

유한요소법을 이용한 레이저 유도 초음파와 표면 균열과의 상호작용 모델링

Finite Element Simulation of Laser-Generated Ultrasound and Interaction with Surface Breaking Cracks

정현조*[†], 박문철**

Hyunjo Jeong*[†] and Moon-Cheol Park**

초 록 탄성매질에서 레이저 여기에 의한 열탄성 영역에서의 초음파 발생 현상과 표면 균열과의 상호작용을 유한요소법으로 모델링하였다. 반무한 탄성체 표면에 집중된 레이저 선원을 전단 쌍극자(shear dipole)로 모델링하고, 2차원 평면 변형을 유한요소법을 사용하였다. 발생된 표면파의 변위와 종파 및 횡파의 지향성을 관찰함으로써 전단 쌍극자-유한요소 모델의 타당성을 조사하였다. 표면파와 균열(기계가공된 2차원 홈)과의 상호작용을 관찰하기 위하여 2가지 경우를 고려하였다. 먼저 레이저 소스와 수신 위치가 균열에 대하여 모두 고정되어 있는 경우, 다음으로 수신자가 고정되어 있고 소스가 시험체 표면 위를 이동하는 주사형의 경우이다. 첫 번째 경우에 균열 깊이 0.3-5.0 mm ($\lambda_R/d=0.21\sim 3.45$)에 대하여 균열 상단과 하단에서 각각 반사된 파의 변위로부터 균열깊이를 측정할 수 있음을 보였고, 두 번째 경우에 레이저 소스가 결합 위를 주사할 때 발생하는 반사파의 큰 진폭 변화를 통하여 파장보다 한 차원 낮은 깊이의 균열을 탐지할 수 있음을 보였다.

주요용어: 레이저 여기 초음파, 표면균열, 유한요소법, 전단쌍극자, 고정형 소스, 주사형 소스

Abstract A finite element method is used to simulate interaction of laser-based ultrasounds with surface breaking cracks in elastic media. The laser line source focused on the surface of semi-infinite medium is modeled as a shear dipole in 2-D plane strain finite elements. The shear dipole-finite element model is found to give correct directivity patterns for generated longitudinal and shear waves. The interaction of surface waves with surface breaking cracks (2-D machined slot) is considered in two ways. Both the source and receiver are fixed with respect to the cracks in the first case, while the source is moving in another case. It is shown that the crack depth tested in the range of 0.3-5.0 mm ($\lambda_R/d=0.21\sim 3.45$) can be measured using the corner reflected waves produced by the fixed laser source. The moving laser source is found to cause a large amplitude change of reflected waves near crack, and the crack whose depth is one order lower than the wavelength can be detected from this change.

Keywords: laser ultrasonics, surface breaking crack, finite element method, shear dipole, fixed source, scanning source

1. 서 론

레이저를 이용한 초음파의 발생 및 감지는 근본적으로 비접촉식 초음파 송수신 기술로서 최근에 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1,2]. 비파괴검사 분야에서 레이저 유도 초음파는 재래식 초음파에 비하여 초음파의 비접촉식 발생 및 감지, 높은 공간 분해능, 용이한 스캐닝, 절대 변위 측정, 광대역과 협대역의 신호발생, 광학을 이용한 장치의 원격 배치, 곡면 및 거친 표면과 고온으로 인하여 접근이 어려운 지점의 적용 등 많은 장점을 가지고 있다. 일반적으로 레이저 입사에 의해 종파, 횡파, 표면파, Lamb 파를 발생시킬 수 있으며, 이들은 재료 내부의 결함 검출, 재료 물성 평가, 탄성파 전파 연구 등에 사용된다. 표면 균열의 검출에는 Rayleigh 파와 Lamb 파가 자주 사용되고 있다.

펄스 레이저가 고체 표면에 입사되면 다양한 물리적 현상이 발생한다. 레이저 출력에 따라 저출력 레이저 입사에 의해 열탄성 응력 및 변형률을 발생시키는 열탄성 영역과 고출력 레이저의 입사에 의해 용발을 발생시키는 용발영역으로 분류한다. 비파괴검사의 목적으로는 열탄성 영역에서의 레이저에 의해 발생되는 초음파를 필요로 한다. 레이저에 의한 초음파의 발생 기구와 더불어 초음파의 전파와 결함과의 상호작용으로 인한 파형을 정확히 예측하는 것은 결과를 해석하는데 있어서 매우 중요하다. Sinclair[3]와 Rose[4]는 각각 반무한체와 평판에서 점원과 표면팽창중심(surface center of expansion) 모델을 이용하여 진앙점에서의 해를 제시하였다. Hutchins 등[5]은 레이저 여기 초음파의 지향패턴에 대한 예측과 실험을 수행하였으며, Bernstein 등[6]은 레이저 선 조명에 의한 지향성과 점원에 의한 지향성을 비교하였다. Scala와 Doyle[7]은 레이저 여기 표면파의 시간 및 주파수 영역에서의 특성을 다루었고, Doyle과 Scala[8]는 실린더 렌즈에 의한 레이저 선 조명이 발생시키는 Rayleigh 파의 근거리장 파형이 단극 하강 특성이 있음을 보였다. Royer 등[9]은 열탄성 영역에서 레이저 선원에 의한 Rayleigh 파의 파형을 음장별로 구하였다.

Aindow 등[10]과 Scruby 등[11]은 레이저 유도 초음파와 time-of-flight 기술[12]을 접목시켜 재료 내부에 존재하는 균열로부터 각각 실험적, 이론적인 B-scan 데이터를 획득하였다. Cooper 등[13]은

레이저 유도 표면파가 재료표면에 가공된 홈으로부터 반사되는 파들을 식별함으로써 홈 깊이를 결정할 수 있음을 보였다. Kromine 등[14]은 주사형 레이저 소스(SLS)를 이용하여 미세한 표면 피로균열을 효과적으로 탐지할 수 있음을 보였다. 이 기법은 레이저 소스가 결함부위를 지날 때 발생하는 표면파의 진폭 및 스펙트럼의 변화에 기초하고 있다. 최근에 Sohn과 Krishnaswamy [15]는 질량-스프링 격자 모델(MSLM)과 레이저 소스의 전단 쌍극자 등가성을 이용하여 SLS에 의해 발생하는 표면파의 특성을 설명하였다.

본 논문에서는 탄성매질에서 레이저 선원에 의한 열탄성 영역에서의 초음파 발생과 표면 균열과의 상호작용을 유한요소법과 등가 전단 쌍극자로 모델링하였다. 발생된 표면파와 균열과의 상호작용을 살펴보기 위하여 레이저 소스가 균열에 대하여 고정되어 있는 경우[Fig. 1(a)] 소스가 시험체 표면 위를 이동하는 주사형[Fig. 1(b)]을 고려하였다.

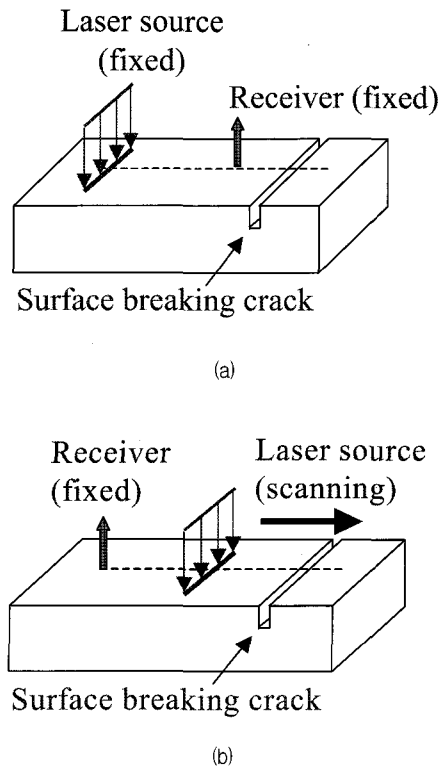


Fig. 1 Schematic configurations of laser based ultrasonic testing for surface-breaking cracks: (a) Fixed laser source, (b) Scanning laser source with respect to the crack

고정형의 경우 결함의 탐지 및 평가는 균열에서 반사된 표면파의 식별을 필요로 하며, 결함의 크기가 작을수록 어려워진다. 이를 해결하기 위한 주사형의 경우에는 레이저 소스가 균열 위를 통과할 때 발생하는 표면파의 변화를 직접 관찰하므로 결함의 탐지가 훨씬 수월해진다. 여기서는 이에 대한 모델링 방법을 소개하고 수치해석 결과를 제시하며 실험 결과와 비교하여 검토한다.

2. 동탄성 유한요소 해석

동탄성 문제의 유한요소 정식화는 물체를 요소로 분할하여 각 요소내의 변위를 절점에서의 변위와 형상함수를 사용하여 근사화한 총 포텐셜에너지를 최소화함으로써 얻을 수 있고, 요소행렬과 하중벡터를 조합하면 다음의 전체 행렬식을 얻을 수 있다.

$$KU + M\dot{U} = F(t) \tag{1}$$

여기서 K 와 M 는 각각 전체 강성행렬과 질량행렬, $F(t)$ 는 하중벡터, U 와 \dot{U} 는 각각 변위와 속도벡터이다.

유한요소모델에서 시간 및 공간 분해능은 수치결과의 수렴에 절대적으로 중요하다. 적분 시간간격 Δt 는 해의 정확도에 대한히 중요하다. 일반적으로 모델의 정확도는 더 작은 시간 간격을 사용할수록 그만큼 더 좋아진다. 반면에 너무 작은 간격을 사용하면 계산시간이 많이 소요된다. 따라서 절충이 필요하다. Newmark 시간적분법에서는 최고 주파수 1 사이클당 20개의 Δt 를 사용한다[16]. 이 규칙은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{\max}} \tag{2}$$

여기서 f_{\max} 은 관심있는 최고 주파수이다. 또 필요한 시간 간격은 가장 속도가 빠른 파가 연속한 절점 사이를 전파하는데 필요한 시간과 관련될 수 있다. 즉, 가장 빠른 파가 한 시간간격 동안 절점사이를 전파하지 않아야 한다는 것이다. 이를 식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\Delta t < \frac{l_e}{V_{LM}} \tag{3}$$

여기서 l_e 는 절점 사이의 가장 작은 간격이며 V_{LM} 은 가장 큰 종파속도이다.

요소의 크기는 전파하는 파들이 공간적으로 분해되도록 선택한다. 참고문헌 [17]에서는 한 파장당 10개 이상의 절점 사용을 권하고 있으며, 참고문헌 [16]에서는 이보다 훨씬 높은(한 파장당 20개의 절점) 숫자를 권하고 있다. 참고문헌 [16]의 권장사항을 식으로 표현하면

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \tag{4}$$

여기서 l_e 는 요소의 길이를 λ_{\min} 은 가장 짧은 파장이다.

3. 전단 쌍극자에 의한 레이저 여기 모델링

3.1. 레이저 선원의 2차원 쌍극자 모델

등방성 재료 내부의 한 점에 열탄성 영역의 레이저 소스가 작용할 때, 이 소스는 동일한 강도를 갖는 3개의 상호 수직한 힘 쌍극자로 표현할 수 있다 [18]. 열전도를 무시하면 쌍극자의 강도는 레이저 여기에 의한 온도 상승에 비례한다[1]. 자유표면에 입사한 레이저 점원의 경우에 레이저 소스를 한 점에서 발생하는 팽창의 중심으로 취급하는 표면팽창 중심(surface center of expansion) 접근법이 제안되었다[4]. 이 표면팽창중심은 표면에 평행한 한 쌍의 상호직교하는 쌍극자와 동등하다는 사실이 알려졌다. 선 집속에 의하여 아주 가느다란 레이저 선원이 표면에 입사할 때, 팽창의 중심은 표면에 평행하며 선원에 수직한 방향의 단일 전단 쌍극자가 된다.

Fig. 2는 열탄성 영역에서 레이저 펄스의 여기에 의한 초음파 발생을 모델링하기 위한 단계별 과정을 보여준다. 먼저 (a) Q-스위칭된 레이저 펄스가 선 집속에 의해 시험체 표면에 가해지고, (b) 이 때 열탄성 영역에서의 레이저 여기는 이에 상당하는 표면에서의 전단 쌍극자로 나타내지며, (c) 2-D 유한요소 모델에서 한 쌍의 전단 쌍극자는 인접한 두 절점에 크기가 같고 방향이 반대인 힘으로 작용하게 된다. 여기서는 레이저 선원의 각 선소(line element)를 점원(point source)의 쌍극자로 가정하였으나, 선원이 공간적으로 Gaussian 모양을 갖는 쌍극자의 분포도 위와 유사하게 모델링할 수 있다.

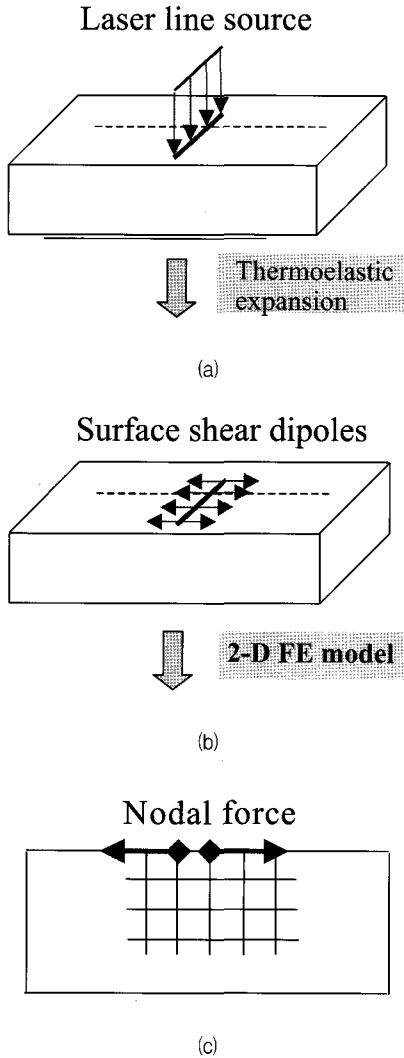


Fig. 2 Two dimensional FE modeling of thermoelastic laser generation of ultrasound: (a) Line-focused pulsed laser source, (b) Equivalent surface shear dipoles, (c) 2-D plane strain FE model

3.2. 유한요소법에 의한 초음파 전파 해석

3.1절의 쌍극자 모델이 열탄성 영역에서의 레이저 여기 초음파 발생에 적합함을 시험하기 위하여 먼저 균열을 포함하지 않는 40 mm × 20 mm 크기의 반무한 고체를 고려하였다. 재료는 Al, 밀도 $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$, 종파속도 $C_L = 6300 \text{ m/s}$, 횡파

속도 $C_T = 3100 \text{ m/s}$, 표면파 속도 $C_R = 2895 \text{ m/s}$ 이다. 2장에서 언급한 바와 같이 안정적인 해를 얻기 위하여 $f = 2 \text{ MHz}$ (이 경우에 표면파의 파장 $\lambda_R = 1.45 \text{ mm}$)에서 가장 짧은 표면파의 한 파장당 10개 이상의 요소를 가지도록 요소의 크기 $l_e = 0.1 \text{ mm}$, 적분시간 간격 $\Delta t = 0.025 \mu\text{s}$ 를 사용하였다. 상용 유한요소 해석 프로그램 ANSYS의 2차원 평면변형률, 4절점 등대개변수 요소를 사용하였다. 전 영역에 걸쳐 균일한 크기의 요소가 사용되었고, 절점에 가해진 힘은 주파수 2 MHz의 반사이크 사인파이다.

Fig. 3은 FEM 계산 결과에 의한 시간 $t = 0.3 \mu\text{s}$ 에서 변위장을 나타내는데 표면파, 헤드 웨이브, 횡파, 종파를 관찰할 수 있다. Fig. 4는 재료내부를 전파하는 종파와 횡파의 지향성을 보여주며, 이 결과들은 해석적 결과[6]와 잘 일치한다. Fig. 5는 레이저 소스로부터 오른쪽으로 각각 1.0, 2.0 mm 떨어진 위치에서 계산한 표면의 수직변위를 나타낸다. 그림에서 먼저 도달하는 파가 종파속도로 표면을 따라 전파하는 헤드 웨이브이고, 뒤이어 나타나는 큰 진폭의 파가 표면파이다. 표면파 시작 전에 아주 미약한 횡파를 관찰할 수 있다. FE 모델에 의해 계산된 이와 같은 파의 거동은 다른 해석적 결과와 잘 일치하고 있다[19].

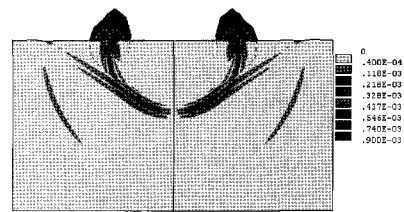


Fig. 3 Calculated displacement distribution

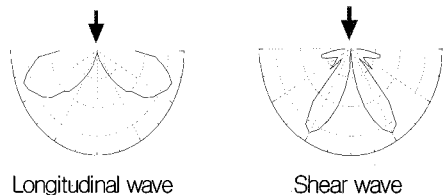


Fig. 4 Calculated directivity patterns of laser generated ultrasound

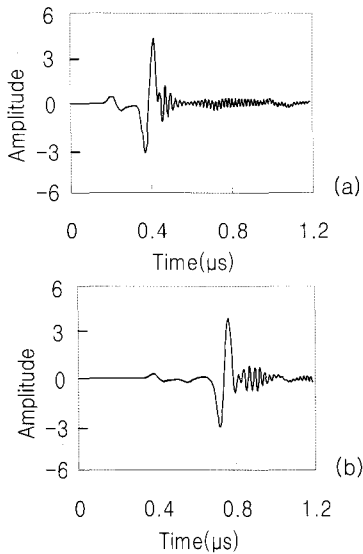


Fig. 5 Vertical displacements on the surface at various source-to-receiver distances: (a) 1.0 mm, (b) 2.0 mm

Fig. 5에서 관찰한 최대 변위 성분의 파가 Rayleigh 표면파인가를 알아보기 위하여 레이저 소스로부터 약 $25 \lambda_R$ 위치에서 반무한체의 깊이에 따른 표면파의 면내 변위와 면외 변위를 구하고 이론값[20]과 비교하였다. Fig. 6은 이 결과 비교를 보여주며, 변위는 해당 최대변위 값으로 각각 정규화하였다. 등가 전단 쌍극자에 의한 FEM 모델은 이론적 정해와 잘 일치하며, 이로부터 균열의 특성을 파악하기 위하여 여기서 사용된 파는 Rayleigh 표면파임을 알 수 있다.

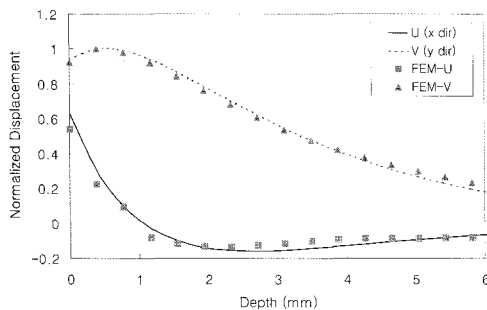


Fig. 6 Comparisons between FEM results and exact theory of the normalized in-plane and out-of-plane Rayleigh wave displacement components

4. 표면 균열에 대한 고정 레이저 소스

열탄성 영역에서 레이저 선원에 의한 표면파의 발생을 3장에서 고찰하였고, 여기서는 발생된 표면파와 표면 균열과의 상호작용을 다룬다. 재래식 초음파법에서 표면파를 이용한 표면 균열 탐지와 균열 깊이 결정은 이미 잘 확립되어 있다[20]. 그 원리는 펄스-에코 또는 피치-캐치 방법을 사용하여 균열로부터 반사 또는 투과된 파를 식별함으로써 균열의 유무와 그 깊이를 알 수 있다는 것이다. 레이저 발생 초음파는 비접촉식 발생과 수신이 가능하므로 재래식 초음파 검사에 비하여 많은 관심이 모아지고 있다. 특히 균열 깊이가 입사 표면파의 파장보다 아주 작은 경우 표면파의 에너지가 대부분 균열 아래쪽으로 통과해 버리므로 관찰된 파의 진폭이 아주 작아 균열 탐지가 어렵게 된다. 이러한 경우에는 다음 장에서 소개되는 주사형 레이저 소스를 사용하여 표면 균열의 탐지와 깊이의 계산이 가능하다.

레이저 발생 초음파와 표면 균열과의 상호작용을 살펴보기 위하여 레이저 소스와 수신자(광학적 간섭계)가 균열에 대하여 모두 고정되어 있는 경우를 여기서 고려한다. 유한요소 모델의 개념도와 사용한 파라미터들이 Fig. 7에 나와 있다. 표면 균열은 깊이 0.3-5.0 mm의 기계가공된 2차원 홈이며, 표면에 수직이다. 이 모델은 Cooper 등[13]이 사용한 실험모델과 동일하다.

Fig. 8(a)는 홈의 깊이가 0.7 mm일 때 홈으로부터 왼쪽으로 6 mm 떨어진 위치에서 계산한 표면파의 파형이고 (펄스-에코 모드), Fig. 8(b)는 홈으로부터 오른쪽으로 10 mm 떨어진 위치에서 계산한 표면파의 파형이다 (투과 모드). 펄스-에코 모드의 경우에 비교적 큰 진폭의 반사파를 분명하게 관찰할 수 있으며, 이들 반사파는 홈의 상단과 하단으로부터 각각 반사된 것이다. 이 두 반사파를 식별하여 그 도달시간 차이를 계산하면 홈의 깊이를 구할 수 있다. 이에 기초하여 홈 깊이 $d=0.3-5.0$ mm ($\lambda_R/d=0.21\sim3.45$)에 대하여 펄스-에코 방법으로 모델링하고 홈의 깊이를 구하였다. Fig. 8(c)는 이에 대한 모델링 결과를 보여준다. 홈 깊이가 깊을수록 홈 상단과 하단에서 반사된 신호 사이의 거리가 멀어짐이 관찰된다. 홈 깊이는 두 가지 방법으로 구하였다. 첫 번째 방법에서는 제 1 반사파와 제 2 반사파 모두 Rayleigh 표면파로서 처음 전파된 경로를 따라 반전된다고 가정하였다. AI에서의

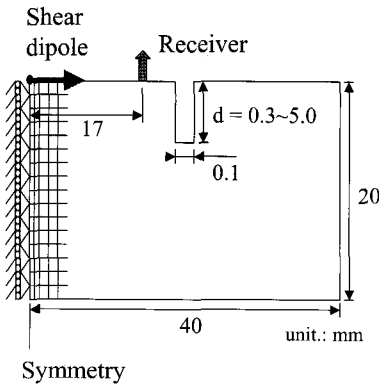
Rayleigh 표면파 속도 $V_R = 2895 \text{ m/s}$, 두 반사파의 도달시간 차이를 Δt 라고 하면, $d = V_R(\Delta t)$ 이다.

계산결과에 의하면 d 가 커질수록 계산 결과와 공칭 홈 깊이의 차이가 커진다. 그 주된 이유는 홈 하단으로부터 반사된 파의 경로에 기인한다. Bond [21], Pekeris와 Lifson [22]에 따르면, 홈의 상단을 통과한 표면파가 하단에서는 회절된 횡파로 모드 변환되어 임계각으로 전파하고, 표면에서는 다시 표면파로 전파한다. Al의 경우 임계각 $\theta \approx 30^\circ$ 로 알려져 있다. 이를 고려하여 펄스-에코 모드에서 관찰된 두 반사파 사이의 시간차를 계산하면

$$\Delta t = d/V_R + d/V_S \cos \theta - d \tan \theta / V_R \quad (5)$$

이고, $\theta \approx 30^\circ$ 를 사용하면 홈 깊이

$$d = \sqrt{3} \Delta t V_R V_S / ((\sqrt{3} - 1) V_S + 2 V_R) \quad (6)$$



Symmetry

- Material : Al
- 4 node isoparametric element
- Element size(l_e) : 0.1 mm
- Time step(Δt) : 0.025 μs
- $f(t) = \sin 2\pi ft$
- Center frequency : 2 MHz

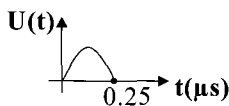
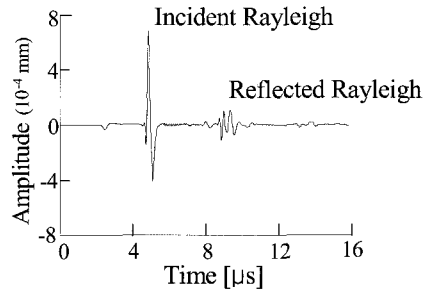
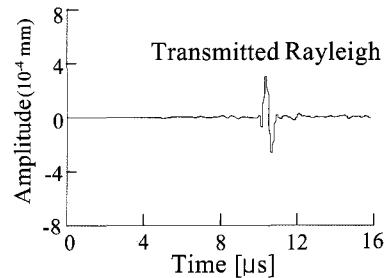


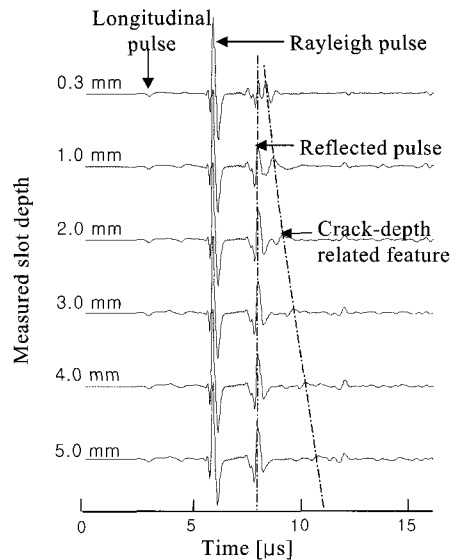
Fig. 7 FE modeling of laser-generated Rayleigh pulse with surface-breaking slot in an aluminum. The thermoelastic laser source is modeled as a surface shear dipole of half cycle sine wave



(a)



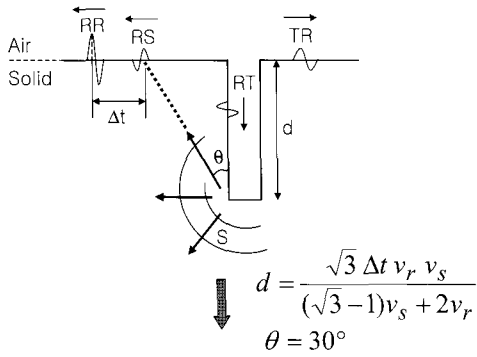
(b)



(c)

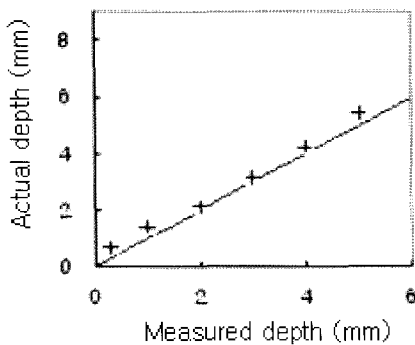
Fig. 8 Interaction of a laser-generated Rayleigh wave with a machined slot in an aluminum block: (a) slot depth = 0.7 mm, pulse-echo mode, source-to-slot distance = 25 mm, detector-to-slot distance = 6 mm (b) slot depth = 0.7 mm, transmission mode, detector-to-slot distance = 10 mm (c) variation of second reflected peak with slot depth of 0.3-5.0 mm, pulse-echo mode, source-to-slot distance = 25 mm, detector-to-slot distance = 6 mm

이다. 이에 관한 물리적 상호작용과 홈 깊이 계산 결과가 Fig. 9에 나와 있다. $d=0.3-0.5$ mm의 전범위에서 계산한 홈 깊이는 공칭 깊이와 아주 잘 일치한다.



- RR1: Reflected Rayleigh pulse at top corner
- RR2: Reflected Rayleigh pulse at lower crack tip
- RT: Rayleigh pulse transmitted around top corner
- TR: Transmitted Rayleigh pulse
- RR: Reflected Rayleigh pulse at top corner
- RS: Rayleigh pulse resulting from the diffracted shear wave S at lower crack tip
- S: Diffracted shear wave at lower crack tip
- d: Crack depth
- Δt : Time difference
- v_r : Rayleigh wave velocity
- v_s : Shear wave velocity

(a)



(b)

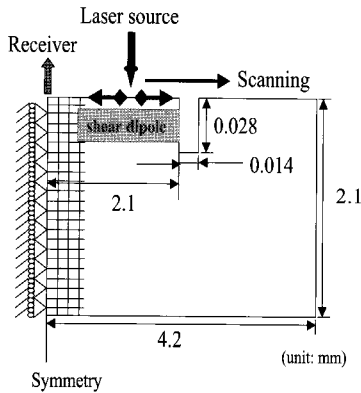
Fig. 9 (a) Physical process involved when an incident Rayleigh pulse interacts with a slot to produce reflected and transmitted surface pulse, (b) A comparison of mechanical and ultrasonic measurements to determine slot depths. Ultrasonic measurements were based on a Rayleigh-shear-Rayleigh interaction

5. 표면 균열에 대한 주사 레이저 소스

주사 레이저 소스에 의해 발생된 초음파는 미소한 표면 균열을 탐지하는데 아주 효과적이 실험적으로 밝혀지고 있다[14]. 주사 레이저 소스 방법에서는 레이저 소스가 시험체 표면의 건전 부위와 결함 부위를 지날 때 발생하는 표면파의 진폭 변화 또는 스펙트럼 변화를 관찰함으로써 표면 균열을 탐상하게 된다. 레이저 소스가 균열 가까이 있을 때 (균열 직전, 균열 위, 또는 균열 직후), 표면파의 발생 조건이 달라지므로 그 진폭과 스펙트럼이 영향을 받는다. 여기서는 전단 쌍극자와 유한요소 모델을 사용하여 홈의 깊이가 표면파의 파장에 비하여 아주 작은 경우에도 표면 균열을 탐지할 수 있는지 살펴본다. 주파수 $f=12.5$ MHz 일 때, Al에서 표면파의 파장은 약 0.23 mm이며, 여기서 사용한 홈 깊이는 이 보다 한 차원 낮은 $d=0.028$ mm이다. 유한요소 모델의 개념도와 사용한 파라미터들이 Fig. 10에 나와 있다. 이 모델은 Sohn과 Krishnaswamy[15]가 사용한 mass-spring-lattice (MSLM) 모델과 유사하다. 고정된 수신자와 홈 사이의 거리는 2.1 mm이며, 레이저 소스가 홈의 왼쪽에서부터 시작하여 오른쪽으로 주사할 때 여러 수신 위치에서의 표면파를 계산하였다.

Fig. 11은 여러 위치에서 계산한 표면파의 수직 변위를 보여준다. 레이저 소스가 결함으로부터 멀리 떨어진 경우(위치 1, 2) 직접 발생한 헤드 웨이브와 표면파를 관찰할 수 있다. 표면 균열 바로 직전인 위치 4에서는 직접 발생한 표면파의 진폭이 크게 증가함을 알 수 있다. 균열 뒤에 (위치 7) 소스가 위치한 경우 균열에 의한 산란으로 인하여 표면파의 진폭이 위치 1에서 보다 더 작아진다.

고정된 수신자로부터 측정된 주사 레이저 소스의 위치에 따른 표면파 수직변위의 peak-to-peak 진폭을 계산하여 Fig. 12에 나타내었다. 앞에서 관찰한 바와 같이 균열로부터 멀리 떨어진 앞, 뒤 위치에서는 거의 변화없이 낮은 진폭을 보이나 균열 근처에서는 peak-to-peak 진폭이 크게 증가하며, 균열 바로 직전에서 최대가 된다. 이러한 진폭 변화는 균열 선단에서 반사된 파의 보강간섭에 기인하며, 균열 깊이보다 짧은 파장 범위 ($\lambda_R/d=0.05\sim0.5$)에서 모두 비슷한 거동을 보였다. 이 계산 결과는 실험결과[14]와 MSLM 모델



- Material : Al
- 4 node isoparametric element
- Element size(l_e) : 0.014 mm
- Time step(Δt) : 0.002 μ s
- $F(t) = \sin 2\pi ft$
- Center frequency : 12.5 MHz

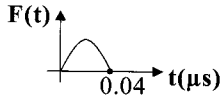


Fig. 10 FE modeling of laser-generated Rayleigh pulse with surface-breaking slot in an aluminum. The thermoelastic laser source is modeled as a surface shear dipole of half cycle sine wave force

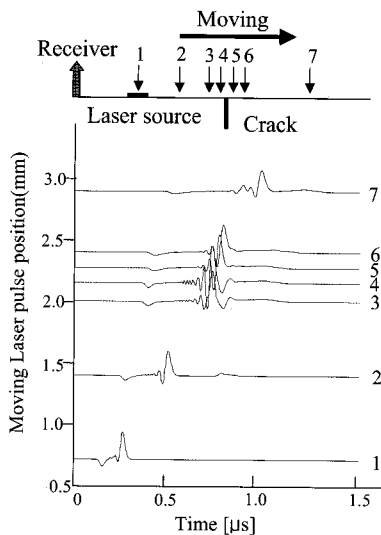


Fig. 11 Vertical displacements at various scanning laser source positions

결과[15]와 잘 일치한다. 진폭의 최대값 변화로부터 균열의 존재 유무와 균열의 위치를 쉽게 탐지할 수 있다. 앞으로 주사형 레이저 소스를 이용한 표면파의 최대값 측정을 통하여 균열의 깊이를 구할 수 있는 체계적인 방법의 연구가 필요하다.

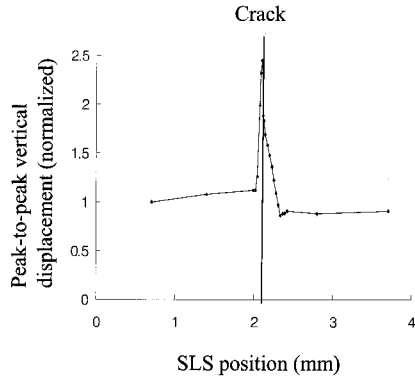


Fig. 12 Peak-to-peak vertical displacements

6. 결론

열탄성 영역에서의 레이저 선원에 의해 발생하는 표면파를 진단 쌍극자와 유한요소법을 사용하여 모델링하였다. 결합이 없는 반무한 고체의 경우에 계산한 표면파의 변위와 재료내부를 전파하는 종파 및 횡파의 지향성은 다른 해석적 결과와 잘 일치하였다. 표면균열의 탐상을 위하여 먼저 고정된 레이저 소스에 의해 발생된 표면파의 균열 선단 반사파를 식별함으로써 $d=0.3-5.0$ mm ($\lambda_R/d=0.21\sim 3.45$)의 균열 깊이를 정확히 결정할 수 있었다. 주사형 레이저 소스의 경우 소스가 균열 바로 앞에 위치할 때, 반사된 표면파의 변위 진폭은 균열로부터 멀리 떨어진 위치에 비하여 큰 진폭 변화를 보였으며 이 변화를 통하여 파장보다 한 차원 낮은 $d=0.028$ mm 균열의 존재와 위치를 파악할 수 있었다.

참고문헌

[1] C. B. Scruby and L. E. Drain, Laser Ultrasonics: Techniques and applications, pp. 237-242, Adam-Hilger, New York, (1990)
 [2] 이승석, 장태성, "레이저 유도 초음파에 대한 이해", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 74-87, (2002)

- [3] J. E. Sinclair, "Epicentre solutions for point multipole sources in an elastic half-space," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 12, pp. 1309-1315, (1979)
- [4] L. R. F. Rose, "Point-source representation for laser-generated ultrasound," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 75, No. 3, pp. 723-732, (1984)
- [5] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst and S. B. Palmer, "Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 70, No. 5, pp. 1362-1369, (1981)
- [6] J. R. Bernstein, J. B. Spicer, "Line source representation for laser-generated ultrasound in aluminum," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 107, No. 3, pp. 1352-1357, (2000)
- [7] C. M. Scala and P. A. Doyle, "Time-and-frequency domain characteristics of laser-generated ultrasonic surface technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 4, pp. 1569-1576, (1989)
- [8] P. A. Doyle and C. M., Scala, "Near-field Rayleigh waves from a laser line source," *Ultrasonics*, Vol. 34, pp. 1-8, (1996)
- [9] D. Royer and C. Chenu, "Experimental and theoretical waveforms of Rayleigh waves generated by a thermoelastic laser line source," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 891-895, (2000)
- [10] A. M. Aindow, R. J. Dewhurst, S. B. Palmer and C. B. Scruby, Unpublished work, (1985)
- [11] C. B. Scruby, K. R. Jones and L. Antoniazzi, *J. NDE*, Vol. 5, pp. 3-4, (1987)
- [12] M. G. Silk, "Research Techniques in Nondestructive Testing," Vol. 3, Eds. R. S. Sharpe, Academic Press, New York, (1977)
- [13] J. A. Cooper, R. J. Dewhurst and S. B. Palmer, "Characterization of surface-breaking defects in metals with the use of laser-generated ultrasound," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, Vol. A320, pp. 319-328, (1986)
- [14] A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach, "Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: Scanning laser source technique," *Mat. Eval.*, Vol. 58, No. 2, pp. 173-177, (2000)
- [15] Y. Sohn and S. Krishnaswamy, "Mass spring lattice modeling of the scanning laser source technique," *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 543-551, (2002)
- [16] ANSYS user's manual for revision 5.0, Swanson Analysis Systems, Houston, TX, (1992)
- [17] D. Alleyne and P. Cawley, "A two-dimensional Fourier transform method for measurement of propagating multimode signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89, No. 3, pp. 1159-1168, (1991)
- [18] K. Aki and P. G. Richards, *Quantitative seismology*, W. H. Freeman, San Francisco, (1980)
- [19] P. A. Doyle, "Calculation of ultrasonic surface waves from an extended thermoelastic laser source," *J. Nondestruct. Eval.*, Vol. 8, No. 3, pp. 147-164, (1989)
- [20] I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb waves," Plenum press, New York, (1967)
- [21] L. J. Bond, "A computer model of the interaction of acoustic surface waves with discontinuities," *Ultrasonics*, Vol. 17, pp. 71-77, (1979)
- [22] C. L. Pekeris, H. Lifson, "Motion of the surface of a uniform elastic half-space produced by a buried pulse," *J. Acoust. Am.*, Vol. 29, pp. 1233-1238, (1957)