

플라스틱 마킹을 위한 레이저 빔 (CO₂, Nd:YAG)의 대상물질과의 상호작용에 관한 연구

The Study of Interaction between Laser Beam (CO₂, Nd:YAG) and Material for Plastic Marking

조선대학교 물리학과 신용진, 유영태, 박영식, 양경승, 김영섭, 박영신

I. 서론

고출력 레이저가 점차 개발됨에 따라 레이저를 이용한 가공기술은 급속히 진보되어 정밀도나 경제성 등 여러 가지 면에서 재래기술을 앞서고 있다. 특히 레이저빔의 우수한 에너지 지향성과 집중도로 인하여, 마킹이나 초정밀 가공 등의 분야에서 주요한 가공 도구로서 각광을 받고 있다. 특히 최근 반도체 제조 업계에서 레이저를 이용한 IC 패키지 마킹기술은 상당한 진척을 이루었고, 잉크 마킹이나 타각과 같은 재래기술을 급격히 대체하고 있다. [1-4]

일반적으로 레이저 마킹에는 TEA CO₂ (Transverse Excitation Atmospheric) 레이저 (파장: 10.6 μm), Nd:YAG 레이저 (파장: 1.064 μm , 532 nm, 355 nm), Ar 이온 레이저 (파장: 514 nm, 488 nm) 그리고 엑시머 레이저 (파장: XeCl 308 nm, KrF 248 nm, ArF 193 nm) 등이 사용되고 있고 마킹의 형태 및 대상물질에 따라 열적 상변위, 광·화학적 에블레이션, 염료의 색 분해등과 같은 레이저빔의 물리·화학적 작용이 이용되고 있다. 특히 레이저마킹의 주된 응용 분야인 반도체 마킹에서는 TEA CO₂와 Nd:YAG 레이저빔의 열·화학적 작용을 이용한다. [5-10] 또한 최근 반도체 시장에 버금가는 넓은 시장을 점유하고 있는 플라스틱 업계에서도 TEA CO₂와 Nd:YAG 레이저를 이용한 마킹 공정을 도입하고 있으며, 마킹 대상 물질의 다양성으로 인해 많은 응용 분야들이 새롭게 개발되고 있다. 이러한 플라스틱 레이저 마킹 공정에서는 (a) 대상물의 표면에 도포된 층의 에블레이션 이나 제거; (b) 표면으로부터 모재의 에블레이션; (c) 발포나 용융 등에 의한 대상물 표층의 물리적 변화; (d) 대상물 표면의 색상 변화 등과 같은 레이저빔의 마킹 효과를 이용하고 있기는 하나, 주로 대상물 표층의 레이저의 열작용으로 인한 물리적 변화를 이용한다. [11]

현재 레이저 마킹 기술은 비교적 성숙된 기술이지만 플라스틱 업계를 중심으로 새로운 응용 분야가 개발됨으로써 레이저빔과 대상물질의 작용에 관한 보다 깊은 연구가 절실히 요구되고 있다. 플라스틱 레이저 마킹에 관한 연구는 PCB 제작시 레이저 천공공정에 필요한 기초적인 자료를 제공한다는 점에서 더욱 그러하다. 따라서 본 연구에서는 TEA CO₂ 레이저빔(파장: 10.6 μm)과 Nd:YAG 레이저빔(파장: 1.064 μm , 532 nm, 355 nm)을 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)에 조사하고 레이저빔의 조사에너지에 따르는 흠의 형태를 관찰함으로써 레이저빔과 대상물질과의 상호작용을 연구 하고자한다.

II. 실험방법

본 실험에서 사용한 레이저 소스는 평균 출력 14W, 최대 출력 17W의 CW CO₂ 레이저 발생기 (HC-20, Synrad)와 멀티모드에서 최대출력 80W급 Nd:YAG 레이저(YAG 22, Fotona)를 사용하였다. 시료는 생활용품의 재료로 가장 널리 사용되고 있고, 본 실험에서 사용한 레이저

빔의 파장대에서 흡수율이 높은 ABS (LG AF-302) 사출판(5.0 cm × 4.0 cm × 2.0 mm)을 사용하였다. 발생기로부터 조사된 레이저빔은 각각 초점거리가 15.24 cm, 22.3 cm인 ZnSe 코팅된 f-θ 렌즈를 사용하여 시료 위에 집속하였다. 조사된 에너지는 마킹 직전과 직후에 Power/Energy Meter (OPHIR, NOVA)의 수광부를 가능한 렌즈 가까운 위치에 놓아 측정한 후 평균값을 취하였다.

레이저빔에 의해 시료에 형성된 흠의 평면을 관측하기 위해 쌍안 실체 현미경 (동원정밀, OSM-1)과 영상분석 소프트웨어 (Compuscope Standard 1.1)를 사용하였다. 한편 흠의 단면은 액화질소에 시료를 담구어 급냉각한 후 시료 전면에 형성된 흠들의 중심을 지나도록 충격을 가하여 절단하여 같은 방법으로 관찰하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

레이저에 의해 형성된 전형적인 흠의 형태는 그림 1에 보였으며, 흠의 형태 뿐 아니라 시료의 가열 전력을 보여 주는 흠 주변의 열 영향층도 볼 수 있었다.

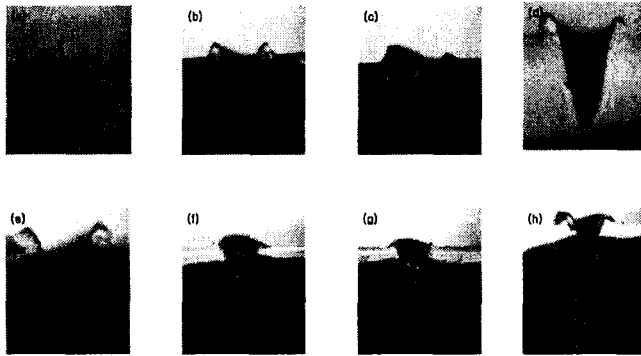


그림 1. 레이저빔에 의해 ABS에 형성된 흠은 조사 에너지 및 레이저빔에 따른 단면의 형태.

(a)~(e) : 120배율; (f)~(h) : 60배율

레이저빔에 형성된 흠의 크기는 그림 4에 보였으며, 흠의 깊이와 지름은 대략 조사 에너지에 비례함을 알 수 있었다. 한편 흠의 주변에 형성된 외륜의 형태는 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 비대칭적이며, 일정하지 않아 그 크기를 결정할 수 없으므로 그림 4에서 제외되었다. 흠과 주변에 형성된 외륜의 형태는 레이저빔에 의한 급격한

시료 온도의 상승으로 인하여 형성된 되쏘임 압력과 사출성형로 인해 형성된 시료의 이방성과 관련지어 설명할 수 있었다. 이미 발표된 광학기록 매체에 관한 연구논문들에 따르면 레이저빔에 의해 형성된 외륜의 원동력으로서 두 가지 기작을 고려하고 있지만, 어느 하나도 정확한 원동력으로서 결론을 내리지 못하고 있다. [12-15] 이에 본 실험에서는 두 가지 기작에 대한 단순한 모형을 제시하고 ABS의 흠과 외륜 형성의 원동력으로서의 역할을 검토하고자 한다.

(a) 표면장력의 역할:

그림 2는 흠과 주변의 외륜의 형성 단계에서 표면장력의 역할을 보여준다. 레이저빔의 조사로 인해 시료 표면의 열팽창으로 초기 형태의 흠이 형성되고 지속적인 시료의 가열로 증배가 형성된다. 마지막 단계로 레이저빔은 차단되고 증배가 냉각되면서 표면장력으로 인해 흠과 외륜이 형성된다. 이때 필요한 점성에너지와 표면장력은 대략 다음과 같이 관련지을 수 있다.

$$\sigma > E_{\eta} / \pi r^2 = \eta r^2 / (l\tau) \sim 2 \times 10^4 \eta \text{ dyne/cm}$$

여기서 η 는 용융상태의 시료의 점성, r 은 흠의 반경, l 은 흠의 깊이 그리고 τ 는 흠이 형성되는 데 필요한 시간이다. 그러나 대부분의 플라스틱에 대해 $\sigma \leq 40 \text{ dyne/cm}$ 이므로, 흠 형성의 원동력이 표면장력이 아님을 알 수 있다.

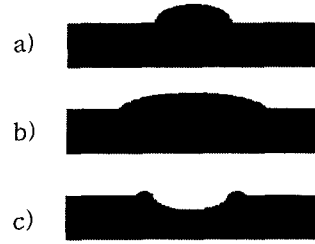


그림 2. 표면장력에 의한 흠의 형성

(b) 되쏘임 압력의 역할:

레이저빔의 조사로 인한 순간적인 시료의 기화는 용융 상태의 시료를 중심으로부터 외곽으로 분출할 수 있는 되쏘임 압력을 형성할 수 있을 것이다. 그림 3은 이러한 되쏘임 압력의 역할을 잘 설명하고 있으며 에블레이션 운동에너지는 근사적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E_a \sim (F_a \pi r^2 \tau)^2 / 2 f \rho \pi r^2$$

f : 흠 체적에 대한 에블레이션 체적 분율

F_a : 시료 표면에 작용하는 되쏘임 압력

되쏘임 압력이 등방적이고 점성력을 극복하기에 충분하다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

그림 3. 흠의 형성시 되쏘임 압력의 작용

$$F_a \geq F \cdot r/l \text{ 혹은 } E_a \geq r^6 \eta^2 / (f \rho l^5) \sim \eta^2 / f \text{ nJ}$$

ABS의 경우 E_a 의 최소값은 대략 0.01mJ 이나 실제로 조사된 레이저빔의 에너지는 수십 mJ 이므로 최소값을 능가한다. 즉 ABS의 경우 흠 형성의 주된 원동력은 급작스런 기화(에블레이션)로 인한 되쏘임 압력임을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 흠 형성의 원동력이 되쏘임 압력임으로 흠의 형태는 용융상태의 시료가 수축시 인가되는 표면장력의 형태보다는 레이저빔에 의해 야기된 시료 온도의 공간분포와 밀접한 연관이 있을 것으로 예상된다. 즉, 흠의 형태는 시료의 등온선을 나타내는 영역 I과 II의 경계면과 일치할 것이다. 한편 일반적인 형태의 레이저빔이 시료에 조사될 때, 시료 온도의 공간적인 분포는 해석적인 해로서는 존재하지 않지만, 조사된 빔의 허리에 비해 먼거리에 대해서 근사적으로 다음과 같은 쿨롱의 법칙을 따른다. [16]

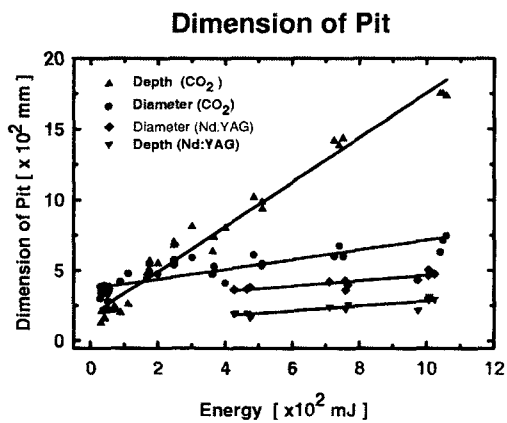


그림 4. 조사된 빔의 에너지가 증가에 따른 흠의 크기(깊이 및 지름).

$$T \cong \frac{P}{2\pi K w} \frac{1}{\sqrt{R^2 + Z^2}}; \quad \text{즉, 쿨롱의 법칙은 빔허리에 비해 크기가 큰 홈의 깊이와 지}$$

름은 조사 에너지에 비례함을 의미한다. 이와 같은 홈 형태의 조사 에너지 의존성은 그림 4.에

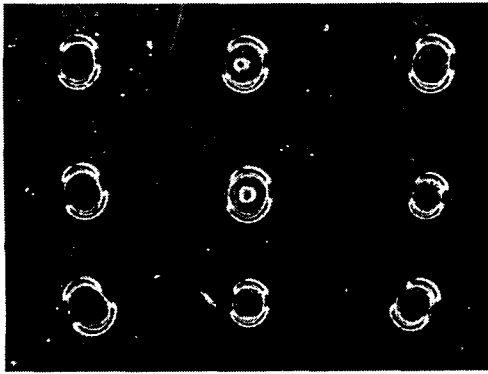


그림 5. CO₂ 레이저빔에 의해 ABS 시료에 형성된 외륜의 전개방향

서 확인할 수 있다. 그러나 그림 1.에서 볼 수 있듯이 두 레이저빔은 공히 홈과 홈의 주변에 외륜을 형성하나, 그 형태는 레이저빔에 따라 다르다. 홈 형태의 차이는 주로 빔의 흡수능과 반사능에 기인한 것으로 사료된다. [17]

그림 5.은 CO₂ 레이저빔의 조사로 ABS 시료에 형성된 홈과 홈 주변의 외륜을 시료의 평면에서 본 모습이다. 확대된 홈의 모습들은 그 중심이 시료에서의 상대적 위치를 나타내도록 배열되었다. 그림에서 알 수 있듯이 외륜의 가장 크게 전개된 방향은 사출시 주입된 용융상태의 시료의 흐름과 일치한다. 이것은 사출에 의해 야기된 시편의 이방성이 외륜의 전개 방향을 결정짓는다는 것을 의미한다.

V. 참고문헌

- [1] R. R. Tummala and E. J. Rymaszkeski, *Microelectronics Packaging Handbook* (Van Nostrand Reinhold, New York, 1989), Ch. 7 - 10
- [2] M. Pecht, *Handbook of Electronic Package Design* (Marcel Decker, New York, 1991)
- [3] M. C. K. Chua, S. Rao, S. H. Tan and S. J. Chua, Proc. Asia Pacific Conf. On Optics Technology, Singapore, pp. 1-18 (1988)
- [4] G. Holizinger, K. Kosanke, and W. Menz, *Optics Laser Technol.* 5, 256 (1973)
- [5] H. Zetner, *J. Packaging Prod.* 26, 477 (1986)
- [6] L. H. Healy Jr., Proc. IEPS, 1984, pp. 392 - 398
- [7] W. L. Arthur, *Lasers Optronics* 8, 51 (1989)
- [8] H. K. Benhard, *Lasers Optronics* 7, 61 (1988)
- [9] H. K. Benhard, Proc. SPIE 744, 185 (1987)
- [10] J. Miller, *Eval. Eng.* 29, 20 (1990)
- [11] D. Wildmann and B. Pietsch, *Germnn Plastics* 79, 18 (1989)
- [12] J. J. Wrobel, A. B. Marchant, and D. G. Howe, *Appl. Phys. Lett.* 40, 928 (1982)
- [13] D. A. Hill and D. S. Soong, *J. Appl. Phys.* 61, 2132 (1987)
- [14] K. F. Wissbrun, *J. Appl. Phys.* 62, 1123 (1987)
- [15] K. Law and G. E. Johnson, *J. Appl. Phys.* 54, 4799 (1983)
- [16] M. Lax, *J. Appl. Phys.* 48, 3919 (1977)
- [17] A. Matsunawa, Proc. SPIE 1502 (1991)