

초음파 비선형 전파특성을 이용한 부분 열화 재료의 평가

김경조* · 장경영** · 山脇壽 ***
(2000년 3월 22일 접수)

The Evaluation of Partially Degraded Material Using Nonlinear Propagation Characteristics of Ultrasonic Wave

Kyung-Cho Kim, Kyung-Young Jhang and Yamawaki Hisashi

Key Words : Nonlinear Acoustic Effect(비선형 음향효과), Material Degradation(재료 열화), Finite Difference Method(유한차분법), Nonlinear Wave Equation(비선형 파동방정식), Nonlinear Parameter(비선형 인자)

Abstract

In this paper, the nonlinear behavior of ultrasonic wave in partially degraded material is considered. For this aim, FDM(finite difference method) model for the nonlinear wave equation was developed with the restriction to the 1-D longitudinal wave motion and how the partial degradation in material contributes to the detected nonlinear parameter was analyzed quantitatively. In order to verify the rightness of this simulation method, the relation between the detected nonlinear parameter and the continuous distribution of degradation obtained from simulation was compared with experiment results and the simulation and experiment results showed similar tendency. It can be known from simulation result that the degree of degradation, the range of degradation and the continuous distribution of degradation have strong correlation with the detected nonlinear parameter. As it was possible in these simulations that only special part is assumed as degraded one, the quantitative evaluation of partially degraded material may be obtained by using this method.

1. 서 론

최근 비선형 음향효과가 재료의 열화와 강한 상관성이 있다는 것이 이론적으로 실험적으로 밝혀졌다.^(1~7) 여기서, 음향 비선형성은 일종의 재료상수로서 취급되었으며 재료 성질의 변화에 따라 변화한다. 따라서, 음향 비선형성을 계측함에 의해서 재료 상태의 변화를 평가할 수 있다. 인자 β 는 비선형 음향효과의 양적인 평가에 일반적으로 사용되고 있는 인자이다. 열화된 재료에서의 β 의 값은

재료 초기 상태의 β 의 값과 다르므로, 이 성질은 재료 열화의 비파괴 평가에 아주 유용하게 적용되고 있다.

그러나, 인자 β 를 계측하기 위한 전형적인 계측법에서는 전파 경로에 걸친 평균적인 값만을 계측하기 때문에, 초음파의 검출을 위한 검출파(Probe wave)계의 경로에 따라서 재료가 균등히 열화된 경우만을 고려하였다. 물론, 음향 비선형성을 국부적으로 제한하여 계측하려는 노력이 있었으나, 이 방법에서는 검출파 외에 전자적 방법에 의하여 강력한 응력 섭동파를 발생시키는 섭동파(Pumping wave)를 사용하였으므로 실제 비파괴 평가에 적용하기에는 어려운 단점이 있다.^(2,8)

본 연구에서는, 특히 부분적으로 열화된 재료에서 초음파의 비선형 거동이 고려되었다. 여기서, 부분적으로 열화된 재료란 실제로 응력 집중이나 국부 손상이 생긴 재료를 의미한다. 부분적으로 열화된 재

* 회원, 일본 금속재료기술연구소, 구조체화 스테이션 4 유닛
E-mail : kckim@nrim.go.jp
TEL : +81-298-52-1620 FAX : +81-298-59-2101

** 회원, 한양대학교 기계공학부

*** 일본 금속재료기술연구소, 구조체화 스테이션 4 유닛

료의 평가는 실험적으로는 어려움이 있기 때문에 수치 해석법을 이용하여 평가하고자 하였다.

초음파 가시화를 위한 수치 해석법은 재료내에서 초음파가 어떻게 전파하는지를 나타낼 수 있는 유용한 방법이다. 이 기술은 비파괴 평가 분야에서 탄성파의 연구 특히 등방성과 비등방성 재료의 평가를 위하여 이용되고 있다.^(9~11)

본 연구에서는 부분적으로 열화된 재료에서의 초음파의 비선형 전파 거동을 알아보기 위하여 유한 차분법(FDM : Finite Difference Method)을 적용하였다. 특히, 부분적으로 열화된 재료에서의 1 차원 중파의 전파거동에 초점을 맞추었다. 이를 위하여, 비선형 탄성론에 기초를 둔 비선형 파동 방정식을 유도하였고, 이에 대한 유한차분 모델이 개발되었다. 해석대상은 이산된 1 차원 노드로서 나타내었으며, 이 노드의 일부가 열화되었다고 가정하였고, 열화된 노드에서는 열화되지 않은 노드에서 사용된 비선형 인자와 다른 값이 사용되었다. 부분적으로 열화된 재료에서 전파된 초음파의 파형을 가시화하였으며, 부분 열화가 검출된 비선형 인자에 어떻게 영향을 미치는지가 여러 시뮬레이션을 통하여 정량적으로 분석되었다.

또한, 시뮬레이션법의 정당성을 검증하기 위해서, 시뮬레이션으로부터 구한 비선형 인자와 연속적인 열화와의 관계가 이전의 실험결과와 비교되었고 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.⁽²⁾

2. 비선형 파동 방정식

먼저, 감쇠가 없는 무한 탄성체에서의 초음파의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도, U_i 는 x_i 방향으로의 변위, T_{ij} 는 응력 텐서이다. 파동이 원통형 봉에서 1차원적으로 움직인다고 가정하면, 운동방정식은 간단히 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, 응력 T 는 다음의 비선형 형태의 후크의 법칙을 이용하면, 변형률을 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.^(2~6)

$$T = c\varepsilon(1 + \beta\varepsilon + \dots) \quad (3)$$

여기서 $c (= E)$ 는 강성(stiffness)이고 β 는 비선형 인자이다. 또한, 변형율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

식 (3), (4)와 종파음속이 $V_0 = \sqrt{c/\rho}$ 라는 것을 이용하면, 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (5)$$

여기서,

$$V^2 = V_0^2 (1 + 2\beta\varepsilon + \dots) \quad (6)$$

식 (5)는 식 (6)의 첫째항만을 고려할 경우 선형파동 방정식이 된다.

3. 유한차분(FDM) 모델

일반적으로 1차원 선형 파동 방정식에 대한 유한 차분방정식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\frac{U_{t+} - 2U_t + U_{t-}}{T^2} = V_0^2 \frac{U_{x+} - 2U_x + U_{x-}}{X^2} \quad (7)$$

여기서, T 와 X 는 각각 시간과 공간 증분이다. 또한, $t+$, $t-$ 는 시간축 방향으로 $x+, x-$ 는 거리축 방향으로의 양과 음의 방향으로 위치하는 영역을 표시한다. 비선형 파동방정식을 구하기 위해서는 식 (7)에서 V_0 를 식 (6)의 V 로 바꾸고, 식 (4)의 ε 를 유한 차분 형태로 대체 해야 한다. 식 (8)은 1 차원 비선형 파동 방정식에 대한 유한 차분 모델을 나타낸다.

$$\frac{U_{t+} - 2U_t + U_{t-}}{T^2} = V_0^2 \frac{U_{x+} - 2U_x + U_{x-}}{X^2} \left(1 + 2\beta_0 \frac{U_{x+} - U_{x-}}{2X} \right) \quad (8)$$

여기서, 비선형성은 1 차까지 고려되었고 식 (6)에서 ε 의 고차 항은 무시되었다. β_0 는 무변형시 즉 아무 손상이 없는 재료초기 상태에서의 비선형 인자를 나타낸다. 그러나, 비선형 인자의 값은 열화된 재료에서 변하므로, 식 (8)가 열화된 부분에서 사용되었다.

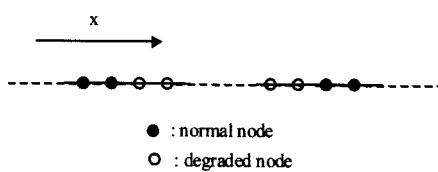


Fig. 1 The 1-D nodal representation of medium with partial degradation

$$\frac{U_{t+} - 2U_t + U_{t-}}{T^2} = \\ V_0^2 \frac{U_{x+} - 2U_x + U_{x-}}{X^2} \left(1 + 2\beta_d \frac{U_{x+} - U_{x-}}{2X} \right) \quad (8)'$$

여기서, β_d 는 열화된 재료에서의 비선형 인자를 나타낸다.

Fig. 1 은 부분적 열화를 가진 재료의 1 차원 노드를 나타낸다. 모든 무변형 재료의 노드는 식 (8)에 의해서 계산 되고, 열화된 노드는 식 (8)'에 의해서 계산된다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션과 결과의 고찰

이 방법의 적용가능성을 증명하기 위해서, 몇 가지 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었다. 사용된 조건은 다음과 같다. 시간 증분 $\Delta t=1.4\text{ps}$ (700 노드), 공간 증분 $L=0.05\mu\text{m}$ (200 노드), 종파 음속 6300m/s , 재료는 밀도 $\rho=2680\text{ kg/m}^3$ 의 알루미늄, 초기 파형은 1 주기의 정현 파형. 부분열화와 비선형성 사이의 관계를 밝히기 위해서, 3 종류의 컴퓨터 시뮬레이션이 행해졌고 그 방법을 Fig. 2 에서 설명하였다.

첫째, Fig. 2(a)처럼 한 노드에서 식 (8)'을 사용함에 의해서 열화의 정도를 변화 시키려고 하였다. 둘째, Fig. 2(b)처럼 β_d 에 의해서 계산된 노드의 수를 증가함에 의해서 열화의 범위를 변화 시키려고 하였다.

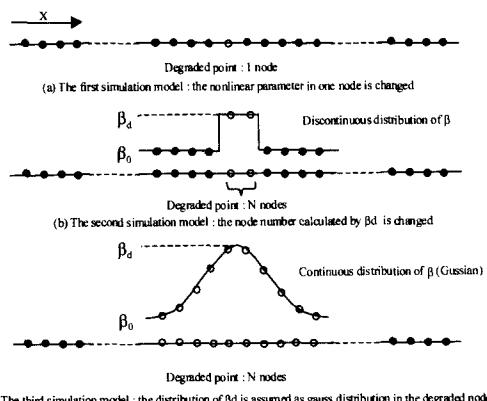


Fig. 2 The explanation of simulation method. (a) The first simulation model : the nonlinear parameter in one node is changed. (b) The second simulation model : the node number calculated by β_d is changed. (c) The third simulation model : the distribution of β_d is assumed as gauss distribution in the degraded nodes

셋째, Fig. 2(c)처럼 β_d 의 분포를 가우시안(gaussian) 분포를 사용함에 의해서 열화된 부분이 연속적으로 열화 되었다고 가정하였다. 계산의 중간에 오차가 생기는지를 알아보기 위해서, 시뮬레이션 전에, $\beta_0 = 0$ 인 경우에 대해서 초기 파형과 전파된 파형을 비교한 결과 완전히 일치함을 확인 하였다.

전파된 파형의 비선형성은 다음에 정의된 계측 가능한 비선형 인자 β_m 에 의해서 평가되었다.⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾

$$\beta_m = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \quad (9)$$

여기서, A_1 과 A_2 는 각각 기본주파수와 2차 조화 성분의 크기이고, k 는 파수 x 는 전파 거리이다. 즉, 다른 변수가 일정할 경우 β_m 은 기본 주파수 성분의 제곱과 2차 고조파 성분의 비율에 비례한다. 검출된 파형으로부터 A_1 과 A_2 를 추정하는 주파수 해석법에 대해서는 이전의 논문에서 설명하였으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.⁽¹²⁾

첫번째 시뮬레이션에서는, 식 (8)'에서 비선형 인자 β_d 가 변화할 경우, 전파된 파형의 비선형성이 계산되었고 Fig. 3에 나타내었다. 사용된 β_d 의 값은 식 (10)에 나타내었다.

$$\beta_d = \beta_0(1+\alpha), (\alpha = 0, 0.1, 0.2 \dots 3) \quad (10)$$

여기서, 사용된 β_0 는 3.47×10^{-10} 이고 무 변형 상태의 비선형성을 나타낸다. 이 경우에 전 노드에 대해서 열화된 노드는 1%이다. 여기서, 열화의 정도는 비선형 인자 β_d 의 크기에 의해서 가정되었다.

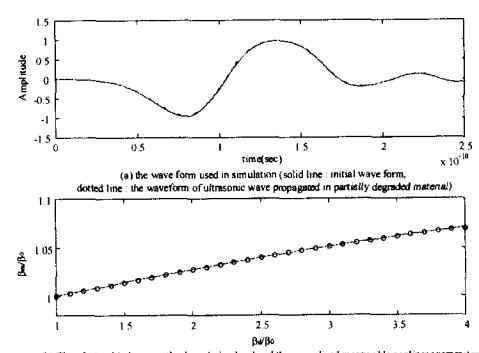


Fig. 3 The result of computer simulation; (a) the waveform used in simulation (solid line : initial wave form, dotted line : the waveform of ultrasonic wave propagated in partially degraded material) (b) the relationship between the degree of degradation(β_d/β_0) and the measurable nonlinear parameter(β_m/β_0)

Fig. 3(a)에서 실선은 초기 파형을 나타내고 점선은 부분적으로 열화된 재료에서 전파한 파형을 나타낸다. Fig. 3(b)는 열화의 정도(β_d/β_0)와 검출된 비선형 인자(β_m/β_0) 사이의 관계를 나타낸다. 비선형 인자를 균일화하기 위해서 모든 비선형 인자는 β_0 로 나누어서 나타내었다. 여기서, Fig. 3(b)의 β_d/β_0 는 열화된 정도를 나타내고 β_m/β_0 는 열화된 부분을 통과한 수신신호로부터 추정된 비선형 인자를 나타낸다. Fig. 3(b)로부터 열화의 정도(β_d/β_0)와 비선형 인자(β_m/β_0) 사이의 관계는 선형적이 아니고 다소 비선형적이라는 것을 알 수 있다.

둘째, 열화의 범위와 수신된 비선형 인자 사이의 관계를 알기 위해서, 열화 노드 수의 증가에 따른 컴퓨터 시뮬레이션이 수행되었다. 이 경우에, 식(8)과 (8)'의 비선형 인자 β_0 와 β_d 는 각각 3.47×10^{-10} 와 6.94×10^{-10} 가 사용되었다. 즉, 이 경우에 α 는 1이다. Fig. 4는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

Fig. 4(a)에서 실선은 초기 파형을 나타내고 점선은 부분적으로 열화된 재료에서 전파한 파형을 나타낸다. Fig. 4(b)는 열화된 노드의 %와 검출된 비선형 인자(β_m/β_0) 사이의 관계를 나타낸다. 여기서, 열화 노드의 %는 전체 노드에 대한 열화 노드의 %를 의미한다. 원은 실제 시뮬레이션 결과이고 실선은 커브 피팅 결과이다. 검출된 비선형 인자와 열화 노드의 % 사이의 관계는 선형적이다. 여기서, 열화 노드의 %가 100%일 경우는 β_m 와 β_d 는 $2\beta_0$ 이므로 β_m/β_0 의 값은 2가 될 것이다. 그런데, 이 경우에 열화의 정도는 60%이므로 β_m/β_0 는 1.6정도가 되었다. 이 결과로부터, 이 시뮬레이션이 옳게 수행되었음을 검증할 수 있다.

Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)를 비교하면, 수신된 비선형 인자에 있어서 변화의 폭이 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 검출된 비선형 인자는 열화의 범위에 더 크게 영향을 받는 것처럼 보인다.

셋째, 열화된 노드의 분포를 가우시안(gaussian) 분포로 가정함에 의해서 열화의 분포가 연속적이라고 가정하였다. 사용된 가우시안(gaussian)분포는 Fig. 2(c)에 나타내었다. 이 경우에 α 는 1이다. 비교를 위하여 가우시안(gaussian)분포의 평균값은 Fig. 2(b)의 열화된 노드의 크기(β_d)와 같게 하였다. Fig. 5는 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

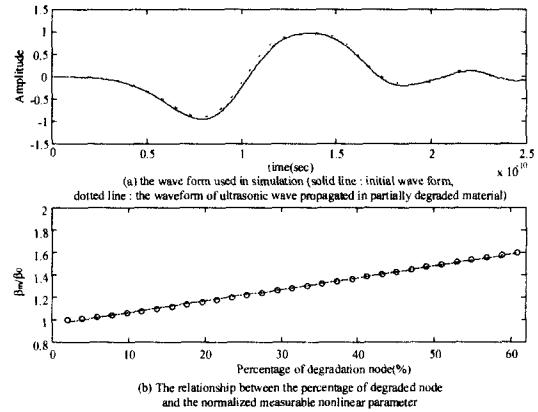


Fig. 4 The result of computer simulation; (a) the waveform used in simulation (solid line : initial wave form, dotted line : the waveform of ultrasonic wave propagated in partially degraded material) (b) the relationship between the percentage of degraded node and the measurable nonlinear parameter(β_m/β_0)

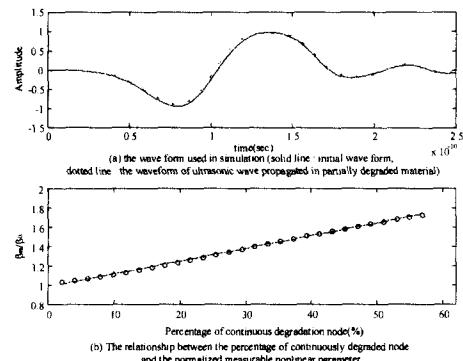


Fig. 5 The result of computer simulation; (a) the waveform used in simulation (solid line : initial wave form, dotted line : the waveform of ultrasonic wave propagated in partially degraded material) (b) the relationship between the percentage of continuously degraded node and the measurable nonlinear parameter(β_m/β_0)

Fig. 5(a)에서 실선은 초기 파형을 나타내고 점선은 부분적으로 열화된 재료에서 전파한 파형을 나타낸다. Fig. 5(b)는 연속적인 열화 노드의 %와 비선형 인자 사이의 관계를 나타낸다. 원은 실제의 관계이고 실선은 커브 피팅 결과이다. 이 관계로부터, 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)와 연속적인 열화 사이의 관계를 알 수 있다. 이것을 Fig. 4와 비교해보면, 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)가

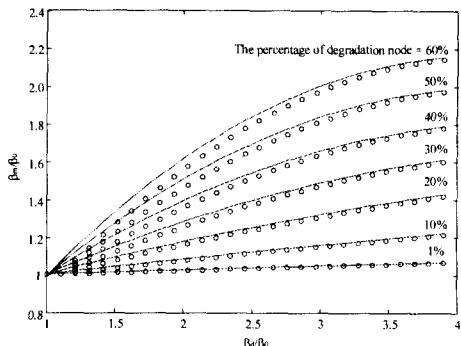


Fig. 6 The tendency of measurable nonlinear parameter (β_m/β_0) according to the increase of the degree of degradation (β_d/β_0) and the range of degradation

이 경우에 다소 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 전체적인 경향은 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서, 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)는 연속적이나 아니냐에는 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

이러한 세 종류의 결과로부터, 검출된 비선형 인자는 열화의 범위에 더 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이러한 경향을 더욱 정확하게 알아보기 위해서 다음 시뮬레이션이 수행되었다. Fig. 3의 경우에, 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)가 열화노드의 증가에 따라서 계산되었다. Fig. 6은 결과를 나타낸다.

Fig. 6의 결과로부터, 열화의 범위가 열화의 정도보다 검출된 비선형 인자에 더 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 검출된 비선형 인자와 열화의 범위 사이의 관계는 다소 비선형이라는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 열화의 범위가 60%이고 열화의 정도 (β_d/β_0)가 1.5인 경우는 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)가 30% 정도 변화하는데, 열화의 범위가 1%이고 열화의 정도(β_d/β_0)가 3.5인 경우는 계측 가능한 비선형 인자(β_m/β_0)는 거의 변화가 없다.

그런데, 불행하게도 실제 실험에서 우리가 계측하는 것은 열화의 정도(β_d/β_0)나 열화의 범위가 아니고, 계측 가능한 비선형 인자 β_m 이다. 계측된 (β_m/β_0)으로부터 열화의 정도(β_d/β_0)와 열화의 범위를 분리하는 것은 불가능하다. 이러한 결과들로부터, 작은 범위에 걸친 큰 열화가 다소 적은 β_m 를 나타낸다. 따라서, 평가자가 이 경우에 열화의 정도가 작다는 오판을 내릴 가능성이 있다. 그래서, 실제 비파괴 평가에 β 를 적용하기 위해서는 이 위험한 경우가 고려되어야 한다.

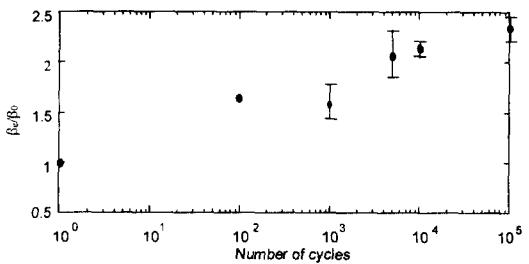


Fig. 7 The nonlinear parameter estimated from SS41 specimens fatigued by several cycles

5. 실험결과와의 비교

이러한 시뮬레이션의 정당성을 증명하기 위하여, 전의 연구에서 얻어진 실험결과⁽²⁾가 비교를 위하여 Fig. 7에 나타내었다.

전의 실험에서 시편은 연속 하중에 의해서 피로를 받았으므로, 열화의 정도는 중간에서 가장 크고 중심에서부터 멀어짐에 따라서 감소할 것이다. 즉, 열화의 정도는 가우시안(gaussian)분포와 가장 비슷할 것이다. 그래서, 세번째 시뮬레이션 결과와 전 실험결과가 비교되었다. 전의 실험에서, 연속 하중에 의해서 열화된 6종류의 SS41로부터 얻어진 초음파 전파 파형으로부터 비선형 인자가 추정되었다. Fig. 7에서 수평축은 하중의 반복횟수를 의미하고 수직축은 검출된 비선형 인자를 의미한다. 그림에서 원들은 3종류의 다른 구동 전압에 대해서 계산된 비선형 인자의 평균값을 나타내고 원 위와 아래의 선은 최대값과 최소값을 나타낸다. 이러한 반복하중과 검출된 비선형 인자의 경향은 세번째 시뮬레이션 결과와 유사하다. 이 결과로부터, 여기서 설명한 시뮬레이션이 옳게 수행되었음을 알 수 있다.

6. 결론

(1) 비선형 파동 방정식에 대한 유한차분 모델을 이용하여 봉에서의 1차원 종파의 운동을 가시화 하였다.

(2) 시뮬레이션으로부터 얻어진 검출된 비선형 인자와 연속적인 열화의 분포사이의 관계가 실험으로부터 얻어진 결과와 유사함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 여기서 제시된 시뮬레이션 결과가 옳은 것을 알 수 있었다.

(3) 열화의 크기, 열화의 정도, 연속적인 열화의

분포가 검출된 비선형 인자와 강한 상관성을 갖는 것이 밝혀졌다. 특히, 열화의 범위가 열화의 정도보다 검출된 비선형 인자에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jeong, K. Na, Cantrell, J. H., Yost and William T., 1996, "Linear and Nonlinear Ultrasonic Properties of Fatigued 410Cb Stainless Steel," Review of QNDE 15, pp. 1347~1351.
- (2) 장경영, 김경조, 1998, "비선형 음향효과를 이용한 미세결함(열화)의 조기검출," 비파괴 검사학회지, 18(5), pp. 365~372.
- (3) Hikata, A., Chick, Bruce B. and Elbaum, Charles, 1965, "Dislocatoin Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves," JAP 36 (1), pp. 229~236.
- (4) Hikata, A., Chick, B. B. and Elbaum, C., 1963, "Effect of Dislocations on Finite Amplitude Ultrasonic Waves in Aluminum," Applied Physics Letters 1.3 (11), pp. 195~197.
- (5) Yost, W. T., Cantrell, John H. Jr and Breazeale, M. A., 1981, "Ultrasonic Nonlinearity Parameters and Thire-order Elastic Constants of copper between 300 and 3°K," JAP 52 (1), pp. 126~128.
- (6) Shkolnik, Iosif E., Cameron and Timothy M., 1996, "Nonlinear Acoustic Methods For Strength Testing of Materials," The 14th ISNA, pp. 316~320.
- (7) 장경영, 佐藤拓宋, 1993, "비선형 탄성-음향 효과를 이용한 비선형 탄성계수의 계측과 금속재료의 특성평가," 대한기계학회논문집, 17(8), pp. 1971~1993.
- (8) Sato, T., Ma, W., Ninoyu, H., Jhang, K. Y. and Kousgi, Y., 1993, "Estimation of the Stress State Inside Metals Using Stress Perturbing Waves and Probe Waves," NDT & E Internatinal, 26(3), pp. 119~126.
- (9) Yamawaki, H., Saito, T., Masuda, C. and Fukuhara, H., 1994, "Development of Three Dimensional Simulation and Its Application," Jpn. J. Appl. Phys. 33, pp. 3126~3129.
- (10) Yamawaki, H. and Saito, T., 1996, "Computer Simulation of Acoustic Waves Propagation in Elastically Anisotropic Materials," Materials Science Forum Vols. 210-213, pp. 589~596.
- (11) Sharpe, R. S., 1982, "Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. VI," Academic Press, pp. 107~150.
- (12) 김경조, 장경영, 1999, "음향 비선형 파라미터의 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용," 비파괴 검사학회지, 19(2), pp. 85~92.
- (13) Kim, K. C. and Jhang, K. Y., 1996, "Basic Research on the Nondestructive Measurement of Nonlinear Elastic Modulus by using Ultrasonic Wave," Proceedings of Asian Pacific Conference for Fracture and Strength '96, pp. 923~928.
- (14) AULD, B. A., 1973, "Acoustic Fields And Waves in Solids," John Wieley&Sons, Inc, pp. 68~84.
- (15) Truell, Rohn, Elbaum, Charles, Chick and Bruce, B., 1969, "Ultrasonic Methods in Solid State Physics," New York Academic Press, pp. 38~52.
- (16) TenCate, James A., Abble, Koen E. A Van Den, 1996, "Laboratory Study of Linear and Nonlinear Elastic Pulse Propagation in Sandstone," JASA 100, pp. 1383~1389.
- (17) Hikata, Akira, Chick, Bruce B. and Elbaum, Charles, 1965, "Dislocatoin Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves," JAP 36(1), pp. 229~236.
- (18) Birks, A. S., 1991, "Nondestructive Testing Handbook 7 : Ultrasonic Testing," ASNT.
- (19) Miyoshi, S., 1996, "Ultrasonic Technology Handbook," Nikkan Kogyo Newspaper Co. (In Japanese)