

비선형 음향 효과를 이용한 미세 결함(열화)의 조기 검출

장경영*, 김경조**

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

초 록 초음파의 비선형 음향 효과를 계측하는 방법이 재료 열화의 효과적인 평가를 위한 새로운 접근법으로 제시되었다. 비선형 음향 효과란 음파가 전파함에 따라서 2차나 그 이상의 고조파 성분이 발생하는 것으로 설명될 수 있다. 따라서, 먼저 비선형 효과에 의해 고조파 성분이 발생하는 메커니즘을 비선형 탄성론에 기초를 두고 설명하였다. 다음으로, 열화된 재료에서 어느 정도의 고조파 성분이 발생하는지를 계측하기 위하여, 헤테로다인 신호 검출법을 이용하는 초음파 신호 분석 장치를 기초로 계측계를 구성하였으며, 인장하중과 파괴하중을 가하여 인공적으로 열화시킨 SS41과 SS45 시편에 대해 실험하였다. 실험 결과 열화의 정도와 비선형 효과가 강한 상관성을 보였으며 이로부터 비선형 음향 효과가 재료 열화 평가를 위한 유용한 수단이 될 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

파괴의 초기 단계에 재료 강도의 열화나 미소 크랙을 검출하는 것에 대한 중요성이 점점 커지고 있다. 실제로, 정유공장에서 발견되는 시효 열화, 핵발전소의 재료 열화, 비행기 날개나 부품에서의 미세 크랙에 의한 사고는 중요한 사회적 문제가 되어 왔다.

초음파는 재료의 비파괴 검사분야에 광범위하게 사용되어져 왔다^{1,2)}. 그러나, 일반적인 초음파 평가법, 즉 결함에 의해서 반사되는 초음파의 신호를 계측하는 방법은 거시적 관점에서의 결함을 검출하는 방법으로, 결함이 다량 발생할 수 있는 분위기가 조성된 상태, 즉 결함 발생 직전의 아주 미세한 크랙이 발생된 상태의 예견적인 검출은 곤란하다. 실제로, 큰 결함이 소량 존재하는 경우보다 미세한 결함이 다량 분포하는 경우가 더 위험할 수 있으며, 구

조물 재료의 건전성을 조기에 판단하기 위해서는 이러한 미세결함의 조기 검출 기법 개발이 시급한 실정이다.

그러나, 초음파는 그 전파 특성이 재료의 성질과 밀접하게 관련되어 있으므로, 여전히 재료열화의 비파괴 평가를 위한 강력한 수단으로 생각되고 있으며, 최근 감쇠를 계측하여 이용하는 방법이 제안되고 있다. 본 논문에서는 또 다른 열화 평가 파라미터로서 비선형 음향효과를 이용하는 방법을 제안한다. 재료의 소성변형이나 재료손상은 일종의 비선형 탄성학적 거동을 수반한다는 사실이 여러 연구 결과들로부터 이미 알려져 있다^{3,4)}. 이러한 소성변형 직전의 상태에서 초음파가 재료를 통과하면 재료의 비선형 탄성특성에 의해서 비선형 음향 효과가 나타난다. 따라서, 재료를 통과하여 전파하는 초음파의 비선형성을 계측함으로써 재료열화의 정도를 평가할

수 있는 가능성을 생각할 수 있다.

고체내에서의 비선형 파동 전파에 대한 이론은 오래전부터 연구되어 왔다^{5,6)}. 비선형 현상에 대한 대부분의 연구는 이러한 맥락을 따르고, 본 연구도 그러하다. 이러한, 비선형 음향효과는 초음파가 전파함에 따라서 기본 주파수 성분외에 2차나 그 이상의 조화성분의 발생을 초래하게 된다. 이러한, 고차 조화성분의 크기는 송신파의 진폭과 전파거리 뿐만 아니라 재료의 물성에도 관련되어 있다. 따라서, 송신파의 진폭과 전파거리가 동일할 경우에, 고조파 성분의 크기는 정상인 재료와 열화된 재료에서 다르게 나타날 것이다. 이 경향은 생체재료에 대한 이전 연구로부터도 알 수 있다^{7,8)}.

본 논문은 이러한 초음파의 비선형 음향효과를 이용하여 지금까지 곤란하였던 재료 내부 미세결함 발생 전후의 상태를 정성적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하고, 그 정당성을 실험적으로 검증함으로써 재료의 건전성을 조기에 판단하는데 응용할 수 있는 기초로 삼고자 하는 것이다. 이를 위하여, 먼저 초음파가 열화된 재료를 통과하는 동안 2차 조화성분이 발생되는 메커니즘을 비선형 탄성론에 기초를 두고 설명한다. 다음으로, 2차 조화성분의 검출을 위해서 초음파 신호분석 장치를 이용한 계측계를 구성한 후, 2차 조화성분의 크기와 재료열화 사이의 상관성을 조사하기 위한 실험을 실시하였다.

실험에서는, 인장시험과 피로시험을 통하여 인공적인 열화를 가한 SS41과 SS45의 시편들이 준비되었다. 실험결과는 재료의 비선형 음향효과가 재료열화의 정도와 강한 상관성을 갖는 것을 보여 주었으며, 이로서 비선형 음향효과가 파괴의 초기단계에서 재료열화를 평가하기 위한 방법으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

2. 비선형 음향 효과의 정량화

먼저, 설명을 위하여 식 (1)에 나타낸 비선형 버전의 후크법칙을 생각하자⁶⁾.

$$\sigma = E \epsilon (1 + \beta \epsilon + \dots) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, E는 영의 계수이고, β 는 2차 비선형 탄성계수다. 이 관계는 금속에서의 전위변위의 비선형적 거동에 주목한 이론적 고찰로 그 일반성이 입증되어 있다^{4,8)}. 또한, 본 논문의 저자도 이 관계를 금

속 재료에 대해서 실험적으로 입증하였다⁶⁾. 여기서는, 식 (1)의 2번째 항, 즉 2차 조화성분까지만 고려하기로 한다.

이와 같은 비선형 탄성효과에 의해서 음파(탄성파)가 매질을 전파함에 따라서 고조파 성분이 발생하게 되는데, 그 과정에 대한 설명을 위하여, Fig. 1에 보인 바와 같이 정현파의 초음파 종파가 미세결함을 가진 원형봉의 금속재료를 통과하는 경우를 생각한다.

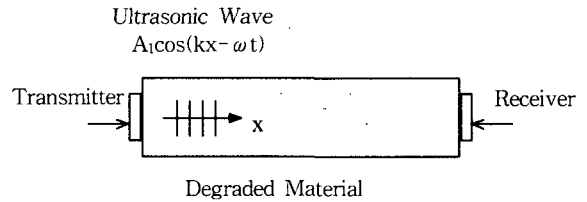


Fig. 1 Incidence of single frequency ultrasonic wave upon one side of a thin circular rod with degradation and its detection at the counter side

그림에서, A_1 은 단일 주파수를 갖는 초기 파형의 진폭이고, ω 는 각주파수, k 는 파수이다. 감쇠가 무시되는 경우에 원형 봉에서의 1차원 거동에 대해서, 운동방정식은 다음과 같이 된다.

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

여기서, ρ 는 밀도이고 u 는 변위이다.

식 (2)에 식 (1)의 관계를 대입하고, 변위 u 와 변형율과의 관계

$$\epsilon(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x}$$

를 이용하면, 다음과 같은 비선형 파동 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2E\beta \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)의 해를 구하기 위해서, 섭동 이론을 적용한다. 우선, 변위 u 를 식 (4)처럼 가정한다.

$$u = u_0 + u' \dots\dots\dots (4)$$

여기서 u_0 는 초기 변위로, Fig. 1에 나타난 파형과 같고, u' 는 1차 섭동해이다. 섭동해를 구하여 식 (4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$u = u_0 + u' = A_1 \cos(kx - \omega t) - A_2 \sin 2(kx - \omega t) \dots\dots(5)$$

여기서,

$$A_2 = \frac{\beta}{8} A_1^2 k^2 x \dots\dots\dots(6)$$

식 (5)의 두번째 항이 2차 조화성분을 나타냄을 알 수 있고, 이로써 2차 조화성분이 전파과정을 통하여 발생한다는 것을 설명할 수 있다. 또한, 식 (6)에서 2차 조화성분의 크기 A_2 가 β 에 의존한다는 것을 알 수 있는데, β 는 재료의 특성을 나타내는 물질상수이므로, 만약 우리가 β 의 변화를 알아낼 수 있다면, 그 재료의 특성 변화 즉, 변질의 정도를 정성적으로 측정할 수 있게 된다. 그러나, A_2 는 β 외에도 초기파형의 진폭 A_1 , 파수 k , 전파거리 x 에 관계되므로 재료의 변질과 관련된 성분만을 추출하기 위해서는 A_1 , k , x 등 실험조건을 일관성 있게 유지해야 할 필요가 있다.

이것이 곤란한 경우에는 A_2 를 측정하기 보다는 β 를 측정해야 하며 식 (6)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{8A_2}{A_1^2 k^2 x} \dots\dots\dots(7)$$

단, 여기서 β 는 엄밀하게는 음의 부호를 가지며 이는 식 (5)의 둘째 항의 부호가 음인 것과 관련된다. 그러나, 본 논문에서는 이 부호는 불변하므로 크기 만에 주목하였다.

한편, A_2 나 β 의 정량적 분석을 위하여는 재료 내부로 투입되는 초음파의 초기변위 A_1 을 정확히 알아야 할 필요가 있다. 이를 위하여는 트랜스듀서 구동 전압과 A_1 사이의 교정(calibration)이 수행되어야 한다. 그러나, 본 연구에서는 재료 열화의 정도와 A_2 또는 β 사이의 상대적인 상관성을 확인하는데 목적이 있으므로 이 과정을 수행하지는 않았다. 또한, 동일한 이유로 트랜스듀서 자체에 대한 비선형성도 별도로 고려하지 않았다. 또한, 식 (7)에서 k , x 는 이후의 실험에서 일정한 값으로 유지되는 값이므로 실제 실험에서는 A_2/A_1^2 의 값만을 구하여 이용하였다.

3. 계측계의 구성과 시편

Fig. 2는 수신 초음파 신호에 포함된 2차 조화성분의 크기를 계측하기 위한 실험계의 전체구성을 나타낸다. 이 시스템은 저잡음으로 데이터의 획득이 가능한 초음파 신호 분석 장치인 RAM10000 Non-linear System(미국, RITEC사)을 기초로 구성되었다.

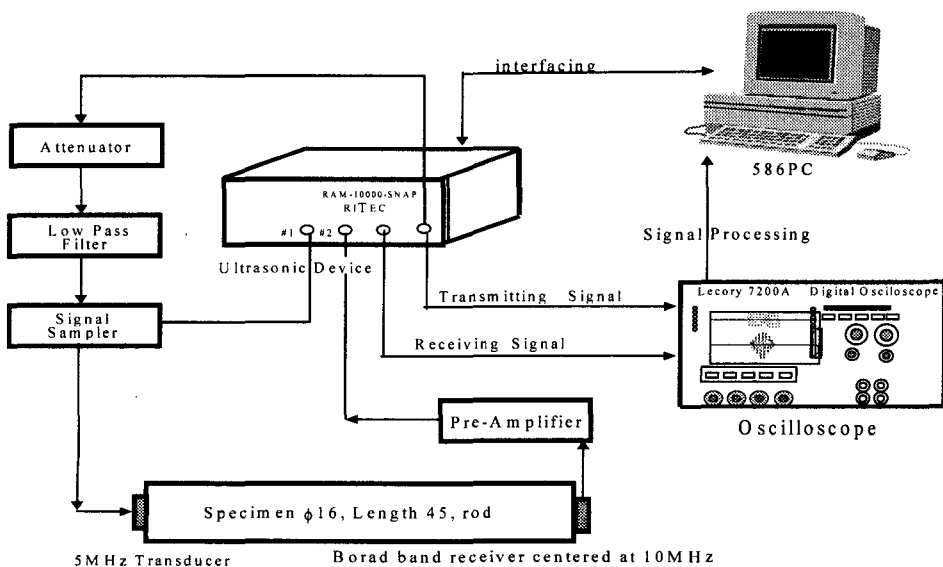
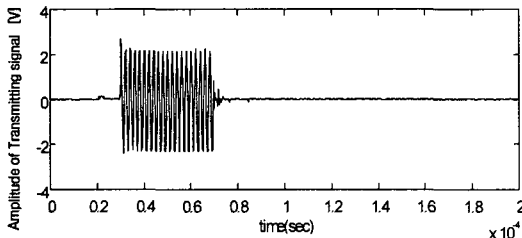
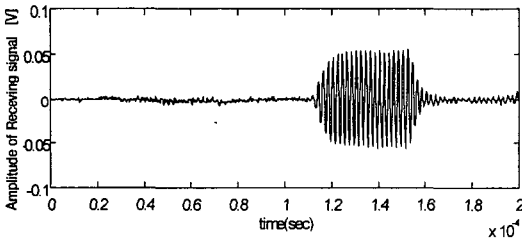


Fig. 2 Measurement system for 2nd harmonic component

송신을 위해서 사용된 탐촉자는 직경 0.5in인 5MHz 협대역 압전 트랜스듀서이며, 송신신호의 파형은 톤 버스트(tone burst)를 이용하였다. 수신에는 2차 고조파 성분을 민감하게 검출하기 위해서 10MHz가 중심 주파수인 광대역 압전 트랜스듀서를 사용하였다. 여기서, 광대역 센서는 수신 초음파 신호에 발생하는 주파수 성분을 포괄적으로 관찰하기 위한 것이다. Fig. 3은 후술하는 SS41 시편에 대한 송수신 신호의 예를 보여준다.



(a) Amplitude of Transmitted signal [V]



(b) Amplitude of Received signal(V)

Fig. 3 Example of (a) transmitted and (b) received signal

기다, 감쇠기, 필터, 앰프는 송 수신 신호의 특성을 조절하기 위한 것이다. 수신 신호는 A/D변환되고, 스펙트럼 영역에서 기본 주파수 성분과 2차 조화성분의 파워를 구하여, β 의 추정에 이용하였다. Fig. 4는 Fig. 3(b)의 파워 스펙트럼을 구한 결과이다.

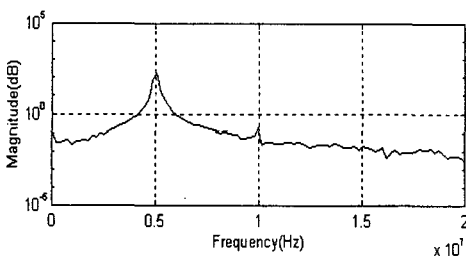


Fig. 4 Power spectrum of received wave form

시편으로는 SS41(항복응력 245MPa)과 SS45(항복응력 260MPa)를 준비하였으며, 각 시편의 형상은 Fig. 5에 보인 바와 같이, 길이 45mm, 직경 16mm의 원형 봉이다. 실험을 위하여 시편에 두 종류의 인공적인 열화를 가하였다. 하나는 UTM(만능 인장시험기)에서 인장하중을 가한 것으로, 다른 열화정도를 위하여 5가지 다른 크기의 인장을 가한 시편을 준비하였다. 즉, SS41에 대해서 122, 203, 308, 516, 637MPa로, SS45에 대해서 106, 246, 307, 503, 733MPa로 인장하중을 달리한 시편을 제작하였다. 여기서, 최대하중조건 637MPa과 733MPa은 각 재료의 파단 직전의 응력이다. 다른 하나는 피로하중을 가한 것으로, 피로 하중은 MTS(피로 시험기)에서 100, 1000, 5000, 10000, 100000회의 서로 다른 반복하중을 가한 시편을 제작하여 실험하였다. Fig. 5의 시편은 이들 UTM과 MTS시험용 시편이며, 실제로 실험에 사용된 시편은 중앙 부분을 발췌한 것이다.

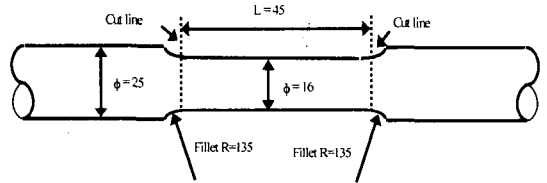
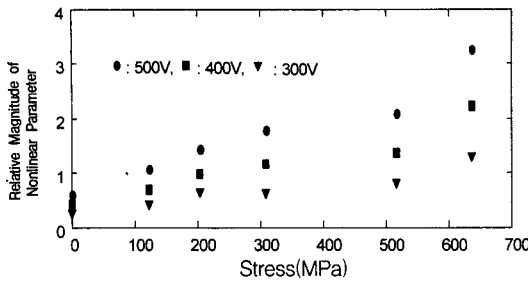


Fig. 5 Dimensions of specimen

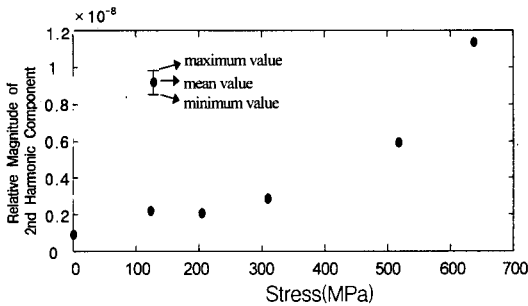
한편, 각 시편에서 계측되는 2차 고조파 성분의 크기 A_2 는 식 (6)에서 보인 바와 같이 β 외에 A_1 , k , x 에 영향을 받는다. 따라서, 실험에서는 동일한 트랜스듀서와 동일한 구동 파형(전압은 변경 가능)을 사용하고 시편은 동일한 조건으로 절삭, 연마가공하였으며, 트랜스듀서와 시편 표면사이의 접촉력을 일정하게 유지함으로써, 검출된 A_2 가 β 와 구동전압에만 관련되고, 나머지에 의한 영향은 일정하게 유지되도록 노력하였다. 구동 전압은 A_1 과 비례하는 것으로 실험에서는 한 시편에 대해 세가지(500V, 400V, 300V)로 변화시켰다. 이는 검출되는 A_2 가 A_1 과 식 (6)의 관계를 따르는지 확인하기 위한 것으로, A_2 의 계측 품질을 평가할 수 있는 하나의 수단으로 활용할 수 있기 때문이다.

4. 실험 결과 및 토론

Fig. 6는 재료를 인장함에 의해 열화된 6종류의 SS41 시편에 대한 실험결과이다. 여기서, 6종류란 5



(a) Relative Magnitude of 2nd Harmonic Component



(b) Relative Magnitude of Nonlinear Parameter

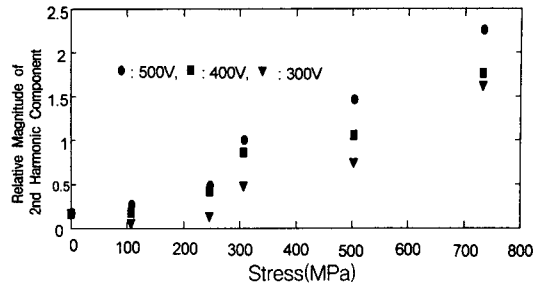
Fig. 6 Experimental results for SS41 specimen degraded by stretching loads: relative magnitude of (a) 2nd harmonic component and (b) nonlinear parameter β

가지의 다른 인장하중을 가한 시편과 하중을 가하지 않은 시편을 의미한다. Fig. 6(a)는 각 시편에 대해서 측정된 2차 조화 성분의 크기이고, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)로부터 추정된 β 를 나타낸다.

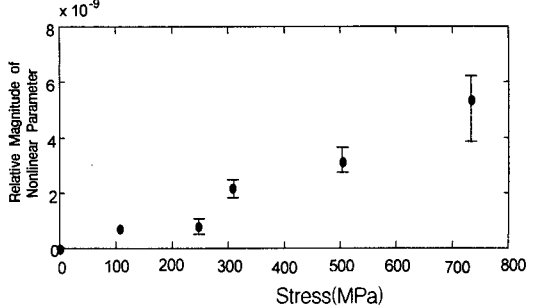
또한 그림에서, 수직축은 각 시편에 가해진 하중을 나타내고, 수직축은 임의의 스케일로 구해진 상대적인 값을 나타낸다. 즉, 여기서 구한 A_2 , β 의 값은 절대량이 아니며 시편에 따른 A_2 와 β 의 상대적인 변화를 알아보기 위한 결과이다. ●, ■, ▲은 초기진폭 A_1 의 크기변화에 의한 영향을 확인하기 위해서 송신센서에 가해지는 전압을 각각 500V, 400V, 300V로 변화시켰을 때 측정된 값을 나타낸다.

Fig. 6(b)는 3종류의 가진 전압에 대한 수신 신호들로부터 구한 비선형 파라메타의 평균값이고 위와 아래의 선은 최대값과 최소값을 나타낸다. 그러나, 이 그림에서는 데이터의 편차가 적어서 최대, 최소값이 나타나지 않았다.

Fig. 6(a)로부터, 각 시편에 가해진 하중이 증가함에 따라서, 2차 조화성분의 크기가 증가함을 알



(a) Relative Magnitude of 2nd Harmonic Component



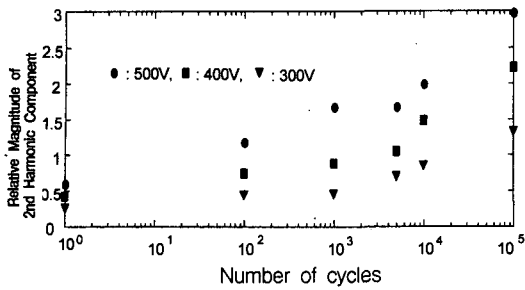
(b) Relative Magnitude of Nonlinear Parameter

Fig. 7 Experimental results for SS45 specimen degraded by stretching loads: relative magnitude of (a) 2nd harmonic component and (b) nonlinear parameter β

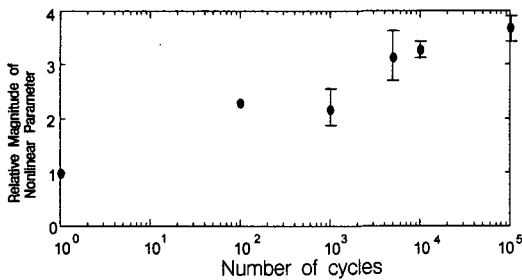
수 있다. 그러나, 이 값은 식 (6)에서 예상할 수 있듯이 기본 주파수 성분의 크기 A_1 이 변함에 따라서 변화한다. 반면에, 비선형 파라메타 β 는 정규화된 양으로, 기본 주파수 성분의 크기나 송신 전압에 무관해야 한다. Fig. 6(b)의 결과는 초기진폭에 무관하게 일정한 β 가 측정될 수 있음을 잘 나타내고 있다.

Fig. 7은 시편 SS45에 대한 실험 결과이다. SS41과 비슷한 경향을 가지나, 다소 전체적인 크기가 좀 작는데 이것은 SS45가 SS41보다 단단한 재료이기 때문이다. 비선형 음향효과가 단단한 재료에서 보다 무른 재료에서 더 크게 나타나는 것은 지난 연구에서 이미 밝힌바 있다¹³⁾.

한편, Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에서 비선형 파라메타의 크기가 항복응력을 경계로 급증하는 것을 알 수 있다. 이는 항복 응력을 넘어서부터는 소성 변형량과 전위가 급증하고, 또한 미세 크랙의 성장이 증대하리라는 예상과 일치하는 경향으로 이로부터 비선형 파라메타의 크기가 재료열화의 정도와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.



(a) Relative Magnitude of 2nd Harmonic Component $\times 10^{-9}$



(a) Relative Magnitude of 2nd Harmonic Component

Fig. 8 Experimental results for SS41 specimen fatigued by several cycles: relative magnitude of (a) 2nd harmonic component and (b) nonlinear parameter β

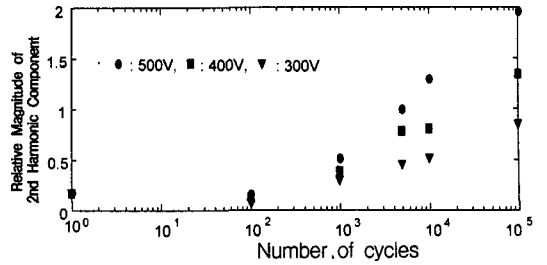
Fig. 8은 반복하중에 의해서 열화된 6종류의 SS41시편에 대한 실험결과이다. 그림에서 수평축은 반복하중의 횟수를 나타내고, Fig. 8 (a)와 Fig. 8 (b)에서의 수직축은 A_2 와 β 의 상대적인 크기를 나타낸다.

Fig. 9은 시편 SS45에 대한 실험결과이고, 인장실험에 의한 결과와 유사하게 Fig. 8보다 작은 값을 나타낸다.

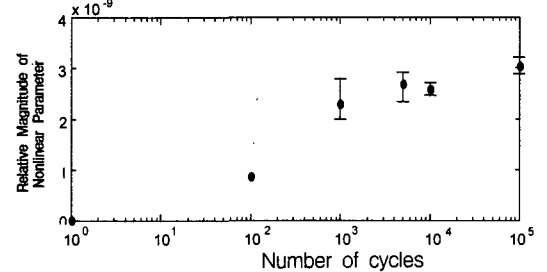
Fig. 8 (b)와 Fig. 9 (b)로부터, 비선형 파라메타 β 는 반복하중의 증가에 따라 증가해 가는 것을 알 수 있다. 결론적으로, 비선형 파라메타 β 는 반복하중의 횟수와 강한 상관성을 갖는다고 할 수 있다.

5. 결론

초음파 음향효과가 재료파괴의 초기단계에 발생하는 미세결함, 즉 열화상태를 평가할 수 있는 효과적인 수단으로 제시되었다. 우선, 초음파가 재료를 전파하는 동안 2차 조화성분이 발생한다는 것을 비선형 탄성론에 기초를 두고 설명하였고, 2차 조화성



(b) Relative Magnitude of Nonlinear Parameter



(b) Relative Magnitude of Nonlinear Parameter

Fig. 9 Experimental results for SS45 specimen fatigued by several cycles: relative magnitude of (a) 2nd harmonic component and (b) nonlinear parameter β

분의 크기로부터 비선형 파라메타 β 가 예측될 수 있음을 보였다.

2차 조화성분과 비선형 파라메타 β 의 예측을 위해서 저잡음으로 데이터의 획득이 가능한 초음파 신호 분석 장치를 이용한 예측계를 구성하였다.

인장하중과 피로하중에 의해 인공적으로 열화시킨 SS41, SS45시편을 제작하여 실험한 결과, 비선형 파라메타 β 가 인장 하중의 크기와 반복하중의 횟수에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있었고, 이 결과로부터 수신된 초음파에서 2차 조화성분의 크기나 비선형 파라메타 β 의 크기를 예측함에 의해서 재료 열화의 정성적인 평가가 가능함을 확인하였다.

본 연구에서는 재료열화와 비선형 파라메타 A_2 (또는 β)사이의 상대적인 상관성에 대해 검토한 것이며 정성적 분석을 위하여는 전위의 발생정도 등을 이용한 재료열화 상태의 정량화와 A_2 (β)값의 절대적인 양을 예측해야 할 필요가 있다. 특히, β 값의 절대량 예측을 위하여는 주파수 분산성, 감쇠, 트랜스듀서의 비선형성, 신호처리 방식에 따른 오차, 재료의 고유 비선형성, 시편가공에 의한 시편 표면재질의 변화에 의한 영향을 별도로 고려해야 한다.

후 기

이 연구는 과학재단(KOSEF)의 핵심지원연구 971-1004-021-2에 의해서 수행되었음.

참고 문헌

- 1) A. S. Birks, *Nondestructive Testing Handbook 7: Ultrasonic Testing*, (1991)
- 2) 實吉純一, *超音波技術便覽*, 3rd Edition, (1991)
- 3) A. Sutin, *Proceedings of the 14th ISNA*, pp. 328-333, (1996)
- 4) J. K. Na, *Review of QNDE*, Vol. 15, pp. 1347-1351, (1996)
- 5) R. Truell, et. al., *Ultrasonic Methods in Solid State Physics*, pp. 38-52, (1969)
- 6) A. Hikata, et. al., *J. Appl. Phys.*, Vol. 36, No. 1, pp. 229-236, (1965)
- 7) I. Y. Demin, et. al., *Proceedings of the 13th ISNA: International Symposium for Nonlinear Acoustics*, pp. 344-349, (1993)
- 8) 장경영 외 2명, *의공학회지*, 제 14권, 1호, pp. 31-40, (1993)
- 9) J. A. TenCate, et. al, *J. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 100, pp. 1383-1389, (1996)
- 10) I. E. Shkolnik, et. al., *Proceedings of the 14th International Symposium for Nonlinear Acoustics*, pp. 316-320, (1996)
- 11) A. Hikata, et. al., *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 3, No. 11, pp. 195-197, (1963)
- 12) W. T. Yost, et. al, *J. Appl. Phys.*, Vo. 52, No. 1, pp. 126-128, (1981)
- 13) 장경영 외 2명, *대한기계학회지*, 제 17권, 8호, pp. 1971-1979, (1993)
- 14) J. M. Barsom, et. al., *Fracture and Fatigue Control in Structures*, pp. 278-319, (1987)

Early Detection of Micro-Defects(Degradation) by Using Nonlinear Acoustic Effect

K. Y. Jhang* and K. C. Kim**

* School of Mech. Eng., Hanyang Univ, Seoul 133-791

** Dept. of Prec. Mech. Eng., Graduate School of Hanyang Univ, Seoul 133-791

Abstract The method of measuring the nonlinear effect of ultrasonic waves is suggested as a new approach for the effective evaluation of material degradation. In sonic wave propagation, the existence of nonlinear effect can be demonstrated by the generation of higher order harmonic waves. So, at first, the mechanism of generating higher order harmonic components due to nonlinear effect was explained by using nonlinear elasticity. Next, we attempted to measure how much of the higher order harmonic component was generated in the degraded material. For this purpose, a measurement system mainly based on a high-powered nonlinear ultrasonic signal analysis system was constructed, and SS41 and SS45 specimen intentionally degraded by tensile load and fatigue load were tested. From the results, we confirmed that the measurement of nonlinear acoustic effect may be useful for the evaluation of material degradation.