

## 협대역 레이저 여기 표면파의 음향비선형성을 이용한 Al6061 합금의 굽힘피로손상 평가

### Bending Fatigue Characterization of Al6061 Alloy by Acoustic Nonlinearity of Narrow Band Laser-Generated Surface Wave

남태형\*, 최성호\*, 장경영\*\*†, 김정석\*, 이태훈\*

Taehyung Nam\*, Sungho Choi\*, Kyung-Young Jhang\*\*†, Chung Seok Kim\* and Taehun Lee\*

초 록 본 연구에서는 레이저를 이용한 협대역 표면파의 음향 비선형 계측을 통하여 굽힘피로손상된 알루미늄 합금의 피로열화를 평가하였다. 선배열 레이저를 이용할 경우 발생하는 본질적인 고조파 성분을 이론적으로 분석하고 굽힘피로손상된 알루미늄 6061 합금의 표면으로부터 음향 비선형 파라미터를 성공적으로 측정하였다. 피로사이클의 증가에 따라서 음향 비선형 파라미터는 증가하였고 손상 정도와 매우 밀접한 관계를 보였다. 결과적으로 본 연구에서 다룬 레이저 여기된 표면파의 비선형평가기법은 피로손상된 표면열화 평가에 매우 유용할 것으로 판단된다.

주요용어: 레이저, 표면파, 협대역, 굽힘피로, 음향 비선형성

**Abstract** Bending fatigue of aluminium alloy was characterized by acoustic nonlinearity of narrow band laser-generated surface wave. The higher harmonic components generated intrinsically by arrayed line laser beam were analyzed theoretically and acoustic nonlinearity was measured successfully on the surface of fatigue damaged aluminium 6061 alloy. The acoustic nonlinearity increased as a function of fatigue cycles and has close relation with damage level. Consequently, the nonlinear acoustic technique of laser-generated surface wave could be potential to characterize surface damages subjected to fatigue.

**Keywords:** Laser, Surface Wave, Narrow Band, Bending Fatigue, Acoustic Nonlinearity

#### 1. 서 론

고체 재료의 비선형탄성특성은 결정내 원자들 간의 인력과 척력으로 인한 평균원자분리거리에 대한 상호작용력으로 나타나며 이때 물리적으로 원자간 분리거리에 대한 작용용력이 비선형적 거동을 하는 데서 나타나는 특성이다. 이렇듯, 실제 고체 재료의 원자간 에너지는 조화특성을 갖지 못하고 비조화 특성을 나타낸다. 일반적으로 이러한 비조화특성은

연속체근사를 이용하여 고차탄성이론으로 설명되어진다. 주어진 일정한 주파수를 갖는 사인파형의 초음파가 충분한 진폭을 갖고 비조화 특성을 갖는 고체 매질 내를 전파할 경우 기본 입사 주파수를 갖는 초음파는 재료의 비선형성특성에 따라서 국부적인 위상속도의 차이로 인해 왜곡현상이 발생하게 된다. 따라서 기본주파수의 배수에 해당하는 고차 조화 성분이 발생하게 된다. 이러한 고차 조화파 성분은 물리적으로 고체 재료의 비선형적인 응력-

변형을 관계에 의해 나타나는 것으로 고차탄성계수에 크게 의존하게 되므로 고체 재료의 비선형성을 나타내게 된다. 일반적으로 고체 재료가 변형될 때 재료의 선형특성 즉, 2차 탄성계수는 거의 변화가 없거나 미비한 것으로 간주한다. 하지만 2차 탄성계수에 비해 절대적인 수치는 매우 낮지만 3차 및 4차 탄성계수는 크게 변화하게 된다. 따라서 이러한 고차탄성계수에 의존하는 고차조화파를 이용하여 재료의 미시적인 변화를 평가하는 것이 매우 유용한 것으로 생각되고 최근 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-5]. 이상과 같이 초음파 비선형성은 초음파가 전파되는 고체의 결정구조상태 혹은 결정의 규칙성에 밀접한 관련이 있으며 전위로 인한 결정격자 내 원자배열의 붕괴, 전위쌍극자, 보이드 그리고 결정립계 등 많은 고체재료 내의 격자결합들이 비선형파라미터에 영향을 미치게 되는 것으로 연구되었다[6-8].

표면파는 기존의 많은 벌크파를 이용한 측정법과는 달리 비선형성 계측에 있어서 몇 가지 큰 장점이 있다. 먼저 표면파는 기존의 계측과 같이 대상재료의 양쪽 면을 이용하는 계측 즉, 한쪽 면에서는 초음파를 발생시키고 반대 면에서는 수신하는 구성요소가 필요치 않다. 따라서 이러한 계측은 특히 현장 적용성이 탁월하다. 왜냐하면 현장에서는 구조물 내부로의 접근이 제한적이기 때문에 외부 표면에서 평행하게 송신과 수신 가능한 표면파가 매우 유리하기 때문이다. 두 번째로, 표면파 에너지의 대부분은 대상재료의 표면 근방(약 한 파장)에 집중되어 전파하므로 벌크파와 비교하여 큰 비선형 효과를 나타내게 된다[5]. 왜냐하면 대부분의 실제 구조재료의 피로손상은 일반적으로 재료의 내부보다는 먼저 표면손상을 크게 받기 때문이다. 마지막으로, 표면파는 벌크파와 비교하여 에너지의 손실이 적어 장거리를 전파하므로 복잡하거나 넓은 구조물에 응용이 가능하다.

기존의 측정방법은 압전소자를 대상재료의 표면에 접촉매질을 이용하여 직접 접촉하는 방법을 사용한다. 따라서 대상재료의 접촉 상태는 실험 결과에 매우 중요한 변수로 작용하게 된다. 이에 반해 비접촉 계측이 가능한 레이저를 이용한 초음파 발생은 이러한 표면에서의 접촉문제를 해결할 수 있다. 또한, 음향 비선형 계측시 특정주파수에서의 진폭값을 측정하기 때문에 협대역 초음파 음원이 필요하다. 이러한 협대역 신호는 신호 내에 존재하는

잡음을 감소시키므로 신호 대 잡음비를 향상시킬 수도 있다. 이러한 협대역 초음파 음원은 발광원의 부분적인 배열 즉, 선배열 슬릿을 이용하여 발생이 가능하다[9].

본 연구에서는 선배열 레이저빔으로 협대역 표면파를 발생시키고 표면파의 음향 비선형 계측을 통하여 굽힘피로손상된 알루미늄 합금의 피로열화를 평가하고자 하였다. 그리고 비선형 파라미터를 효과적으로 측정하기 위해서는 2차 고조파 성분의 수신 감도를 최대화할 필요가 있으므로 본 연구에서는 2차 고조파 주파수 부근의 공진주파수를 갖는 공진형 압전소자를 수신부에 사용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 레이저를 이용한 협대역 표면파 발생

레이저에 의한 초음파의 발생 메커니즘은 기존의 접촉식 탐촉자를 이용한 초음파의 발생 원리와는 전혀 다른 특성을 가진다. 기존의 접촉식 탐촉자는 압전효과에 의하여 기계적 진동을 발생시키고 직접적으로 재료에 그 진동의 전달을 통해 초음파를 발생시킨다. 그러나 레이저를 이용한 초음파의 발생은 레이저 빔이 재료의 표면에 입사함에 따라 발생하는 열변형에 기인한다. 적절한 세기의 레이저 빔이 재료의 표면에 조사되면 표면은 순간적으로 가열되면서 열응력이 발생하며 이에 의한 재료 변형은 재료 내에 탄성파를 발생시키게 된다. Fig. 1은 레이저와 선배열 슬릿 마스크에 의한 표면파 발생을 나타낸 그림이다. 여기서  $d$ 는 각 슬릿의 간격,  $w$ 는 슬릿의 열림 폭,  $\lambda$ 는 발생 표면파의 파장이다.

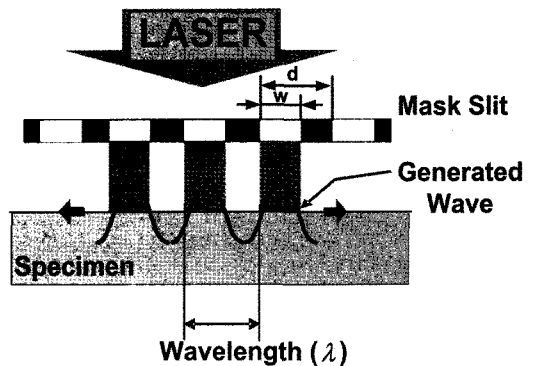


Fig. 1 Schematic diagram of generation of surface wave by arrayed line laser beam

적절한 세기의 레이저에 의해 재료가 열탄성구간 내에서 변형을 일으킬 때, 슬릿 마스크를 통과한 하나의 레이저 빔은  $q(t)I(r)$ 에 비례하는 강도를 가지는 열원으로 작용하게 된다. 여기서  $q(t)$ 는 레이저의 시간적인 세기분포를 나타내며,  $I(r)$ 은 공간적인 세기분포를 나타낸다. 각각의 슬릿을 통과하는 레이저빔은 슬릿의 폭  $w$ 가 충분히 작다면, 슬릿의 경계조건에 의해 공간적으로는 가우시안 분포, 시간적으로 임펄스의 분포( $q(t) \rightarrow \delta(t)$ , 델타함수)를 가진다고 할 수 있다. 유효반경  $a$ 를 가지는 가우시안 분포의 레이저 빔에 대해 그 임펄스 응답은  $e^{-\xi^2}$ 에 비례한다. 여기서  $\xi = (r - cr_t)/a$  로,  $r$ 은 측정위치,  $c_R$ 은 표면파의 전파속도를 나타낸다. 레이저 빔이 등방성을 가지는 편평한 재료의 얇은 표면부에 입사된다면 이에 의해 발생하는 표면파의 면외변위  $h(t)$ 는 식(1)과 같이 나타내어진다[10,11].

$$h(t) \propto \xi e^{-\xi^2} \quad (1)$$

이는  $e^{-\xi^2}$ 의 가우시안 분포를 가지는 레이저빔의 입사에 따른 경계조건으로 쌍극자효과에 의해 재료의 변형이 1차 미분형태로 나타나기 때문이다. 다음으로 간격  $d$ 를 가지는  $N$ 개의 레이저 빔이 선배열 분포를 이루며 입사된다고 한다면, 선배열 레이저 빔에 의한 면외변위  $g(t)$ 는 식(2)와 같이 나타내어 질 수 있다.

$$g(t) = \sum_{n=1}^N h(t - n\Delta t) \quad (2)$$

여기서  $\Delta t$ 는  $d/c_R$ 로 시간적으로 나타낸 배열간격을 의미한다. 이  $g(t)$ 의 값을 푸리에 변환을 통하여 선배열 레이저 빔에 의한 표면파의 주파수 스펙트럼  $G(f)$ 를 구할 수 있다.

$$G(f) = NH(f)S(f) \quad (3)$$

$H(f)$ 는 단일 레이저 빔에 의해 발생하는 표면파의 주파수 스펙트럼,  $S(f)$ 는 선배열의 특성에서 나타나는 배열함수를 의미한다.  $S(f)$ 는 식 (4)와 같으며 표면파의 전파 속도  $c_R$ , 배열간격  $d$ , 슬릿 배열의 개수  $N$ 에 의존한다.

$$S(f) = \frac{\sin(\pi N f \Delta t)}{N \sin(\pi f \Delta t)} \quad (4)$$

Fig. 2는 단일 레이저빔과 다중 레이저빔으로 발생하는 초음파의 광대역과 협대역을 갖는 이론적인 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 여기서 Fig. 2(a)는  $a=0.7$  mm,  $N=10$ ,  $d=1.66$  mm,  $c_R=2900$  m/s 일 때의  $H(f)$ 와  $S(f)$ 를 나타낸 그림이다. 이들의 합성으로 발생하는 선배열 레이저 빔에 의한 표면파의 스펙트럼  $G(f)$ 는 Fig. 2(b)에 나타내었다. 이 결과는 선배열 레이저를 이용하여 기본파의 주파수  $f$ 가  $c_R/d$  인 협대역 표면파를 발생시킬 수 있음을 나타낸다. 이는  $S(f)$ 의 값이  $f=1/\Delta t$  일 때 최대값을 가진다는 점을 생각해 볼 때 타당한 결과이다.

여기서 배열의 개수  $N$ 이 증가함에 따라  $S(f)$ 의 사이드로브 값이 감소하면서 발생하는 표면파의  $G(f)$ 는 더욱 협대역 신호로 변하게 된다. 결과적으로 슬릿을 이용한 레이저 여기표면파는 본질적으로 고조파 성분을 포함하게 된다. Fig. 2(b)에서 주파수  $f=1.75$  MHz를 가지는 기본파 성분 이외에도 3.5 MHz의 2차 고조파 성분, 그리고 5.25 MHz의 3차 고조파 성분이 존재함을 볼 수 있다. 또한, 이

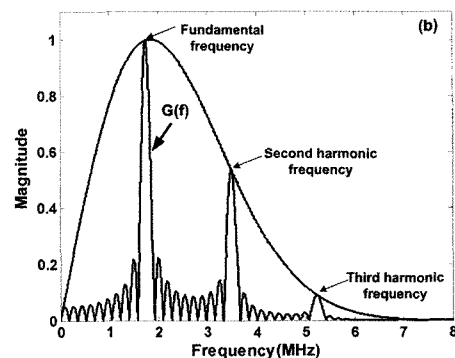
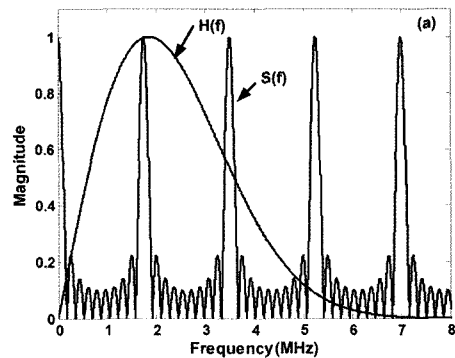


Fig. 2 Theoretical frequency spectra showing single beam and multiple beam generation: (a)  $H(f)$  and  $S(f)$ , (b)  $H(f)$  and  $G(f)$

고조파 성분은 슬릿을 통하여 입사되는 레이저빔의 조건을 일정하게 유지시킴으로써 그 크기를 일정하게 제어하는 것이 가능하다.

## 2.2. 표면 탄성파의 음향 비선형성

반무한 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파의 경우 그 변위 성분은 진행 방향인  $x$ 축과 이에 수직인  $z$ 축의 성분을 고려한다. 이 때 각 방향에 대한 변위 포텐셜은 다음 식(5)와 (6)으로 나타낼 수 있다[12].

$$\phi = B_1 e^{-kqz} e^{ik(x-ct)} \quad (5)$$

$$\psi = C_1 e^{-ksz} e^{ik(x-ct)} \quad (6)$$

$$\text{where } q = \sqrt{1 - \frac{c}{c_L}}, \quad s = \sqrt{1 - \frac{c}{c_T}}, \quad c = \frac{\omega}{t}$$

그리고  $B_L$ ,  $C_1$ 는 임의의 상수,  $c_L$ 과  $c_T$ 는 각각 종파와 횡파의 속도를 의미하며,  $k$ ,  $\omega$ 와  $c$ 는 각각 표면파의 파수, 각주파수, 그리고 전파속도이다.

표면파는 종파와 횡파의 합성파로 고체의 무응력 상태인 표면을 따라 전파하는 특성을 갖는 것을 고려하여 변위 성분을 각각 종파와 횡파 성분으로 분리하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_x = A_1 (r e^{-qz} - 2s q e^{-sz}) \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

$$u_z = i A_1 q (-r e^{-qz} + 2e^{-sz}) \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

$$\text{where } A_1 = k \frac{C_1}{2q}, \quad r = 2(sq)^{1/2}$$

그리고 비선형성을 갖는 고체 매질의 경우 충분한 거리를 전파해 가는 표면파의 2차 고조파 성분을 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_x \approx A_2 (r e^{-2qz} - 2s q e^{-2sz}) \cos 2(kx - \omega t) \quad (9)$$

$$u_z \approx i A_2 q (-r e^{-2qz} + 2e^{-2sz}) \cos 2(kx - \omega t) \quad (10)$$

표면파의 경우  $u_x$ 와  $u_z$ 에는 종파와 횡파 성분이 모두 기여한다. 그런데, 매질이 등방성이고 2차의 약한 음향 비선형성을 갖는 경우 횡파의 음향 비선

형성은 3차 탄성계수의 대칭성으로 인해 무시되어 질 수 있다[13]. 따라서 표면파의 음향 비선형성은 종파 성분만이 기여하게 되며 이는 일반적인 종파에서의 비선형성 특성과 유사하게 된다. 즉, 전파하는 표면파에서 발생하는 2차 고조파의 변위  $A_2$ 는 기본파 성분의 변위  $A_1$ 의 제곱에 비례하는 것으로 간주할 수 있다.

$$A_2 = \frac{\beta k^2 x A_1^2}{8} \quad (11)$$

여기서  $\beta$ 는 비선형 파라미터이고  $x$ 는 전파거리이다.

## 3. 실험 방법

### 3.1. 재료 및 피로시험

실험에 사용된 대상재료는 330×30×20 mm의 크기를 갖는 알루미늄 6061-T6를 사용하였으며, 피로 열화 전후의 음향 비선형 파라미터를 비교하기 위해 초기시편과 열화된 시편을 각각 준비하였다.

피로열화를 발생시키기 위해 Fig. 3과 같이 3점 굽힘피로시험을 수행하였고, 그림은 피로시험에 사용한 시편과 고정장치를 나타낸 것이다. 하중을 13 kN, 응력비  $R=0.1$ 로  $10 \times 10^6$  사이클 동안 반복 인가하였다. 시편에 가해진 응력을 수치적으로 유한요소 분석 결과 최대응력은 시편의 표면 중앙부에서 147 MPa이었으며 최대응력이 절반으로 감소하는 범위는 중앙으로부터 좌우 20 mm지점 인 것으로 나타났다. 또한 미세열화에 대한 시험을 위하여 같은 조건에서  $5 \times 10^5$  사이클의 반복하중을 인가한 시편도 준비하였다.

### 3.2. 레이저 여기표면파 계측

선배열 레이저 소스를 이용한 비접촉식 표면파를 발생시키기 위하여 Fig. 4와 같은 시스템을 구축하였다. 사용된 주요 장비로는 Nd:YAG 펄스 레이저(파장 1064 nm, 펄스폭 5 ns)와 슬릿 마스크를 사용하였다. 슬릿 마스크는 레이저의 회절효과를 억제하기 위하여 시편 표면에 부착시켰다. 이미 2.1에서 이론적으로 살펴본 바와 같이 레이저가 1.66 mm의 간격을 갖는 선배열 슬릿을 통과하여 시편에 조사

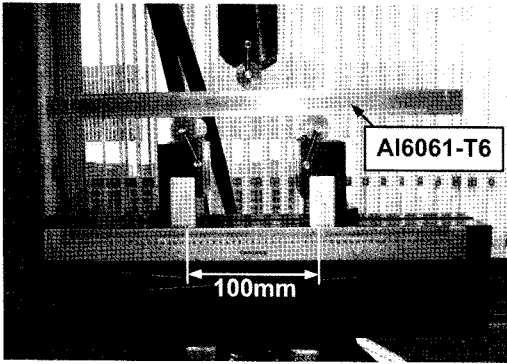


Fig. 3 The fixture and specimen of 3-point bending fatigue test

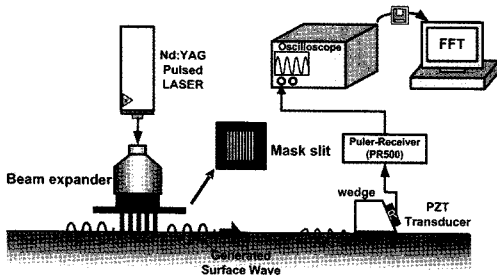


Fig. 4 Schematic diagram of acoustic nonlinearity system

되면 1.75 MHz 협대역 표면파를 발생시킬 수 있으며(참고 Fig. 2), 이를 중심주파수 3.5 MHz의 접촉식 공진형 압전소자를 이용하여 수신하였다. 이는 2차 고조파 성분의 발생대역인 3.5 MHz부근의 수신감도를 최대화하기 위함이다. 수신 신호는 펄서/리시버(Panametrics PR500)를 이용해 증폭시킨 후, 디지털 오실로 스코프(Lecroy WS452)에서 A/D 변환되고 컴퓨터에서 주파수 분석하였다. 주파수 분석에서는 고속 푸리에 변환을 이용하여 기본파 성분의 진폭과 2차 고조파 성분의 진폭으로부터 비선형 파라미터를 계산하였다.

식(11)에서와 같이 비선형 파라미터  $\beta$ 는 기본파와 2차 고조파 성분의 변위 및 파수와 전파거리에 크게 의존한다. 실험에서 파수와 전파거리는 일정하게 유지하고 변위는 재측되어진 기본파와 2차고조파의 진폭으로 간주하여 다음과 같은 상대적인 비선형 파라미터  $\beta'$ 을 계산하였다.

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \tag{12}$$

여기서,  $A_1$ 은 기본파 성분의 진폭,  $A_2$ 는 2차 고조파 성분의 진폭이다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1. 피로열화 전후 주파수 스펙트럼 특성

피로열화에 따른 비선형 파라미터  $\beta'$ 을 구하기 위해 피로열화 전후의 시편에 대하여 실험을 수행하였으며, 이때 각각의 실험은 전파거리 및 송신파 수신 지점을 고정하여 엄격히 동일 조건을 유지하도록 하였다. Fig. 5에서 각각 초기시편과  $10 \times 10^6$  사이클의 피로 시편에 대하여 수신된 표면파의 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 각각의 그림에서 슬릿 간격  $d=1.66$  mm에 의해 1.75 MHz에서 기본 주파수 성분이 나타나고 있음을 볼 수 있으며, 3.5 MHz에서 2차 고조파 성분이 나타남을 확인할 수 있다.

피로시험전 시편의 실험결과에서 나타나는 현저히 높은 진폭을 갖는 고조파 성분  $A_2$ 의 존재는 이미 이론적으로 분석한 바와 같이 레이저 음원에 의해 본질적으로 포함된 비선형 성분이 존재함을 의미한다. 또한, 기본파 성분보다 높은 진폭의  $A_2$ 를 갖는 것은 본 연구에서 비선형 파라미터를 효과적으로 측정하기 위해 2차 고조파의 중심주파수를 갖는 공진형 압전소자를 사용했기 때문이다. 각각의 경우에 대하여 비선형 파라미터  $\beta'$ 의 값을 도출해보면, 피로시험전 시편에 대해서는  $(\beta')_{N=0}=0.013$  그리고 피로 사이클이  $N=10 \times 10^6$ 의 열화시편에서는  $(\beta')_{N=10 \times 10^6}=0.019$ 로 피로열화 후 더 큰 비선형 파라미터 값을 갖는 것을 알 수 있다.

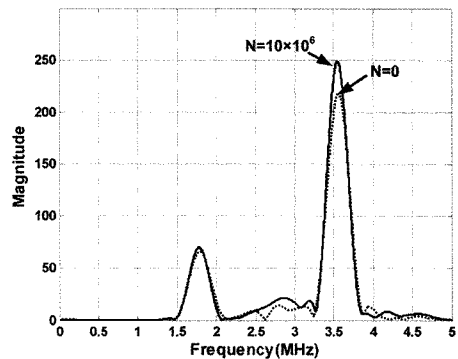


Fig. 5 The typical frequency spectrum of  $N=0$  and  $N=10 \times 10^6$  cycles showing increase in magnitude of second harmonic wave

4.2. 열화 단계별 시편간의 비교

피로시험전 시편과 피로 사이클이  $N=5 \times 10^5$ ,  $N=10 \times 10^6$  인 단계별로 3점 굽힘피로시험을 거친 시편에 대하여 수신된 표면파의 주파수 분석을 통해 비선형 파라미터  $\beta'$ 의 값을 얻었다. Fig. 6에서 피로시험전 시편에 대한  $A_1^2$ 과  $A_2$ 의 상관성을 나타내었다. 이때 레이저의 세기변화를 통해 입력신호의 크기를 변화시켜 가며 측정하였다. 대체적으로 레이저의 세기가 커지면 여기된 표면파의 크기 또한 커지는 것으로 나타났다. 먼저 전체적인  $A_1^2$ 과  $A_2$ 의 증가는 선형적인 증가를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서  $A_1^2$ 과  $A_2$ 의 관계를 입력신호 크기의 증가에 따른 선형적인 관계로 볼 수 있으며, 비선형 파라미터  $\beta'$ 의 값을 선형보간 직선의 기울기의 값으로 생각할 수 있다. 열화 단계별 비선형 파라미터의 값은 Fig. 7에 나타내었다. 비선형 파라미터  $\beta'$ 의 값은  $N=0$ 의 경우 0.0265,  $N=5 \times 10^5$ 의 경우 약 16%의 증가한 0.0285,  $N=10 \times 10^6$ 의 피

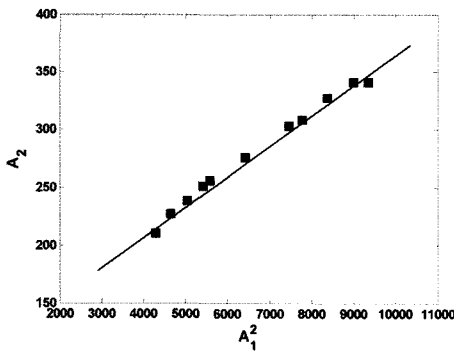


Fig. 6  $A_1^2$  vs  $A_2$  showing the linearity with input power at  $N=0$  specimen

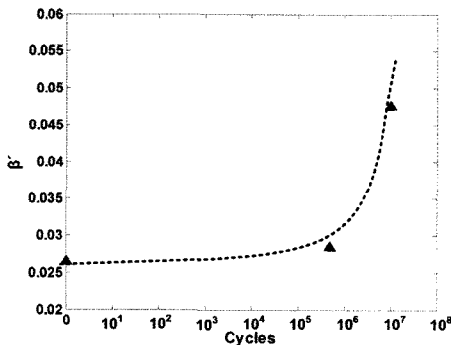


Fig. 7 Nonlinearity parameter as a function of fatigue cycles

로를 가한 시편에서는 약 88% 증가한 0.0475로 점차 증가함을 명확하게 확인할 수 있다.

5. 고찰

기존의 직접 접촉식 압전소자를 사용하는 경우 압전소자, 압전소자와 시편간의 계면, 접촉매질, 구동전기장치 등 구동시스템에 의존하여 발생하는 피할 수 없는 본질적인 고조파 성분이 존재하게 된다. 따라서 측정하는 고조파 성분은 이런 본질적으로 존재하는 고유 고조파 성분과 재료 자체만의 음향 비선형특성에 의해 발생하는 추가적인 고조파 성분의 합성분이 된다. 그러나 피로손상전과 후에서의 상대적 비교 평가에서는 구동시스템에 대한 고유 고조파 성분을 일정하게 유지할 수만 있으면 최종 측정결과를 상대적으로 비교함에 의해 열화 정도의 평가가 가능하게 된다.

그런데 압전소자를 이용하는 경우 소자, 구동전기장치 등 하드웨어적 요소의 구성은 일관되게 유지할 수 있어도 압전소자와 시편사이의 계면효과나 접촉매질에 의한 영향을 일정하게 제어하기는 매우 제한적이다. 이에 반해 본 연구에서 레이저를 이용하는 경우 본질적으로 비접촉이고 따라서 계면 접촉이나 접촉매질의 영향을 제거할 수 있고, 구동소자가 별도로 필요하지 않고 재료 자체가 탄성파의 음원이 되므로 구동시스템에 의한 영향을 무시할 수 있음을 이론적이고 실험적으로 확인할 수 있었다(참고 Fig. 2와 Fig. 5). 그러나 그 대신 협대역 파형을 얻기 위해 사용한 배열에 의해 고조파가 발생하게 된다(참고 Fig. 1과 Fig. 5). 그런데 선행연구결과 이런 고조파 성분은 슬릿 열림폭에만 의존하는 것으로 나타났으며 따라서 음향 비선형성의 상대 평가에서는 이것을 일관되게 유지해 주면 음원에 의한 영향을 제어할 수 있다. 그런데 슬릿 열림폭은 측정시마다 변동하는 것이 아니므로 결과적으로 본 연구에서 제안한 기법에서는 음원에 본질적으로 존재하는 고조파 성분이 있기는 하나 상대 평가에는 영향을 미치지 않으므로 비선형 측정에 유용하다고 할 수 있다.

또한 일반적으로 재료의 음향 비선형성에 의해 발생하는 고조파의 크기는 매우 미약하여 수신 신호의 배경잡음 수준이 되면 잡음에 따른 변동이 크게 되고 음향 비선형성을 정확하게 측정할 수 없다. 따라서 이에 대한 대책으로 입사파의 세기나

수신 감도를 크게 하거나 다양한 신호처리기법 등이 동원되어 왔다. 그런데 음원에 이미 충분히 큰 신호 대 잡음비의 고조파가 존재한다면 열화에 따른 고조파 성분의 증분에만 관심을 가지면 되며, 따라서 고체 재료의 열화정도를 상대평가를 하는데 유효한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 레이저 여기표면파를 이용하여 구동시스템에서 발생하게 되는 비선형성을 제거하고 현장적용의 가능성을 향상시킬 수 있는 협대역의 표면파를 효과적으로 발생시켰다. 협대역의 레이저 여기표면파 발생시 나타나는 본질적인 고조파 성분을 이론적으로 분석하고 굽힘피로손상된 Al6061 합금의 표면으로부터 음향 비선형 파라미터를 성공적으로 측정하였다. 측정결과 피로사이클의 증가에 따라서 음향 비선형 파라미터는 크게 증가하였고 손상 정도와 매우 밀접한 관계를 보였다. 결과적으로 본 연구에서 제안하는 레이저 여기된 표면파의 비선형 평가기법이 피로손상된 표면열화평가에 매우 효과적이라고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 방사선기술개발사업 첨단비파괴검사기술개발 분야의 연구지원으로 이루어졌습니다. (2008-2003505)

## 참고문헌

- [1] A. Kumar, C. J. Torbet, T. M. Pollock and J. W. Jones, "In situ characterization of fatigue damage evolution in a cast Al alloy via nonlinear ultrasonic measurements," *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 2143-2154 (2010)
- [2] H. Ogi, M. Hirao and S. Aoki, "Noncontact monitoring of surface-wave nonlinearity for predicting the remaining life of fatigued steels," *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, No. 1, pp. 438-442 (2001)
- [3] G. Shui, J. Y. Kim, J. Qu, Y. S. Wang and L. J. Jacobs, "A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves," *NDT&E International*, Vol. 41, pp. 326-329 (2008)
- [4] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 487-490 (2001)
- [5] 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, 124913 (2006)
- [6] 이재익, 이태훈, 장경영, "표면파의 음향 비선형 특성을 이용한 표면피로열화 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 5, pp. 415-420 (2009)
- [7] 이재익, 권구도, 이태훈, 장경영, "표면파의 음향 비선형성과 실험적 특성 검증", *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 4, pp. 344-350 (2009)
- [8] C. S. Kim, I. K. Park and K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic characterization of thermal degradation in ferritic 2.25Cr-1Mo steel," *NDT&E International*, Vol. 42, pp. 204-209 (2009)
- [9] S. Kenderian and B. B. Djordjevic, "Narrow band laser-generated surface acoustic waves using a formed source in the ablative regime," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, pp. 261-266 (2003)
- [10] C. E. Duffer and C. P. Burger, "Narrow band laser ultrasonic NDE," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 593-600 (1996)
- [11] Y. H. Berthelot and J. Jarzynski, "Directional laser generation and detection of ultrasound with arrays of optical fibers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, pp. 463-470 (1990)
- [12] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, pp. 44-92, Cambridge University Press, New York, USA (1999)
- [13] 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)