

• Topical Issue • 레이저를 이용한 가공 기술(Laser Processing Technologies)

상대습도에 따른 알루미늄 호일의 레이저 어블레이션 임계값 분석

Analysis of the Laser Ablation Threshold of Aluminum Foil under Varying Relative Humidity Conditions

박명호¹, 이동경^{1-5,#}
Myeongho Park¹ and Dongkyoung Lee^{1-5,#}

1 국립공주대학교 대학원 미래융합공학과 (Department of Future Convergence Engineering, Graduate School, Kongju National University)
2 국립공주대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University)
3 국립공주대학교 반도체공학과 (Department of Semiconductor Engineering, Kongju National University)
4 국립공주대학교 첨단분말소재부품센터 (Center for Advanced Materials and Parts of Powder (CAMP2), Kongju National University)
5 국립공주대학교 글로벌생산제조기술연구소 (Global Institute of Manufacturing Technology (GITECH), Kongju National University)
Corresponding Author / E-mail: ldkinka@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9260
ORCID: 0000-0001-9404-2321

KEYWORDS: Aluminum foil (알루미늄 호일), Laser ablation threshold (레이저 어블레이션 임계값), Relative humidity (상대습도)

To reduce the use of fossil fuels, the adoption of battery electric vehicles (BEVs) using lithium-ion batteries has been increasing in internal combustion engine alternatives. Accordingly, significant efforts have been made to improve the manufacturing process of lithium-ion batteries within electric vehicles. In particular, the cutting process of lithium-ion batteries has been actively discussed as it is closely related to battery performance. Laser-based cutting enables a more precise and sustainable manufacturing process. The laser ablation threshold has been investigated in many studies to achieve high-precision laser processing. While laser parameters and ambient conditions have been examined to determine the laser ablation threshold, studies focusing on the effect of relative humidity remain insufficient. Thus, this study investigated the laser ablation threshold of aluminum foil under varying relative humidity conditions. First, a laser interaction chamber was fabricated to control the relative humidity during experiments. A scanning electron microscope (SEM) was then used to observe laser ablation craters and analyze the threshold. The variation of the laser ablation threshold with relative humidity revealed changes in the interaction between the laser and aluminum foil depending on the humidity level.

Manuscript received: April 14, 2025 / Revised: June 12, 2025 / Accepted: June 19, 2025

1. 서론

현재 내연기관은 화석연료의 주요 사용처로 연간 총 에너지의 수요의 3분의 1을 소비하고 있으며, 지구 온난화와 대기 오염에 대한 우려가 커지고 있다. 이에 따라 대체 에너지원으로서 리튬 이온 배터리는 많은 장점을 가지고 있다[1]. 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 높은 쿨롱 효율, 낮은 자가 방전 특성, 다양한 전극 설계로 접근 가능한 광범위한 화학 퍼텐셜로 인해 전기자동차로 개발되고 널리 사용된다[2-6]. 리튬 이온 배터리는

크게 양극, 음극, 분리막, 전해질로 구성되어 있다. 특히 양극의 경우 배터리 밀도와 사이클 성능을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 양극의 경우, 활물질과 알루미늄 호일로 구성되어 있으며, 다양한 재료 (LFP, NMC, LCO 등)들이 활물질로서 사용되어지고 있다[7-9]. 양극 제조 공정은 활물질들을 섞는 믹싱(Mixing) 공정, 활물질들을 알루미늄 호일에 코팅(Coating) 공정, 활물질이 알루미늄에 잘 부착되기 위한 프레스링(Pressing) 공정, 시트 단위로 슬리팅(Slitting), 노칭(Notching) 공정이 순서대로 이루어진다. 특히 슬리팅, 노칭 공정은 정밀하게 진행되어야 하며, 정밀하게

이루어지지 않을시 배터리 성능에 악영향을 미치게 된다. 알루미늄 호일의 경우 공정 후 호일의 가장자리나 표면에 입자가 남아서는 안 되며, 버가 없는 절단면이 필요하다[10,11].

현재 슬리팅과 노칭 공정은 기계적 공정과 레이저 공정으로 이루어져 있다. 특히 레이저 공정은 기계적 공정과 달리 비접촉 공정으로서 가공이 진행될수록 접촉에 의한 오염이 적어 더 정밀한 공정으로 여겨진다. 하지만, 레이저와 재료간의 반응 특성을 자세히 이해함으로써 정밀한 공정으로 이루어지기에 그에 대한 자세한 조사가 필요하다. 많은 연구들은 재료와 레이저 간의 상호작용을 조사하기 위하여 레이저 어블레이션 임계값에 대하여 조사하였다. 레이저 어블레이션 임계값은 레이저가 재료표면과 반응하여 제거가 일어나는 시점의 에너지 밀도(J/cm^2) 값을 나타내며, 레이저와 재료간의 상호작용을 파악하기 위한 기초적인 자료로서 이용된다[12,13]. 레이저 어블레이션 임계값은 같은 재료 조건에서 크게 두가지 요인들에 의해 영향을 받는다. 첫번째는 레이저 파장[14,15], 레이저 Pulse Duration [16,17], 레이저 Pulse Repetition Rate [18,19] 등 레이저 파라미터 변화에 따른 요인이다. 레이저 파라미터 정보는 쉽게 변경 가능하기에 많은 연구들이 선행되어왔다. 두번째는 주변환경에 따른 영향이다. 대표적으로 주변 온도[20], 액체 환경[21], 다양한 가스[22]에 대한 연구들이 진행되었지만, 주변환경으로서 고려해야할 대상이 많다. 특히 상대습도의 경우 계절에 따라 다양한 값을 나타내고, 그에 따른 영향을 파악할 필요가 있지만, 그에 따른 연구가 부족하다.

본 연구는 상대습도에 따른 알루미늄 호일의 레이저 어블레이션 임계값에 대하여 조사하였다. 레이저와 상호작용할 수 있고, 상대습도 조정이 가능한 챔버를 제작하였다. 레이저 어블레이션 임계값을 조사하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 그에 따른 레이저 어블레이션 임계값을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 챔버 제작 및 성능 분석

일정한 온도 및 다양한 상대습도를 확보하기 위하여 챔버를 직접 제작하였다. Fig. 1은 챔버의 전체적인 개략도를 보여준다. 챔버는 투명 석영 유리판, 용기 뚜껑, 차단 프레임, 실리카겔, 물, 온습도계로 구성되어 있다. 투명 석영 유리판은 레이저의 빛이 투과하여 챔버 내부의 시편과 상호작용을 위한 부품으로 투과율 99%의 값을 보여준다. 용기 뚜껑은 투명 석영 유리판이 부착되고, 내부 공기들을 차단하게 해준다. 차단 프레임은 챔버 내부의 공기들을 차단하게 하여 수분들이 외부로 빠져나가지 못하게 한다. Fig. 1(a)는 챔버 내부 낮은 상태의 상대습도를 확보하기 위하여 실리카겔 만을 이용하였다. Fig. 1(b)는 챔버 내부 높은 상태의 상대습도를 확보하기 위하여 물 만을 이용하였다. 제작한 챔버 내부 온도는 외부 온도와 같았으며, 외부 온도를 일정하게 유지함으로써 내부온도도 일정하게 유지시켰다.

Fig. 2는 챔버 내부의 성능 평가를 나타낸 그래프이다. 챔버

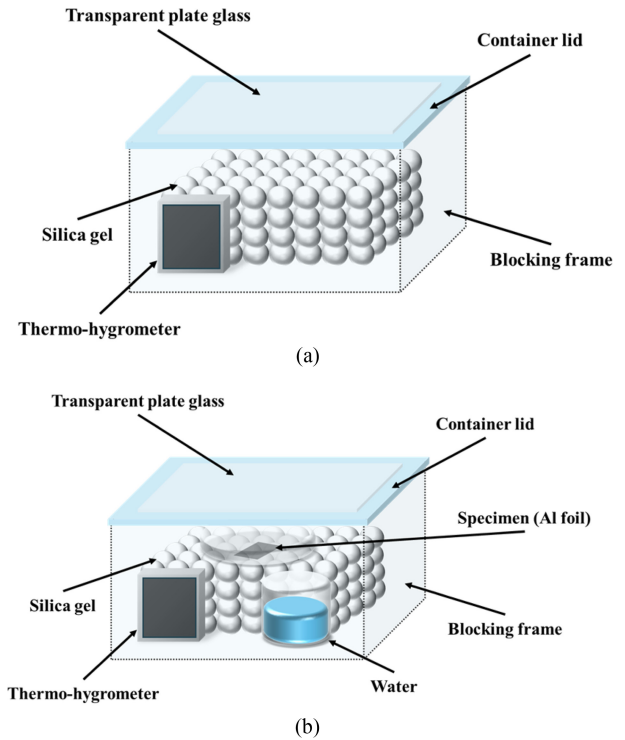


Fig. 1 Schematic diagram of a chamber composed of (a) silica gel (b) water

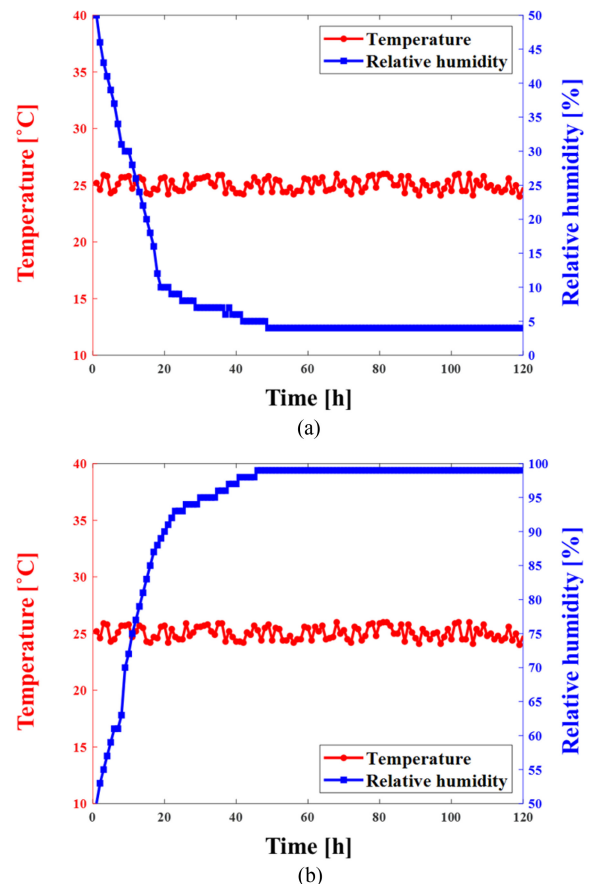


Fig. 2 Graph of temperature and humidity in chamber (a) silica gel-based (b) water-based

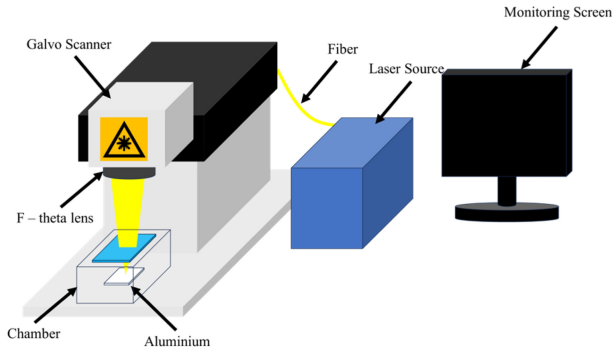


Fig. 3 Schematic diagram of the overall laser system

Table 1 Laser experimental parameters

Relative humidity [%]	4	99
Pulse duration [ns]	8	
Pulse repetition rate [kHz]	200	
Power [W]	0.4-20 (Interval: 0.4)	
Number of pulses	1000	
Laser fluence [J/cm ²]	0.14 – 7.07	

내부의 온도와 상대습도를 1시간 간격으로 평가하였고, 총 120 시간을 관찰하였다. 일정한 온도를 유지하면서 낮은 상대습도와 높은 상대습도를 목표로 하였다. Fig. 2 (a)는 실리카겔만 넣은 챔버 내부의 온습도를 나타낸다. 온도의 경우 약 25°C로 거의 일정하게 유지되었고, 상대습도는 실리카겔을 넣기 시작 지점에 약 50%로 시작하였으며, 49시간 이후 상대습도가 4%를 달성하였다. 그 이후 71시간동안 상대습도가 4%로 계속 유지되는 것을 확인하였고, 총 120시간 이후에도 4%로 일정하게 유지되었다. Fig. 2(b)는 물만을 넣은 챔버 내부의 온습도를 나타내었다. 챔버 내부의 온도는 약 25도로 일정하게 유지되었고, 상대습도의 경우 약 물이 들어간 시점에서 약 50%의 상대습도를 확인하였다. 그 후, 46시간 이후 99% 상대습도가 유지되는 것을 확인하였다. 73시간 동안 상대습도가 99%로 유지되는 것을 확인하였고, 총 120시간 이후에도 99%의 상대습도가 유지되었다.

2.2 레이저 시스템

본 실험의 전체적인 레이저 시스템은 Fig. 3과 같이 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 재료는 알루미늄 포일로 두께는 15 μm이며, MTI Corporation에서 구매하였다. 레이저는 Ytterbium Pulsed Fiber Laser (IPG Photonics)를 이용하였다. 레이저의 스펙의 경우, 레이저의 파장은 1064 nm, 파워는 20 W, Repetition Rate는 1000 kHz, Pulse Duration은 200 ns까지 이용 가능하다. 레이저의 초점거리는 189 mm이며, 스팟크기는 30 μm이다. 본 실험에서 사용한 레이저 파라미터는 Table 1에 나타내었다. 레이저 빛이 챔버 내부와 상호작용하기 위해서 투명유리판을 통과해야 하므로, 투명유리판을 통과한 후의 레이저 초점거리는

약 300 μm 증가하였으며, 그에 맞게 초점거리를 설정하였다. 추후 레이저 어블레이션 임계값을 파악하기 위하여 레이저 파워만을 변경하였다. 상대습도만의 레이저 어블레이션을 파악하기 위하여 상대습도를 제외한 나머지 값들은 동일한 상태로 실험을 진행하였다.

2.3 레이저 어블레이션 임계값

레이저를 이용한 미세 가공에서, 어블레이션된 표면 재료는 레이저 어블레이션 임계값이라는 특정 에너지 밀도 (J/cm²) 값에 도달해야만 제거가 가능하다. 따라서 이 값은 레이저와 재료 표면의 상호작용 메커니즘을 발견하는데 중요한 요소이다. 레이저 어블레이션 임계값을 결정하는데 있어 세가지 주요 방법이 이용된다. 첫번째는 현미경으로 표면 형태를 관찰하여 영구적인 손상의 존재를 검사하는 것이다. 두번째 방법은 온라인 모니터링 방법으로, 산란 또는 레이저 방출 스펙트럼 검출 방법을 이용하여 표면 플라즈마 방사선이 생성되는지 여부를 모니터링한다. 세 번째 방법은 절삭 면적(또는 부피)과 레이저 펄스 에너지 밀도 간의 선형 관계를 가정하고, 최소제곱법을 이용한 선형 회귀 외삽을 통해 절삭 면적(또는 부피)이 0이 되는 지점의 에너지 밀도를 어블레이션 임계값으로 추정하는 방식이다. 본 연구에서는 세번째 방식을 이용하였고, 앞선 두가지 방법에 비하여 실험적, 이론적 근거를 가지고 있어 더 정확한 결과를 얻을 수 있다[23].

레이저 어블레이션 임계값을 구하기 위하여 다음과 같은 식들을 이용한다. 식(1)에 재료가 제거될 때, 제거 크레이터 직경의 제곱 사이에는 식(1)과 같은 선형 관계가 성립된다.

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{th}}\right) \tag{1}$$

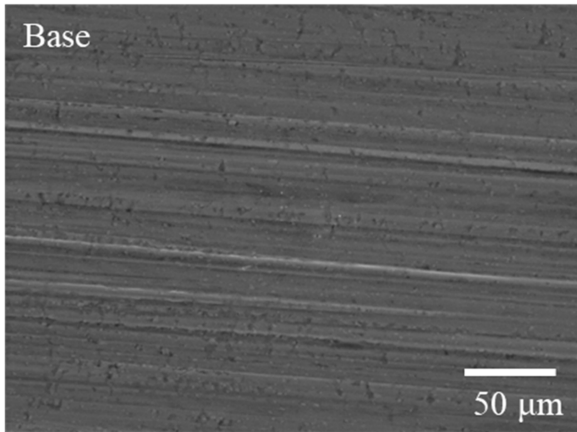
D는 레이저 어블레이션 지름을 나타낸다. ω₀는 초점 레이저 스팟 반경 (즉, 빔 허리 반경) 이다. φ₀는 빔 중심에서의 최대 에너지 에너지 밀도 (J/cm²)를 보여준다. φ_{th}는 가공된 재료의 어블레이션 임계값이다. 빔 중심에서의 최대 에너지 에너지 밀도 (J/cm²)는 식(2)와 같이 구한다.

$$\varphi_0 = \frac{2E_p}{\pi\omega_0^2} = \frac{2W_p}{f\pi\omega_0^2} \tag{2}$$

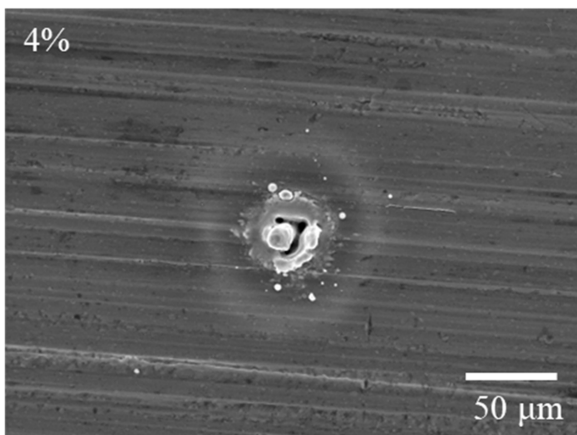
E_p는 빔 중심에서의 펄스 에너지를 나타낸다. W_p는 평균 펄스 전력을 나타낸다. f는 레이저 pulse repetition rate를 나타낸다. 레이저 어블레이션 임계값을 구하기 위해서 다음 방정식을 이용한다[24,25].

$$\varphi_{th} = \frac{2W_p}{f\pi\omega_0^2} \exp\left(-\frac{D^2}{2\omega_0^2}\right) \tag{3}$$

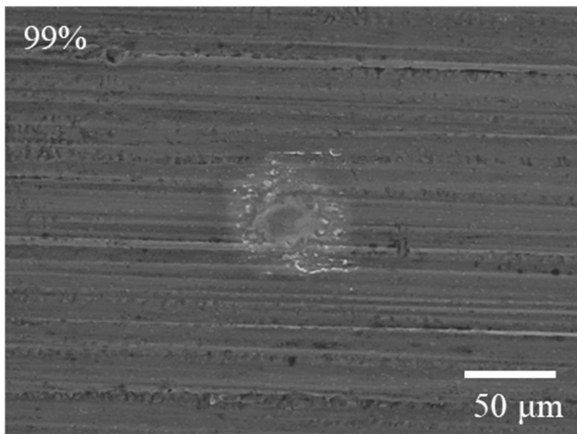
상대습도에 따른 레이저 어블레이션 지름과 레이저 에너지 밀도 (J/cm²)간의 관계를 나타내고, 그에 따른 레이저 어블레이션 임계값을 추정한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 SEM image of the surface of aluminum foil (a) base (b) irradiated by laser under 4% relative humidity (c) irradiated by laser under 99% relative humidity (Laser fluence: 4.67 J/cm²)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 레이저 어블레이션 형태학적 관찰

Fig. 4는 알루미늄의 레이저 어블레이션을 진행한 알루미늄의 표면을 SEM을 이용하여 나타내었다. 기존 레이저 조사를 안한

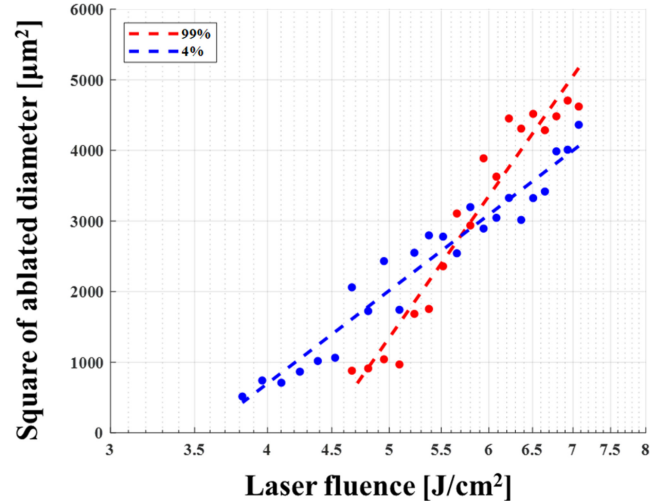


Fig. 5 Graph of the square of ablated diameter as a function of laser fluence

SEM 이미지와 비교하였을 때, 레이저를 조사한 후 크레이터들의 형태들이 나타난 것을 확인하였다. 상대습도에 따른 레이저 어블레이션 형태들의 차이가 보인다. 상대적으로 낮은 상대습도인 4%일 때, 상대적으로 높은 상대습도인 99%에 비해 더 많은 에너지 밀도 (J/cm²)가 적용되어 크레이터 중심부의 녹은 형태와 표면이 어블레이션된 부분을 확인하였다. 어블레이션 크레이터 주위 부분에 작은 입자들의 형태가 부산물로서 나타났는데, 상대습도가 4%일 경우에 더 많은 분포를 보였다. 이것은 주변의 수분이 레이저 가공시 더 깔끔한 레이저 어블레이션 크레이터 형성에 영향을 주는 것으로 보인다.

3.2 레이저 어블레이션 임계값 특징

3.2.1 레이저 어블레이션 크기 분포

Fig. 5는 레이저 어블레이션 크기 분포를 파악하기 위하여 레이저 에너지 밀도 (J/cm²)에 따른 레이저 어블레이션 지름의 제곱을 보여준다. 두 상대습도에 따른 어블레이션 크레이터 크기 변화에 차이가 생긴다. 상대적으로 상대습도가 낮은 경우인 4%일 때, 레이저 에너지 밀도 (J/cm²)가 약 3.82 J/cm² 지점에서 레이저 어블레이션 크레이터 형성이 된 반면, 상대습도가 99%일 때, 에너지 밀도(J/cm²)가 약 4.67 J/cm² 지점에서 레이저 어블레이션 크레이터가 형성되었다. 상대습도가 높은 경우, 시편 표면에 더 많은 수분이 흡착되어 일부 레이저 에너지를 흡수하거나 산란시켜 시편에 전달되는 유효 에너지 밀도를 감소시킬 수 있다. 또한, 레이저 어블레이션 과정에서 생성되는 플라즈마는 크레이터 형성에 기여하는 역할을 수행한다. 그러나 높은 습도 환경에서는 수분에 의해 플라즈마 생성이 억제될 수 있으며, 이는 결과적으로 어블레이션 크레이터 형성을 방해하는 요인이 된다. 이러한 영향으로 인해, 상대습도가 높은 조건에서는 동일한 어블레이션 효과를 얻기 위해 더 높은 레이저 에너지 밀도 (J/cm²)가 요구됨을 확인하였다[26]. 레이저 에너지 밀도(J/cm²)가

Table 2 Laser ablation threshold depending on relative humidity

Relative humidity [%]	4	99
Laser ablation threshold [J/cm^2]	3.55	4.42

증가함에 따라, 상대습도가 낮은 조건에서는 어블레이션 크레이터의 지름이 비교적 완만하게 증가하는 경향을 나타냈다. 반면, 상대습도가 높은 조건에서는 동일한 에너지 밀도 증가에 대해 크레이터 지름이 급격하게 증가하는 현상이 관찰되었다. 이에 따라, 초기 에너지 밀도 구간에서는 상대습도가 낮은 시편에서 더 큰 어블레이션 크레이터 지름이 형성되었으나, 약 $5.7 J/cm^2$ 이상의 에너지 밀도에서는 상대습도가 높은 조건에서 더 큰 크레이터가 형성되는 역전 현상이 나타났다. 이는 $5.7 J/cm^2$ 미만의 에너지 밀도에서는 표면에 흡착된 수분이 플라즈마 생성을 억제하여 어블레이션 크레이터 형성을 저해하는 반면, $5.7 J/cm^2$ 를 초과하는 에너지 밀도에서는 수분이 오히려 플라즈마 생성을 촉진시켜 어블레이션 효과가 증폭되기 때문으로 해석된다.

3.2.2 레이저 어블레이션 임계값

Table 2는 상대습도에 따른 레이저 어블레이션 임계값을 보여준다. 상대습도가 낮을수록 더 작은 어블레이션 임계값을 나타내며, 이는 적은 레이저 에너지 밀도(J/cm^2)로도 어블레이션이 쉽게 발생함을 의미한다. 반면, Fig. 5에서는 레이저 에너지 밀도(J/cm^2)가 증가할수록, 상대습도가 낮은 조건에서 어블레이션 크레이터의 지름 증가율이 상대적으로 완만함을 확인할 수 있다. 이로부터 유추할 수 있는 바는, 초기에는 수분이 레이저와 알루미늄 간 상호작용을 방해하여 더 높은 임계 에너지를 요구하지만, 일단 어블레이션이 시작된 이후에는 수분이 레이저 에너지가 알루미늄에 보다 효과적으로 전달되도록 매개 역할을 할 수 있다는 점이다.

4. 결론

본 논문은 알루미늄 포일의 레이저 절단시 상대습도의 영향을 레이저 어블레이션 임계값을 이용하여 분석하였다. 레이저 어블레이션 크레이터는 더 많은 수분이 주변부에 영향을 주지 않도록 하는 역할을 하는것으로 확인되어진다. 수분은 초기 레이저 어블레이션이 발생하는 레이저 에너지 밀도(J/cm^2)를 증가시키게 한다. 어블레이션 크레이터 형성 후 에너지 밀도(J/cm^2)가 증가할수록 수분이 어블레이션 크레이터 크기 증가에 기여한다. 레이저 어블레이션 임계값을 조사한 결과 상대습도가 높을수록 더 큰 값을 보이며, 수분이 알루미늄 레이저 어블레이션에 방해를 한다. 알루미늄 절단 공정시 상대습도의 영향도 고려되어야 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

The research described herein was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) (No. RS-2023-00208039) funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT, Korea) and was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) (No. P0018009) funded by the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE, Korea). This work was also supported by the Human Resources Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) (No. RS-2024-00394769). The opinions expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the sponsors' views.

REFERENCES

1. Wakihara, M., (2001), Recent developments in lithium ion batteries, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 33(4), 109-134.
2. Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y., (2019), Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies, *Journal of Materials Chemistry A*, 7(7), 2942-2964.
3. Tarascon, J. M., Armand, M., (2001), Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries, *Nature*, 414(6861), 359-367.
4. Goodenough, J. B., Park, K. S., (2013), The Li-ion rechargeable battery: a perspective, *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176.
5. Goodenough, J. B., Kim, Y., (2010), Challenges for rechargeable Li batteries, *Chemistry of Materials*, 22(3), 587-603.
6. Armand, M., Tarascon, J. M., (2008), Building better batteries, *Nature*, 451(7179), 652-657.
7. Daniel, C., Mohanty, D., Li, J., Wood, D. L., (2014), Cathode materials review, *AIP Conference Proceedings*, 26-43.
8. Whittingham, M. S., (2004), Lithium batteries and cathode materials, *Chemical Reviews*, 104(10), 4271-4302.
9. Goodenough, J. B., (2007), Cathode materials: A personal perspective, *Journal of Power Sources*, 174(2), 996-1000.
10. Liu, Y., Zhang, R., Wang, J., Wang, Y., (2021), Current and future lithium-ion battery manufacturing, *iScience*, 24(4).
11. Örü̇m Aydın, A., Zajonz, F., Günther, T., Dermenci, K. B., Berecibar, M., Urrutia, L., (2023), Lithium-ion battery manufacturing: Industrial view on processing challenges, possible solutions and recent advances, *Batteries*, 9(11), 555.
12. Jeschke, H. O., Garcia, M. E., Lenzner, M., Bonse, J., Krüger, J., Kautek, W., (2002), Laser ablation thresholds of silicon for different pulse durations: theory and experiment, *Applied surface science*, 197, 839-844.

13. Gamaly, E. G., Rode, A. V., Luther-Davies, B., Tikhonchuk, V. T., (2002), Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics, *Physics of Plasmas*, 9(3), 949-957.
14. Torrisi, L., Borrielli, A., Margarone, D., (2007), Study on the ablation threshold induced by pulsed lasers at different wavelengths, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 255(2), 373-379.
15. Olivié, G., Giguère, D., Vidal, F., Ozaki, T., Kieffer, J. C., Nada, O., Brunette, I., (2008), Wavelength dependence of femtosecond laser ablation threshold of corneal stroma, *Optics Express*, 16(6), 4121-4129.
16. Hashida, M., Semerok, A. F., Gobert, O., Petite, G., Izawa, Y., (2002), Ablation threshold dependence on pulse duration for copper, *Applied Surface Science*, 197, 862-867.
17. Takahashi, T., Tani, S., Kuroda, R., Kobayashi, Y., (2020), Precision measurement of ablation thresholds with variable pulse duration laser, *Applied Physics A*, 126(8), 582.
18. Brygo, F., Dutouquet, C., Le Guern, F., Oltra, R., Semerok, A., Weulersse, J. M., (2006), Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation, *Applied Surface Science*, 252(6), 2131-2138.
19. Di Niso, F., Gaudiuso, C., Sibillano, T., Mezzapesa, F. P., Ancona, A., Lugara, P. M., (2013), Influence of the repetition rate and pulse duration on the incubation effect in multiple-shots ultrafast laser ablation of steel, *Physics Procedia*, 41, 698-707.
20. Thorstensen, J., Erik Foss, S., (2012), Temperature dependent ablation threshold in silicon using ultrashort laser pulses, *Journal of Applied Physics*, 112(10).
21. Liu, H., Chen, F., Wang, X., Yang, Q., Bian, H., Si, J., Hou, X., (2010), Influence of liquid environments on femtosecond laser ablation of silicon, *Thin Solid Films*, 518(18), 5188-5194.
22. Gusarov, A. V., Gnedovets, A. G., Smurov, I., (2000), Gas dynamics of laser ablation: Influence of ambient atmosphere, *Journal of Applied Physics*, 88(7), 4352-4364.
23. Zheng, B., Jiang, G., Wang, W., Mei, X., Wang, F., (2017), Surface ablation and threshold determination of AlCu4SiMg aluminum alloy in picosecond pulsed laser micromachining, *Optics & Laser Technology*, 94, 267-278.
24. Pecholt, B., Vendan, M., Dong, Y., Molian, P., (2008), Ultrafast laser micromachining of 3C-SiC thin films for MEMS device fabrication, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 239-250.
25. Zheng, B., Jiang, G., Wang, W., Wang, K., Mei, X., (2014), Ablation experiment and threshold calculation of titanium alloy irradiated by ultra-fast pulse laser, *AIP Advances*, 4(3).
26. Liu, J., Hou, Z., Wang, Z., (2023), The influences of ambient humidity on laser-induced breakdown spectroscopy, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 38(12), 2571-2580.



Myeongho Park

Ph.D. candidate in the Department of Future Convergence Engineering at Kongju National University. His research interest is Laser ablation fundamental research on various materials for the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) and their applications

E-mail: myeongho0203@gmail.com



Dongkyoung Lee

He graduated Ph.D in Mechanical Engineering at the University of Michigan- ANN Arbor in 2011 and 2012. Currently, he is a professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering at Kongju National University. His research interest is fundamental understanding of laser material processing for various applications (secondary battery, fuel cell, semiconductor packaging, display, nuclear power plant decommissioning, surface science)

E-mail: ldkkinka@kongju.ac.kr