

KrF 엑시머레이저 조사에 의한 금속에서의 광-음향신호의 검출

‘최 종석’ 이 종호’ 전 계석’
* 경희 대학교 전자공학과

Detection of The Photoacoustic Signal Generated by Irradiation of KrF Excimer Laser in Metals

Choe Jong-Seok Yi Chong-Ho Jun Kye-Suk
Dept. of Electro. Eng., Kyung Hee Univ.

요 약

펄스레이저를 고체표면에 조사하면 광-음향효과에 의해 입사지점에서 음향파원이 형성되고 음향파원의 형태와 재료의 특성에 따라 여러 유형의 종파, 횡파 및 표면파의 음향에너지가 발생된다. 본 연구에서는 열탄성영역과 플라즈마영역에서 종파와 횡파의 변위파형을 해석하여 모의실험을 수행하였다. 실험에서는 KrF 엑시머레이저를 탄소강, 알루미늄, 황동에 조사하여 플라즈마영역에서의 광 음향신호를 검출하였으며 이론과 비교하여 분석하였다.

A b s t r a c t

When a pulsed laser is irradiated on the surface of metals, acoustic source is formed on the point and it is propagated in the sample the acoustic energy assuming the forms of longitudinal, shear and surface wave. In this paper, the displacement waveforms of bulk waves have been studied in the thermo-elastic and plasma regime and computer simulations have been performed. In the experiment, the photoacoustic signals generated from carbon steel, aluminum and brass have been detected by the use of KrF Excimer Laser.

1. 서론

광-음향효과를 이용하여 재료에서 음향에너지를 검출하는 기술은 기존의 압전효과를 이용한 탐상기술에 비해 많은 정보를 검출할 수 있고 물과 같은 매질을 이용하지 않고도 샘플에 초음파를 발진시킬 수 있는 장점을 가지므로 최근 활발한 연구가 진행되고 있다. 재료표면에 형성되는 음향원은 입사되는 레이저의 출력밀도(Power density) 값에 따라 두 가지의 특정한 유형으로 구별되는데 첫째로 재료표면을 용해(ablation)시키지 않는 범위의 레이저출력을 이용한 열탄성영역 (Thermo-elastic regime)에서의 음향원과 둘째로 재료표면을 용해시키는 고출력밀도를 이용하는 플라즈마영역(Plasma regime)에서의 음향원으로 나뉜다. 본 연구에서는 열탄성영역과 플라즈마영역에서의 음향원을 해석하였고 종파, 횡파의 변위파형을 시뮬레이션하여 분석하였으며 실험에서는 플라즈마영역에서 종파 및 표면파를 검출하였고 이론과 비교하여 분석하였다. 이러한 광-음향신호검출기술은 비파괴 검사 및 재료의 특성분석등 많은 분야에 응용될 것이다.

2. 광-음향효과에 의한 변위파형분석 및 시뮬레이션

펄스레이저를 금속 표면에 입사시키면 광 에너지는 표면에서 열에너지로 변환되며 입자의 열탄성효과에 의해 금속표면에 음향에너지를 전파시키는 음향원을 형성시킨다. 레이저의 입사에너지를 변화시키면 금속표면에 서로 다른 음향원의 유형이 발생하는데 일반적으로 금속 표면에 입사되는 출력밀도가 10^6W/cm^2 이하인 범위에서는 열탄성영역이 되며 표면과 출력밀도가 $10^6 \sim 10^8 \text{W/cm}^2$ 인 범위에서는 표면이 용해되는 플라즈마영역이 된다. 금속표면에 형성되는 음향원으로부터 발진되는 탄성에너지는 다양한 음향모드, 즉 벌크파(종파, 횡파) 그리고 표면파의 형태로 전파된다. 열탄성영역에서는 주로 열경도(Thermal gradient)가 표면에 평행한 방향으로 분포하게 되어 횡파성분이 현저히 나타나며 플라즈마영역에서는 표면의 용해현상에 의한 반사작용으로 인해 스트레스가 수직인 방향으로 형성되어 종파성분이 두드러지게 나타난다. 또한 금속의 경계면을 따라 진행하는 표면파도 발생된다. 그림1. 과 그림2. 는 각각 열탄성영역과 플라즈마 영역에서의 입자변위파형 특성을 식1, 2와 같이 모델링하여 시뮬레이션한 것이다. 열탄성영역에서는 금속표면에 평행한 방향으로 스트레스가 주로 분포하므로 횡파성분의 진폭이 종파성분 진폭보다 매우 크고 플라즈마영역에서는 종파성분이 현저함을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u_1 = & \frac{v_0 + v_1 t (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} + (G_1 + 2\mu) \lambda \Delta T (\theta - t_1)}{G_1 \mu^2 (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} + \lambda (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} (\theta^2 - t_1^2)} \\
 & \frac{v_0 + v_1 t (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} + (G_1 + 2\mu) \lambda \Delta T (\theta - t_1)}{G_1 \mu^2 (\theta^2 - 0.5 t_2^2)^{1/2} + \lambda (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} (\theta^2 - t_1^2)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{0.5 t_1^2 (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2) F_3 H (\theta - t_1)}{G_1 \mu^2 (\theta^2 - t_1^2 + t_2^2)^{1/2} + \lambda (\theta^2 - t_1^2)} \\
 & \frac{0.5 t_1^2 (\theta^2 - t_1^2) (\theta^2 + t_1^2 - t_2^2) F_3 H (\theta - t_1)}{G_1 \mu^2 (\theta^2 - 0.5 t_2^2)^{1/2} + \lambda (\theta^2 - t_1^2)} \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_1 = & v_0 + v_1 t_1^2 - 3v_1^2 (10\mu v_1 v_2)^2 + G_1^2 + 10\mu v_1 + v_2^2 + v_1 v_2 + G_1 v_2 v_1 v_2 + v_1^2 \\
 & - 2v_1 v_1^2 - 2v_1^2 (10\mu v_1 v_2)^2 + 10\mu v_1 v_2 + v_1 v_2 + 2v_1^2 v_2 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & -y (6\mu v_1 t_1^2 - 3y^2 (10\mu v_1 v_2)^2 + 10\mu v_1 + v_2 + G_1 v_2 v_1 v_2 - 2v_1^2 (10\mu v_1 v_2)^2 \\
 & - \mu^2 + 10\mu v_1 v_2 - 2y^2 + 2(10\mu v_1 v_2)^2 + 2(10\mu v_1 v_2 + 2v_1 v_2)^2 + 2v_1 v_2 + 10\mu v_1 v_2 + 2v_1 v_2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 $y = t^2 - t_1^2, u = t_1^2, v = t_2^2, w = 1/2t_2^2, X_2 = -X_1, Y_2 = -Y_1, U_2$: 변위, t_1 : 종파속도, t_2 : 횡파속도, h : 샘플의 두께, λ : 램탄성상수, μ : 횡방향탄성율, ΔT : 열탄성원의 음향원의 특성, F_3 : 플라즈마영역의 음향원, H : 스텝함수이다.

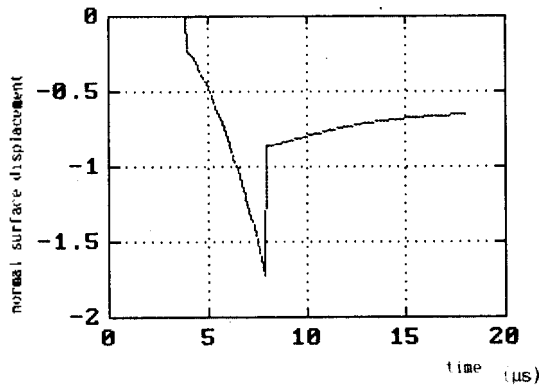
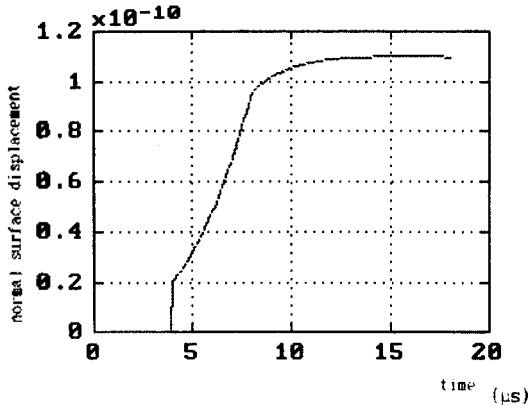
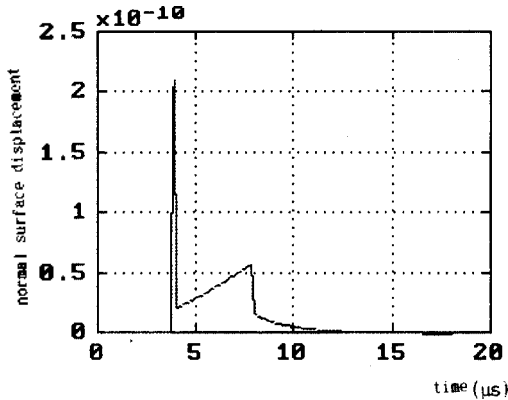


그림1. 열탄성영역에서의 표면변위파형
Fig1. Surface displacement in the thermo-elastic regime



(a) 출력밀도의 범위가 $10^6 \sim 10^9$ 인 경우
 (a) The range of Power Density: $10^6 \sim 10^9$



(b) 출력밀도의 범위가 10^9 이상인 경우
 (b) The range of Power Density: above 10^9

그림2. 플라즈마영역에서의 표면변위파형
 Fig. 2. Surface displacement
 in the plasma regime

3. 실험

3.1 광-음향신호 검출시스템의 구성

본 연구에서는 광-음향신호를 검출하기 위해 그림3.와 같이 시스템을 구성하였다. 광원으로 사용된 펄스레이저는 KrF 엑시머레이저로서 파장은 248nm이고 펄스폭은 17ns이며 출력에너지는 펄스 당 35mJ이다. 레이저를 반사경에 의해 경로를 변

화시키고 집속렌즈(초점거리 40cm)로 집속하여 샘플표면에 수직방향으로 입사 하였다. 레이저입사에 의해 샘플 내에서 광-음향변환되어 발생된 탄성파는 금속내부를 전파하여 반대편의 압전 변환기(PZT)에 의해 검출된다. 이 변환기의 중심주파수는 800KHz이다. 변환기로 검출된 신호는 HP 400MHz 디지털 오실로스코프에 나타나며 GP-1B를 이용한 HP프린터에 기록되었다. 또한 금속면을 진행하는 표면파를 검출하기 위해 직경 70mm, 두께 20mm인 탄소강의 모서리 부분을 45도 각도로 가공하여 변환기를 그림4.과 같이 부착하였다. 샘플은 레이저 및 탄성파의 산란을 막기 위해 양면을 정밀하게 폴리싱하였다.

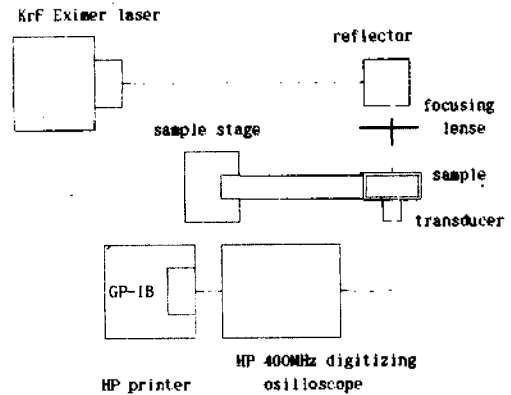


그림3. 광-음향신호 검출 시스템의 구조도

Fig.3. Schematic diagram of Photoacoustic signal detection system

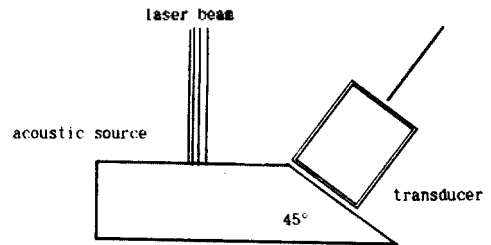
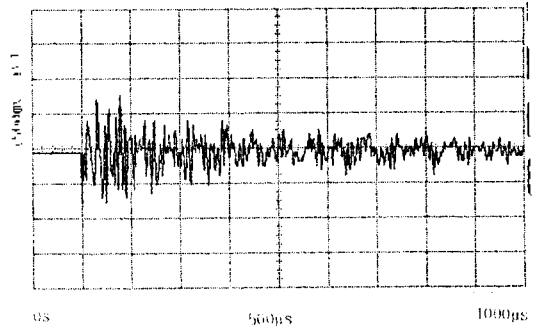


그림4. 표면파 검출을 위한 시료제작
 Fig.4. Sample manufacture for detecting surface wave

3.2 실험 결과 및 그찰

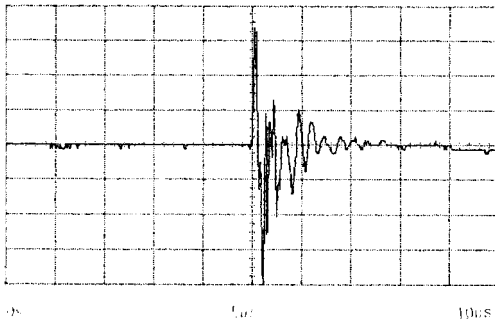
금속표면에 플라즈마영역에서의 음향원을 형성 시키기 위해 레이저빔의 펄스폭을 17ns, 출력에너지를 60mJ로 설정한 뒤 초점거리가 40cm인 집속렌즈를 거쳐 금속표면에 수직으로 입사시켰다. 레이저빔의 출력은 3.53 MW이고, 입사면에서의 출력밀도는 $3.53 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 가 된다. 입사되는 금속표면은 고열에 의한 플라즈마현상이 확인되었다. 그림5. (a), (b), (c)는 각각 원통형의 탄소강, 알루미늄, 황동을 샘플로 이용하여 검출한 금속 내부에서의 광 음향신호를 보여주고 있다. 샘플의 직경은 70mm이고 두께는 20mm이다.



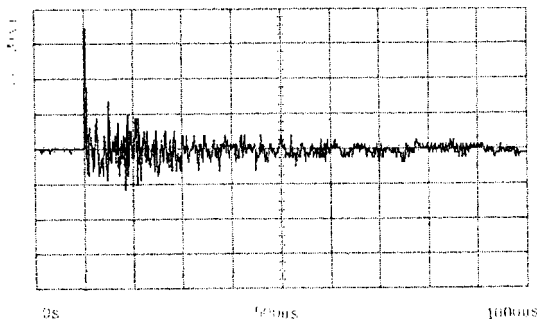
(c) 황동 (brass)

그림5. 금속내부에서 변환된 광-음향신호

Fig5. The photoacoustic signal converted in metals



(a) 탄소강 (carbon steel)



(b) 알루미늄 (aluminum)

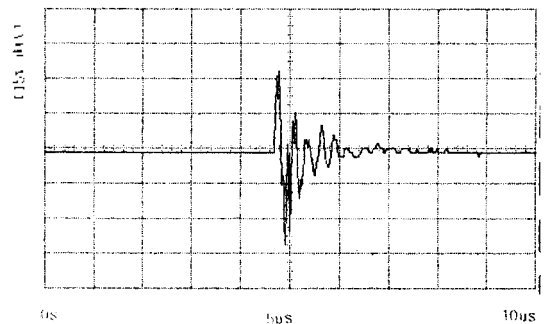


그림6. 탄소강에서의 표면파의 검출

Fig6. Detection of the surface wave in carbon steel

그림5의 파형특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

표1. 샘플들의 제반특성

Diag.1 Several properties of the samples

4. 결론

본논문에서는 펄스레이저를 금속에 조사하여 형성되는 음향원에 대해 분석하여 시뮬레이션을 수행하였고 플라즈마영역에서 KrF 엑시머레이저를 이용하여 직접 실험을 수행하였다. 플라즈마영역에서는 표면의 응제로 인해 열경도가 표면 수직방향으로 현저하게 분포하기 때문에 스트레스도 같은 방향으로만 매우 높게 나타남을 확인할 수 있었고 탄소강, 황동, 알루미늄을 이용하여 재료의 제반 특성과 비교함으로써 이론과 일치함을 알 수 있었다. 본 광 음향검출기술은 미래의 정밀한 재료특성분석 및 비파괴검사기술에 크게 기여할 것으로 고려된다.

5. 참고 문헌

[1] A.M.Ainbow, R.J.Dewhurst, D.A.Hutchins, and S.B.Palmer, "Laser-generated ultrasonic pulses at free metal surfaces", J. Acoust. Soc. Am. 69(2), 449, Feb. 1981

[2] J.F.Ready, "Effects Due to Absorption of Laser radiation", J. of Appl. Phys. 36(2), 462, Feb 1965

[3] D. A. Hutchins, R. J. Dewhurst, and S.B.Palmer, "Directivity patterns of laser-generated ultrasound in Al", J. Acoust. Soc. Am. 70(5), 1362, Nov. 1981

[4] H. M. Ledbetter and J. C. Moulder, "Laser-induced Rayleigh waves in Al", J. Acoust. Soc. Am. 65(3), 840, Mar 1979

[5] "Laser Ultrasonics-Techniques and Applications", C.B.Scruby and L.E.Drain, pp 223~334, Adam Hilger, 1989

1) 실험결과 펄스파의 종파성분 펄스만이 현저하게 나타나고 횡파성분 펄스는 거의 나타나지 않았다. 이는 플라즈마영역에서 표면의 고열상태로 인한 응제현상으로 인해 표면에 수직인 방향의 스트레스가 매우 크게 나타났기 때문에 종파의 지향성 패턴은 90°방향에 집중되어 종파성분 펄스가 현저해진 반면, 횡파성분은 종파에 비해 매우 작아서 검출되지 않은 것으로 고려된다.

2) 탄소강의 종파성분은 샘플들 중 가장 큰 전압 피크치(74V)를 나타낸다. 이것은 광-음향신호가 열팽창계수와 흡수된 에너지량에 비례하므로 표1.과 비교하면 실험과 일치함을 알 수 있다. 황동은 알루미늄에 비해 광 흡수율은 높지만 열팽창계수가 작기 때문에 알루미늄보다는 낮은 광 음향변환율을 보였다. (그림5. (a))

3) 알루미늄과 황동의 과열은 탄소강에 비해 900u s이후까지 지속적으로 진동하고 있음을 보여주고 있다 (그림5. (b), (c)). 이는 알루미늄과 황동의 열팽창계수와 열전도도가 탄소강에 비해 상대적으로 크므로 입자들의 열팽창으로 인한 진동이 연속된 것으로 추정되며 표1.에서 확인할 수 있다.

4) 또한 광-음향신호를 통해 금속표면으로 전파되는 표면파의 존재도 확인할 수 있었다. (그림6.)

5) 탄소강, 알루미늄, 황동에서의 종파의 전파속도와 도달시간과의 관찰결과 표1에서 나타난 것과 일치함도 확인할 수 있었다.

특성	샘플	알루미늄	황동	탄소강	단위
피크전압		4.4	1.5	74	(V)
광흡수율		40	74	63	(%)
열팽창계수		0.23	4.70	0.25	(10 ⁻⁶)
열전도도		209	121	60.3	(W m ⁻¹ K ⁻¹)
종파도달 시간		3.115	4.220	3.389	(ns)
종파속도		6.42	4.70	5.9	(km/s)