

선배열 슬릿마스크를 이용한 협대역 레이저 여기 표면파의 음향 비선형성

최성호* · 남태형* · 이태훈* · 김정석* · 장경영**†

* 한양대학교 자동차공학과, ** 한양대학교 기계공학부

Acoustic Nonlinearity of Narrow-Band Surface Wave Generated by Laser Beam with Line-Arrayed Slit Mask

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

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

** School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received July 12, 2010 ; Revised October 23, 2010 ; Accepted October 25, 2010)

Key Words: Laser(레이저), Surface Wave(표면파), Acoustic Nonlinearity(음향 비선형성), Harmonic Generation(조화파 발생)

초록: 선배열 슬릿 마스크를 이용하여 발생시킨 협대역의 레이저 여기 표면파의 주파수 특성을 이론적으로 분석하여 음향비선형성 분석에 영향을 미칠 수 있는 초기 고조파성분의 발생 기구를 규명하였다. 그리고 알루미늄 6061-T6 합금의 음향 비선형성에 대한 슬릿 열림폭과 레이저 세기의 영향을 단일 슬릿과 선배열 슬릿을 이용하여 실험적으로 분석하였다. 고조파 성분의 진폭은 슬릿 열림폭에 의존하는데 본 연구의 경우 슬릿 배열간격을 1.67 mm로 하여 1.75 MHz의 표면파를 발생시켰으며 이 경우 슬릿 열림폭이 0.5 mm에서 1.0 mm로 증가함에 따라 2차 고조파 성분의 진폭은 약 80 % 감소하였다. 또한 레이저 세기에 따라서 기본파 성분 진폭(A_1)을 변화시키면서 2차 고조파 진폭(A_2)의 변화를 실험한 결과 A_1^2 과 A_2 간에는 우수한 선형 관계를 보였으며, 이는 전형적인 음향비선형성의 특징을 잘 나타낸다.

Abstract: We examined the mechanism of generation of higher harmonics by theoretically analyzing the frequency characteristics of a narrow-band surface wave generated by a laser beam with line-arrayed slit masks. We experimentally analyzed the effects of slit opening width and laser intensity on the acoustic nonlinearity of aluminum 6061-T6 alloy by using single-slit and line-arrayed slit masks. The magnitude of the harmonic wave depended on the slit opening width. In our experiment, we generated a 1.75-MHz surface wave by using an arrayed slit with intervals of 1.67 mm. The magnitude of the second harmonic component decreased about by 80% when the slit opening width was increased from 0.5 mm to 1.0 mm. In addition, the relationship between the magnitudes of the fundamental and the second harmonic wave showed good linearity, which agreed well with the typical behavior of acoustic nonlinearity.

1. 서론

탄성파의 비선형 특성은 전파 매질의 미세구조에 매우 민감하므로 열화에 따른 미세 변질과 미세결합의 정밀한 평가를 위한 수단으로서 주목받고 있다. 기존 탄성파의 비선형 특성은 여러 초음파 중에서도 종파를 이용한 기법이 주로 사용되어져 왔다. 그러나 구조재의 열화가 대부분 사용중 기계적 진동 및 피로에 의해 재질 표면에서

부터 발생된다는 점을 감안하였을 때, 구조재 표면의 열화 정도와 표면탄성파의 비선형특성과의 상관관계에 대해 규명하여 현장 적용을 위한 평가 기법으로 개발하는 것이 필수적이라 할 수 있다.⁽¹⁻³⁾

기존의 표면파 발생 기구로 접촉식 탐촉자를 이용한 측정 기법을 이용할 경우 탐촉자와 시험재간의 계면효과 및 커플러트의 영향으로 인해 측정의 부정확성, 비신속성의 문제점이 나타나게 된다.⁽⁴⁾ 표면파 비접촉기법으로 초음파 현미경은 안정한 시스템과 정밀 측정이 가능하지만 수침에

† Corresponding Author, kyjhang@hanyang.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

의한 측정으로 그 측정 환경이 제한적이고 현장 적용성에 한계가 있다.⁽⁵⁾ 이에 반해 레이저 여기 표면파를 이용한 비접촉 기법은 이러한 계면 문제점을 크게 향상시킬 수 있고 현장 적용에도 용이하다. 특히 선배열 형태의 레이저 빔을 이용하면 협대역 표면 탄성파를 발생시킬 수 있으며 이러한 협대역 신호는 측정주파수에서의 변위 값을 측정하는 음향 비선형연구에 필수적이며 또한, 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있으므로 주파수 분석에 유리하다.^(6,7)

선배열 형태의 레이저 빔을 만들기 위해 광섬유를 이용한 연구들이 많이 보고된 바 있다.^(2,4,5) 그러나 광섬유를 이용한 실험 장비의 경우 고가이고 설치에 있어 매우 복잡하다. 반면에 선배열 슬릿 마스크를 이용할 경우 실험장치를 구성함에 있어 비교적 간단하여 쉽게 선배열 형태의 레이저 빔을 만들 수 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 선배열 슬릿 마스크를 이용하여 발생시킨 협대역 표면파의 주파수 특성을 이론 모델을 기반으로 분석하여 소스에서 본질적인 고조파 발생기구를 규명하고 이를 실험에 의해 검증하였다. 비선형 파라미터를 효과적으로 측정하기 위해서는 2차 고조파 성분의 수신 감도를 최대화할 필요가 있으므로 본 연구에서는 2차 고조파 주파수 대역의 공진주파수를 갖는 공진형 압전 소자를 수신부에 사용하였다. 이를 토대로 재료의 미세변질을 평가하는 정밀기법으로 협대역 레이저 여기 표면파의 음향비선형 기법을 제안하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 레이저를 이용한 협대역 표면파 발생

레이저에 의한 초음파의 발생 메커니즘은 기존의 접촉식 탐촉자를 이용한 초음파의 발생 원리와는 다른 특성을 가진다. 기존의 접촉식 탐촉자는 압전효과에 의하여 기계적 진동을 발생시키고 직접적으로 재료에 그 진동을 전달시킨다. 이러한 진동은 재료내에서 탄성파를 발생시키고 이때 특정 입사각에서 표면파가 발생하게 된다. 그러나 레이저를 이용한 초음파의 발생은 레이저 빔이 재료의 표면에 입사함에 따라 발생하는 열변형에 기인한다. 적절한 세기의 레이저 빔이 재료의 표면에 조사되면 표면은 순간적으로 가열되

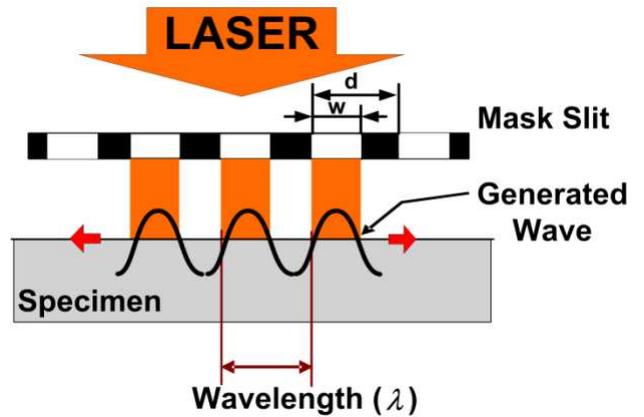


Fig. 1 Schematic diagram of surface wave generated by laser beam with line arrayed slit mask

면서 열응력이 발생하며 이에 의한 재료 변형은 재료 내에 탄성파를 발생시키게 된다. Fig. 1은 레이저와 선배열 슬릿 마스크에 의한 표면파 발생을 계략적으로 나타낸 그림이다. 여기서 d 는 각 슬릿의 간격, w 는 슬릿의 열림 폭, λ 는 레이저 여기 표면파의 파장이다.

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 w 가 충분히 작다면, 슬릿의 경계조건에 의해 공간적으로는 가우시안 분포, 시간적으로 임펄스의 분포($q(t) \rightarrow \delta(t)$, 델타함수)를 가진다고 할 수 있다. 레이저 빔이 등방성을 가지는 편평한 재료의 얇은 표면부에 입사된다면 이에 의해 발생하는 표면파의 면외 변위 $h(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타내어진다.^(3,7)

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

여기서 $\xi = (r-ct)/a$ 로 r 은 측정 위치, a 는 레이저 빔의 유효 반경, c 는 표면파의 전파속도이다.

다음으로 간격 d 를 가지는 N 개의 레이저 빔이 선배열 분포를 이루며 입사된다고 한다면, 선배열 레이저 빔에 의한 면외 변위 $g(t)$ 는 식 (2)와 같이 나타내어 질 수 있다.

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

여기서 Δt 는 d/c 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 슬릿 배열의 개수 N , 표면파의 주파수 f , 그리고 시간적인 슬릿 배열 간격 Δt 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 $a=0.45$ mm, $N=6$, $d=1.67$ mm, $c=2920$ 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/d 인 협대역 표면파를 발생시킬 수 있음을 나타낸다.

여기서 배열의 개수 N 이 증가함에 따라 $S(f)$ 의 사이드로브 값이 감소하면서 발생하는 표면파의 $G(f)$ 는 더욱 협대역 신호로 변하게 된다. Fig. 2(b)에서 주파수 $f=1.75$ MHz를 가지는 기본파 성분 이외에도 3.5 MHz의 2차 고조파 성분이 존재함을 볼 수 있다. 그러므로 슬릿을 이용한 레이저 여기 표면파는 본질적으로 고조파 성분을 포함하게 된다. 선배열 슬릿을 이용한 레이저 여기 표면파의 이론적인 분석결과 슬릿 간격 d 를 결정하면 c/d 로 기본파 주파수가 정해지게 되고 슬릿 열림폭 w 가 작아질수록 $H(f)$ 주파수 스펙트럼의 최대 피크 주파수(f_m)가 고주파수 대역으로 이동함에 따라 2차 고조파 성분의 크기가 증가하게 된다.⁽⁴⁾

2.2 표면 탄성파의 음향 비선형성

반무한 매질의 표면을 따라 전파하는 표면파의

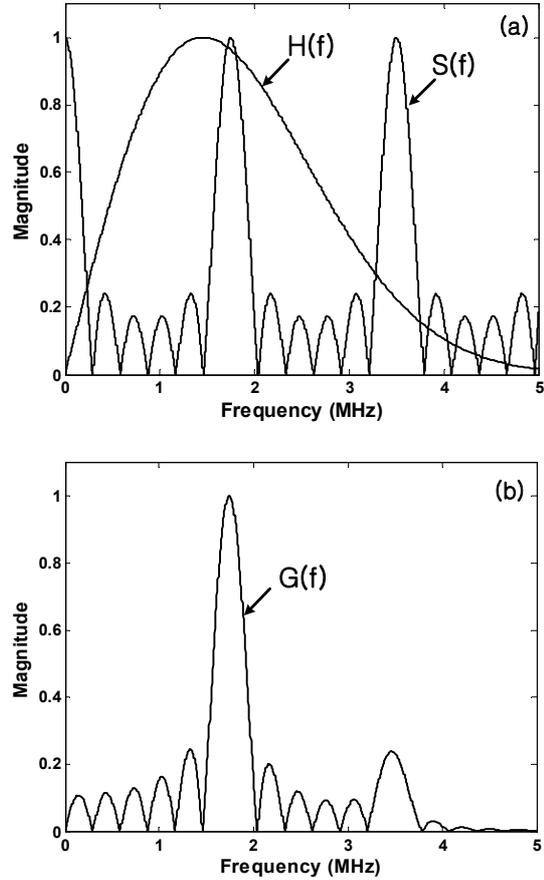


Fig. 2 Theoretical frequency spectra showing single beam and multiple beam generation: (a) $H(f)$ and $S(f)$, (b) $G(f)$

경우 그 변위성분은 진행방향인 x 축과 이에 수직인 z 축의 성분을 고려한다. 이 때 각 방향에 대한 변위 포텐셜은 다음 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\phi = B_1 e^{-qz} e^{i(kx - \omega t)} \quad (5)$$

$$\psi = C_1 e^{-sz} e^{i(kx - \omega t)} \quad (6)$$

여기서 $q^2 = k^2 - k_L^2$, $s^2 = k^2 - k_T^2$, $B_1 = -i \frac{k^2 + s^2}{2kq} C_1$ 이다. 그리고 B_1 과 C_1 은 임의의 상수, k 는 표면파의 파수, k_L 과 k_T 는 각각 종파와 횡파의 파수를 의미하며, ω 는 표면파의 각주파수이다.

표면파는 종파와 횡파의 합성파로 고체의 무응

력 상태인 표면을 따라 전파하는 특성을 갖는 것을 고려하고 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 각 방향의 변위성분을 각각 종파와 횡파 성분으로 분리를 하면 다음의 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$u_x = B_1 k (e^{-qz} - \frac{2qs}{k^2 + s^2} e^{-sz}) \sin(kx - wt) \quad (7)$$

$$u_z = B_1 q (e^{-qz} - \frac{2k^2}{k^2 + s^2} e^{-sz}) \cos(kx - wt) \quad (8)$$

비선형성을 갖는 고체매질의 경우 충분한 거리를 전파해 가는 표면파의 2차 고조파성분을 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽⁸⁾

$$u_x \approx B_2 k (e^{-2qz} - \frac{2qs}{k^2 + s^2} e^{-2sz}) \sin 2(kx - wt) \quad (9)$$

$$u_z \approx B_2 q (e^{-2qz} - \frac{2k^2}{k^2 + s^2} e^{-2sz}) \cos 2(kx - wt) \quad (10)$$

표면파의 경우 u_x 와 u_z 에는 종파와 횡파 성분이 모두 기여한다. 그런데, 매질이 등방성이고 2차의 약한 음향 비선형성을 갖는 경우 횡파의 음향 비선형성은 3차 탄성계수의 대칭성으로 인해 무시되어질 수 있다.⁽⁹⁾ 따라서 표면파의 음향 비선형성은 종파성분만이 기여하게 되며 이는 일반적인 종파에서의 비선형성 특성과 유사하게 된다.^(10,11) 즉, 전파하는 표면파에서 발생하는 2차 고조파의 변위 A_2 는 기본파 성분의 변위 A_1 의 관계에 의해서 음향 비선형 파라미터 β 는 다음 식 (11)과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

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

여기서 x 는 표면파의 전파거리이다.

2.3 공진형 수신기

일반적으로 비선형 파라미터 β 에서 2차 고조파 성분은 기본파에 비해 작은 크기를 갖는다. 비선형 파라미터 β 를 효과적으로 측정하기 위해서는 2차 고조파 성분의 수신감도를 최대화할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 2차 고조파 주파수 부근의 공진주파수를 갖는 공진형 압전 트

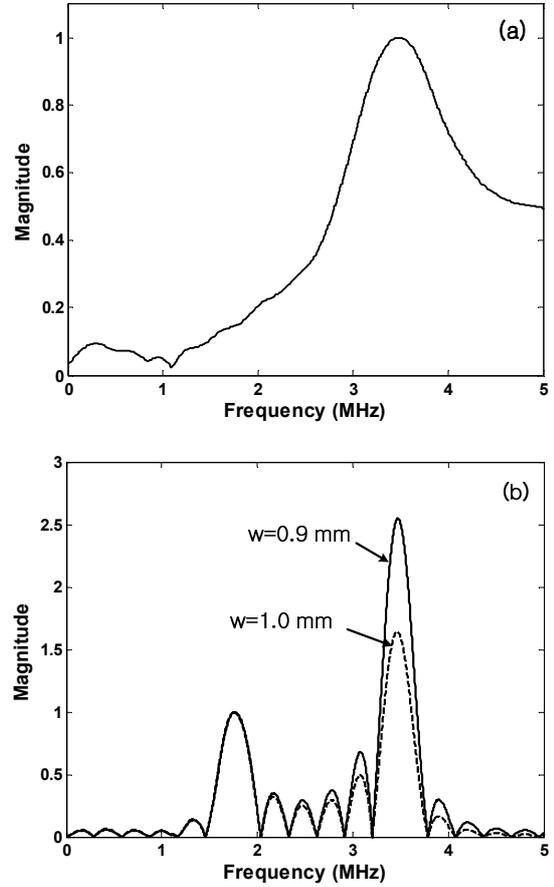


Fig. 3 Frequency spectra of received wave: (a) receiver sensitivity of commercialized 3.5 MHz PZT transducer and (b) theoretical frequency spectrum $G_s(f)$ showing multiple beam generation

랜스듀서를 수신부에 사용하였다.

이 경우 $G(f)$ 의 특성에는 수신기의 주파수에 대한 감도 특성인 $R(f)$ 가 고려되어야 한다. 즉 선배열 레이저 빔에 의한 표면파의 주파수 스펙트럼 $G_s(f)$ 는 다음과 같다.

$$G_s(f) = G(f)R(f) = NH(f)S(f)R(f) \quad (12)$$

Fig. 3은 3.5 MHz의 공진형 수신기의 경우 주파수 감도 특성과 이 주파수 감도를 고려한 $G_s(f)$ 스펙트럼으로 $d=1.67$ mm일 때 w 에 따른 주파수 크기를 나타낸다. 슬릿 열림폭 w 가 0.9 mm와 비교하여 1.0 mm인 경우 그림에 나타낸 바와 같이 2차 고조파 주파수의 크기가 낮게 나타났다. 이는 단일 레이저 빔에 의한 주파수 특성곡선(참고 Fig. 2(a))이 w 가 0.5 mm에서 1.0 mm범위에서 w

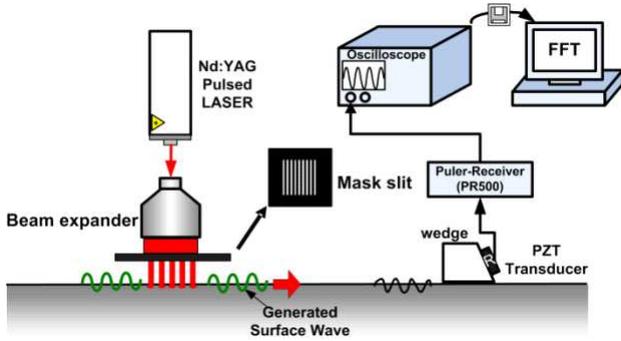


Fig. 4 Schematic diagram of acoustic nonlinearity system

가 증가함에 따라서 저주파수 쪽으로 이동하므로 선배열 레이저 빔에 의한 주파수 특성곡선 $G(f)$ 상의 A_2 의 진폭이 감소함에 따라서 나타난 것이다.

3. 실험 방법

선배열 레이저 소스를 이용한 비접촉식 표면파를 발생시키기 위하여 Fig. 4와 같은 시스템을 구축하였다. Nd:YAG 펄스 레이저 (파장 1064 nm, 펄스폭 5 ns)와 빔 확장기를 사용 하였다. 슬릿 마스크는 레이저의 회절효과를 억제하기 위하여 시편 표면에 부착시켰다. 이미 2.1절에서 이론적으로 살펴본 바와 같이 레이저가 $d=1.67$ mm의 간격을 갖는 선 배열 슬릿을 통과하여 시편에 조사되면 1.75 MHz 협대역 표면파를 발생시키며(참고 Fig. 2), 이를 중심주파수 3.5 MHz의 공진형 압전 소자를 이용하여 수신하였다. 수신 신호는 펄스/리시버 (Panametrics PR500)를 이용해 증폭시킨 후, 디지털 오실로 스코프 (Lecroy WS452)에서 A/D 변환 되고 컴퓨터에서 주파수 분석하였다.

4. 실험 결과

단일 레이저 빔에 의해 발생하는 표면파의 주파수 스펙트럼은 슬릿 열림폭에 따라 달라지게 된다. 실험에 사용된 대상재료는 알루미늄 6061-T6를 사용 하였고, 단일 슬릿은 $w=0.9$ mm와 1 mm로 하였다. 배열 슬릿의 경우는 $N=6$, $d=1.67$ mm에 대해 $w=0.9$ mm와 1 mm로 단일 슬릿의 폭과 동일하게 하였다.

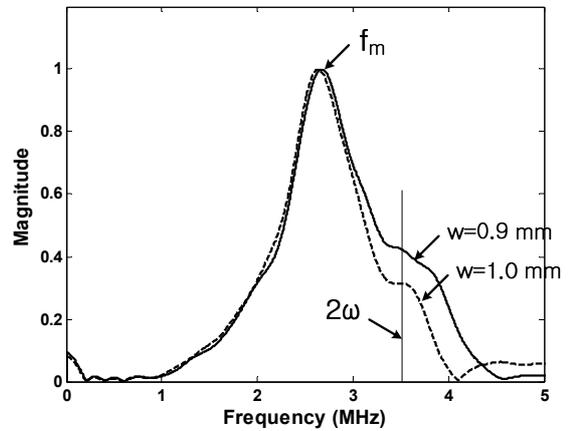


Fig. 5 Experimental frequency spectrum showing single beam generation received by 3.5 MHz PZT transducer

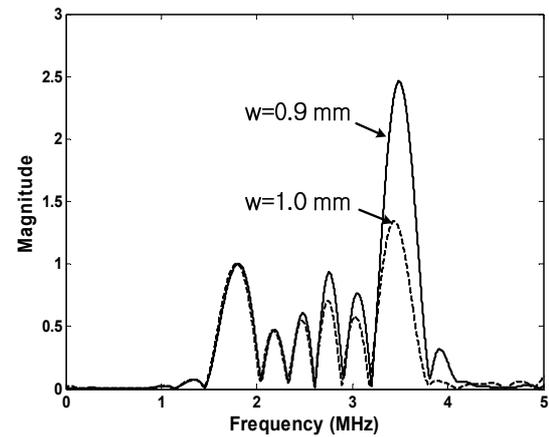


Fig. 6 Experimental frequency spectrum showing multiple beam generation received by 3.5 MHz PZT transducer

Fig. 5 는 3.5 MHz 트랜스듀서를 이용하여 수신한 실험 결과로 슬릿 열림폭이 0.9 mm에서 1.0 mm로 증가함에 따라 단일 레이저 빔에 의해 여기된 표면파의 중심 주파수(f_m)의 최대 피크는 저주파수 쪽으로 미소하게 이동하고 2차 고조파 성분(2ω)는 크게 감소함을 알 수 있다.

선배열 슬릿을 이용하면 협대역의 주파수를 얻을 수 있다. $d=1.67$ mm일 경우 3.5 MHz 트랜스듀서로 수신한 $G(f)$ 스펙트럼은 Fig. 6과 같다.

슬릿 열림 폭이 0.9 mm 에서 1.0 mm로 증가함에 따라 상대적으로 2차 고조파 성분이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 이미 이론적으로 배열 슬릿에 의한 주파수 스펙트럼을 분석한 결과(참고 2.3절)와 매우 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 배열 슬릿을 사용할 경우 A_2 의 진폭은 빔의 열림

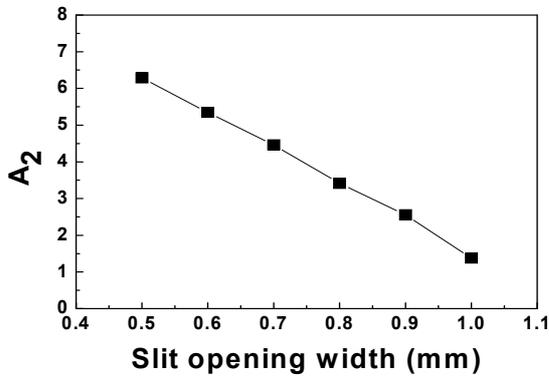


Fig. 7 The magnitude of the second harmonic component (A_2) as a function of slit opening width (w)

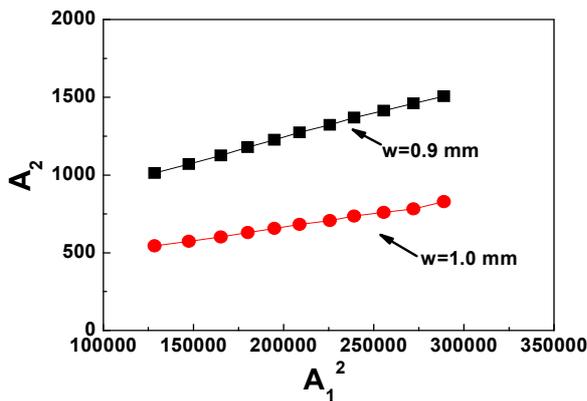


Fig. 8 A_1^2 vs A_2 showing the linearity with input power at each slit opening width

폭에 크게 의존하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 슬릿 열림폭을 $w=0.5$ mm에서 1.0 mm로 증가시키며 실험한 결과로 슬릿 열림폭의 범위가 0.5 mm에서 1.0 mm의 영역에서는 w 가 증가함에 따라 슬릿에 의한 본질적인 2차 고조파 성분의 크기는 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 레이저의 세기변화에 대한 A_1^2 과 A_2 의 상관성을 나타낸 결과이다. 대부분 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, 실험시 사용한 기본 입사주파수와 전파거리를 일정하게 유지할 경우 식 (11)로부터 상대적 비선형 파라미터($\beta' = A_2/A_1^2$)를 구할 수 있다. 따라서

Fig. 8에서와 같이 β' 은 A_1^2 와 A_2 에 대해 선형 회귀분석하고 이에 대한 선형 보간 직선의 기울기로부터 측정이 가능해진다.

측정결과 $w=0.9$ mm일 때 $\beta'=0.0030$ 이고 $w=1.0$ mm일 때 $\beta'=0.0015$ 로 나타나 빔의 열림 폭이 작은 경우 β' 은 보다 높았으며 이러한 이유는 이론적 분석결과(참고 Fig. 3(b)와 Fig. 6)에서와 같이 w 의 증가에 따라 기본파성분의 진폭 A_1 은 거의 변화가 없는 반면 2차 고조파 성분의 진폭 A_2 가 크게 감소하기 때문이다.

5. 결론

선배열 슬릿을 이용한 협대역의 레이저 여기 표면파 발생 시 나타나는 본질적인 비선형 파라미터를 이론적으로 분석한 결과 비선형 파라미터 성분은 공진형 수신기의 음장특성과 슬릿 열림폭에 크게 의존하는 것으로 나타났다. 본 연구의 실험 결과 슬릿 배열간격을 1.67 mm로 하여 1.75 MHz의 표면파를 발생시켰으며 이 경우 슬릿 열림폭이 0.5 mm에서 1.0 mm로 증가함에 따라 2차 고조파 성분의 진폭은 약 80 % 감소하였다. 또한 레이저 세기에 따라서 기본파 성분 진폭(A_1)을 변화시키면서 2차 고조파 진폭(A_2)의 변화를 실험한 결과 A_1^2 과 A_2 간에는 우수한 선형 관계를 확인 할 수 있었다. 결과적으로 선배열 슬릿을 이용한 협대역의 레이저 여기 표면파에서 본질적인 고조파 성분이 존재함을 확인할 수 있으며 이를 이용하여 재료의 미세 변질을 평가하는 새로운 정밀 측정 기법으로 응용이 가능할 것이라 판단된다.

후 기

이 연구는 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었음. (KRF-2007-313-D00010)

참고문헌

- (1) Jhang, K. Y., 2000, "Application of Nonlinear Ultrasonics to the NDE of Material Degradation," *IEEE Transaction on Ultrasonics, Frequencies, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 540~548.
- (2) Huang, J., Krishnaswamy, S. and Achenbach, J. D.,

- 1991, "Laser-Generation of Narrow-Band Surface Waves," *Ultrasonics Symposium*, pp.537~541.
- (3) Vella, P. J., Padmore, T. C. and Stegeman, G. I., 1974, "Nonlinear Surface-Wave Interaction : Parametric Mixing and Harmonic Generation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 5, pp. 1993~2006.
- (4) Duffer, C. E. and Burger, C. P., 1996, "Narrow Band Laser Ultrasonic NDE," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 15, pp. 593~600.
- (5) Lee, Y. C., Kim, J. O. and Achenbach, J. D., 1994, "Measurement of Stresses by Line-focus Acoustic Microscopy," *Ultrasonics*, Vol. 32, No. 5, pp. 359~365.
- (6) Berthelot, Y. H. and Jarzynski, J., 1990, "Directional Laser Generation and Detection of Ultrasound with Arrays of Optical Fibers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, pp. 463~470.
- (7) Kenderian, S. and Djordjevic, B. B., 2003, "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.
- (8) Viktorov, I. A., 1967, "Rayleigh and Lamb Waves Physical Theory and Applications," pp. 1~7, Plenum Press, New York.
- (9) Norris, A. N., 1991, "Symmetry Conditions for Third Order Elastic Moduli and Implications in Nonlinear Wave Theory," *Journal of Elasticity*, Vol. 25, No. 3, pp. 247~257.
- (10) Jeong, H. J., Nahm, S. H., Jhang, K. Y. and Nam, Y. H., 2002, "Evaluation of Fracture Toughness Degradation of CrMoV Rotor Steels Based on Ultrasonic Nonlinearity Measurements," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 147~154.
- (11) Choi, I. H., Beak, S. H., Lee, T. H. and Jhang, K. Y., 2010, "Evaluation of Fatigue Degradation in SUS316L Using Nonlinear Ultrasonics," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 34, No. 2, pp. 145~152.