

## 레이저 여기 표면파의 음향비선형성을 이용한 Al6061 합금의 소성변형 평가

### Assessment of Plastic Deformation in Al6061 Alloy using Acoustic Nonlinearity of Laser-Generated Surface Wave

김정석\*, 남태형\*, 최성호\*, 장경영\*\*†

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

**초 록** 본 연구의 목적은 비접촉식 레이저 여기 표면파의 비선형성 계측을 통하여 소성 변형된 알루미늄 합금의 소성변형을 평가하고자 하는 데 있다. 슬릿마스크와 고출력 펄스 레이저를 통한 선배열 레이저빔을 이용하여 협대역의 표면파를 발생 시켰으며, 표면파의 음향 비선형 특성을 이용하기 위하여 슬릿 마스크의 열림 폭과 간격을 변화시킴으로써 레이저 여기 표면파의 주파수 특성을 제어하였다. 스트로크 제어를 통한 인장시험을 통하여 단계별 인장 소성변형 정도를 달리하는 시험편을 제작하였다. 실험결과 인장 소성 변형율이 커짐에 따라 음향 비선형 파라미터는 증가하였으며, 경도 및 EBSD 측정결과 손상의 정도와 매우 밀접한 관계를 보였다. 결과적으로 본 연구에서의 레이저 여기 표면파의 비선형 평가기법은 알루미늄 합금의 소성변형 평가에 매우 유용할 것으로 판단된다.

**주요용어:** 레이저 여기 표면파, 협대역, 음향 비선형성, 인장소성변형

**Abstract** The objective of this study is to assess plastic deformation in aluminium alloy by acoustic nonlinearity of laser-generated surface waves. A line-arrayed laser beam made by high-power pulsed laser and mask slits is utilized to generate the narrowband surface wave and the frequency characteristics of laser-generated surface waves are controlled by varying the slit opening width and slit interval of mask slits. Various degrees of tensile deformation were induced by interrupting the tensile tests so as to obtain aluminum specimens with different degrees of plastic deformation. The experimental results show that the acoustic nonlinear parameter of a laser-generated surface wave increased with the level of tensile deformation and it has a good correlation with the results of micro-Vickers hardness test and electron backscatter diffraction (EBSD) test. Consequently, acoustic nonlinearity of laser-generated surface wave could be potential to characterize plastic deformation of aluminum alloy.

**Keywords:** Laser-Generated Surface Wave, Narrowband Wave, Acoustic Nonlinearity, Plastic Deformation

#### 1. 서 론

초음파의 음향 비선형성 계측을 통한 재료의 미소손상 진단 기술은 근래에 많은 연구자들에 의하여 발전하여 왔다. 최근의 이론적, 실험적 연

구 결과들은 재료의 미시 구조적 변화와 초음파의 비선형 파라미터 간에 직접적으로 연관이 있음을 보여주었다[1-6]. Cantrell은 수직 투과 종파를 이용하여 재료 내부의 전위와 초음파 비선형 파라미터와의 관계를 연구하였다[4-6]. 그리고

[접수일: 2012. 1. 2, 수정일: 2012. 2. 3, 게재확정일: 2012. 2. 10] \*한양대학교 자동차공학과, \*\*한양대학교 기계공학부, †Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr)

Blackshire는 피로에 의한 재료의 표면손상을 평가하기 위하여 표면파의 음향 비선형 특성을 이용하였다[7]. 하지만 이러한 기법들은 접촉식 탐촉자를 이용한 전통적인 방식으로써, 피검사체에 탐촉자 접근을 위한 환경과 접촉매질에 의한 오차 등은 기술의 적용성 측면에서 많은 제한이 있다.

이러한 문제를 극복하기 위한 방법으로써, 레이저를 이용한 비접촉식 표면파 가진 기술이 연구되었으며 이는 특히 표면파를 발생 시키는데 효과적인 기법인 것으로 밝혀졌다[8]. 일반적으로 음향 비선형 특성 계측을 위해서는 기본주파수 성분과 고조파 성분의 측정이 유리한 협대역의 주파수 성분을 가지는 초음파가 선호되며 다중 레이저빔, 간섭패턴, 마스크 슬릿등을 이용한 선배열 형태의 레이저 빔을 이용하여 협대역의 표면파를 발생시키기 위한 기법들이 연구되어져 왔다[9-11]. 이들 중, 마스크 슬릿을 이용한 기법은 매우 간편하면서도 효과적인 방법이며, Jhang은 이 기법을 통하여 발생된 협대역의 레이저 여기 표면파의 음향 비선형 특성을 계측하였다[12]. 특히, Shui와 Solodov는 종파보다도 표면파에 의한 고조파발생이 약  $10^3$ 배나 크다는 것을 물리적이고 분석적으로 보고하였다[13].

이상에 언급한 바와 같이 시험대상 구조물의 형상과 사용환경에 따른 시스템의 구성과 접근한계성으로 기존의 투과종파를 이용한 음향비선형성은 재료의 물리적인 특성값 즉, 고차탄성계수를 측정하는데는 유리하지만 구조물의 진단 및 평가에는 한계가 있다. 따라서 소성변형을 평가하고 그 정도를 모니터링하는데는 표면파가 유리하고, 일반금속의 경우 재료에 의한 비선형성으로 나타나는 2차 고조파성분의 진폭이 기본주파수성분의  $10^3 \sim 10^2$  정도로 매우 작은 값이므로 보다 고조파발생이 큰 표면파가 더욱 유리하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 비접촉식 기법으로써 인장 소성변형된 알루미늄 합금의 손상정도를 평가하기 위하여 Nd:YAG 펄스 레이저와 슬릿 마스크를 이용한 레이저 여기 표면파를 이용하였다. 또한 이론적 모델을 이용하여 마스크 슬릿을 설계함으로써 협대역의 주파수 성분을 가지는 표면파를 가진 시켰다. 시험편은 스트로크 제어에 의한 인장 시험을 통하여 단계별 손상정도를 가지는 시험편을 제작하였다. 실험 결과는 각 시험

편에 대하여 상대적인 비선형 파라미터 값으로 얻어졌으며, 이 결과는 마이크로 비커스 경도계를 이용한 경도측정 결과와 전자후방산란을 이용하여 소성변형으로 발달한 미시구조를 분석하고 이를 경도와 음향비선형의 변화와 관련하여 분석하였다.

## 2. 이 론

### 2.1 레이저 여기 표면파와 주파수 특성

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. 이때 종파(P), 횡파(S), 표면파(R) 등이 발생되며 특히 레이저에 의한 재료 표면의 변형은 표면파를 발생시키는데 매우 유리한 특성을 지닌다. 표면파는 표면을 따라 전파하는 탄성파로 입자의 진동은 면에 수직인 횡파성분과 면에 평행한 종파성분의 중첩으로 나타난다. 표면파는 표면으로부터 약 1파장 정도의 깊이에 에너지의 대부분이 집중되어 전파하기 때문에 재료의 표층부 결함검출에 매우 효과적이다.

한편 초음파 비선형 파라미터는 일반적으로 1차 기본주파수 성분 크기의 제곱과 재료의 비선형성에 의해 발생된 2차 고조파 성분 크기의 비로 계산되는데 레이저에 의해 발생된 표면파는 이론적으로 기본주파수 성분과 기본주파수 성분의 배수에 해당하는 2차 고조파 성분을 본질적으로 포함하는 것으로 알려져 있고[14], 이는 재료 비선형성에 의한 고조파 성분과의 중첩으로 재료만에 의한 초음파 비선형 파라미터를 정확히 계산하기 어렵게 한다. 따라서 본질적으로 포함되어 있는 2차 고조파 성분을 제거할 수 있는 적절한 슬릿 열림폭과 열림간격을 가지는 마스크 슬릿을 이용하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 레이저에 의해 발생된 표면파의 주파수특성을 먼저 분석하였다. 그 모델로 Fig. 1 과 같은 레이저와 선배열 슬릿 마스크에 의한 모델을 이용하였다. 여기서  $d$ 는 각 슬릿의 간격,  $w$ 는 슬릿의 열림 폭,  $\lambda$ 는 발생 표면파의 파장이다.

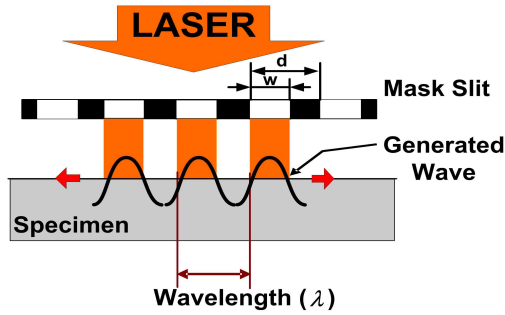


Fig. 1 Schematic diagram of surface wave generation by arrayed line laser beam with mask slit

선배열 레이저 빔에 의한 표면파의 주파수 스펙트럼  $G(f)$ 는 다음과 같은 수식을 통하여 구할 수 있다[14,15].

$$G(f) = NH(f)S(f), \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 주파수이고,  $H(f)$ 는 단일 레이저 빔에 의해 발생하는 표면파의 주파수 스펙트럼,  $S(f)$ 는 선배열의 특성에서 나타나는 배열함수를 의미한다.  $S(f)$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$S(f) = \frac{\sin(\pi N f \Delta t)}{N \sin(\pi f \Delta t)}. \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 슬릿 배열의 개수,  $\Delta t$ 는 슬릿의 시간간격 ( $\Delta t = d/c_R$ ),  $c_R$ 은 표면파의 속도이다.

선배열 레이저 빔에 의해 발생하는 레이저 여기 표면파의 주파수특성을 정확히 예측하기 위하여 유한요소해석(FEA)을 수행하였다. FEA 시뮬레이션 소프트웨어로, COMSOL Multiphysics를 이용하여 빔폭  $w$ 를 가지는 레이저빔 입사에 의하여 표면파를 발생시키고 이의 면외 변위를 측정하여 주파수 분석하는 일련의 과정을 수행하였다. 시뮬레이션 조건으로 레이저 빔의 공간적인 세기분포는 실제와 유사한 사각 펄스 빔모델로 하였으며, 시간적인 세기분포는 가우시안모델을 이용하였다. 사용된 대상재료로는 알루미늄 6061-T6를 적용하였고, 밀도, 열전도도, 열용량, 열팽창계수 등의 물성치는 온도에 의존하는 값으로 설정하였다.

Fig. 2의 결과는, 슬릿 열림간격  $d=1.168$  mm, 슬릿 열림폭  $w=0.067$  mm의 슬릿마스크를 이용하여 발생된 표면파의 주파수 특성을 나타내었다.

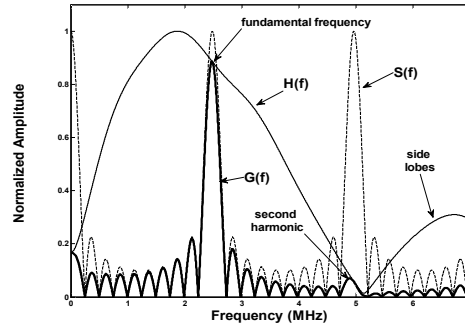


Fig. 2 Theoretical frequency spectra of narrowband surface waves generated by single and multiple line-arrayed rectangular pulse laser beams;  $H(f)$ ,  $S(f)$ , and  $G(f)$

선배열 레이저 빔에 의한 표면파의 주파수 스펙트럼  $G(f)$ 와 FEA 시뮬레이션을 통한 단일레이저 빔의 주파수 특성  $H(f)$ , 그리고 선배열 특성  $S(f)$ 를 나타내었다. 이 결과는 본질적으로 포함되어 있는 2차 고조파 성분 (5 MHz)을 최소화하여 기본 주파수 (2.5 MHz) 성분만 가지는 레이저 여기 표면파를 발생시킬 수 있음을 나타내며 따라서 재료만에 의한 초음파 비선형 파라미터 측정이 가능하다. 그러나 슬릿 열림폭 값  $w$ 를 달리하면  $H(f)$ 의 패턴이 달라지고 2차 고조파 성분의 발생을 피할 수 없게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 주파수분석을 통하여 레이저 표면파에서 나타나는 초기 2차 고조파 성분을 최소화할 수 있는 슬릿 열림폭을 결정하였다[16].

## 2.2 표면파의 음향 비선형성

이미 언급한 대로 표면파는 종파와 횡파의 중첩이며 무 응력상태의 접촉면을 갖으며 재료의 표면층을 따라서 전파하는 초음파로서 변위는 종파와 횡파의 성분들의 기여로 나타난다. 그리고 재료가 약한 2차의 비선형성을 갖으며,  $x$ 방향을 따라서 충분한 거리를 전파하는 표면파의 2차 고조파의  $x$ 와  $z$ 방향의 변위는 다음과 같이 표현된다[12].

$$u_x \approx A_2 k (e^{-2qz} - \frac{2qs}{k^2 + s^2} e^{-2sz}) \sin 2(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$u_z \approx A_2 q (e^{-2qz} - \frac{2k^2}{k^2 + s^2} e^{-2sz}) \cos 2(kx - \omega t) \quad (4)$$

여기서,  $q^2 = k_R^2 - k_L^2$ ,  $s^2 = k_R^2 - k_T^2$ ,  $k_R, k_L, k_T$ 는 각각 표면파, 종파, 횡파의 파수, 그리고  $A_2$ 는 2차 고조파 성분의 입자변위로 임의의 상수이다.

또한, 등방성재료에서 3차 탄성계수의 대칭성으로 인해 횡파에 의한 비선형성을 무시하므로써 표면파의 비선형성은 종파성분만이 기여를 하게 된다[17,18]. 따라서, 표면파의 음향 비선형성은 일반적인 종파에서의 비선형성 특성과 유사하게 된다. 즉, 전파하는 표면파에서 발생하는 2차 고조파의 변위  $A_2$ 은 기본파 성분의 변위  $A_1$ 의 제곱에 비례하며, 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$A_2 = \frac{\beta k_L^2 x A_1}{8} \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 재료의 고차탄성계수에 해당하는 비선형 파라미터,  $x$ 는 전파거리,  $A_1$ 과  $A_2$ 는 각각 입사된 기본주파수 성분과 2차고조파 성분의 입자변위를 의미한다.

식 (5)에서와 같이 비선형 파라미터  $\beta$ 는 기본파와 2차고조파 성분의 변위 및 파수와 전파거리에 크게 의존한다. 본 연구에서 주파수와 전파거리는 일정하게 유지하고 변위는 실험에서 측정되어진 기본파와 2차고조파의 진폭 크기로 간주하여 다음과 같은 상대적인 비선형 파라미터  $\beta'$ 를 계산하였다.

$$\beta' = \frac{\overline{A_2}}{\overline{A_1}^2} \quad (6)$$

여기서,  $\overline{A_1}$ 은 측정된 기본 주파수 성분의 진폭,  $\overline{A_2}$ 는 측정된 2배 주파수 성분의 진폭이다.

### 3. 실험

#### 3.1. 실험장치

선배열 레이저 소스를 이용한 협대역의 주파수를 가지는 레이저 여기 표면파를 발생시키기 위하여 Fig. 3과 같이 Nd:YAG 펄스 레이저 (파장 1064 nm, 펄스폭 5 ns), 빔 익스팬더, 슬릿 마스크를 이용하였다. 슬릿 마스크는 레이저의 회절 효과를 억제하기 위하여 시편 표면에 부착시켰다. 수신 탐측자로는 2차고조파 성분의 수신감도

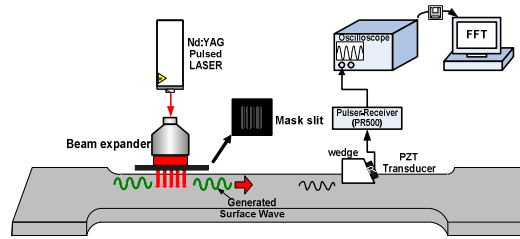


Fig. 3 Schematic diagram of acoustic nonlinearity measurement system consisted of Nd-YAG laser

를 높이기 위하여 5 MHz의 중심주파수와 밴드폭 (2.4 MHz ~ 8.6 MHz)을 가지는 공진형 압전 트랜스듀서를 사용하였으며, 표면파를 수신하기 위하여 웨지를 장착한 공진형 압전 소자를 이용하였다. 수신 신호는 펄스/리시버 (Panametrics PR500)를 이용해 증폭시킨 후, 디지털 오실로스코프 (Lecroy WS452)에서 A/D 변환되고 컴퓨터에서 주파수 분석하였다. 주파수 분석에서는 고속 푸리에 변환을 이용하여 기본파 성분과 2차 고조파 성분의 진폭으로부터 식 (6)을 이용하여 비선형 파라미터를 계산하였다.

#### 3.2. 시편준비

레이저 여기 표면파를 이용한 알루미늄합금의 소성변형을 위한 시험편으로 인장단계별 변형율을 달리한 시험편을 이용하였다. 금속물리학적으로 금속은 소성변형되면 재료내 전위의 증가와 슬립이 발달하게 된다. 따라서 인장변형을 통하여 재료에 마이크로 단위의 미세손상을 가하였으며, 인장 변형율을 달리한 서로 다른 손상의 정도를 가지는 시험편을 제작하였다. 시험편은 Al6061-T6의 소재로 350 × 25 × 10 mm의 크기의 열처리된 판상규격의 인장시험편을 이용하였다. 열처리 조건으로는 530 °C 에서 120 분 유지 후 상온의 물에 급냉처리하였다. 인장시험의 조건으로는 스트로크 제어를 통하여 표점거리 220 mm의 시험편을 2 mm/min의 속도로 인장하여 각각 0 %, 0.91 %, 2.73 %, 5.45 %, 9.09 %, 13.64 %, 18.18 %의 변형률을 가지는 시험편을 제작 하였다. 이때 파단연신율은 22 %인 것으로 나타났다.

4. 실험결과

Fig. 4는 레이저 여기 표면파를 이용하여 수신한 파형 및 이의 주파수 분석 결과를 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이, 선배열 레이저 빔에 의하여 발생된 표면파는 톤버스트 형태를 나타내었으며 협대역의 2.5 MHz 기본주파수 성분과, 5 MHz의 2차고조파 성분이 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 소성변형률에 따른 상대적 비선형 파라미터를 구한 결과이다. 비선형 파라미터 값은 인장 변형되지 않은 시편에서의 값을 1로 하여 상대적인 값을 비교하였다. 10회 측정된 결과로부터, 비선형 파라미터 값은 변형률 18.18%에서 인장되지 않은 초기 시편에 비해 약 34% 증가하는 결과를 보였으며, 인장변형률이 커짐에 따라서 비선형 파라미터 또한 증가하는 경향을 보였다.

알루미늄 시험편의 응력-변형률 곡선과 함께 인장 변형률에 따른 경도값의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 항복강도를 넘어서 변형율이 증가함에 따라 응력이 증가하는 가공경화현상이 크게

나타났다. 각각의 변형율에 따른 경도측정은 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. 경도값도 변형율이 증가함에 따라서 증가하였다. 이는 이미 설명한 바와 같이 변형율의 증가에 따른 가공경화현상에 기인하는 것으로 생각된다.

일반적으로 금속재료의 경우 재결정온도 이하의 낮은 온도에서 압연, 단조 등과 같은 소성변형이 일어나면 변형량에 의존하여 재료내부에는 전위가 생성되고 증가하여 기계적 물성이 향상되는 현상이 나타난다. 본 연구에서도 인장변형율이 증가함에 따라 가공경화현상이 나타났고 경도값이 증가하였다. 이는 소성변형으로 인해 재료내부에 전위가 생성되고 밀도가 증가하기 때문이다. 따라서 재료는 소성변형 구간 이후 경도가 급격히 증가하여 파단 전 초기상태보다 약 40% 증가하는 결과를 보였다. 또한 이는 Fig. 5의 상대적 비선형 파라미터 값과 유사한 경향을 보였다.

인장변형에 의한 전위의 증가를 미시적인 관점에서 분석하기 위해 전자후방산란회절 (Electron BackScatter diffraction; EBSD)를 이용하였다. Fig. 7은 EBSD를 통한 결정립계 해석 결과를 나타낸다. 측정크기는  $350 \times 350 \mu\text{m}$ 의 크기를 350 배율로 측정하였다. 그림에서 굵고 검은 실선은 매우 선명하며 결정입계를 보여주고 있다. 이렇게 EBSD는 다결정체고체에서 인접 결정과의 결정학적 방위차 (즉, 원자간 배열이 규칙적인 배열에서 벌어진 각도)를 정량적으로 분석하게 된다. 이를 방위각이  $2\sim 15^\circ$ 인 저경각입계와  $15\sim 180^\circ$ 인 고경각입계를 각각 가는 실선 (빨간색)과 굵은 실선 (검은색)으로 나타내었다.

일반적으로 방위각이  $15^\circ$ 가 넘는 고경각입계는 미세조직상으로 결정입계에 해당하며, 특히 저경

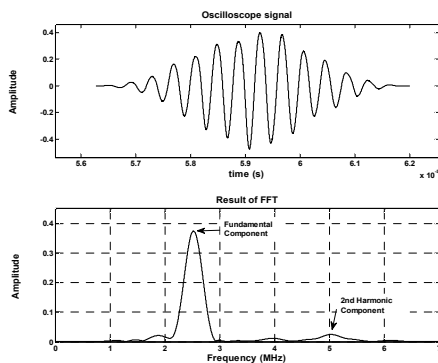


Fig. 4 Received signal and result of FFT

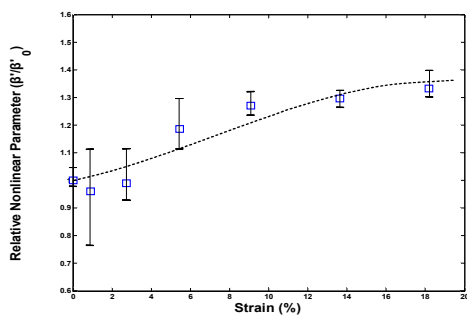


Fig. 5 Variation in relative nonlinear parameter as a result of tensile strain

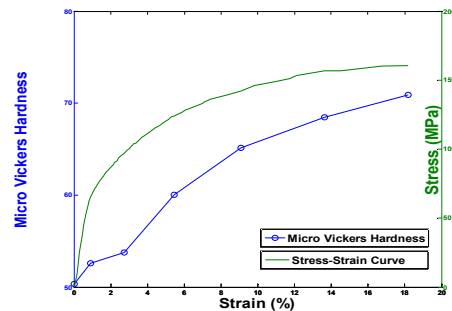


Fig. 6 Stress-strain curve of aluminum alloy and Vickers hardness with tensile strain

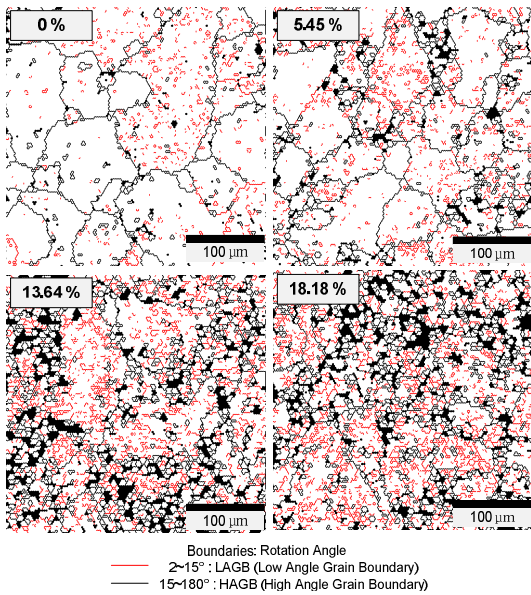


Fig. 7 Variation in misorientation angle at each tensile strain showing increase in fraction of low angle grain boundary (LAGB); (a) 0 %, (b) 5.45 %, (c) 13.64 %, (d) 18.18 %

각입계는 미세 보이드, 전위 등에 의하여 나타난다. 일반적으로 금속재료가 소성변형되면 격자결합, 주로 전위밀도의 증가를 나타낸다. Fig. 7에서 보듯이 인장변형률이 증가함에 따라 입계내에서 저각각입계의 비율이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 인장 소성변형의 증가는 재료내에 전위를 발달시키게 된다. 전위는 물리적으로 재료내에 국부적인 응력장을 형성하고 결정 격자의 뒤틀림을 유발하며 기계적으로 재료의 경도를 증가시키고 재료의 비선형성을 증가시키게 된다. 이상의 변화로 인해 초음파가 소성변형된 재료를 전파할 때 재료비선형의 영향으로 초음파의 왜곡이 발생하고 2차 고조파를 발생시키게 된다. 결과적으로 본 연구에서 인장소성변형으로 발달한 전위가 레이저 여기 표면파의 음향비선형성을 증가시킨 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 인장 소성 변형된 알루미늄 합금의 손상 정도를 평가하기 위하여 협대역 레이저 여기 표면파를 이용한 음향 비선형성 측정 기

법을 제안하였다. 마스크 슬릿을 이용한 선배열 형태의 레이저 빔을 이용하여 협대역의 주파수 성분을 가지는 표면파를 발생시킬 수 있었으며, 이때 발생된 레이저 여기 표면파의 주파수 특성을 유한요소해석을 통하여 예측하였다. 이를 통하여 본질적으로 존재하는 2배주파수 성분을 최소화 할 수 있는 슬릿 열림 폭의 값을 구하였다. 또한 인장 소성 변형된 알루미늄 합금의 시험편에 대한 상대적인 비선형 파라미터를 구하였다. 그 결과 상대적인 비선형 파라미터 값이 인장변형률이 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 경도 측정 결과와 EBSD 측정결과와 비교해 볼 때 미시 구조적 손상 정도와 밀접한 관계가 있었다. 이와 같은 결과로 볼 때, 레이저 여기 표면파의 음향 비선형 특성의 계측을 통한 소성변형에 의한 미소손상 진단이 가능할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 원전기술혁신사업 분야의 연구지원으로 이루어 졌습니다. (20101620100080)

## 참고문헌

- [1] V. V. S. Jaya Rao, E. Kannan, R. V. Prakash, and K. Balasubramaniam, "Fatigue damage characterization using surface acoustic wave nonlinearity in aluminum alloy AA7175-T7351," *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, pp. 123508 (2008)
- [2] C. S. Kim, I. K. Park, K. Y. Jhang and C. Y. Hyun, "Long-term aging diagnosis of rotor steel using acoustic nonlinearity," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 6, pp. 642-629 (2011)
- [3] 백승현, 이태훈, 김정석, 장경영, "열처리된 SA508 합금에서의 초음파 비선형성 측정: 결정립과 석출물 영향", *비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 5, pp. 451-457 (2010)
- [4] J. H. Cantrell, "Dependence of microelastic-plastic nonlinearity of martensitic stainless steel on fatigue damage accumulation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, pp. 063508 (2006)

- [5] J. H. Cantrell and X. G. Zhang, "Nonlinear Acoustic Response from Precipitate-Matrix Misfit in a Dislocation Network," *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, pp. 15-18 (1998)
- [6] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 487-490 (2001)
- [7] J. L. Blackshire, S. Sathish, J. Na and J. Frouin, "Nonlinear Laser Ultrasonic Measurements of Localized Fatigue Damage," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, pp. 1479-1488 (2003)
- [8] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser Ultrasonics: Techniques and Applications", Adam Hilger, Bristol, (1990)
- [9] T. W. Murray, J. B. Deaton Jr. and J. W. Wagner, "Experimental evaluation of enhanced generation of ultrasonic waves using an array of laser sources," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 69-77 (1996)
- [10] A. Harata, N. Nishimura and T. Sawada, "Laser-induced surface acoustic-waves and photothermal surface gratings generated by crossing 2 pulsed laser-beams," *Applied Physics Letters*, Vol. 57, pp. 132-134 (1990)
- [11] D. Royer and E. Dieulesaint, "Analysis of thermal generation of Rayleigh waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 56, pp. 2507-2511 (1984)
- [12] T. H. Nam, S. H. Choi, T. H. Lee and K. Y. Jhang, C. S. Kim, "Acoustic Nonlinearity of Narrowband Laser-generated Surface waves in the Bending Fatigue of Al6061 Alloy," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 57, pp. 1212-1217 (2010)
- [13] Y. Shui, Y. Solodov, "Nonlinear Properties of Rayleigh and Stoneley Waves in Solids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 64, pp. 6155-6165 (1988)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] S. H. Choi, T. H. Nam, K. Y. Jhang and C. S. Kim, "Frequency Response of Narrowband Surface Waves Generated by Laser Beams Spatially Modulated with a Line-arrayed Slit Mask," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 60, No. 1, pp. 26-30 (2012)
- [17] 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)
- [18] 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)