

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.751

열처리된 재료의 초음파 비선형성에 관한 연구<sup>§</sup>

Li Weibin\* · 이재선\* · 조운호\*\*

\* 부산대학교 기계공학부

Study of Ultrasonic Nonlinearity in Heat-Treated Material

Weibin Li\*, Jaesun Lee\* and Younho Cho\*\*\*

\* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received January 5, 2010 ; Revised March 23, 2010 ; Accepted April 1, 2010)

**Key Words:** Ultrasonic Nonlinearity(초음파 비선형성), Heat Treatment(열처리), Internal Stress(내부응력), Dislocation(전위)

**초록:** 비선형 초음파는 선형 초음파와 비교하였을 때 재료의 물성 변화에 민감하게 반응한다. 이 연구의 목표는 비선형 요소를 포함하여 열처리 조건과 초음파 비선형성의 상관관계를 알아내는 것이다. 본 연구에서 기존의 방법과는 다른 수정된 초음파속도계산 식이 새롭게 제안되었다. 이것은 열처리된 재질에서 초음파 속도변화가 재료의 비선형성 때문에 발생하는 것을 찾아내었다. 실험을 통하여 수정된 초음파 속도와 1차 조화 및 2차 조화파의 진폭 비율이 서로 동일한 경향을 보이는 것을 알아냈다. 그리고 수정된 초음파속도식을 통해 계산된 상대적인 비선형계수는 기존의 방법을 이용하였을 때보다 더 민감함을 알아냈다.

**Abstract:** Ultrasonic nonlinearity is very sensitive to changes in material properties. This paper describes the study of the correlation between heat treatment and ultrasonic nonlinearity by taking nonlinear factors into consideration. A modified formula was proposed for ultrasonic velocity. This formula indicated that the changes occurring in nonlinearity during heat treatments cause changes in the ultrasonic velocity. The experimental results show that the relative nonlinearity parameters calculated from the modified ultrasonic velocities and the ratio of amplitudes of the second harmonic and fundamental wave are in good agreement. The experimental results prove that heat treatment can result in changes in material nonlinearity. Moreover, the relative nonlinearity parameter calculated from the modified velocity formula is has a large value. Since this parameter has high sensitivity to changes in nonlinearity, it can be used to represent the relative nonlinearity change calculated in this study by using the modified formula for ultrasonic velocity.

- 기호설명 -

- |  |  |
|--|--|
| <p><math>x</math> : 초음파 전파 방향</p> <p><math>u</math> : <math>x</math>방향 변위</p> <p><math>\sigma</math> : 응력</p> <p><math>\rho</math> : 밀도</p> <p><math>K_2</math> : 2차 탄성 계수</p> <p><math>K_3</math> : 3차 탄성 계수</p> <p><math>C</math> : 초음파 속도</p> | <p><math>\bar{C}</math> : 개정된 초음파 속도</p> <p><math>E</math> : 영률(Young's modulus)</p> <p><math>\bar{E}</math> : 개정된 영률(Modified Young's modulus)</p> <p><math>\beta</math> : 비선형 변수</p> |
|--|--|

1. 서론

재료의 물성을 확인하기 위해서는 인장 시험기를 비롯한 파괴적인 방법이 많이 사용되어 왔다. 하지만 파괴적인 방법으로는 재료의 물성을 측정하기 어려운 경우에는 비파괴적인 방법이 사용된다. 비파괴적인 방법 중 초음파 탐상법은 재료의 기계적 거동을 검사하기에 효율적인 방법이다. 재료의 물성은 미세구조와 밀접한 관계를 가진다.

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, mechcyh@pusan.ac.kr

재료의 미세 구조 변화는 재료의 기계적 성질에 영향을 미친다. 비선형 초음파법은 기존의 선형 초음파법과 비교했을 때 재료 성질과 미세 구조 변화에 더 높은 감도를 가진다.<sup>(1)</sup> 따라서 비선형 초음파법은 재료의 미세 구조 성질을 알아내는데 큰 가능성을 가지고 있다. 초음파를 활용한 비선형성 측정 방법은 단일 주파수의 초음파를 시편 내로 전파시키고 일정 거리를 전파한 후의 신호를 측정한다. 재료의 비선형성 때문에 입사된 단일 가진 주파수 신호가 왜곡되고 시편을 통과 하면서 계속적으로 고조파 주파수가 가진된다. 열처리하는 재료의 미세 조직을 변화뿐만 아니라, 재료 입자의 전위로 인해 내부응력을 이완시키므로 물질의 기계적 성질은 변화시킨다. 하지만 기존의 연구는 선형 초음파를 활용하는 경우 열처리 시편에 대해 감도가 뛰어나지 않음을 볼 수 있다.<sup>(2)</sup> 재료의 미세입자의 전위와 미세구조의 불연속은 음향 비선형성의 원인이 된다. 따라서 열처리하는 재료의 비선형성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이 연구의 목적은 비선형 요소를 고려하여 열처리와 재료의 비선형성의 관계를 밝히는 것이다. 열처리 전과 후의 수정된 초음파 속도와 재료의 성질이 변하는 이유를 새롭게 제안된 방법을 통해 설명한다.

## 2. 배경 이론

등방성 재질에서 1차원 종파 전파를 고려했을 때, 미소요소의 운동방정식은 식 (1)과 같이 정의된다.<sup>(3)</sup>

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (1)$$

하지만 실제 상황에서는 재료에서 미세구조의 불연속과 전위가 존재한다. 따라서 응력-변위 구성방정식은 선형관계가 아니다. 만약 3차 탄성계수를 고려하면 구성방정식은 비선형이 된다. 식 (2)는 비선형 구성 방정식을 나타낸다.

$$\sigma = \epsilon [K_2 + \frac{1}{2}(3K_2 + K_3)\epsilon] \quad (2)$$

여기서는 등방성 물질의 종방향 응력과 변형률만 고려한다. 식 (3)의  $K_2, K_3$ 는 2차와 3차 탄성계수이다.

$$K_2 = C_{11}, K_3 = C_{111} \quad (3)$$

비선형 계수의 정의는 식 (4)와 같다.<sup>(4,6)</sup>

$$\beta = \frac{8c^2 A_2}{A_1^2 k^2 x} \quad (4)$$

비선형 모델에서 개정된 영률(Modified Young's modulus)은 식 (5)와 같이 정의 되고, 이를 활용한 새롭게 제안된 응력은 식 (6)과 같이 정의된다.

$$[K_2 + \frac{1}{2}(3K_2 + K_3)\epsilon] = \bar{E} \quad (5)$$

$$\sigma = \bar{E}\epsilon, \quad \bar{E} = E(1 - \beta\epsilon) \quad (6)$$

여기서, 수정된 초음파 속도 방정식은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\bar{C} = \sqrt{\bar{E}/\rho} \quad (7)$$

따라서,

$$\bar{C} = (E/\rho)^{1/2}(1 - \beta\epsilon)^{1/2} = C(1 - \beta\epsilon)^{1/2} \quad (8)$$

$$\beta\epsilon = 1 - \bar{C}^2/C^2 \quad (9)$$

식 (7)은 재료의 비선형성까지 고려하여 제2차 및 3차 탄성계수를 포함하여 본 연구에서 새롭게 제안되었다. 새롭게 제안된 식 (7)의 개선된 초음파 속도 변화를 이용해서 대략적인 재료의 비선형성을 평가할 수 있다. 하지만 초음파 속도의 변화가 재료의 미세구조 불연속과 전위로만 발생한다는 것은 중요한 사실이다. 비선형 계수가 의미하는 다른 중요한 물리적인 의미는 2차 조화 성분이 가진되는 것이다. 섭동이론을 이용하여 변위를 식 (10)과 같이 표현이 가능하다.<sup>(4)</sup>

$$u = u_0 + u_1 \quad (10)$$

만약  $U_0$ 가 주파수  $\omega$ 를 가진 사인(sinusoidal)형태의 파동으로 표현이 될 때 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$u_0 = A_1 \sin(kx - \omega t) \quad (11)$$

이를 이용하여 비선형 방정식의 해는 식 (12)와 같이 표현이 되고, 이때 진폭  $A_2$ 는 식 (13)과 같이 정의된다.

$$u_0 = A_1 \sin(kx - \omega t) + A_2 \cos 2(kx - \omega t) \quad (12)$$

$$A_2 = \frac{A_1^2 k^2 \beta x}{8c^2} \quad (13)$$

비선형 계수  $\beta$ 는 식 (13)에서 1차 조화 진폭과 2차 조화 진폭의 비로 표현 되는 것을 알 수 있다. 따라서 비선형 계수는 식 (14)와 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{8c^2 A_2}{A_1^2 k^2 x}, \quad \beta \propto \frac{A_2}{A_1^2} \quad (14)$$

여기서  $A_1$ 은 1차 조화 진폭이고,  $A_2$ 는 2차 조화 진폭이다. 2차 조화 진폭은 음향 비선형성 계수와 비례관계에 있다. 따라서  $A_2/A_1$ 로 물질의 초음파 비선형성을 구할 수 있다.<sup>(5)</sup> 다시 말해 비선형성은 1차 조화 진폭과 2차 조화 진폭을 이용하여 평가할 수 있다. 여기서 진폭의 비( $A_2/A_1$ )는 실험을 통해 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 시편과 열처리

이 연구에서 사용된 시편은 인코넬 x-750이다. 시편은 Fig. 1과 같이 사각형 인코넬 시편을 이용하여 실험을 하였다. 시편 중 하나는 원소재이고 나머지 3개 시편은 서로 다른 조건의 열처리를 가하였다. 연구에 사용된 인코넬 시편의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 가장 잘 알려진 열처리 방법은 담금질(Quenching)과 뜨임(tempering)이다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 2와 같이 서로 다른 온도와 시간 동안 담금질과 뜨임과정을 거쳐 열처리를 하였다.

#### 3.2 실험 방법

비선형 초음파 측정을 위해서는 2차 조화 진폭을 측정해야 한다. 2차 조화 성분은 입사되는 초음파에서 가진된 주파수의 2배 성분이 가진되는

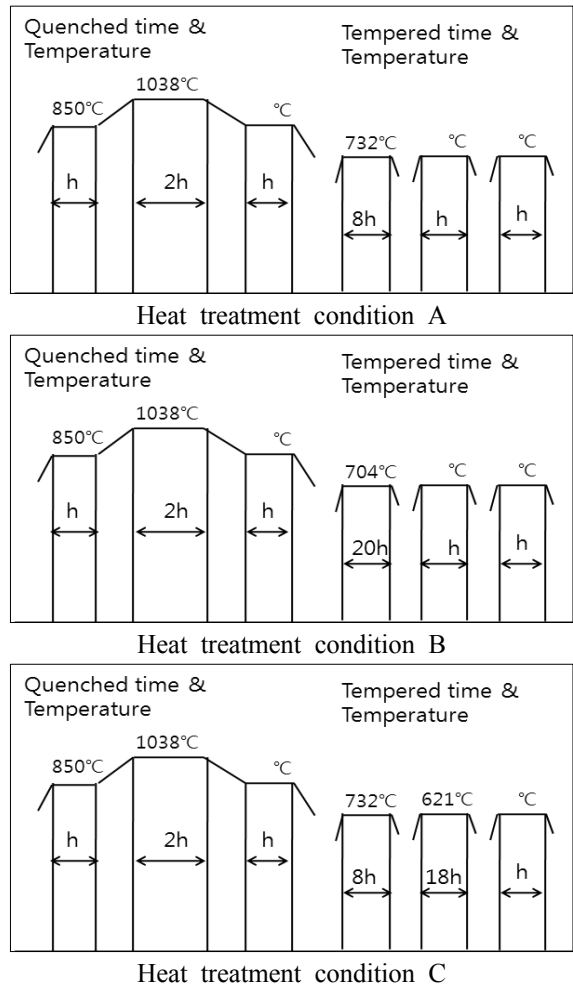
**Table 1** Chemical composition of Inconel x-750

단위 : %					
성분	Al	C	Cr	Cu	Mn
함량	0.4~1	0.08Max	14~17Max	0.5Max	1Max
성분	Iron	Si	Ti	Sr	Nm
함량	5~9	0.5Max	2.25~2.75	0.01Max	0.7~1.2

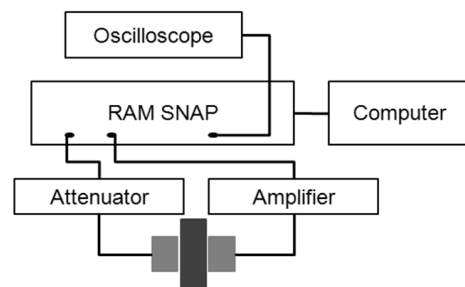


**Fig. 1** Inconel X-750 specimens

것을 말한다. 2차 조화 진폭은 물질의 비선형 성분에 비례하는 것이다. 재료의 비선형성을 측정하기 위한 실험장비 구성은 Fig. 3과 같다. 초음파 발생기와 고출력 감쇠기, 증폭기로 구성되어 있다. 실험은 2개의 센서를 활용한 Pitch-Catch방식을 활용하였다. 입사 신호를 발생하는 PZT 탐촉자의 중심주파수는 5MHz이고, 시편을 통과한 신호를 측정



**Fig. 2** Different heat treatment conditions of specimens



**Fig. 3** Block diagram of the ultrasonic measurement system

하는 PZT 탐촉자는 1차 조화 주파수와 2차 조화 주파수를 모두 수신하기 위해 대역폭이 넓은 중심주파수 10MHz를 이용하였다. 비선형성을 측정하는 실험에서는 시편에서 발생된 비선형성 뿐만 아니라 측정 장비와 센서, 접촉매질에서 모두 발생하므로 주의해야 한다.

이 실험에서는 접촉 매질과 접촉 압력을 동일하게 유지하기 위해 특별하게 설계된 지그(jig)를 이용하였다. 실험을 통해 측정된 신호는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transformation)을 활용하여 입사 주파수의 변위 진폭  $A_1$ 과 2차 조화 주파수 변위 진폭  $A_2$ 를 구하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 4가지 시편의 미세 구조를 나타낸다. 열처리 조건이 다른 각 시편의 미세 조직을 통해 시편의 조직이 균일해 진 것을 알 수 있고, 그 중 시편 C가 가장 균일 해진 것을 볼 수 있다. 또한 열처리는 결정립의 크기를 증가 시켰고 이는 비선형성의 증가로 이어짐을 알 필요가 있다.

이 연구는 열처리 과정 중 증가하는 비선형성은 무시하고 전체적인 재료의 비선형 효과에 대해서만 고려하였다. Fig. 5는 4가지 다른 시편의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있으며, 이들 차이는 쉽게 드러난다. Fig. 5에서 선형 탄성구간에서는 열

처리 전후 모두 유사한 성향을 가지지만 소성 변형 구간에서는 높은 차수의 탄성 계수의 영향으로 큰 차이를 확인할 수 있다. 이 응력-변형률 관계 곡선은 비선형 구조 관계로부터 구해진 식에서 지니는 비선형 초음파가 선형 혹은 법칙(Hooke's law)로부터 구해진 선형 초음파 보다 더 민감하다는 것을 나타낸다. 이것은 시편 C의 물성과 관련된 재료의 강도가 가장 우수하다는 것을 보여준다. 비선형 구조 관계로부터 유도된 수정된 초음파 속도에 의해 비선형 계수를 표현하는 새로운 방법이 소개 되었다. 각 시편에서 수정된 초음파 속도는 기존의 속도와 다르게 나왔다. Fig. 6은 원재료에서의 초음파 속도가 가장 낮지만 시편 C에서 가장 빠르다는 것을 보여준다. 새롭게 제안된 상대적인 비선형성은 수정된 초음파 속도를 바탕으로 하여 관계식에 의해 계산된다. 실험 결과 Fig. 8과 같이 원재료에서 비선형성이 가장 크게, 시편 C에서 가장 낮게 나왔다. 모든 시편에 공통적으로 기본적인 재료 고유의 비선형성이 존재하고, 열처리에 의해 발생된 비선형성의 증가, 감소에 따른 차이를 알 수 있다. 측정된 신호는

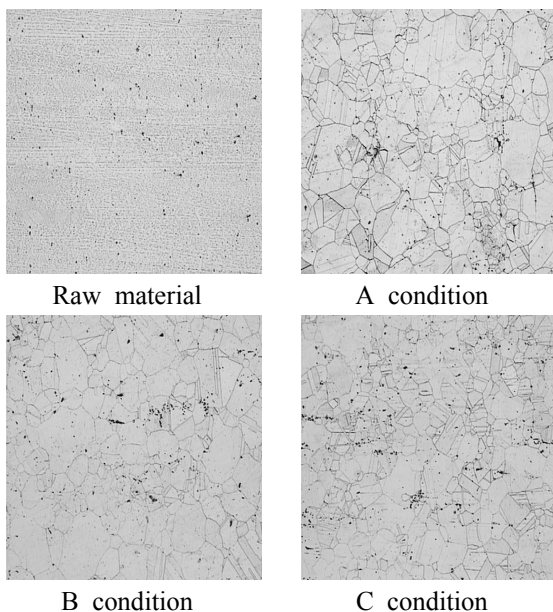


Fig. 4 Micro-structure of each specimen

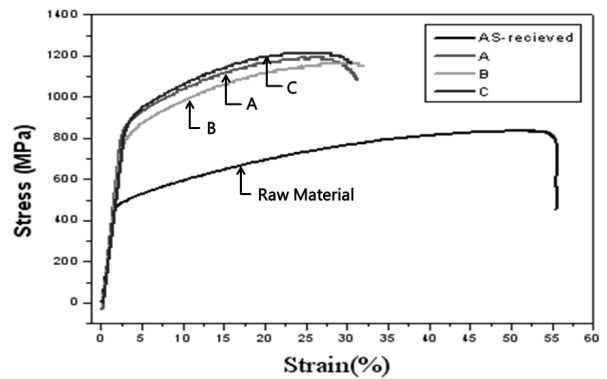


Fig. 5 Stress-strain relationship of each specimen

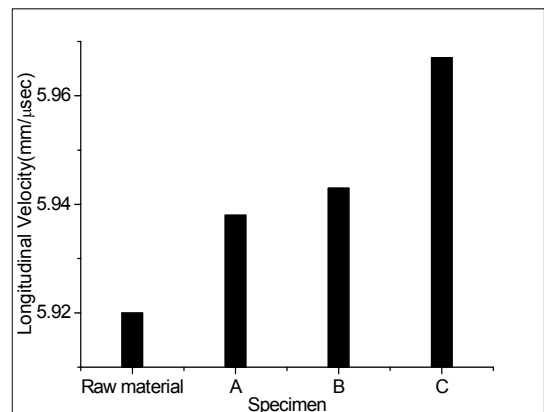


Fig. 6 Longitudinal wave velocity of each specimen

고속 푸리에 변환을 통해 시간신호에서 주파수 신호로 변화하여 1차 조화 진폭  $A_1$ 과 2차 조화 진폭  $A_2$ 을 계산하여 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 8은 정규화된 비선형성을 나타내었다. 그리고 시편 C의 2차 조화 진폭을 1차 조화 진폭의 제곱으로 나눈 값을 기준으로 각 시편의 2차 조화 진폭을 1차 조화 진폭으로 나눈 값을 비율로 나타내었다. 제안된 식을 통해 개선된 서로 다른 시편의 비선형성은 원소재에서 가장 크게 나타나고, 시편 C에서 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 열처리를 통해 비선형성이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 미세 구조 결함이 있는 재료에 단인 주파수 성분을 가진 사인파형의 초음파 신호를 입사 시키면 신호가 전파되면서 재료의 초음파 비선형성 때문에 신호가 왜곡된다. 따라서 이 연구에서는 열처리를 통해 재료의 비선형성을 줄어드는 것은 열처리가 재료의 미세구조를 균일하게 만들며 변형, 전이되는 것을

줄여 주는 것을 알아냈다. 그리고 열처리 이후에 미세 입자의 입계가 증가하는데 이는 비선형성을 증가시킨다. 하지만 입계 증가로 인한 비선형성의 증가보다는 미세구조의 균일화로 줄어드는 비선형성이 더 큰 역할을 하는 것을 알 수 있다.

열처리를 통해 비선형성이 낮아진 시편 C를 기준으로 하여 열처리 전의 원소재와 열처리 조건이 다른 시편 A와 B를 비교하였을 때 Fig. 8에서 보는 것과 같이 2차 조화 진폭  $A_2$ 가 시편 C와 비교하였을 때 큰 것을 알 수 있다. Fig. 8에서의 수정된 속도 식을 이용한 경우와 기존의 진폭을 이용하여 측정된 경우를 비교했을 때 수정된 속도 식을 이용하여 계산된 경우가 민감도가 뛰어난 것을 알 수 있다.

Fig. 8에서 보여진 각 시편의 수정된 속도 식에 의한 정규화된 비선형성과 정규화된 진폭 비에서 보는 것과 같이 두 가지 방법 모두 열처리가 재료의 비선형성 변화에 영향을 미치는 것을 알아냈다. 재료의 비선형성은 전위현상과 미세구조 변화에 의해 발생된다. 특별히 수정된 초음파 속도 식을 통해 계산된 상대적인 비선형성은 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 연구에서는 열처리와 비선형 변수를 포함한 비선형 초음파를 활용하여 측정된 재료의 비선형성과의 관계를 알아냈다.

## 5. 결론

이 연구에서 비선형 요소를 고려하였을 때 열처리를 통한 시편의 탄성계수와 초음파 속도의 변화의 관계가 명확히 설명되었다. 비선형 계수를 포함한 수정된 초음파 속도 공식이 새롭게 제안되었으며, 열처리가 시편에서의 전위에 의한 내부 응력을 이완시키고 비선형성을 변화시킴을 알 수 있었다. 실험결과는 수정된 초음파로부터 계산되어진 비선형 파라미터들이 이들 시편에서 생성된 2차 조화 진폭과 동일한 경향을 가짐을 보여준다. 수정된 초음파 속도로부터 계산된 정규화된 비선형성은 기본 진폭의 제곱과 2차 조화 진폭에 대한 일반적인 비와 비교하였을 때 재료의 미세구조 변화에 더 민감함을 알 수 있다. 그러나 이 연구는 열처리 시편의 경우만 적용이 되었으므로, 비선형 계수가 재료의 물성과 초음파 속도에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 수행될 것이다.

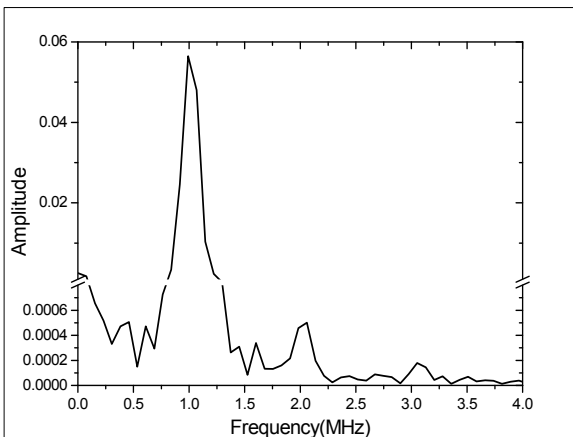


Fig. 7 Fourier spectrum(FFT) showing the amplitudes of fundamental and second harmonic

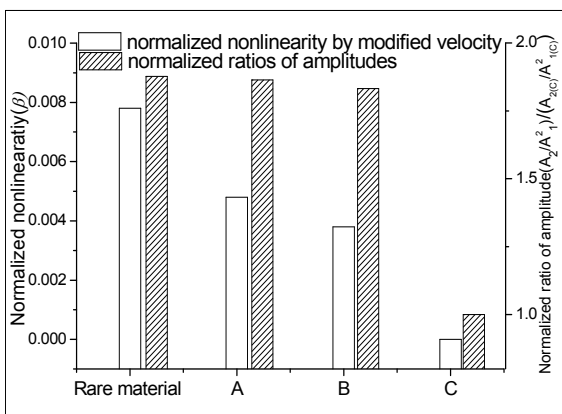


Fig. 8 Nonlinearity variation of different specimens

## 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다.(R33-10155)

## 참고문헌

- (1) Yost, W. T. and Cantrell, J.H, 1990, "Material Characterization Using Acoustic Nonlinearity Parameters And Harmonic Generation, Engineering Materials," Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 11b, No. 28, pp. 1669~1692
- (2) Joseph, S.H. and Engmin, J.C., 1981, "Characterization of Heat Treatment In Aluminum Based On Ultrasonic Determination Of The Second And Third Order Elastic Constants," IEEE Ultrasonic symposium, PP. 936~939
- (3) Norris, A.N., 1998, "Finite-Amplitude Waves In Solids, in Nonlinear Acoustics," Academic press, New York, pp. 267~269
- (4) Meyendorf, N. G., Nagy, P.B. and Rockhlin, S.I., 2004, "Nondestructive Materials Characterization," Springer Press, New York, pp. 206~232
- (5) Wallace, D. C., 1967, "Thermoelasticity of Stressed Materials and Comparison of Various Elastic Constants," *Physical Review*, Vol. 162, No. 3, pp. 776~789.
- (6) Yost, W. T. and Breazeale, M. A., 1973, "Ultrasonic Nonlinearity Parameters And Third-Order Elastic Constants Of Germanium Between 300 and 77°K," *Physical Review*, Vol. 9, No. 2, pp. 510~516.