형파라미터의 변화를 측정하여 열화를 분석하는데 있어 시스템 의존적 비선형성이 미치는 영향을 억제할 수 있는 방법을 찾고자 하였다.

## 2. 탄성과 비선형 파라미터

재료의 탄성과 비선형성은 식 (1)로 정의된 파라

미터  $\beta$ 로 측정한다[1-3].

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \quad (1)$$

여기서  $A_1$  과  $A_2$  는 각각 1차 해와 와 2차 해의 진폭이고,  $k$ 는 파수(wave number),  $x$ 는 전파거리이다. 이 파라미터는 재료의 물성치로서 열화에 의해 재료의 탄성 특성이 달라지면  $\beta$ 의 값 또한 달라진다. 따라서 재료의 열화를 평가할 때는 일반적으로 열화된 상태에서의 비선형 파라미터를 측정하고 열화되기 이전의 초기 상태의 비선형 파라미터와 비교하게 된다.

그런데 파수, 전파거리를 상수로 고정할 수 있는 경우에는  $\beta$  대신에  $A_1$  과  $A_2$  만을 이용한 상대적인 비선형파라미터  $\beta'$ 을 사용하는 것이 편리하다. 상대적인 비선형파라미터  $\beta'$ 은 식 (2)와 같이 정의된다.

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

서로 다른 시편의  $\beta'$ 를 측정하여 열화도를 비교하기 위해서는 모든 측정 조건들을 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 이는 탐촉자나 신호발생기, 증폭기, 필터 등의 전자기기와 탐촉자 간의 접촉조건 같은 실험 장비나 설정 상태가 파형에 또 다른 조화 성분을 야기할 수 있기 때문이다[7,8].

이 논문에서는 이러한 실험조건이나 장치에 의해 발생한 시스템 의존적 조화성분이 비선형계수  $\beta'$ 의 측정에 주는 영향을 실험적으로 분석하고, 이 현상을 줄이기 위한 방안을 찾고자 한 것이다.

## 3. 실험방법

Fig. 1은 접촉식 탐촉자를 사용하여 초음파 비선형 파라미터를 측정하기 위한 전체시스템의 개략도이다. 이 시스템에는 탐촉자와 시편사이의 압력을 일정하게 유지 할 수 있도록 고안된 공압 조절 장치가 포함되어 있다[7].

신호의 송신을 위해 RAM5000(미국, RITEC)을 사용하였고, 탐촉자는 송신에는 협대역 5 MHz, 수신에는 10 MHz의 중심주파수를 가지는 광대역 탐촉자를 이용하였다. 송신 탐촉자에는 5 MHz 단일주파수 30 주기의 고전압 톤버스트(tone-burst) 신

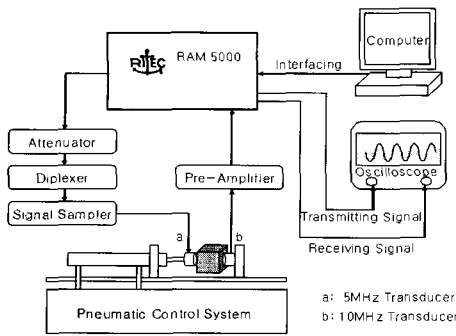


Fig. 1 Configuration of experimental system to measure the ultrasonic nonlinear parameter, with automatic contact pressure control system for ultrasonic transducer

호를 사이드 로브 성분을 제거하기 위해 hanning window로 변조시켜 인가했다. 그리고 RAM5000에서 제공하는 수퍼헤테로다인법으로 부터 수신된 신호의 기본 주파수 성분의 진폭과 2차 고조파 성분의 진폭을 측정하고 측정된 신호들을 계산하여  $\beta'$ 를 구하였다. 수신신호는 RAM5000에서 30개씩 평균화하였다.

#### 4. 실험결과

##### 4.1. 접촉압력이 $\beta'$ 의 측정에 미치는 영향

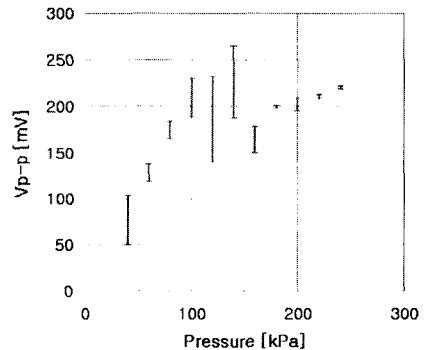
탐촉자와 재료의 접촉압력이 측정결과에 미치는 영향을 분석하였다. 송신측 탐촉자는 접촉이 완벽하게 되었을 때 충분한 파워를 가지고 시편에 초음파를 가해줄 수 있고, 수신측 탐촉자 또한 완벽하게 접촉되어야 매질을 통과한 초음파 신호를 충분한 세기로 받아들일 수 있다. 여기서는 압력변화에 대한 수신신호의 peak-to-peak와 비선형파라미터를 분석하여 비선형파라미터 측정에 필요한 최소한의 압력을 알아보았다.

Fig. 2(a)는 압력을 20 kPa씩 증가시키면서 측정 한  $V_{pp}$ 의 크기를 보여준다.  $V_{pp}$ 는 수신신호의 peak-to-peak이다. 그래프의 가로축은 압력을, 세로축은 측정된  $V_{pp}$ 를 나타낸다. 실험은 3회 중복 측정을 하였다. 실험결과를 살펴보면 약 170 kPa을 기준으로 좌우에서 서로 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 170 kPa 보다 작은 부분에서는 접촉상태의 불안정성으로 인해 동일한 압력 하에서도  $V_{pp}$ 의 편차가 크게 나타났다. 그에 비해 170 kPa

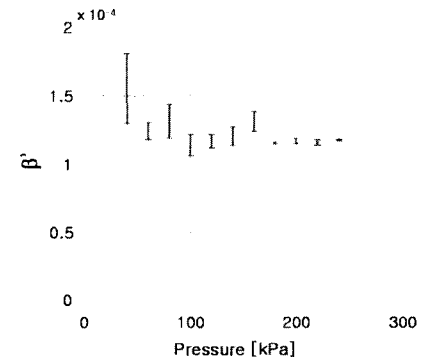
이상에서는 동일 압력 하에서  $V_{pp}$ 가 비교적 일정하게 측정되었다.

Fig. 2(b)는 압력을 변화시키면서 측정한  $\beta'$ 을 나타낸다. 가로축이 압력, 세로축이 비선형 파라미터의 크기를 나타낸다. 앞의 실험결과에서와 유사하게 낮은 압력에서는 큰 편차를 보이고, 높은 압력에서는 거의 일정한  $\beta'$ 을 얻을 수 있었다. 이 실험결과를 통해 살펴보면, 탐촉자와 시편 사이에 충분한 접촉압력을 가해주어야 신호의 전달이 양호하고 이때 안정적으로  $\beta'$ 를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

단, 적절한 압력의 크기는 가압장치, 탐촉자의 종류, 시편의 거칠기, 커플란트의 종류 등에 의존하는 값으로 다른 상황에서는 이 임계압력이 바뀔 수도 있으므로 비선형 파라미터 측정을 하기 전에 미리 접촉압력의 영향을 분석하여 적정 크기를 정해 둘 필요가 있다. 본 연구의 경우 위 실험결과로부터



(a) Magnitude of the peak-to-peak value ( $V_{pp}$ )



(b) Magnitude of the relationship nonlinear parameter

Fig. 2 Measured peak-to-peak value ( $V_{pp}$ ) and relative nonlinear parameter as increasing the contacting pressure

적정 압력을 170 kPa 이상으로 결정하였다. 그러나 과도한 압력은 시편의 변형이나 탐촉자의 손상을 야기할 수 있으므로 주의해야 할 것이다.

4.2. 시스템 비선형성이  $\beta'$ 의 측정에 미치는 영향

재료의 비선형성에 의해 발생하는 고조파의 크기는 기본주파수의 제곱에 비례하기 때문에 인가전압의 크기가 클수록 비선형파라미터 측정에 유리하다고 알려져 있다[6]. 하지만 인가전압을 무한히 크게 할 수 없고 충분히 큰 인가전압을 가하여도 비선형 측정 시스템에 따라 그 결과가 다르게 나올 수 있다. 이론적인 재료의 열화도 측정에서는 재료에 의한 비선형성만이 측정되어야 하지만 실제의 측정에서는 시스템을 통해 생겨나는 비선형 성분들도 포함되기 때문이다. 시스템 요소에는 탐촉자, 탐촉자의 접촉상태, 그리고 전기적인 시스템 등이 포함된다. 여기서는 이런 측정시스템에 의한 비선형성을 분석하기 위해 실험장치에서 시편을 제거하고 송수신 탐촉자를 직접 접촉시켜 얻어지는 신호의 비선형성을 분석하였다.

Fig. 3은 Al6061 시편을 통과한 신호와 시편을 통과하지 않고 시스템만을 통과한 신호의 기본주파수 크기 대비 2차 고조파 성분의 크기를 나타낸 것이다. 가로축은 수신된 신호의 기본파성분의 크기이고, 세로축은 수신된 신호의 고조파성분의 크기이다. ■는 시편을 거치지 않은 신호의 경우이고, ▲는 50 mm 시편, ◆는 80 mm 시편을 통과한 신호의 경우를 나타낸다. 식 (1)의 관계처럼 시편을 통과한 2차 고조파의 크기는 기본주파수 성분의 제

곱에 비례하고, 전파 거리가 길수록 큰 값을 갖는다. 이처럼 측정된 신호의 크기는 예상된 경향성을 가지고 있다. 단, 시편에서의 감쇠 때문에 탐촉자 직접 접촉에서 얻은 신호와 길이가 다른 시편에서 얻은 신호들에서 동일한 크기의 수신파를 얻기 위해 탐촉자에 인가한 전압은 서로 다를 수 있다.

이상적인 비선형 측정 시스템에서는 시스템만을 통과한 신호에 2차 고조파 성분이 발생해서는 안 되겠지만 실제 실험에서는 얼마간의 고조파 성분이 발생하고 있다. 또한 그 경향은 시편을 통과한 신호와 마찬가지로 2차 고조파 신호가 기본주파수 성분의 제곱에 비례하는 경향을 가지고 있고 신호의 크기에 상관하지 않는 초기 값을 가지고 있다. 이는 시편을 통과한 신호가 재료의 비선형성에 의해 발생하는 고조파 성분 이외에 다른 요인으로 부터 발생된 고조파 성분을 포함하고 있다는 것이다. 따라서 측정된 고조파 성분은 재료의 비선형성과 시스템의 비선형성의 합이라 생각할 수 있고, 식 (3)과 같이 가정할 수 있다.

$$A_2 = \beta'_{material} A_1^2 + \beta'_{system} A_1^2 + c_{system} \quad (3)$$

여기서  $\beta'_{material}$ 과  $\beta'_{system}$ 은 각각 재료에 의한 비선형파라미터와 시스템에 의한 비선형파라미터이고,  $c_{system}$ 은 전기적 노이즈나 A/D 변환 등에 의해 일정하게 잔류할 수 있는 고조파 성분이다. 그러면 실제로 측정되는 비선형 파라미터는 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} = \beta'_{material} + \beta'_{system} + \frac{c_{system}}{A_1^2} \quad (4)$$

Fig. 4는 식 (3)과 식 (4)를 시뮬레이션한 결과이다. 여기서 각 성분의 크기는 임의로  $\beta'_{material}=0.01$ ,  $\beta'_{system}=0.005$ ,  $c_{system} = 0.001$ 로 두었다. (a)는 식(3)을 이용하여 기본주파수 성분과 2차 고조파 성분의 관계를 시뮬레이션한 결과로 Fig. 3에 대응하고, (b)는 식(4)를 이용하여 기본주파수 성분과  $\beta'$ 의 관계를 시뮬레이션한 결과이다. 그림에서 일점쇄선(—)은 순수 재료의 비선형성, 점선(- -)은 시스템의 비선형성, 실선(—)은 이들의 합을 나타낸다.

Fig. 4(a)를 Fig. 3의 실험결과와 비교하면 기본주파수 성분과 2차 고조파 성분의 관계가 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있고, 이것은 식 (3)의

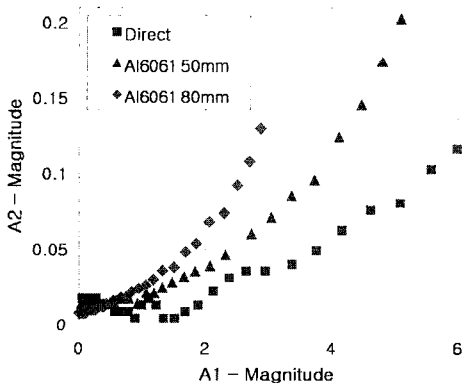


Fig. 3 Magnitude of the second harmonic wave measured with and without specimen

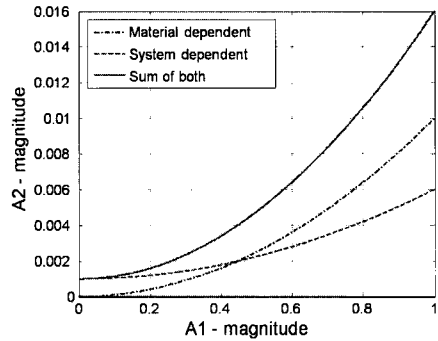
가정이 타당함을 입증한다. Fig. 4(b)를 보면  $C_{system}$ 의 영향에 의해  $\beta'$ 가 기본 주파수의 크기가 증가할수록 감소하고 있고 일정한 값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이는 수신신호의 크기가 크면 클수록  $C_{system}$ 의 영향을 적게 받아 비선형파라미터를 안정되게 측정할 수 있음을 의미한다. 이 같은 결과는 기본파 진폭이 작을 경우 배경잡음으로 인해 고조파 측정에 오류가 크게 발생할 수 있다는 이전 연구결과와도 일치한다[6]. 그러나 안정되었다 하더라도 측정되는 비선형파라미터는 재료의 비선형성 이외에 시스템 비선형성을 여전히 포함한다. 이 성분은 제거하기 어렵다. 다만 Fig. 3의 실험결과에서 보듯이 기본파 성분의 크기가 클수록 측정되는 고조파성분의 크기에서 차지하는 시스템 의존성분의 크기가 작아지므로, 실제 실험에서는 가급적 입사신호의 크기를 크게 하여 기본파 성분의 크기를 크게 하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

Fig. 5는 Al6061 50 mm, Al6061 80 mm 그리고 시편을 거치지 않을 때의  $A_1$ 에 대한  $\beta'$ 의 크기를 나타낸 실험 결과이다. 이것은 Fig. 4(b)의 시뮬레이션에 대응하는 실험결과로, ■는 시편을 거치지 않은 신호의 경우이고, ▲는 50 mm 시편, ◆는 80 mm 시편을 통과한 신호의 경우를 나타낸다. 시뮬레이션에서 예상하였던 결과와 유사한 형태의 경향을 보이며  $A_1$ 의 크기가 클수록  $\beta'$ 이 수렴하고 있다.

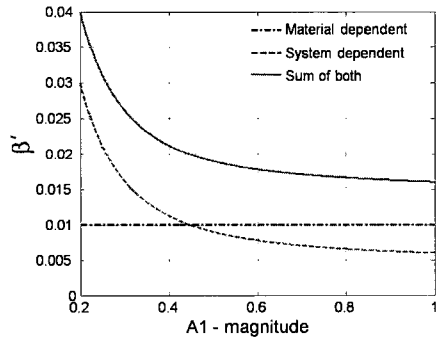
길이가 길어지면 재료의 비선형성으로 인해 고조파성분이 커지고 그에 따라 파라미터  $\beta'$ 도 커진다. 실험결과는 시편의 길이에 따라 동일한 재료에서 길이가 길수록 측정되는  $\beta'$ 이 크다는 것을 보여주며, 실험결과가 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 입증한다. 또한 앞의 분석에서 예상했듯이 기본파 성분의 크기가 클수록  $\beta'$ 이 입사진폭에 의존하지 않고 일정하게 측정됨을 알 수 있다. 이 실험 결과에서 Al6061 50 mm 시편에서는 인가전압이 약 300 V 이상에서, Al6061 80 mm 시편에서는 500 V 이상에서 안정화 되었고, 시편의 길이에 따라 안정화 되는 최소 인가전압의 크기가 다른 이유는 시편이 길수록 감쇠가 커서 수신신호의 크기가 작게 되고 이에 따라 노이즈 등의 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 따라서 시편의 길이가 길수록 인가전압의 크기가 커야 한다.

한편 시편을 거치지 않은 신호에서도 시편을 통

과한 신호와 비교하여 무시할 수 없을 정도의 크기를 가진  $\beta'$ 이 측정되었다. 이는 계측 시스템이 바뀌면 측정되는  $\beta'$ 의 크기가 달라질 수 있다는 것을 의미하며, 따라서 상대적인 비선형파라미터 크기 변화를 측정할 때 측정시스템을 일관되게 유지하는 것이 매우 중요하다.



(a) Magnitude of the second harmonic wave



(b) Magnitude of the  $\beta'$

Fig. 4 Simulation results for the effect of system dependent nonlinearity

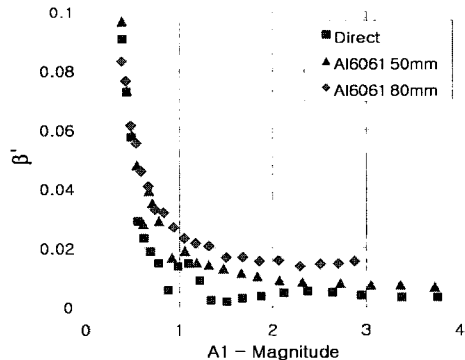


Fig. 5 Measured relative nonlinear parameter as increasing the input amplitude

## 5. 결 론

이 논문에서는 접촉식 탐촉자를 사용하여 재료의 열화에 따른 초음파 비선형 파라미터의 상대적 변화를 측정할 때, 실험조건이나 장치가 미치는 영향을 실험적으로 분석하고, 이런 영향을 줄이기 위한 방안을 찾고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 접촉식 탐촉자를 사용하여 재료의 열화에 따른 초음파 비선형 파라미터의 상대적 변화 측정 영향에 미치는 시스템 요소는 탐촉자와 시편사이의 접촉상태, 그리고 탐촉자, 신호발생기, 증폭기, 필터, A/D변환기 등을 포함하는 실험장비다.
- 2) 탐촉자와 시편사이의 접촉압력은 너무 작으면 불안정한 접촉으로 인해 측정결과에 큰 변동을 야기하므로, 충분히 큰 접촉압력을 가해주어야 한다. 이 연구의 경우, 접촉 압력이 170 kPa 이상에서 압력변화와 무관하게 일정한 비선형 파라미터 측정이 가능하였다. 그리고 최대 압력은 탐촉자 파손이나 시편의 변형을 야기하지 않는 범위로 제한될 것이다.
- 3) 수신신호에는 재료의 비선형성 뿐 아니라 계측 시스템에 의해서 발생된 비선형성이 함께 존재한다. 이런 비선형성은 기본주파수의 크기와 2차 고조파의 크기가 제곱에 비례하는 경향과 함께 dc성분을 함께 가지고 있다. dc 성분은 입사진폭을 크게 함으로써 영향을 억제할 수 있다. 나머지 성분은 제거할 수는 없지만 입사신호의 크기를 크게 하면 측정되는 비선형 파라미터가 일정한 값으로 수렴하기 때문에 상대적인 비선형 파라미터의 변화를 관측하는데 영향을 주지 않는다. 결론적으로 입사신호의 크기가 클수록 유리하다고 할 수 있고, 이 연구에서 전파거리에 따른 신호의 감쇠 때문에 시편의 길이에 따라 Al6061 50 mm는 300 V 이상에서, Al6061 80 mm는 500 V 이상에서 안정적으로 측정할 수 있다.

## 후 기

이 연구는 한국 과학기술부의 장기 원자력연구개발과제의 일환인 미세열화손상 진단 신기술 개발과제의 후원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] J. K. Na, J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Linear and nonlinear ultrasonic properties of fatigued 410Cb stainless steel," Rev. of Prog. in QNDE, Vol. 15, pp. 1347-1351, (1996)
- [2] T. P. Berndt and R. E. Green, "Feasibility study of nonlinear ultrasonic technique to evaluate adhesive bonds," Nondestructive Characterization of Material VIII, New York Plenum, pp. 125 131, (1998)
- [3] K. Kawashima, "Nondestructive evaluation and testing of engineering materials with contact acoustic nonlinearity - harmonic imaging of tight cracks and microdamages," Journal of JSNDI, Vol. 56, No. 6, pp. 274-279, (2007)
- [4] K. Y. Jhang, "Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," IEEE UFFC, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548, (2000)
- [5] J. Y. Kim, L. J. Jacobs, J. Qu and J. W. Little, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves," J. Acoust. Soc. Am, Vol. 120, Issue. 3, pp. 1266-1273, (2006)
- [6] D. J. Barnard, "Variation of nonlinearity parameter at low fundamental amplitudes," Applied Physics Letters, Vol. 74, No. 17, pp. 2447-2449, (1999)
- [7] I. H. Lee, D. S. Son, I. H. Choi, T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Development of pressure control system of contact transducer for measurement of ultrasonic nonlinear parameter," Journal of KSNT, Vol. 27, No. 6, pp. 576-580, (2007)
- [8] R. K. Oruganti, R. Sivaramanivas, T. N. Karthik, V. Kommareddy, B. Ramadurai, B. Ganesan, E. J. Nieters, M. F. Gigliotti, M. E. Keller and M. T. Shyamsunder, "Quantification of fatigue damage accumulation using non-linear ultrasound measurements," International Journal of Fatigue, Vol. 29, Issue. 9-11, pp. 2032-2039, (2007)