

# 초단펄스 레이저를 이용한 유연 배터리의 비손상 프리폼 커팅 기술

## Damage-Free Freeform Cutting of Flexible Battery Using Ultra-Short Pulse Laser

지석영<sup>1,2</sup>, 김재구<sup>1</sup>, 조성학<sup>1,2</sup>, 임형준<sup>1,2</sup>, 장원석<sup>1,2,#</sup>  
SeokYoung Ji<sup>1,2</sup>, Jaegu Kim<sup>1</sup>, Sung Hak Cho<sup>1,2</sup>, Hyungjun Lim<sup>1,2</sup>, and Won Seok Chang<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science and Technology)  
<sup>2</sup> 한국기계연구원 나노공정장비연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery and Materials)  
# Corresponding Author / E-mail: paul@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7134  
ORCID: 0000-0002-3426-1781

KEYWORDS: Femtosecond laser (펨토초 레이저), Freeform cutting (프리폼 커팅), Flexible battery (유연 배터리), Hybrid foil (이중소재 기판)

*With the progress of flexible devices, numerous researchers aim to manufacture the flexible battery with freeform at various scales. Laser cutting is considered as one of the essential processes to achieve on-demand manufacturing but continuous wave or long-pulse laser beam may cause large heat affect zone (HAZ) in cutting process and may even result in failure of battery function. Herein, it was demonstrated that the sophisticated cutting process using ultra-short pulse laser is applicable for tailoring of flexible battery with multilayered structure. Based on the comparison of cutting results using nanosecond laser and femtosecond laser, we confirmed that laser cutting by femtosecond laser induces much less thermal damage on thin foil electrodes, separator, and electrolyte. Furthermore, we investigated the interaction of femtosecond laser with the materials composed of a flexible battery and implemented a process for cutting each material without causing any critical damage. To prevent a short circuit between the anode and cathode, which usually occurs during laser cutting of the actual battery, the double-side cutting process was done by adjusting the focal points of the laser beam. We assume that the proposed approach can be applied in a roll-to-roll based cutting process for the mass-production of flexible devices.*

Manuscript received: October 15, 2020 / Revised: December 10, 2020 / Accepted: December 23, 2020

### NOMENCLATURE

SEM = Scanning Electron Microscope  
EDX = Energy Dispersive X-Ray  
OM = Optical Microscopy  
HAZ = Heat Affect Zone

### 1. 서론

웨어러블, 소형화, 간편 공정 등의 유연 소자 제작 기술들이 각광을 받으면서 유연 디바이스 제작에 대한 연구가 활발하게

이뤄지고 있다. 유연 디바이스에 들어가는 디스플레이,<sup>1</sup> 메모리, 안테나, 센서,<sup>2</sup> 유연 소자 회로<sup>3</sup> 등이 활발하게 연구가 이뤄지고 있지만 이런 유연 소자들이 동작하기 위해서 가장 중요한 소자는 유연 배터리로 유연하면서 소형화할 수 있는 배터리 제작 기술이 연구되고 있다.<sup>4,9</sup> 특히 기존 배터리 구조에 사용하던 물질들은 유연 배터리 기술에 적합하지 않아 다양한 유연성을 가진 전극 금속들과 전해질 물질들이 새로이 개발되고 있다.<sup>4,7</sup>

유연 배터리는 전해질 재료의 종류에 따라 용량이 정해지며, 모양과 크기가 다양하게 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 이러한 다양한 크기와 모양을 제작하기 위해서는 펀칭틀이나 절단기를 이용한 기계적 가공 방법을 이용한다. 펀칭틀에 들어가는 금형틀은 최대 타발수가 정해져 있어 일정량의 절단 후 다시 금형틀을 제작해야 하며 그때마다 금형틀 제작비용이

들어가므로 공정 가격이 올라가는 단점을 가지고 있다. 또한 기계적 가공 시 절단면 끝단 변형이 야기되고, 배터리 모양이 바뀔 때마다 금형들을 제작해야 한다는 단점도 있다. 금형들을 이용한 절단의 단점을 해결하기 위해서 레이저 절단 기술이 대안으로 이용되고 있으며 쉽고 빠르게 다양한 모양의 절단이 가능하여 지속적인 응용확대가 이루어지고 있다. 다만 기존 레이저 절단 기술에 많이 사용되었던 연속파 레이저인 CO<sub>2</sub> 레이저<sup>10</sup> 같은 경우 레이저 절단 시 다층 구조로 제작되는 유연 배터리의 절단 주변부에 열적 손상을 발생하게 되어 배터리의 효율 하락 뿐만 아니라 열적 손상이 발생한 영역만큼 배터리의 유효면적이 감소하기 때문에 유연 배터리 절단에는 적합하지 않다. 가격은 증가하나 연속파보다 주변부로 열적 손상을 적게 발생시키는 펄스파 레이저<sup>11-16</sup>를 이용한 레이저 절단 기술도 많이 사용되고 있지만 나노초 이상을 가진 긴 펄스폭을 이용하게 되면 레이저 조사 시 레이저 조사 시간이 물질 간의 열전달 시간보다 길어 마이크로 크랙, 충격파 영향(Shock Waving)과 같은 열 손상 영역(Heat Affected Zone)이 생기면서 정밀한 절단을 할 수 없게 된다.<sup>15,16</sup> 본 연구에서는 극초단 레이저를 이용하여 기존 레이저 절단 기술의 단점인 열적 손상 없이 유연 배터리 물질들을 절단하는 공정을 개발하였다. 또한 실제 유연 배터리 절단 시 발생하는 상단 금속판과 하단 금속판의 단락 현상에 의해 배터리가 방전되는 현상을 해결하기 위해서 양면 절단 기술을 적용하여 배터리 절단 시 단락 현상이 발생하지 않도록 공정을 최적화하였다.

## 2. 유연 배터리와 레이저 절단 공정

### 2.1 유연 배터리의 이종소재 다층 구조

Fig. 1은 유연 배터리 구조를 보여준다. 배터리 내에는 양극(Anode), 음극(Cathode), 분리막(Separator), 전해질(Electrolyte), 상단 하단 금속 필름, 절연막(Sealing Film) 그리고 패키징 필름 등 다양한 물질들이 필요하다. 음극 활성 물질은 탄소(Carbon)를 사용하였고, 양극 활성 물질은 NCM622(니켈(Nickel) : 코발트(Cobalt) : 망간(Manganese) = 6 : 2 : 2)를 사용한다. 전해질 물질은 LiPF<sub>6</sub> in EC/EMC를 사용한다. 전극으로 사용되는 금속의 경우 유연성을 가질 수 있는 알루미늄, 구리, 니켈, 스테인리스 스틸 포일(Foil) 등을 사용하고 분리막, 패키징 필름은 폴리에틸렌을 사용한다. 본 연구에서는 유연 배터리 제작 전문 신생 업체인 (주)유벳에서 제작한 샘플을 사용하였다.

### 2.2 나노초 레이저와 펄스 레이저 공정 비교 및 분석

본 연구에서 절단 공정 결과 비교를 위하여 사용된 레이저의 사양은 Table 1과 같다.

레이저 절단에 사용되는 다양한 레이저 중 극초단 레이저를 사용한 이유는 열적 손상을 최소화하기 위해서이다. 극초단 레이저가 아닌 나노초 레이저와 같이 열전달 속도보다 긴 펄스 폭을

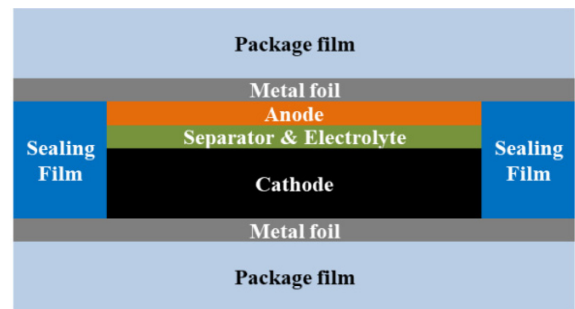


Fig. 1 Flexible battery structure

Table 1 Laser specification

	Femtosecond laser	Nanosecond laser
	SATSUMA HP <sup>2</sup> (Amplitude)	AREX 20W (Acrovision)
Laser energy	> 40 μJ	> 1.0 mJ
Pulse width	< 350 fs	< 100 ns
Wavelength	1,030 nm	1,050 nm
Repetition rate	> 2.0 Mhz	> 100 khz

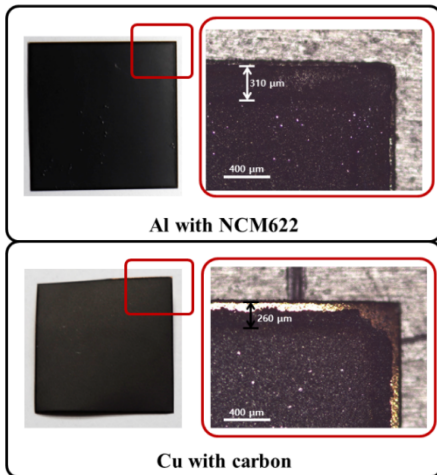
발진하는 레이저 경우 시료의 용융과 증발에 의해 재료가 제거될 때 레이저가 조사되는 영역 주변부에도 열적 영향을 미치게 된다.<sup>8-11</sup> Fig. 2는 나노초 레이저와 펄스 레이저를 이용한 전극과 금속 기판의 절단 비교를 한 것이다. 나노초 레이저와 펄스 레이저의 가공 스캔 속도는 각각 40, 20 mm/s를 이용해서 가공했다. Fig. 2(a)는 나노초 레이저를 이용하여 절단한 결과이다. 절단 부위를 보면 전극 물질들의 레이저 열에 의한 손상 범위가 250 μm 이상 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 열 손상은 배터리의 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 작은 크기로 미세 커팅을 시도할 때에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 극초단 레이저를 이용하여 절단 주변부에 열 영향을 주지 않는 절단을 시도하였다. 펄스 레이저의 경우 레이저 펄스 조사 시간이 자유 전자(Carrier)와 재료 격자(Lattice) 사이의 에너지 전달 시간보다 훨씬 짧아 흡수된 에너지는 물질의 용점(Melting Point)보다 높은 온도로 급격하게 올라가면서 재료가 제거되고, 주변부에는 열전달이 이뤄지지 않아 HAZ 생성이 억제된다. 이는 미세하고 정교한 절단 공정에 적합한 기술로 펄스 레이저를 이용한 절단 결과를 Fig. 2(b)에 도시하였다.

### 2.3 유연 배터리의 레이저 절단 공정 조건 선정

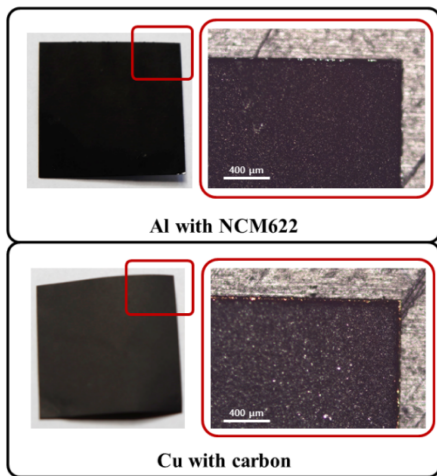
유연 배터리를 구성하는 물질들과 극초단 레이저 간의 상호 작용 조사를 통해 레이저 절단 시 각 물질들이 열적 손상을 최소화하면서 절단 공정 시 레이저 파라미터를 선정할 수 있다. 유연전극용 금속 포일로 사용되는 알루미늄, 구리, 니켈, 스테인리스강과 분리막으로 사용되는 폴리에틸렌 계열 원단인 투명 필름과 폴리에틸렌 계열 원단에 세라믹 코팅이 부착된 불투명 필름까지 다양한 물질들의 최적화된 레이저 파라미터를 선정하는 실험을 진행하였다.

Table 2 Optical properties of battery components

Materials	Absorption coefficient ( $\lambda = 1030 \text{ nm}$ ) [cm-1]	Melting point [K]	Thermal conductivity [W/mK]	Heat capacity at 25°C [J/g°C]	Thermal diffusivity [mm <sup>2</sup> /s] @ 300 K
Al	$1.2021 \times 10^{6[17]}$	$933.45^{21}$	205.0	0.900	97
Cu	$8.2634 \times 10^{5[18]}$	$1,358.15^{21}$	385.0	0.385	111
Ni	$6.9763 \times 10^{5[19]}$	$1,728.15^{21}$	90.9	0.440	24.9
STS	$7.646 \times 10^{6[20]}$	$1,673.15^{21}$	16.3	0.5	4.2



(a) Cutting results with nanosecond laser



(b) Cutting results with femtosecond laser

Fig. 2 Optical images (OM) of laser cutting results in Al with NCM622 and Cu with carbon

펄토초 레이저를 물질에 조사하게 되면 물질 표면에 열이 전달되는 공식은 다음 식(1)부터 식(3)과 같이 일차원, 2개 온도 모델(Two-Temperature Model)로 설명할 수 있다.

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_i) + S \tag{1}$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma(T_e - T_i) \tag{2}$$

$$Q(z) = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z}, S = I_{(t)} A \alpha \exp(-\alpha z) \tag{3}$$

수식에서 전자와 격자의 열 용량(Heat Capacity)는 각각  $C_e, C_i$ 이고,  $Q(z), S, \gamma, z, A, \alpha, k_e$ 는 각각 열플럭스(Heat Flux), 레이저 가열 소스(Laser Heating Source), 전자-포논(Phonon) 커플링 계수, 표면 흡수율(Surface Absorptivity), 물질 흡수 계수(Material Absorption Coefficient), 그리고 전자 열전도율(Electron Thermal Conductivity)이다. 여기서 식(3)의 레이저 가열 소스 식에서 레이저 파워와 흡수 계수에 의해 열이 전달되는 것을 확인할 수 있다. 그래서 흡수 계수를 고려하여 인가하는 레이저 에너지를 고려하였다. 하지만 절단 공정에서는 표면 식각(Ablation)이 아닌 두꺼운 두께의 필름을 절단하기 위해 높은 레이저 에너지를 가하기 때문에 주변부의 열 영향 정도는 열확산율(Thermal Diffusivity) 특성을 통하여 예측할 수 있으며 다음 식(4)와 같다.

$$D = \frac{k}{\rho c_p} \tag{4}$$

$k, \rho, c_p$ 는 각각 열전도율, 밀도(Density), 그리고 비열(Specific Heat Capacity)이다. 열확산율이 낮게 되면 레이저 절단 시 레이저에 의해 발생된 열이 빠져나가지 못하고 남아 있어 주변부에 열적 손상을 일으킬 수 있고, 확산율이 높으면 열이 쉽게 빠져나가 주변부에 영향을 적게 준다. Table 2는 물질별 다양한 광학 특성값을 정리한 것이다. 알루미늄 같은 경우 광흡수 계수가 높고, 녹는점이 낮아 레이저 에너지가 낮아도 기판의 온도가 녹는점에 빠르게 도달할 수 있어 낮은 레이저 에너지에서 절단이 이뤄질 수 있으며, 열확산율이 높아 절단부 주변은 열이 빠르게 확산되어 주변부에 열적 영향이 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 반대로 스테인리스강 같은 경우, 흡수 계수는 높지만 녹는점이 높아 높은 레이저 에너지를 가해야 하고, 열확산율이 낮아 절단 시 발생하는 열이 빠져나가지 못해 절단면 주위에 열적 손상을 발생할 수 있게 된다.

스테인리스강, 구리, 알루미늄을 같은 레이저 파라미터로 절단하였을 때 발생하는 HAZ의 양을 Fig. 3에서 보여준다. 모든 재료에는 레이저 에너지: 4.0 μJ, 스캔 속도: 5.0 mm/s, 펄스 반복률: 500 kHz, 그리고 반복 횟수는 1번을 이용하여 절단하였다. Fig. 3(a)를 보면 열확산율이 낮은 스테인리스강은 절단면 주변부의 HAZ가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 최소 13에서 최대 27 μm까지 발생하였다. 하지만 Figs. 3(b)와 3(c)에서 보듯이, 열확산율이 높은 알루미늄과 구리 같은 경우 같은 레이저 파라미터를 가지고 절단하여도 절단면 주변부에 HAZ가 적게 발생하는

Table 3 Laser parameter of battery components

Materials (Thickness)	Laser energy [ $\mu\text{J}$ ]	Scan speed [mm/s]	Pulse repetition rate [Hz]	Scanning times
Al (30 $\mu\text{m}$ )	5.0	20	500 k	1
Cu (30 $\mu\text{m}$ )	3.0	10	500 k	1
Ni (30 $\mu\text{m}$ )	6.84	10	200 k	2
STS (30 $\mu\text{m}$ )	2.27	10	200 k	2
Polyethylene (PE) film (10 $\mu\text{m}$ )	3.82	30	200 k	1
PE coated in ceramics film (10 $\mu\text{m}$ )	1.4	40	200 k	1
Al with NCM622 (50 $\mu\text{m}$ )	7.08	20	500 k	2
Cu with carbon (60 $\mu\text{m}$ )	5.64	20	500 k	2
STS with NCM622 (60 $\mu\text{m}$ )	5.1	20	500 k	2

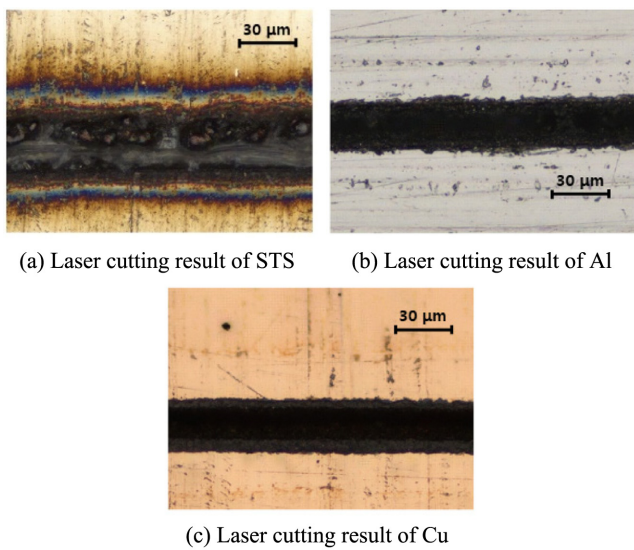
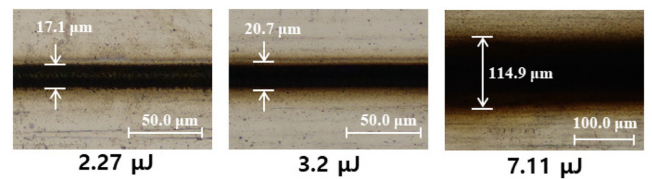


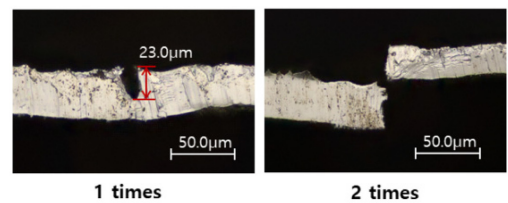
Fig. 3 Optical images (OM) of laser cutting results for STS, Al and Cu foil

것을 볼 수 있다. 알루미늄과 구리 각각 HAZ는 5.2, 5.8  $\mu\text{m}$ 가 발생하였다. 이러한 특성들을 고려하여 각 물질마다 레이저 파라미터 선정에 관한 실험을 진행하였고, 각 물질별 선정한 레이저 파라미터는 레이저 에너지, 레이저 스캔 속도, 레이저 펄스 반복률, 반복 횟수이다.

레이저 에너지에 따른 스테인리스강 포일의 절단 결과를 Fig. 4(a)에 도시하였다. 다른 레이저 파라미터인 스캔 속도, 반복률, 반복 횟수는 고정시키고 레이저 에너지를 변화해가면서 필름에 맞는 총 에너지를 증감하며 실험하였다. 인가된 레이저 에너지가 약하면 주변부의 열적 손상이 적게 일어나며 절단폭이 좁게 형성되는 것을 볼 수 있다. 하지만 에너지가 부족하면 필름이 완벽하게 절단되지 않는다(Fig. 4(a) 왼쪽). 완벽하게 절단이 되는 레이저 에너지를 가하게 되면 절단은 이뤄지지만 주변부에 약간의 열적 손상을 남기는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(a) 중간). 레이저 에너지가 높게 인가된 경우 절단 폭이 넓게 되는 것뿐만 아니라 열 손상이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4(a) 오른쪽).



(a) Laser cutting results for various laser energy on stainless steel foil



(b) Cross sectional OM image of laser cutting results for one time and twice scanning on stainless steel foil

Fig. 4 Femtosecond laser cutting results for various processing parameters and materials

재료에 따라서 극초단 레이저의 흡수율과 열전달 특성이 모두 다르기 때문에 각 물질마다 열적 손상이 이뤄지지 않으면서 절단할 수 있는 레이저 파라미터를 선정하기 위한 실험을 진행하였다. 하지만 스테인리스강의 경우 녹는점이 높아 높은 레이저 에너지를 가해야 하지만 열확산율이 낮아 열적 손상이 주변에 생기기 쉽다. 스테인리스강처럼 단 한번의 레이저 스캐닝만으로 완전한 절단을 하기 위해서는 인가해야 하는 레이저 에너지가 증가하여 열적 손상이 없이 커팅하기 힘든 재료들이 있다. 이런 경우 열적 손상을 줄이기 위해서는 인가되는 레이저 빔의 에너지를 작게 하고, 빔 스캐닝 횟수를 늘려가면서 절단해야 한다.

빔 스캐닝 횟수에 따른 절단면의 사진을 Fig. 4(b)에 도시하였다. 스테인리스강은 한 번 스캐닝으로 절단했을 때는 앞선 실험에서와 같이 단면부에서도 열적 손상을 남기는 것을 확인하였다. 열적 손상이 없는 레이저 파라미터를 사용하게 되면 Fig. 4(b) 왼쪽 결과와 같이 일부 깊이까지만 가공이 일어나고, 완전한 절단은 이루어지지 않았다. 절단면 주변에 열 영향부가 생기지 않도록 레이저 에너지를 조절하고 스캐닝 횟수를 증가시키는



Fig. 5 Laser cutting results of the battery materials with various patterns

것이 절단부의 단면 품질을 향상시키는 방법임을 확인할 수 있다.

유연 배터리를 구성하는 다양한 물질들에 대해 앞선 실험에서와 같이 열적 손상을 최소화하면서 절단하기 위한 실험을 반복하여 진행하였고, 이에 대한 공정 조건들을 Table 3에 정리하였다. 선정된 공정 조건을 이용하여 다양한 모양으로 절단한 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

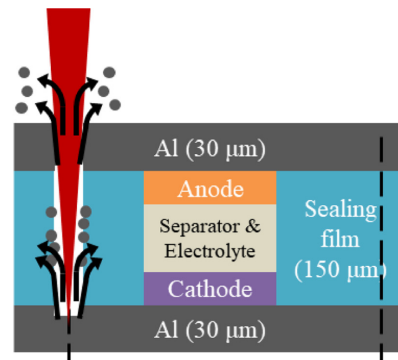
### 3. 단락 방지를 위한 레이저 절단 기술

#### 3.1 단락 현상

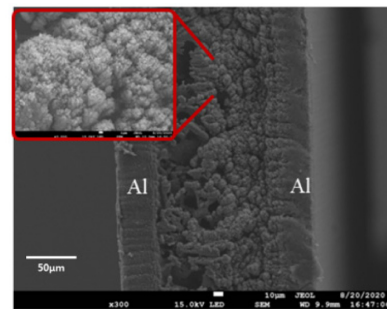
앞선 유연 배터리 물질들의 열적 손상 없는 레이저 파라미터 선정 실험을 진행하였다. 하지만 배터리를 구성하는 필름을 각각 절단한 후 배터리를 제작하는 것은 공정이 많이 소요되므로 대면적 배터리를 제작한 후 한번에 절단하는 공정을 이용하게 되면 공정 시간과 비용이 절약되게 된다. 이에 우리는 제작된 배터리를 절단하기 위해서 배터리를 구현 후 절단 공정을 진행하였다. 절단면은 상하단 금속 필름과 실링 필름 부분이다.

Fig. 6은 유연 배터리의 한쪽 면에서 레이저를 인가하였을 때 절단면을 SEM과 EDX를 이용한 분석한 결과이다. 실링 필름으로 가장 많이 사용되는 물질은 폴리에틸렌(Polyethylene, PE)으로 상단과 하단 금속 필름이 서로 전기적으로 절연시키는 역할을 한다. 또한 배터리 전해층은 수분에 기능을 상실하므로 공기 중의 수분에 노출되지 않도록 방지하는 역할을 한다. 배터리 충전 후 상단 하단 필름이 단락이 되면 배터리 용량은 방전되게 된다. 본 실험에서 배터리의 한쪽 방향에서만 레이저를 인가하여 절단을 시도했을 때 상단 금속 필름이 절단되고 순차적으로 실링 필름이 절단될 때 열 손상에 의해 양단 금속 필름의 단락이 발생하였다. 또 하단 금속 필름이 절단되면서 발생하는 금속 파티클(Particle)들이 실링 필름에 달라붙으면서 단락 현상에 영향을 미친 것으로 관찰되었다.

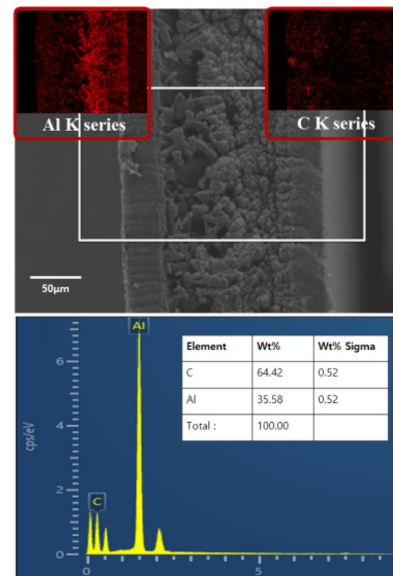
앞선 실험에서 펄스 레이저를 이용하여 각 층을 개별 절단할 때 열적 손상을 최소화하여 절단을 할 수 있었지만 배터리를



(a) Schematic of one side laser cutting



(b) SEM image of sectional side of flexible battery after laser cutting



(c) EDX mapping image and constituents analysis

Fig. 6 The schematic (a) and SEM analysis (b), (c) for one side laser cutting of flexible battery

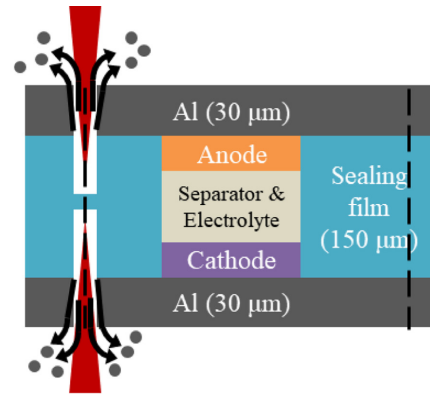
구성한 후 한쪽 면에서 레이저를 인가하여 전체 소자의 절단 시 단락 현상이 발생하였다. SEM 이미지에서 보이는 것과 같이 양쪽 알루미늄 포일 사이에 실링 필름이 보이지 않고 미세한 입자들이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이 입자들이 절단 시 발생하는 금속 파티클인지 확인하기 위해 EDX 분석을 진행하였으며 그 결과를 Fig. 6(c)에 도시하였다. EDX 분석을 통해 검출된

원소는 탄소와 알루미늄이며 탄소의 경우 실링 필름에 사용되는 폴리에틸렌에서 검출이 될 수 있고, 파티클의 경우 알루미늄이 검출되는 것을 통해 실링 필름 쪽에 있는 파티클들이 알루미늄 파티클이라는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(a)와 같이 레이저 절단 시 금속이 제거되면서 발생하는 파티클은 Fig. 6(a)의 검은색 화살표 방향처럼 레이저 조사 방향으로 튀어 오르게 되어 있다. 상단 기판 절단과 실링 필름 절단 후 하단 기판 절단 시 레이저에 의해 실링 필름을 열을 받아 접착력을 가지게 되고 그때 하단 기판에서 생성되는 파티클들이 날라가지 못하고 실링 필름에 달라 붙게 되는 것으로 확인할 수 있었다.

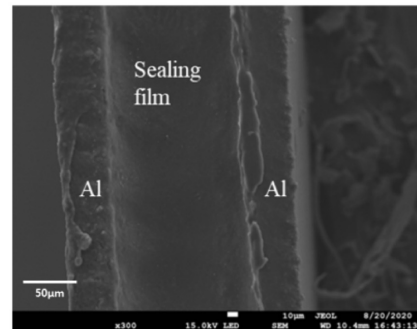
3.2 양면 절단 기술

앞 절에서 서술한 바와 같이 레이저 절단 시 발생하는 배터리의 단락 현상을 해결하기 위하여 한쪽 면에서 레이저를 인가하여 절단을 하는 것이 아닌 양면에서 레이저를 조사하여 절단하는 기술을 적용하였다. Fig. 7은 양면 절단 기술을 보여준다. Fig. 7(a)는 같은 위치를 절단 시 양쪽으로 레이저를 조사하여 절단하는 공정의 모식도이다. 상하단 금속 기판에 각자 레이저를 조사하여 절단하게 되면 금속 기판이 절단되었을 때 발생하는 파티클들은 레이저 조사 방향인 검은색 화살표 방향으로 날라가게 되며, 실링 필름을 절단할 때는 금속 파티클이 발생하지 않아 실링 필름에 파티클이 붙지 않고 절단을 할 수 있게 된다. 이때 사용한 레이저 파라미터는 각 면마다 레이저 에너지, 레이저 스캔 속도, 반복률, 반복 횟수는 각각 4.0 μJ, 20 mm/s, 500 khz, 2 Times이다. 양면 절단 기술을 사용하여 절단한 단면의 SEM 이미지는 Fig. 7(b)에 도시하였다. 상하단 금속 포일의 깔끔한 절단면과 가운데 실링 필름 부분에도 금속 파티클이 관찰되지 않는 것을 볼 수 있다. 이 샘플도 EDX 분석을 통해 절단면의 물질 분석을 진행한 결과 Fig. 7(c)에서 보이는 바와 같이 알루미늄의 구성비가 한쪽면 방향 절단한 결과에 비해 현저하게 감소된 것을 볼 수 있다. 그러나 알루미늄 픽(Peak)이 양쪽 금속 필름뿐만 아니라 중간 실링 필름에 미세하게 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 양면의 금속 필름 절단 시 발생하는 작은 파티클들이 일부 실링 필름 쪽으로 이동하여 붙는 것으로 보이지만 파티클의 크기가 작고, 상하단 필름을 연결할 만큼 충분하지 않기 때문에 단락 현상을 유발하지 않는 것으로 보인다.

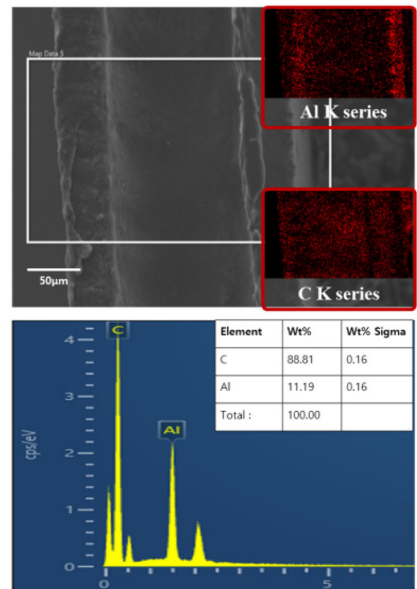
앞선 연구 결과를 바탕으로 양면 절단 방식을 이용하여 실제 충전된 유연 배터리의 절단을 수행하였고, 한면 절단과 양면 절단을 수행한 후 절단부 외양과 배터리 전압 측정 결과를 비교한 사진을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)를 보면, 한면 절단을 이용하여 절단한 배터리는 하단 기판 절단할 때 상단 기판에도 레이저의 영향을 받아 열적 영향에 의해 잔여물들(빨간색 화살표 방향)도 생성되는 것을 볼 수 있으며 단락 현상에 의해 방전된 것을 볼 수 있다. 원하는 모양으로 절단한 실제 충전된 배터리에서 양면 절단의 경우에만 방전 현상 없이 전압이 유지되는 것 (Fig. 8(b))을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 본



(a) Schematic of both sides laser cutting



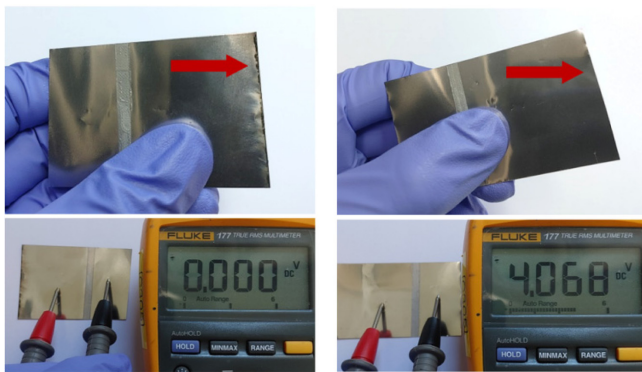
(b) SEM image of sectional side of flexible battery after laser cutting



(c) EDX mapping image and constituents analysis

Fig. 7 The schematic (a) and SEM analysis (b), (c) for both sides laser cutting of flexible battery

기술을 이용하면 유연 배터리뿐만 아니라 다양한 유연 전자 소자의 생산 시 소량 다품종의 소비자 요구에 대응하며 대량 생산도 가능한 Roll-to-Roll (R2R) 시스템 기반의 레이저 절단 공정 적용이 가능할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) One side laser cutting (b) Both side laser cutting

Fig. 8 HAZ (Red arrow) and voltage measurement results after laser cutting of charged flexible battery

4. 결론

본 연구에서는 유연 배터리에 사용하는 다양한 소재들을 레이저를 이용하여 절단 시 발생하는 현상을 기반으로 최적의 절단 공정을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 각 소재마다 특성 값들이 다르기 때문에 소재별 절단 시 필요한 레이저 조사 조건이 민감하게 변화되며 열 영향을 최소화하기 위해서는 펄스폭이 열전달 속도보다 짧은 펄스초 레이저를 적용하는 것이 효과적인 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 유연 배터리의 절단을 진행하였지만 한면 절단을 수행한 경우 공정 시 발생하는 금속 파티클에 의해서 단락 현상이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이에 우리는 정밀 양면 절단 기술을 적용하여 단락 현상이 발생하지 않고 소비자가 원하는 다양한 모양으로 미세한 형태까지 유연 배터리의 손상 없이 절단할 수 있음을 확인하였다. 이 연구 결과는 유연 배터리뿐만 아니라 다양한 기능층으로 구성되는 다양한 유연 전자 소자의 제작기술에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 글로벌프론티어사업 ‘나노기반 소프트 일렉트로닉스사업(No. NRF-2016M3A6A5929198)’과 한국기계연구원 주요사업(No. NK224E)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Sandström, A., Dam, H. F., Krebs, F. C., and Edman, L., “Ambient Fabrication of Flexible and Large-Area Organic Light-Emitting Devices Using Slot-Die Coating,” *Nature Communications*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-5, 2012.

2. Wang, D., Li, D., Zhao, M., Xu, Y., and Wei, Q., “Multifunctional Wearable Smart Device based on Conductive Reduced Graphene Oxide/Polyester Fabric,” *Applied Surface Science*, Vol. 454, pp. 218-226, 2018.

3. Ghorbani, M., Golobostanfard, M. R., and Abdizadeh, H., “Flexible Freestanding Sandwich Type ZnO/rGO/ZnO Electrode for Wearable Supercapacitor,” *Applied Surface Science*, Vol. 419, pp. 277-285, 2017.

4. Hong, S. H., Jung, D. H., Kim, J. H., Lee, Y. H., Cho, S. J., et al., “Electrical Conductivity Gradient based on Heterofibrous Scaffolds for Stable Lithium-Metal Batteries,” *Advanced Functional Materials*, Vol. 30, No. 14, Paper No. 1908868, 2020.

5. Lee, S. Y., “Scalable and Safer Printed Zn//MnO<sub>2</sub> Planar Micro-Batteries for Smart Electronics,” *National Science Review*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-6, 2020.

6. Kim, J. H., Hwang, I., Kim, S. H., Park, J., Jin, W., et al., “Voltage-Tunable Portable Power Supplies based on Tailored Integration of Modularized Silicon Photovoltaics and Printed Bipolar Lithium-Ion Batteries,” *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 8, No. 32, pp. 16291-16301, 2020.

7. Mohanta, J., Kim, H. J., Jeong, S. M., Cho, J. S., Ahn, H. J., et al., “High-Performance Quasi-Solid-State Flexible Sodium Metal Battery: Substrate-Free FeS<sub>2</sub>-C Composite Fibers Cathode and Polyimide Film-Stuck Sodium Metal Anode,” *Chemical Engineering Journal*, Vol. 391, Paper No. 123510, 2020.

8. Li, B., Zhao, W., Yang, Z., Zhang, C., Dang, F., et al., “A Carbon-Doped Anatase TiO<sub>2</sub>-Based Flexible Silicon Anode with High-Performance and Stability for Flexible Lithium-Ion Battery,” *Journal of Power Sources*, Vol. 466, Paper No. 228339, 2020.

9. Li, J., Nieh, K. W., and Makhar, S., “Thin Film Battery Substrate Cutting and Fabrication Process,” *US Patent*, 7862627B2, 2011.

10. Lutey, A. H., Fiorini, M., Fortunato, A., and Carmignato, S., “Lithium Iron Phosphate Battery Electrode Integrity Following High Speed Pulsed Laser Cutting,” *Applied Physics A*, Vol. 119, No. 2, pp. 431-435, 2015.

11. Lutey, A. H., Fortunato, A., Carmignato, S., and Fiorini, M., “High Speed Pulsed Laser Cutting of LiCoO<sub>2</sub> Li-Ion Battery Electrodes,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 94, pp. 90-96, 2017.

12. Lee, D., Patwa, R., Herfurth, H., and Mazumder, J., “Computational and Experimental Studies of Laser Cutting of the Current Collectors for Lithium-Ion Batteries,” *Journal of Power Sources*, Vol. 210, pp. 327-338, 2012.

13. Zeng, X., Mao, X., Greif, R., and Russo, R., “Experimental Investigation of Ablation Efficiency and Plasma Expansion during Femtosecond and Nanosecond Laser Ablation of Silicon,” *Applied Physics A*, Vol. 80, No. 2, pp. 237-241, 2005.

14. Zhai, Z., Wang, F., and Duan, H., “Experimental Study on 800 nm Femtosecond Laser Cutting of Polyamide in Air,” *Optik*, Vol. 194, Paper No. 163080, 2019.

15. Huan, Y., Shan, H., and Jun, D., "Contrastive Study on Laser Ablation of Single-Crystal Silicon by 1030 nm Femtosecond Laser and 355 nm Nanosecond Laser," Chinese J Lasers, Vol. 40, No. 1, Paper No. 0103003, 2013.
16. Kasaai, M. R., Kacham, V., Theberge, F., and Chin, S. L., "The Interaction of Femtosecond and Nanosecond Laser Pulses with the Surface of Glass," Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 319, Nos. 1-2, pp. 129-135, 2003.
17. Johnson, P. B. and Christy, R. W., "Optical Constants of the Noble Metals," Physical Review B, Vol. 6, No. 12, Paper No. 4370, 1972.
18. Rakić, A. D., "Algorithm for the Determination of Intrinsic Optical Constants of Metal Films: Application to Aluminum," Applied Optics, Vol. 34, No. 22, pp. 4755-4767, 1995.
19. Johnson, P. and Christy, R., "Optical Constants of Transition Metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, and Pd," Physical Review B, Vol. 9, No. 12, Paper No. 5056, 1974.
20. Kuang, J. H., Hung, T. P., Lai, K., Hsu, C. M., and Lin, A. D., "The Surface Absorption Coefficient of S304L Stainless Steel by Nd: YAG Micro-Pulse Laser," Advanced Materials Research, Vols. 472-475, pp. 2531-2534, 2012.
21. Holman, S., Lawrence, R., and Barr, L., "Melting Points of Aluminum, Silver, Gold, Copper, and Platinum," Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, Vol. 31, pp. 218-233, 1895.



**SeokYoung Ji**

Ph.D. Candidate in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science and Technology. His research interest is nano mechatronics.  
E-mail: [ji10047@kimm.re.kr](mailto:ji10047@kimm.re.kr)



**Jaegu Kim**

Principal Researcher in the Department of Nano-Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interest is laser micro/nano-manufacturing technology and applications.  
E-mail: [gugu99@kimm.re.kr](mailto:gugu99@kimm.re.kr)



**Sung Hak Cho**

Professor in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science and Technology and Principal Researcher in the Department of Nano-Manufacturing Technology of KIMM. His research interest is ultrafast-laser machining.  
E-mail: [shcho@kimm.re.kr](mailto:shcho@kimm.re.kr)



**Hyungjun Lim**

Professor in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science and Technology and Principal Researcher in the Department of Nano-Manufacturing Technology of KIMM. His research interest is laser direct lithography and nanoimprint lithography.  
E-mail: [hjlim@kimm.re.kr](mailto:hjlim@kimm.re.kr)



**Won Seok Chang**

Professor in the Department of Nano-Mechatronics, Korea University of Science and Technology and the Head of the Department of Nano-Manufacturing Technology of KIMM. His research interest is nano mechatronics.  
E-mail: [paul@kimm.re.kr](mailto:paul@kimm.re.kr)