

어블레이션 영역 레이저 초음파의 시뮬레이션과 내부결함 검사

Simulations for Internal Defect Inspection Using Laser Generated Ultrasonic Wave in Ablation Regime

김진겸*, 최성호*, 장경영**†

Jin-Gyung Kim*, Sungho Choi* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 본 연구에서는 고출력 레이저를 재료 표면에 조사하였을 때 나타나는 어블레이션 현상에 의한 레이저 초음파의 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해 분석하였다. 레이저 초음파 기법은 비파괴검사 분야에서 기존의 접촉식 초음파 기법을 적용하기 어려운 환경요인(고온 등)을 극복할 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히, 어블레이션 영역에서는 종파의 신호 세기 및 직진성이 강하므로, 투과 및 반사 신호를 통한 내부결함 검사법으로 활용하기 적합하다. 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 어블레이션 영역에서의 레이저 초음파의 발생 및 전파를 해석하였다. 그리고 개발된 유한요소해석 모델을 활용해 결함모사시편을 대상으로 B-Scan을 수행한 결과, 실험 결과와 동일하게 나타나는 것을 확인하였고, 이로부터 개발된 해석모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

주요용어: 어블레이션, 레이저 초음파, 유한요소해석, 내부결함 검사

Abstract In the present study, the characteristics of laser ultrasound in the ablation regime are investigated using simulations and experiments. The laser ultrasonic technique has been recognized as a noncontact method in the field of nondestructive tests (NDTs). In hostile environments (such as hot temperatures), this method has various advantages over the conventional contact ultrasonic method. In particular, in the ablation regime, the laser ultrasonic technique is suitable for inspecting internal defects because of the high amplitude and directivity of the longitudinal wave. In this paper, a simulation model for laser ultrasound in the ablation regime was developed. This model was subsequently applied to a defective specimen using the B-scan method to locate defects. Finally, we performed an experimental test to verify the simulation results. Consequently, the simulation demonstrated good agreement with the experimental test.

Keywords: Ablation, Laser Ultrasonics, Finite Element Analysis, Internal Defect Inspection

1. 서 론

레이저 초음파 기법은 비파괴검사 분야에서 비접촉식 초음파 가진 및 수신 기법으로 활용되고 있으며, 이러한 비접촉식 초음파 기법은 피검사체로부터 일정 거리 이격된 상태에서도 초음파 가진 및 수신이 가능한 특징을 가지고 있다. 따라서 기존의 접촉식 초음파기법의 한계인 고온 환경 및 피검사체의 복잡한 형상 등 환경적 요인

에 의한 접근제한성을 극복할 수 있는 장점이 있다[1].

비접촉식 레이저 초음파의 발생 기구는 입사되는 레이저의 강도에 따라 크게 열탄성 영역과 어블레이션 영역으로 분류할 수 있다[2]. 그런데 열탄성 영역에서의 레이저 초음파 발생기구에 대해서는 해석적 및 실험적 연구가 다수 수행된 반면 [3-6], 어블레이션 영역에서는 재료 표면에서 수 μm 정도의 표면 손상을 동반하기 때문에 비파괴

[접수일: 2014. 3. 28, 수정일: 2014. 4. 24, 게재확정일: 2014. 4. 26] *한양대학교 융합기계공학과, **한양대학교 기계공학부, †Corresponding Author: School of Mechanical engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea (E-mail: kyjhang@hanyang.ac.kr)

검사 측면에서의 연구는 상대적으로 미비하다. 그러나 표면 직하 방향으로 강한 종파를 발생시킬 수 있기 때문에 수 μm 정도의 표면 손상에 큰 영향을 받지 않는 구조재에 적용할 경우에는 어블레이션 영역에서의 레이저 초음파 기법이 구조재 내부결함 검사에 활용될 수 있다[7].

어블레이션 영역 레이저 초음파에 관한 기존의 연구로, Sakamoto[8]는 알루미늄 시편을 대상으로 어블레이션 영역에서 레이저 빔 지름에 따른 레이저 초음파의 종파 지향성을 분석하였으며, 1064 nm 파장의 Nd:YAG 펄스 레이저로 초음파를 발생시키고, 50 kHz에서 20 MHz의 수신대역을 갖는 마하젠더 간섭계로 초음파를 수신하였다. Hopko[9]는 Q-switched Nd:YAG 레이저와 광섬유를 이용하여 어블레이션 영역 레이저 초음파 발생 기법을 개발하였으며, 각도에 따른 레이저 초음파의 지향성을 정확히 측정하기 위해 편형 탐촉자로 초음파를 수신하였다. Mi[10]는 어블레이션 영역에서 대상 재료의 종류, 두께, 레이저 세기에 따른 초음파의 주파수 스펙트럼을 분석하였으며, 20 MHz 대역의 레이저 간섭계를 사용하여 초음파를 수신하였다. 그러나 기존의 연구들에서는 어블레이션 영역 레이저 초음파에 대한 실험적인 분석이 주로 이루어진 반면, 레이저 초음파의 발생 및 전파 해석을 위한 해석 모델 개발 관련 연구는 미비하다.

본 연구에서는 어블레이션 영역에서의 레이저 초음파 발생 및 전파 해석을 위한 유한요소해석 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 해석 결과를 이론적 분석 결과와 비교함으로써 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 또한, 비파괴검사 목적으로 내부결함 검출에의 활용 가능성을 평가하기 위해 내부결함 모사시편을 대상으로 B-scan을 수행하였으며, 실험결과와 비교 분석하였다.

2. 레이저 초음파

레이저 초음파의 발생 영역은 Fig. 1에서 보여지는바와 같이 입사되는 빔의 세기에 따라 열탄성 영역과 어블레이션 영역으로 구분할 수 있으며, 각기 다른 원리로 초음파를 발생시킨다.

먼저, 열탄성 영역의 경우, 레이저의 세기가 어블레이션 영역에 비해 상대적으로 낮으며 레이저 조사지점에서의 국부적인 열변형으로 인해 표면

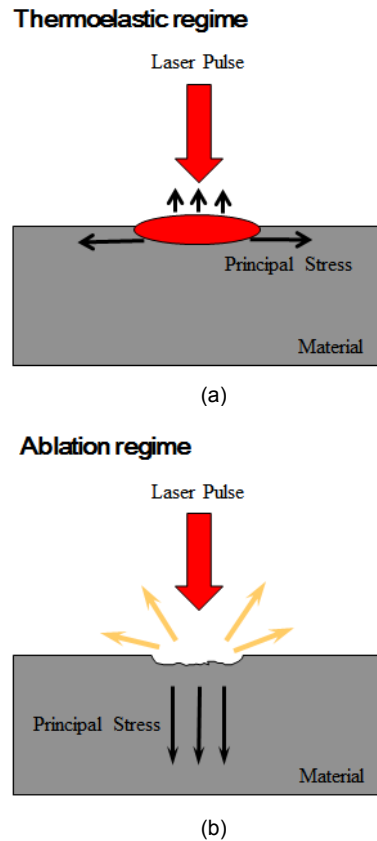


Fig. 1 Generation mechanism of laser ultrasound: (a) thermoelastic regime and (b) ablation regime

의 수평방향으로 응력이 작용하여 초음파를 발생시킨다. 이러한 영역에서 발생하는 종파 및 횡파는 어블레이션 영역에서 발생하는 종파 및 횡파에 비해 상대적으로 음압이 낮은 반면, 표면파나 램파는 강하게 발생된다[2]. 이와 달리 어블레이션 영역에서는 재료의 표면이 증발되면서 발생하는 반발력에 의해 초음파를 발생시킨다. 이 경우에는 표면 직하방향으로 주응력이 작용하기 때문에 열탄성 영역에서 발생하는 종파에 비해 표면 직하방향으로 강한 음압의 종파를 발생시킬 수 있다[1].

어블레이션 영역에서 초음파를 발생시키기 위해서는 재료 표면에서 어블레이션 현상이 발생하여야 하며, 이러한 현상을 발생시키는 임계 레이저 강도는 Eq. (1)과 같다[11].

$$I_c \geq 2L\rho\kappa^{1/2}\tau^{-1/2} \quad (1)$$

여기서, I_c 는 어블레이션 현상이 발생하는 임계 레이저 강도, L 은 기화잠열, ρ 는 밀도, κ 는 열확산도, τ 는 레이저 조사시간이다.

어블레이션 현상으로 인해 재료 표면이 증발되면서 발생하는 반발력에 의한 표면 직하방향으로의 응력은 Eq. (2)와 같다[1].

$$\sigma_A = \frac{I_c}{L + C(T_v - T_o)} \quad (2)$$

$$= \frac{I^2}{\rho[L + C(T_v - T_o)]^2}$$

여기서, σ_A 는 어블레이션에 의해 표면 직하방향으로 작용하는 응력, I 는 레이저 강도, ζ 는 어블레이션 현상으로 인해 증발되는 재료의 제거율, C 는 열용량, T_v 와 T_o 는 각각 증발 온도와 초기 온도이다.

3. 유한요소해석 모델

어블레이션 영역 레이저 초음파 발생 및 전파를 유한요소해석 프로그램(COMSOL Multiphysics)를 이용하여 2차원 모델로 해석하였으며 해석 모델은 Fig. 2와 같다. 해석에 사용된 재료는 스텐레스강으로 크기는 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 이고, 해석에 사용된 재료 물성치 및 해석 조건은 Table 1에 나타내었다. 매쉬는 삼각매쉬를 이용하였고, 매쉬의 크기는 레이저 초음파 파장의 1/10 이하의 크기를 갖도록 하였고, 실험으로부터 얻어진 레이저 초음파의 메인 주파수 성분이 약 1 MHz, Steel에서 초음파의 속도는 일반적으로 5900 m/s 임을 고려하였을 때 파장은 약 5 mm가 되고 1/10의 크기는 0.5 mm가 된다. Fig. 2에서의 A영역은 레이저가 조사되는 영역으로 어블레이션에 의해 표면 직하방향으로 단위면적당 힘이 작용하는 영역이다.

레이저 빔의 공간적 그리고 시간적 세기 분포는 가우시안으로 고려하였으며 이 경우에 재료가 흡수되는 레이저 강도는 Eq. (3)과 같다[12].

$$I = 2 \frac{E(1-R)}{S\tau} \times \exp\left(-2 \frac{x^2}{x_0^2}\right) \times \exp\left(-2.7726 \frac{(t-\tau/2)^2}{\tau^2}\right) \quad (3)$$

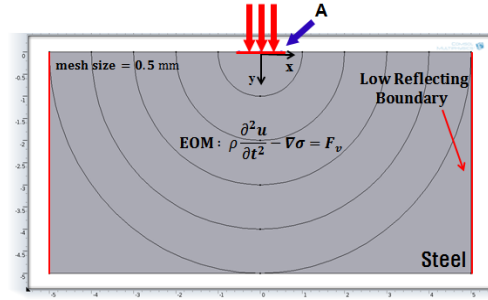


Fig. 2 Simulation model of laser ultrasound in ablation regime

Table 1 Values of parameters used in simulation

Parameter	Value
Beam energy	140 mJ
Beam radius	2.5 mm
Density	7809 kg/m ³
Latent heat required to vaporize the solid	6258 J/kg
Pulse duration	5 ns
Reflectivity	0.64
Specific thermal capacity	640 J/kg*K
Initial temperature	293 K
Vaporization temperature	3030 K

여기서, E 는 레이저 빔의 에너지, R 은 재료 표면에서의 반사율, S 는 빔이 흡수되는 면적, x_0 는 레이저 빔의 반지름, t 는 시간, τ 는 펄스지속시간이다. Eq. (3)으로부터 얻어지는 레이저 강도는 약 103 MW/cm^2 으로 이는 대상 재료가 스텐레스강일 경우, Eq. (1)에 의해 계산되는 어블레이션 영역의 임계 레이저 강도 498 kW/cm^2 보다 큰 값이기 때문에 어블레이션에 의한 응력이 발생하기에 적합한 조건이다. 초음파 해석을 위한 지배방정식[13]은 Eq. (4)와 같으며 경계조건으로 작용하는 응력 σ_A 에 의한 초음파의 발생 및 전파를 해석하게 된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (4)$$

여기서, u 는 변위 벡터, σ 는 응력 텐서이고, Fig. 2의 A영역 이외의 영역들은 자유조건으로 하였다.

4. 해석 모델 검증

Fig. 3(a)는 유한요소해석을 통해 얻은 어블레이션 영역 레이저 초음파 발생 및 전파 해석 결과이다. 재료 표면에서 어블레이션 현상이 나타나면 강한 반발력에 의해 표면 직하방향으로 응력이 발생하게 된다. 이 때, 재료 내부로는 표면 직하방향으로 음장 분포를 갖는 종파(longitudinal wave)가 발생하며, 동시에 전단력에 의한 횡파(shear wave)가 발생한다. 횡파의 속도는 종파 속도의 약 1/2 정도 이며, 종파의 주 전파 방향 기준으로 약 60° 기울어진 방향으로 음장 분포를 갖는다. 또한, 종파와 횡파가 전파되는 과정에서 종파와 횡파를 잇는 헤드파(head wave)와 재료의 표면을 따라서 전파하는 표면파(Rayleigh wave)가 발생한다. 이러한 해석 결과를 검증하기 위해 이론적 모델로부터 얻어진 결과[14] (Fig. 3(b))와 비교해보면 어블레이션 현상에 의해 발생하는 초음파의 종류 및 전파에 대한 결과가 잘 일치한다.

Fig. 4는 레이저 초음파의 종파 및 횡파의 지향성에 대한 해석 결과이다. 종파의 경우에는 재료 표면의 수직인 방향으로 주 전파 방향성을 가지는 반면, 횡파의 경우에는 일정 경사각을 가지며 전파하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 지향성에 대한 해석 결과는 이론적 모델[1]로부터 얻어진 결과와 일치하는 결과로 해석 모델의 타당성을 확인하였다.

5. 내부결함 검출에의 적용

본 연구에서 개발된 어블레이션 영역 레이저 초음파 해석 모델의 내부결함 검출에의 적용 가능성을 평가하기 위해 내부결함 모사시편을 대상으로 B-scan을 수행하였으며 해석 모델은 Fig. 5와 같다.

대상 재료는 스텐레스강이고 시험편의 크기는 20 mm × 70 mm이다. 내부결함은 1 mm × 5 mm 크기의 슬릿형 직사각형이고 결함의 깊이 방향으로의 위치는 각각 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm이다. B-scan 이미지를 얻기 위해 Fig. 5에서의 B 지점에서 C지점까지 1 mm 간격으로 스캐닝을 하였다.

Fig. 6(a)는 해석 모델로부터 얻어진 B-scan 이미지로 각기 다른 깊이의 내부결함과 저면의 위

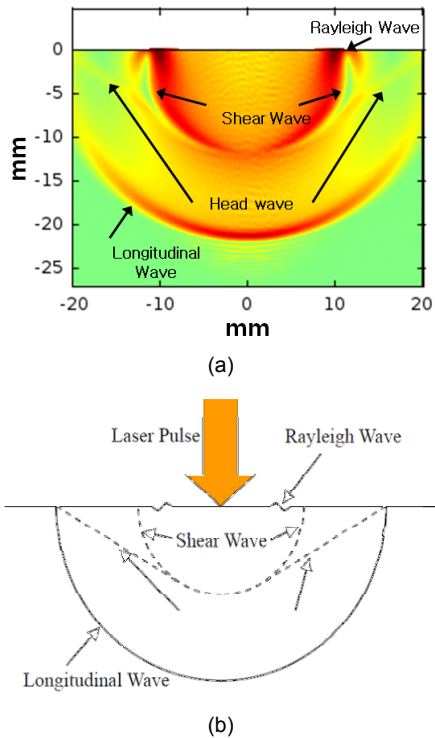


Fig. 3 Wave propagation of laser ultrasound in ablation regime: (a) simulation result and (b) theoretical result

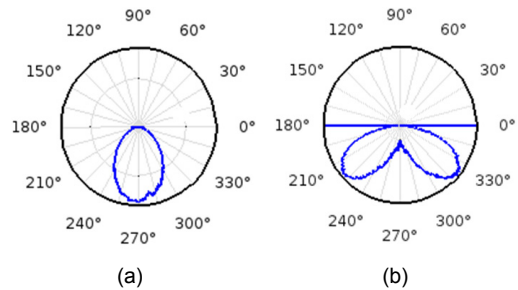


Fig. 4 Directivity of laser ultrasound in ablation regime: (a) longitudinal wave and (b) shear wave

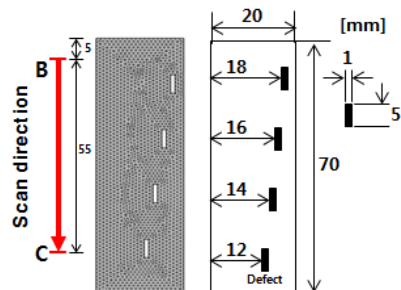


Fig. 5 Simulation model for detection of internal defect

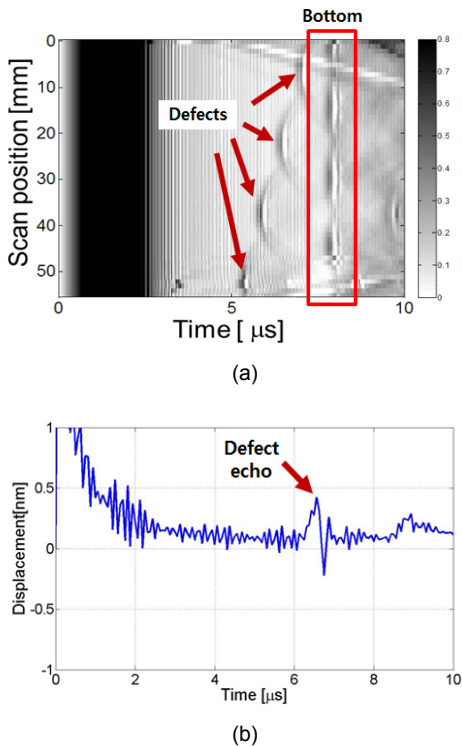


Fig. 6 Simulation results: (a) B-scan image and (b) waveform at the scanning position of 20 mm

치를 명확히 판별할 수 있다. Fig. 6(b)는 20 mm의 스캐닝 위치에서의 레이저 초음파 파형으로 결함에 의해 반사된 종파를 명확히 확인할 수 있다.

6. 실험장치 구성

어블레이션 영역 레이저 초음파를 이용한 내부결함 검출 실험장치 구성은 Fig. 7(a)와 같다. 초음파 발생을 위한 가진 레이저는 Nd:YAG 펄스 레이저로 파장은 1064 nm, 펄스폭은 5 ns, 빔 지름은 5 mm, 빔 에너지는 140 mJ이다. 레이저 빔은 볼록렌즈로 입사하고 볼록렌즈에 의해 빔 지름이 1 mm로 1/5배 감소하도록 집속시켰다. 또한, 레이저 초음파를 비접촉으로 수신하기 위하여 TWM(two-wave mixing) 방식[15]의 레이저 초음파 수신기(TWM, TECNAR)를 이용하였다. 여기서 가진 레이저와 수신기는 동일한 파장을 사용하는 관계로 상호 간섭을 피하기 위해 부득이 가진점과 수신점을 10 mm 분리시켰으며, 가진 레이저는 θ 의 각도로 입사된다. 내부결함 검출

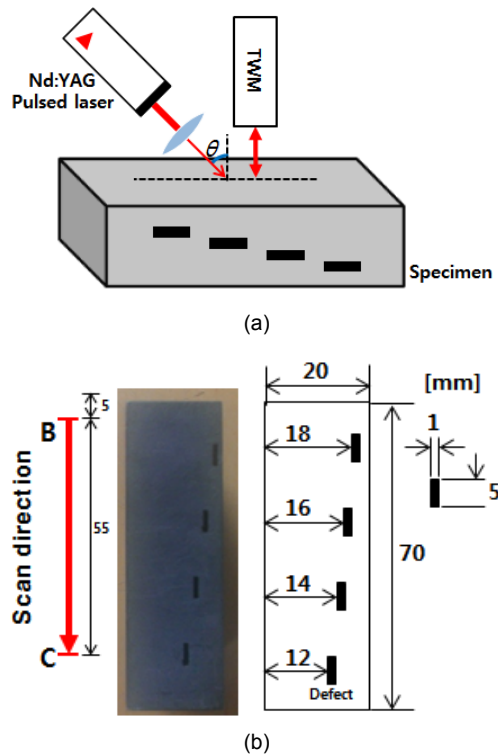


Fig. 7 (a) Schematic diagram of experimental set-up and (b) image of defective specimen

실험 이전에 입사 레이저 각도에 따른 초음파의 특성을 분석하였으며, θ 가 $\pm 30^\circ$ 범위에서는 초음파의 특성에 거의 영향을 미치지 않았다. 따라서 본 연구에서는 $\theta = 25^\circ$ 로 하였다.

내부결함 모사 시편의 크기와 결함 위치는 유한요소해석에서의 조건과 동일하며 Fig. 7(b)와 같다.

B-scan 이미지를 얻기 위해 시플레이션과 동일하게 Fig. 7(b)에서의 B지점에서 C지점으로 1 mm 간격으로 스캐닝을 하였다.

7. 실험 결과

Fig. 8(a)는 실험으로부터 얻어진 B-scan 이미지이고, Fig. 8(b)는 20 mm의 스캐닝 위치에서의 레이저 초음파 파형이다. 본 실험에서는 레이저 초음파 가진점과 수신점의 위치가 일치하지 않아 수신되는 초음파 신호의 초기 부분에 강한 표면파가 측정된 것을 확인할 수 있다. 이러한 초기 부분의 강한 표면파 성분으로 인해 재료 표면에

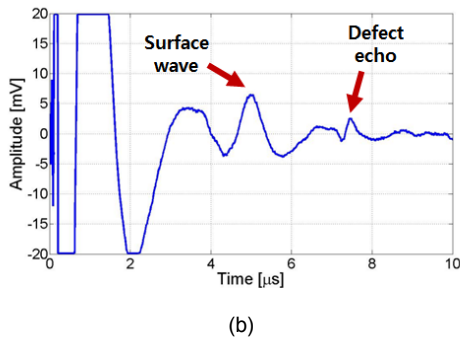
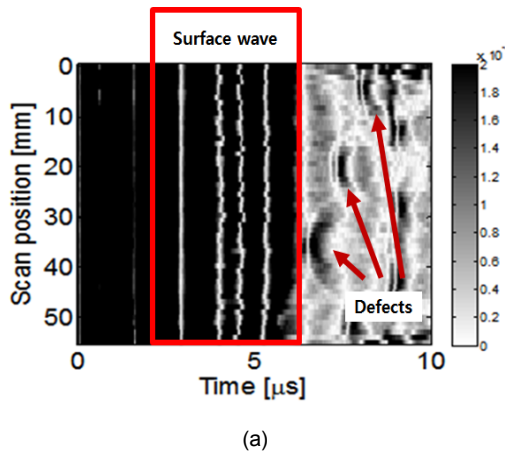


Fig. 8 Experimental results: (a) B-scan image and (b) waveform at scanning position of 20 mm

인접한 결함의 검출이 어려우며, 또한, 실험 환경적 요인에 의한 노이즈 성분에 의해 정확한 결함 검출이 어려웠다.

이러한 표면파 및 노이즈 성분을 제거하기 위해 본 연구에서는 표면파의 주파수 대역이 1 MHz 이하인 것을 고려하여, 수신된 초음파 신호에 대역 통과 필터(1.5 MHz ~ 10 MHz)를 적용하였으며, 필터링된 B-scan 이미지 및 20 mm의 스캐닝 위치에서의 레이저 초음파 파형은 Fig. 9와 같다. 대역 통과 필터를 적용함에 따라 초기 부분의 표면파 및 노이즈 성분이 확연히 제거된 것을 확인할 수 있으며, 각기 다른 깊이의 내부결함과 저면의 위치를 명확히 판별할 수 있다. 또한, 이를 가진점과 수신점 사이의 이격 거리에 따른 시간지연을 감안하여 해석 결과와 비교해보면 결함 및 저면에서 반사된 신호의 위치가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

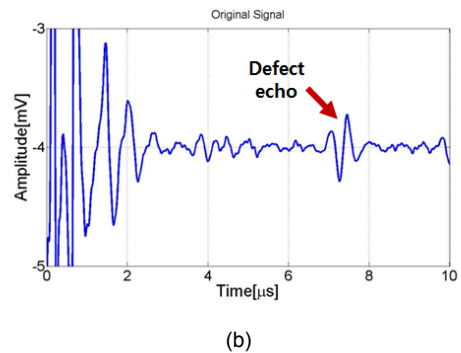
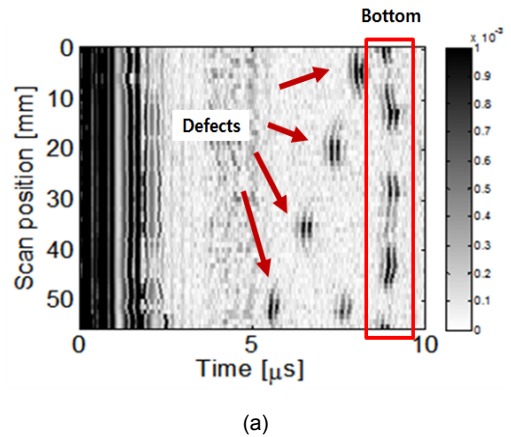


Fig. 9 Experimental results with bandpass filter: (a) B-scan image and (b) waveform at scanning position of 20 mm

8. 결론

본 연구에서는 어블레이션 영역 레이저 초음파 발생 및 전파 해석을 위한 해석 모델을 개발하였으며 해석 결과를 이론적 그리고 실험적 분석 결과와 비교함으로써 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 먼저, 해석 모델을 이용하여 어블레이션 영역 레이저 초음파(종파, 횡파, 표면파, 헤드파)의 전파 및 지향성에 대해 해석을 수행하였으며, 그 결과는 이론적 분석 결과와 일치하였다. 또한, 비파괴검사 목적으로 내부결함 검출에의 활용 가능성을 평가하기 위해 내부결함 모사시편을 대상으로 B-scan을 수행하였으며, 해석 모델로부터 얻어진 B-scan 이미지에서 각기 다른 깊이의 내부결함과 저면의 위치를 명확히 판별할 수 있었다.

실험에서는 Nd:YAG 펄스 레이저를 이용하여 레이저 초음파를 가진시키고 TWM 방식의 레이

저 초음파 수신기를 이용하여 레이저 초음파를 수신하였다. 그러나 실험으로부터 얻어진 내부결함시편에 대한 B-scan 이미지 상에서는 신호 초기 부분의 표면파 및 노이즈 성분에 의해 결합 및 저면의 위치가 명확히 판별되지는 않았다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 수신된 레이저 초음파 파형에 대역 통과 필터를 적용하였으며, 그 결과, 각기 다른 깊이의 내부결함 및 저면의 위치가 명확히 판별되었다. 또한 실험적으로 얻어진 B-scan 이미지 결과는 해석 결과와 잘 일치하였다. 이로써 본 연구에서 개발된 어블레이션 영역 레이저 초음파 발생 및 전파 모델의 유효성을 검증할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2013M2A2A904241).

참고문헌

- [1] D. W. Blodgett and K. C. Baldwin, "Laser-based ultrasonics: applications at APL," *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Vol. 26, No. 1, pp. 36-45 (2005)
- [2] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser ultrasonics: Techniques and Applications," Taylor & Francis Group, New York, USA, pp. 242-302 (1990)
- [3] M. K. Song and K. Y. Jhang, "Crack detection in single-crystalline silicon wafer using laser generated Lamb wave," *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2013, No. 950791, pp. 1-6 (2013)
- [4] I. Arias and J. D. Achenbach, "Thermoelastic generation of ultrasound by line-focused laser irradiation," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6917-6935 (2003)
- [5] D. H. Hurley, "Laser-generated thermoelastic acoustic sources in anisotropic materials," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 115, No. 5, pp. 2054-2058 (2004)
- [6] H. Jeong, C. Kim, T. Kim, D. Park and K. Kim, "Thermoelastic finite element analysis of laser generation ultrasound," *2006 Spring Conference of the KSME*, pp. 74-79 (2006)
- [7] R. E. Green, "Non-contact ultrasonic techniques," *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 9-16 (2004)
- [8] J. M. S. Sakamoto, B. R. Tittmann, A. Baba and G. M. Pacheco, "Directivity measurements in aluminum using a laser ultrasonics system," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 278, No. 012032, pp. 1-4 (2011)
- [9] S. N. Hopko and I. C. Ume, "Laser generated ultrasound by material ablation using fiber optic delivery," *Ultrasonics*, Vol. 37, pp. 1-7 (1999)
- [10] B. Mi and I. C. Ume, "Parametric studies of laser generated ultrasonic signals in ablative regime: time and frequency domains," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 21, No. 1, pp. 23-33 (2002)
- [11] J. Ready, "Effects of High Power Laser Radiation," Academic, New York, USA (1971)
- [12] S. Choi, C. Kim, K. Y. Jhang and W. S. Shin, "Analysis of variation in the surface morphology of aluminum alloy," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 14, No. 5, pp. 897-903 (2011)
- [13] Andrei Marchidan, Tarah N. Sullivan and Joseph L. Palladino, "Load cell design using COMSOL multiphysics," *Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston* (2012)
- [14] J. -P. Monchalain, R. Heon, J. Bussiere and B. Farahbakhsh, "Nondestructive Characterization of Materials II," Plenum Press, New York, USA, pp. 717-723 (1987)
- [15] J. -P. Monchalain, "Non contact generation and detection of ultrasound with lasers," *Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing*, pp. 1-9 (2004)