ISSN 2466-2232 (Print)
ISSN 2466-2100 (Online)

Characterization of Laser Welded Joints between Copper Tabs and Multi-layered Foils in Li-Ion Battery

Sung-Kab Kim* and Seung-Jun Shin**,†

*Graduate School of Technology & Innovation Management, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea
**School of Interdisciplinary Industrial Studies, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

†Corresponding author: sjshin@hanyang.ac.kr
(Received December 19, 2025; Revised January 2, 2026; Accepted January 10, 2026)

Abstract

The rapid expansion of electric vehicles and energy storage systems requires lithium-ion batteries with simultaneously high energy density and reliability. In this regard, the joint between the copper (Cu) current collector and the Cu tab becomes a critical determinant to represent cell performance and safety. However, Cu exhibits low absorptivity under infrared ray lasers and high thermal conductivity. These material characteristics disturb stable keyhole formation and molten pool flow, which result in weld defects. Relevant studies proposed high-power green and blue lasers, beam shaping, and spatial beam oscillation; however, they remain limited to provide the fundamental process knowledge enabling stable and persistent use of infrared ray lasers, which have been widely installed in production lines. This study presents the empirical analysis to characterize laser welded joints between Cu tabs and multi-layered foils in the infrared ray laser. In this study, welding tests are conducted on a joint of a Cu tab and multi-layered foil using a TruDisk 8000 infrared disk laser. Design factors are tab thickness (0.4, 0.5, 0.6 mm), foil thickness (5, 6, 8 ㎛), and the number of foil layers (5, 10, 20). Weld performance is evaluated through bead appearance inspections and tensile shear strength (TSS) tests. The maximum TSS for 5 layer stacks is measured, wherein a peak strength of 10.79 kgf is achieved with a combination of a 0.5 mm tab and 6 ㎛ foil on a 20-layer stack. The experimental results provide fundamental knowledge to correlate design factors with the joint strength in Cu foil-tab welding assembly.

Key Words: Lithium-ion battery, Copper stacked foil, Copper tab, Infrared ray laser, Tensile shear strength, regression analysis

1. Introduction

Owing to the dissemination of electric vehicles and energy storage systems, the production of secondary batteries continues to grow, making it necessary to develop high-productivity and high-quality technologies for all processes, including electrode manufacturing, assembly, joining, and inspection[1]. Among them, electrode current collectors (Cu/Al foils), tabs, and tab-busbar joints are current paths and locations where resistance-induced heat is concentrated within cells, and thus it is essentially required to ensure both mechanical strength and electrical performance[2].

Copper (Cu) has been widely used as an anode current collector and tab material due to its high electrical and thermal conductivity and mechanical properties. It is, however, known as a hard-to-weld material due to the low keyhole formation and molten pool stability caused by low absorptivity and high thermal conductivity in the infrared ray (IR) laser with a wavelength of approximately 1 μm[3,4]. Therefore, a remote scanner-based design approach for laser welding process optimization was proposed to improve productivity, but an empirical analysis of Cu is required because the process window varies depending on material thermal properties[5]. In addition, as the laser welding process has been expanded from a perspective of the automated mass production of electrode stacks, it is essentially required to ensure process stability and quality[6].

To address these problems, various studies have been conducted, including an improvement in absorptivity

through wavelength conversion of 515nm green and 450nm blue in IR with a wavelength of approximately 1 μm[7], beam shaping and spatial beam oscillation[8], and electron beam welding[9]. In studies on multi-layer foil-tab structures inside cells, quality characteristics were systematically analyzed according to the foil thickness, number of foils in stack, tab geometry, bead length and width, electrical resistance, and temperature rise. Grabmann et al. proposed a method for measuring the electrical resistance of multi-layer foil-tab joints and quantified resistance changes according to the number of foils and joint geometry[10]. Kamat et al. constructed a process-performance integrated model for multi-layer battery foil-tab laser welding and proposed a method for optimizing both foil design and laser processing conditions[11]. Shin et al. compared laser welding and ultrasonic welding for multi-layered foils in pouch cells[12], and Kumar et al. analyzed the trade-offs among mechanical strength, electrical resistance, and productivity in process selection[13]. Reinhimer et al. performed fiber laser lap welding experiments on multi-layer aluminum (Al) sheets (30 μm, 40 sheets) to analyze penetration, the bead width, and tensile shear strength according to the pulse conditions[14]. Other studies have been conducted on laser welding of dissimilar metals (Cu-Al)[15-17] and the analysis of high welding speeds in laser welding[18].

There are, however, few studies on IR laser welding of Cu foil-tab structures for electric vehicles. In particular, it is necessary to numerically estimate mechanical properties for combinations of design factors without physical experiments in the design phase by quantitatively identifying the relationships between key design factors and the mechanical properties of joints. Specifically, an empirical analysis is required to explain the relationships between the design factors of stacked foil-tab joints (tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack) and tensile shear strength.

In this study, lap welding experiments were performed by applying the IR laser on the joints between Cu foils, which are the anode current collector used in pouch and prismatic secondary batteries, and the Cu tab, which is the anode terminal, to analyze mechanical properties (tensile shear strength) according to key design factors (tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack). In addition, the quantitative relationships between the design factors and tensile shear strength were examined through linear regression analysis. The IR disk laser from the TruDisk 8000 equipment was used, and welding experiments were performed by varying the tab thickness from 0.4 to 0.5 and 0.6 mm, the foil thickness from 5 to 6 and 8 μm, and the number of foils in stack from 5 to 10 and 20.

2. Experimental Method

The purpose of this experiment is to analyze the quantitative relationships between the key design factors (tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack) and tensile shear strength. By identifying the quantitative relationships, it is possible to determine appropriate design factors in the design phase. This chapter describes specimen configuration and materials, equipment and operating conditions, weld bead observation, and tensile test conditions.

2.1 Specimen configuration and materials

Test specimens were prepared in multi-layer foil-tab structures by simulating the cell structures of pouch and prismatic secondary batteries. Fig. 1 shows the schematic diagram of the specimens from side and top views. In Fig. 1(a), the upper part is the Cu tab without nickel (Ni) coating while the lower part is Cu foils. When these two parts are clamped in a jig system and the IR laser is irradiated, welding occurs in the tab-foil sequence due to heat transfer. Mechanical properties are secured through this weld penetration. In Fig. 1(b), the tab and foil sizes can be identified. The actual weld length was 20 mm, and the area of laser beam irradiation was identical in all experiments.

Table 1 shows the main specifications of the Cu tab and foils. The factors were divided into the tab thickness, the foil thickness, and the number of foils in stack. Since the three design factors have three values, respectively, 27 combinations of experimental conditions are possible. Due to the constraints of the ex-

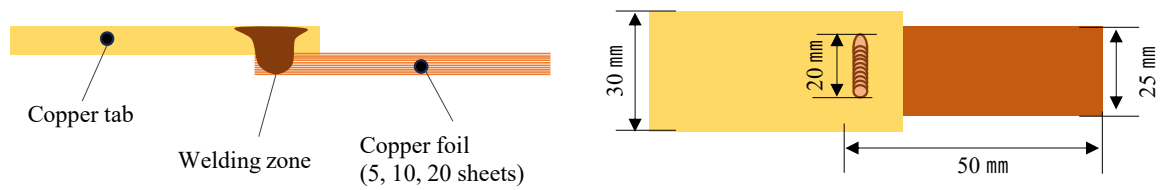


Fig. 1 Schematic diagram of specimen, (a) side view, (b) top view

Table 1 Specification of specimen

Material of tab	Dimension of tab (W×L×t)	Material of foil	Dimension of foil (W×L×t)	Number of foils in stack(n)	Weld length
C1020	40×30×0.4 mm 40×30×0.5 mm 40×30×0.6 mm	Electrolytic (copper) foil, ≥99.9 wt.%	50×25×0.005 mm 50×25×0.006 mm 50×25×0.008 mm	5 10 20	20 mm

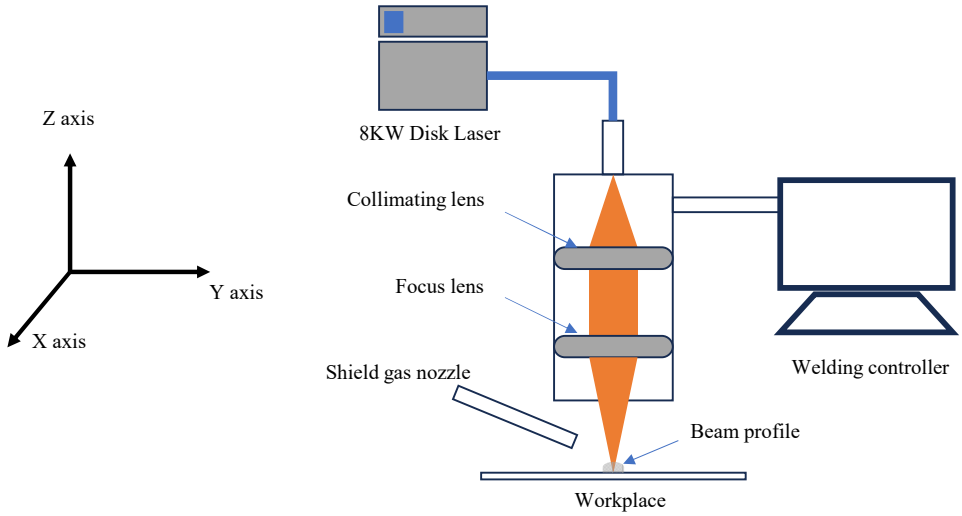


Fig. 2 Schematic diagram of laser welding equipment

perimental environment and cost, however, experiments were performed for 13 combinations of experimental conditions (see Table 3). For reproducibility, the experiment was repeated two to three times under each condition. Measurement errors, however, occurred under some conditions during the experiment. Those conditions were regarded as missing values and excluded from the calculation of the average. For the appropriateness of the set ranges (thickness and the number of foils in stack), they were set similarly to the ranges in a previous study for Al/Cu multi-layer foil-tab structures and Cu foil-Ni plated strip structures in ultrasonic metal welding[19].

2.2 Laser welding equipment and conditions

Fig. 2 shows the schematic diagram of the laser welding equipment used in the experiment. The TruDisk 8000 disk laser and the PFO 33 scanner head were used for laser welding. Laser welding is useful for joining highly reflective and highly conductive materials, such as Cu, during the lithium ion battery manufacturing process because the weld geometry has the bell-shaped Gaussian distribution. The IR laser provides the maximum power density due to the high energy output per unit area[11]. TruDisk 8000 is a multi-beam mode laser system, but the IR laser set to a core power of 100%

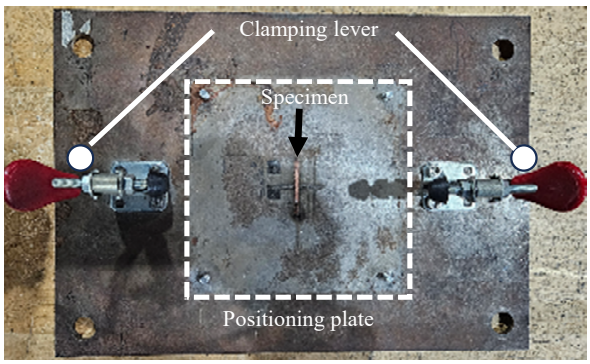


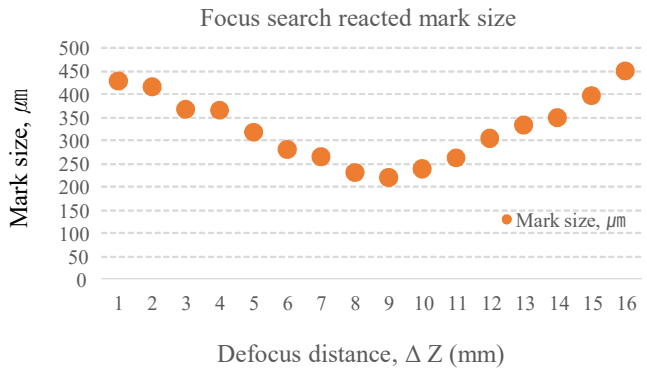
Fig. 3 Jig system

and a ring power of 0% was emitted in the experiment of this study. The laser beam emitted through the focus lens was concentrated on the workpiece. Fig. 3 shows the specimen mounted on the workpiece. Welding was performed along a 20mm length for the specimen located at the center of the workpiece.

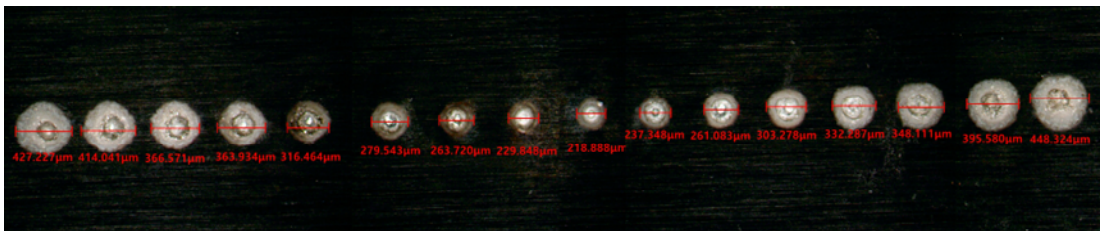
Table 2 shows the laser welding conditions. All of the parameters in the table were set to fixed values. The focal length was set to 265 mm within a range of 200 to 340 mm by benchmarking the experimental conditions for laser welding in previous studies[12,13]. The average power was set to 1.6 kW, the welding speed to 250 mm/s, and the 2-in-1 laser light cable core diameter to 50 μm. Here, the average power is the set power that

Table 2 Laser welding condition for Cu tab-foil joints

Parameter	Unit	Setting parameter (fixed values)
Maximum power	W	8000
Average power	W	1600
Operation mode	-	Continuous wave
Wavelength	nm	1030
2-in-1 laser light cable core/ring diameter	㎛	50/200
Collimation length	mm	140
Focal length	mm	265
Welding speed	mm/s	250
Shield gas flow rate (N_2)	L/min	20



(a)



(b)

Fig. 4 Determination of focal position, (a) diameter of reacted mark sizes on Δ Z positions, (b) optical images of reacted marks on Δ Z positions

represents a constant laser power. Although the maximum power of the TruDisk 8000 equipment is 8 kW, the average power was set to 1.6 kW to meet the experimental conditions for welding Cu tabs and foils. The stacked foils and the tab were fixed in the fabricated jig system for welding the exposed 20mm section.

Fig. 4 shows the process of finding the optimal focal position. While the focal height was adjusted along the axial direction in the section of -ΔZ to +ΔZ on the anodized aluminum plate, the position of the smallest mark size (ΔZ=0) was identified. The observed reacted mark size was used as an indicator for focal position search alignment, and it varied depending on the thermal response of the plate and the power. As shown in Fig. 4(a), the smallest laser beam diameter was found while the focal height was adjusted by 1 mm within a range of +7 mm to -8 mm in the Z-axis. A beam size of up to 400 μm is possible because the collimation length is 140 mm and the focal length is 265 mm under the conditions of a core diameter of 50 μm and a ring diameter of 200 μm. In the experiment of this study, only the core power was used and the theoretical beam diameter was 100 μm, but the mark size ranged from 200 to 450 μm under the influence of the heat on the plate surface caused by the power. The experiment results confirmed the formation of the smallest mark at a focal position of 219 μm. Fig. 4(b) shows the results of measuring the beam size using an optical microscope under the welding conditions.

2.3 Appearance observation after welding

The front and rear images of the tab of each specimen



(a) (b)

Fig. 5 Images of welded Cu foils and tabs, (a) front, (b) rear

after welding were captured using an optical camera and a microscope. Fig. 5 shows the front and rear images of Cu tabs and foils after welding. The tabs welded onto the foils can be seen. Through the images, the continuity of weld beads, unwelded sections, and the presence or absence of the pinholes caused by burn-through can be observed. On the front side, oxidation on the weld bead surface can be determined. On the rear side, observations were performed with focus on unwelded sections, burn-through, and the traces of oxidation on the bead surface (see Fig. 7).

2.4 Tensile shear strength measurement

In this study, tensile shear strength was adopted as a process quality indicator for evaluating the mechanical properties of the weld zone. Tensile shear strength is an indicator directly related to preventing foil damage and poor electrical contact at secondary battery joints. It is also an indicator for quantitatively evaluating the effects of key process variables, such as the laser power and welding speed. Previous studies also utilized tensile shear strength as a quality evaluation indicator in laser and ultrasonic welding processes for secondary battery cell joining[14,19].

Tensile shear strength was measured using the QC-5281MF tensile test equipment (load cell: 500 N). Fig. 6 shows the tensile shear strength test equipment and specimen. The specimen was fixed in the clamps of the equipment so that the weld zone could be subjected to tensile force in the longitudinal direction. The upper part was raised with the lower part fixed for testing at a tensile speed of 50 mm/min. The measurement item was the maximum tensile shear strength (kgf). To examine the reproducibility and uniformity of the experiment, the tensile shear strengths of two to three specimens were measured under each experimental condition. The direct tensile shear strength (fracture strength) of the weld zone was measured using a push pull gauge,

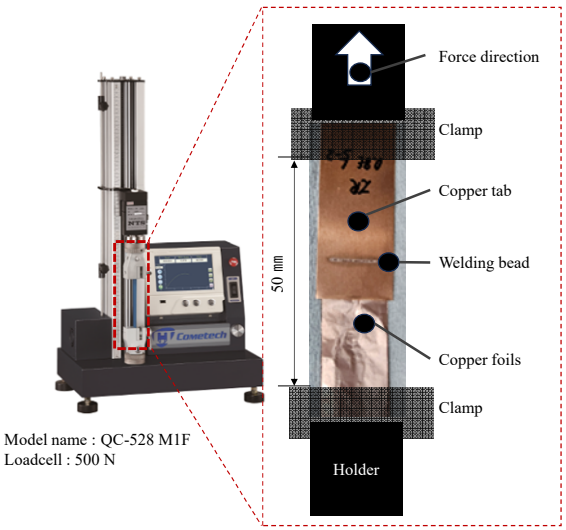


Fig. 6 Tensile shear strength test equipment and specimen

and the highest value among the measurements was recorded as the tensile shear strength of the specimen while the upper jig holding the specimen was raised until the fusion zone was detached. This is similar to the evaluation method used in a study on optimizing the resistance welding process for cylindrical secondary batteries[20].

Tensile shear strength data were collected through these measurements. Samples with abnormal tab-foil welding condition, however, were regarded as errors and excluded from data collection. During the measurement of tensile shear strength, fractures were visually observed only from the weld zone between the tab and foils.

3. Experimental Results

Specimens were prepared and tensile shear strength was measured through the experimental method in chapter 2. In this chapter, the experiment results are ex-

Table 3 Measurement result of tensile shear strength on experimental trials

Trial no.	Thickness of tab (mm)	Thickness of foil (㎛)	Number of foils in stack (n)	Tensile shear strength (kgf)
1	0.4	5	5	0.243
2	0.4	6	5	0.135
3	0.4	8	5	0.653
4	0.5	5	5	0.638
5	0.5	6	5	0.442
6	0.5	8	5	0.348
7	0.6	5	5	0.845
8	0.6	6	5	1.103
9	0.6	8	5	0.635
10	0.5	5	10	2.810
11	0.5	6	10	2.303
12	0.5	5	20	10.787
13	0.5	6	20	9.570

plained, including weld bead appearance and tensile shear strength measurements.

3.1 Weld bead appearance

Fig. 7 shows the front and weld bead images obtained using the optical camera and microscope after welding. The weld length was 20 mm and the magnification was 200 times. In this study, the presence and frequency of defects, such as unwelded sections, burn-through (or pinholes), spatters, and thermal discoloration, were analyzed based on the bead appearance to set them as judgment criteria for good and bad performance. The criteria for good performance were determined to be the absence of unwelded sections, burn-through, and spatters on the weld bead surface and the appearance with minimal thermal oxidation on the surface. In the observation results, unwelded and burn-through defects were not observed under the conditions of five Cu foil sheets and a tab thickness of 0.4 to 0.5 mm. In addition, local spatters occurred outside the bead surface and thermal discoloration or oxidation was limited, leading to the judgment of good performance. At a tab thickness of 0.6 mm, on the other hand, thermal discoloration and oxidation were clearly formed in a wide area in the bead length direction, leading to the classification of bad performance. This appears to be due to the difference in heat transfer rate during welding caused by the increase in tab thickness even though weld pools need to be sufficiently formed in the initial stage.

As the foil thickness increased, the oxidation of the bead surface was less observed despite the increase in tab thickness. This appears to be because the molten pool was formed first by the direct irradiation of the welding beam onto the tab surface and there was no significant difference in heat transfer depending on the foil thickness, which is extremely thin (several μm) compared to the tab thickness. As the number of foils in stack increased, thermal effects on the weld bead and pass were observed to be insignificant. This indicates that thermal effects are mainly caused by the tab thickness. This is because high laser power is required to reach the deep penetration welding process due to the high thermal conductivity and low room-temperature absorptivity of Cu in the initial stage of laser welding[3,4].

3.2 Tensile shear strength measurement results

Table 3 shows the tensile shear strength measurement results. As mentioned in section 2.1, the average values of the maximum tensile shear strength (kgf) measured under 13 experimental conditions are summarized. Measurements were repeated two to three times under each experimental condition, and measurement errors that occurred under some experimental conditions were regarded as missing values and excluded from the calculation of the average.

The tensile shear strength test results show that the maximum tensile shear strength of laser welded joints is closely related to the number of foils in stack (n) and the tab thickness among the design factors of secondary batteries. In particular, an increase in the number of foils in stack exhibited significant impacts. When the number of foils in stack was five, the tensile load ranged from 0.135 to 1.103 kgf. As the tab thickness increased from 0.4 to 0.5 and 0.6 mm, the maximum

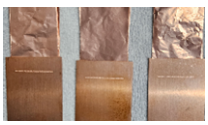
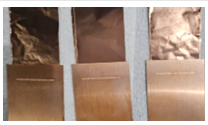
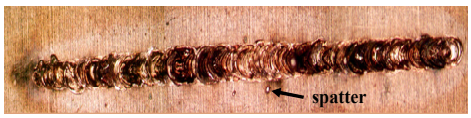
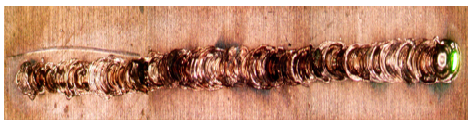
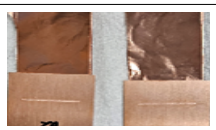
Design factor (t: thickness, n: number of foils)	Top view after welding	Image for welding bead (X 200)	Unwelded/ Burn-through/ Spatter	Oxidat -ion	Bead quality
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	O	Bad
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	O	Bad
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	O	Bad
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 10sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 10sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 20sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 20sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	X	Good

Fig. 7 Welding bead images

tensile shear strength tended to increase. At a tab thickness of 0.5 mm and a foil thickness of 5 μm, tensile shear strength sharply increased from 0.638 kgf for five foils to 2.810 kgf for ten foils and 10.787 kgf for 20 foils. This appears to be due to the increase in the effective welding area between the tab and foils caused by an increase in the number of foils in stack. The interfacial area of each layer did not increase, but the effective welding area increased due to the increase in the interfacial area of multiple layers caused by an increase in the number of foils in stack. At a foil thickness of 6 μm, tensile shear strength similarly increased to 2.303 kgf for ten foils and 9.570 kgf for 20 foils. The experiment results confirmed that the number of foils in stack is a key design factor that increases tensile shear strength.

3.3 Tensile shear strength regression model

In this study, laser lap welding between Cu tabs and foils was performed, and tensile shear strength, i.e., mechanical performance, was measured to examine process quality. To predict tensile shear strength in the design phase of secondary batteries, the quantitative relationships between the design factors (tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack) and the maximum tensile shear strength were identified through a multivariate linear regression model based on the measurement results. Through the model, the regression coefficient (β) of each design factor for tensile shear strength was derived to provide explanatory power for the relationships between the design factors and tensile shear strength. In addition, the linear regression model provides one-dimensional quantitative influence between the design factors and tensile shear strength, thereby enabling expansion to models that apply machine learning techniques. In general, a multivariate linear regression model for n variables is given by equation (1). Y is tensile shear strength as a dependent variable. β_i is the i-th coefficient (β_0 is a constant term). χ_i represents the tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack as independent variables. ϵ ϵ is the error term.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \epsilon \quad (1)$$

The SPSS Statistics version 27 analysis tool was used to derive the regression model above. The linear regression model for three independent variables was derived using the data in Table 3. Equation (2) is the linear regression model for tensile shear strength (Y) according to the tab thickness (χ_1), foil thickness (χ_2), and number of foils in stack (χ_3).

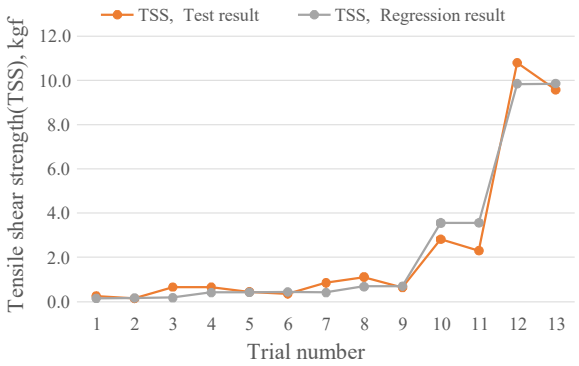


Fig. 8 Comparison between real and predicted tensile shear strength values

$$Y = -3.781 + 2.314x_1 - 0.0110x_2 + 0.626x_3 \quad (2)$$

Tensile shear strength is expressed in kgf, the tab thickness in mm, and the foil thickness in μm. The number of foils in stack is provided as a count. The coefficient of determination for the entire dataset was $R^2 = 0.975$, indicating that the relationships between the predicted and measured values were well explained. Fig. 8 compares the measured and predicted tensile shear strength values. The design prediction effect is judged to be significant because the simple linear regression equation alone led to high predictive accuracy. Linearity can be estimated through the magnitude of the regression coefficient for each variable in equation (2).

- Coefficient for the tab thickness: Tensile shear strength increases by 2.314 kgf as the tab thickness increases by 1 mm.
- Coefficient for the foil thickness: Tensile shear strength decreases by 0.011 kgf as the foil thickness increases by 1 μm.
- Coefficient for the number of foils in stack: Tensile shear strength increases by 0.626 kgf as the number of foils increases by one sheet.

The above results revealed that the number of foils in stack had the largest impact on the maximum tensile shear strength, which represents the mechanical characteristics of process quality. Considering that the tab thickness was changed by 0.1 mm, the number of foils in stack practically exhibited the highest regression coefficient. The number of foils in stack has a positive relationship with tensile shear strength. This is because tensile shear strength increases alongside the increase in the number of foils due to the increase in effective joint area and the distribution of the load. It was also

found that the tab thickness directly affects tensile shear strength. This is because effective weld penetration affects tab-foil interactions and an increase in tab thickness proportionally affects tensile shear strength by causing less deformation during welding and ensuring welding stability in contact with the weld zone.

4. Experiment Discussion

In this study, lap welding between tabs and foils was performed using the IR laser, and the effects of the design variables (tab thickness, foil thickness, and number of foils in stack) on weld bead appearance and the tensile shear strength of the joint were analyzed. In this chapter, the experiment results presented in chapter 3 are analyzed from the perspectives of heat-transfer and load-transfer mechanisms, and the significance and application range of the linear regression model derived for design prediction are discussed.

4.1 Analysis of the cause of thermal effects on the bead surface

The laser energy is irradiated onto the surface of the tab located above the foils. It can be transferred through thermal conduction as well as radiation after keyhole formation. These structural characteristics cause the tab to absorb heat first in the joint structure, and the oxidation observed from the bead appearance appears to be more sensitive to the tab thickness compared to the foil thickness and the number of foils in stack. As the tab thickness increases, the amount of heat diffusing inside the tab and its heat capacity increase under the same welding conditions, thereby extending the residence time of the molten pool. This causes the relative expansion of the heat affected zone around the upper bead.

On the other hand, changes in foil thickness and number of foils in stack are reaction factors by secondary heat transfer in the lower structure, which is not directly irradiated by the laser. Thus, they may have led to limited differences in oxidation. This indicates that the foil conditions affected tensile strength as they are more closely related to internal joint geometry, such as molten penetration and joint width, compared to appearance. Therefore, these results imply that weld appearance may vary depending on tab design factors rather than foil design factors.

4.2 Analysis of the tensile shear strength change mechanism

In the experiment results, fractures occurred along the fusion line. The tendency that tensile shear strength increased as the number of foils in stack increased can be interpreted as the result of the mitigated stress concentration and the load distribution effect caused by the increased number of foils that support the load. This could be confirmed through the fractures on the weld bead at the tab-foil interface.

It is also judged that an increase in the number of foils in stack effectively contributed to the increase in tensile shear strength by expanding the effective joint area between the tab and foils. An increase in tab thickness, however, may cause defects due to thermal effects. Thermal impacts need to be considered for the effect of the tab thickness rather than being simply interpreted as an increase in tensile shear strength. It appears that the impact of the foil thickness was relatively insignificant because internal penetration profile was not sensitive to changes in foil thickness. This can be identified through cross-sectional observations and precise analysis of the fracture mode.

4.3 Analysis and application range of the linear regression model

In this study, linear regression was used to quantify the relative contributions of design factors to the tensile shear strength of the joint and determine the level of mechanical performance by deriving the coefficients of each design factor within the limited experiment. The high coefficient of determination (R^2) of the regression model indicates that tensile shear strength can be explained by a linear combination of key design factors. In particular, the regression coefficient analysis results revealed that the number of foils in stack had the largest impact, followed by the tab thickness and the foil thickness.

The regression model, however, provides limited analysis results within the IR laser conditions and the ranges of the design factors set in this study. Thus, the results may vary depending on process variables and modes (dual and green laser)[6]. In addition, additional verification through more experiments is required because the number of experiments was small in this study. The proposed model is useful as a practical method for setting and screening the effects of design factors in the early design phase under the IR laser conditions used in secondary batteries.

5. Conclusions

This study experimentally analyzed the effects of the design factors of laser welding conditions applied to cylindrical, pouch-type, and prismatic cells with copper

(Cu) tab-foil joints, which are important for secondary battery design, on the mechanical performance of the joints and presented a basic model for design prediction. The conclusions of this study are as follows.

1) when appearance analysis was conducted for thermal effects on the weld bead in infrared ray (IR) laser welding, it was found that the thermal effects were relatively sensitive to the tab thickness and less sensitive to the foil thickness and the number of foils in stack under the influence of the product structure in which the tab first absorbs heat. This indicates that it is difficult to conclude a high correlation between appearance and internal joint results.

2) the tensile shear strength of the joint is dominantly affected by the number of foils in stack among the design factors, indicating that an increase in the number of foils plays a key role in ensuring mechanical performance through the expansion of the effective joint area and the load distribution effect. The tab thickness also contributes to the tensile shear strength, but its contribution is considered relatively less compared to that of the number of foils.

3) a mechanical performance prediction method applicable in the early design phase was presented by quantifying the relationships between design factors and tensile shear strength using a linear regression model. This suggests the possibility of prioritizing the effects of design factors during the design of tab-foil joints under IR laser conditions.

The limitations of this study are as follows. First, experiments were performed under IR laser welding conditions. Thus, the degree of molten penetration, joint width, joint depth, and electrical resistance (joint resistance) characteristics for welded joints could not be evaluated. Second, for the relationships between design factors and mechanical properties (maximum tensile shear strength), an integrated prediction model that considers welding process variables (i.e., welding power, speed, and focal length) could not be developed. In the future, welding characteristics between Cu tabs and foils in green laser welding will be quantitatively identified. Furthermore, research will be conducted on an intelligent quality management system that introduces machine learning-based prediction and optimization techniques by deriving the correlations between process conditions and quality.

Acknowledgement

This research was supported by the MSIT (Ministry of Science, ICT), Korea, under the Global Research Support Program in the Digital Field program (RS-2024-00411653) supervised by the IITP (Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

ORCID: Sung-Kab Kim: https://orcid.org/0009-0008-4869-7413
ORCID: Seung-Jun Shin: https://orcid.org/0000-0002-3587-5507

References

1. M. E. McGovern, D. D. Bruder, E. D. Huemiller, T. J. Rinker, J. T. Bracey, R. C. Sekol, and J. A. Abell, A Review of Research Needs in Nondestructive Evaluation for Quality Verification in Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing, *J. Power Sources.* 561 (2023) 232742. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232742
2. A. Das, D. Li, D. Williams, and D. Greenwood, Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing, *World Electric Vehicle J.* 9(2) (2018) 22. https://doi.org/10.3390/wevj9020022
3. S. Engler, R. Ramsayer, and R. Poprawe, Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers, *Physics Procedia.* 12 (2011) 339-346. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.142
4. J. Ning, L. J. Zhang, L. L. Zhang, J. Long, X. Q. Yin, and S J. Na, Effects of Power Modulation on Behaviours of Molten Pool and Keyhole During Laser Arc Hybrid Welding of Pure Copper, *Mater. Des.* 194 (2020) 108829. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108829
5. D. Y. Kim and Y. H. Park, The Design of Manufacturing Process Optimization for Aluminum Laser Welding Using a Remote Scanner, *J. Weld. Join.* 29(6) (2011) 702-707. https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.6.702
6. A. Olowinsky, C. Spurk, J. Helm, and A. Gillner, Laser-Based Joining of Electrode Stacks for Automated Large Scale Production of Li-Ion Battery Cells, *Energy Technol.* 11 (2023) 2200770. https://doi.org/10.1002/ente.202200770
7. S. W. Britten, L. Schmid, T. Molitor, and M. Rütering, Blue High-Power Laser Sources for Processing Solutions in E-Mobility and Beyond, *Procedia CIRP.* 94 (2020) 592-595. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.082
8. S. Jabar, V. V. Pamarthi, Q. Hayat, M. H. Khan, H. R. Kotadia, and P. Franciosa, A Review of Beam Shaping Approaches for Near-Infrared Continuous-Wave Laser Welding in E-Mobility Applications, *Opt. Laser Technol.* 192 (2025) 114000. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.114000
9. S. Duraisamy, A. Horovistiz, A. Bastos, B. Mascate, and J. M. S. Dias, Electron Beam Welding Parameters for Copper and Dissimilar Copper Joints: Review, Research Gaps, and Future Challenges*, J. Adv. Joining Processes.* 12 (2025) 100350.

https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100350
10. S. Grabmann, C. Bernauer, L. Wach, M. Leeb, and M. F. Zaeh, A Method for the Reproducible and Accurate Determination of Electrical Resistances Based on Multi-Layer Joints in Lithium-Ion Batteries, *Appl. Energy.* 349 (2023) 121613. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121613
11. S. Kamat, W. Cai, T. J. Rinker, J. Bracey, L. Xi, and W. Tan, A Novel Integrated Process-Performance Model for Laser Welding of Multi-Layer Battery Foils and Tabs, *J. Mater. Process. Technol.* 320 (2023) 118121. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118121
12. S. M. Shin and D. C. Kim, Weldability Evaluation According to Alignment Conditions of Horn and Anvil in Ultrasonic Welding Process for Multilayer Battery Cell, *J. Weld. Join.* 39(5) (2021) 552-557. https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.5.12
13. N. Kumar, V. V. Pamarthi, and A. Das, Investigating Laser and Ultrasonic Welding of Pouch Cell Multi-Foil Current Collectors for Electric Vehicle Battery Fabrication, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 134 (2024) 2497-2511. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14281-5
14. E. N. Reinhimer, F. Fetzer, R. Weber, and T. Graf, Benefit of High Feed Rates on the Process Efficiency in Laser Beam Welding, *Procedia CIRP.* 94 (2020) 718-721. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.127
15. S. J. Hwang, T. W. Kim, W. S. Jeon, and J. P. Jeong, Al-Cu Electrode Laser Welding for Rechargeable Battery, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 26(4) (2019) 1-6. https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.4.001
16. M. J. Kang, W. S. Choi, and S. H. Kang, Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing, *J. Weld. Join.* 37(2) (2019) 52-59. https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8
17. K. D. Lee, S. H. Kang, M. J. Kang, S. Yi, S. K. Hyun, and C. H. Kim, Modeling of Laser Welds Using Machine Learning Algorithm, Part I: Penetration Depth for Laser Overlap Al/Cu Dissimilar Metal Welds, *J. Weld. Join.* 39(1) (2021) 27-35. https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.3
18. S. Grabmann, M. K. Kick, C. Geiger, F. Harst, A. Bachmann, and M. F. Zaeh, Toward the flexible production of large format lithium ion batteries using laser based cell internal contacting, *J. Laser Appl*. 34 (2022) 042017. https://doi.org/10.2351/7.0000778
19. S. M. Shin, S. W. Nam, J. Y. Yu, J. Y. Park, and D. C. Kim, Ultrasonic Metal Welding of Multilayered Copper Foils to Nickel-Plated Copper Sheet in Lithium-Ion Battery Cell, *Metals.* 11 (2021) 1195. https://doi.org/10.3390/met11081195
20. J. S. Chung, S. S. Park, J. H. Kim, H. M. Kwon, H. M. S. H. Hong, and M. K. Lee, Process Optimization for Improving Resistance Welding Quality of Cylindrical Secondary Battery, *J. Korean Soc. Qual. Mang.* 48(1) (2020) 69-86. https://doi.org/10.7469/JKSQM.2020.48.1.69

이차전지의 구리 탭과 적층 포일간 레이저 용접 접합 특성

Characterization of Laser Welded Joints between Copper Tabs and Multi-layered Foils in Li-Ion Battery

김 성 갑*·신 승 준**

*한양대학교 기술경영전문대학원

**한양대학교 산업융합학부

1. 서 론

전기 자동차와 에너지 저장 장치의 확산으로 인해 이차전지 생산량은 지속적으로 증가하면서 전극 제조, 조립, 접합, 검사 등 모든 공정에 대한 고생산성 및 고품질 기술 개발이 요구되고 있다[1]. 이 중에서도 전극 집전체(Cu/Al 포일)와 탭(tab) 그리고 탭과 버스바(busbar)를 연결하는 접합부는 셀 내부 전류 통로이자 저항에 의한 발열이 집중되는 위치로서, 기계적 강도와 전기적 특성을 동시에 확보하는 것이 필수적이다[2].

구리(Cu)는 우수한 전기·열전도성과 기계적 성질을 바탕으로 음극 집전체 및 탭 소재로 널리 사용되고 있다. 그러나 파장이 1 ㎛ 근처인 적외선(infrared ray, IR) 레이저에서 낮은 흡수율과 높은 열전도도로 인해 키홀 형성 및 용융 풀 안정성이 떨어지는 문제가 발생하여 용접이 어려운 재료로 알려져 있다[3,4]. 그래서 생산성 향상을 위해 원격 스캐너 기반 레이저 용접 공정 최적화 설계 접근법도 제안된 바 있으나, 재료 열물성 차이에 따라 공정 범위(process window)가 다양하기 때문에 Cu 소재에 대한 실증적 분석이 요구된다[5]. 또한 전극 스택의 자동화 대량 생산 관점에서 레이저 용접 접합공정이 확대됨에 따라 공정 안정성과 품질 확보는 필수적인 요구사항이 되고 있다[6].

이러한 문제를 해결하기 위해 1 ㎛ 근처 파장의 IR에서 515 nm Green, 450 nm Blue의 파장 전환을 통한 흡수율 향상[7], 빔 셰이핑 및 공간 빔 오실레이션[8], 전자빔 용접(electron beam welding)[9] 등 다양한 연구가 수행되었다. 셀 내부의 다층 포일-탭 구조 대상 연구에서는 포일 두께·적층수, 탭 형상, 비드 길이·폭, 전기 저항 및 온도 상승 등에 대한 품질 특성이 체계적으로 분석되었다. Grabmann 등은 다층 포일-탭 접합부의 전기저항 측정법을 제안하고, 포일 수 및 접합 형상에 따른 저항 변화를 정량화하였다[10]. Kamat 등은 다층 배터리 포일-탭 레이저 용접에 대해 공정-성능 통합 모델을 구축하고, 포일 설계와 레이저 공정 조건을 동시에 최적화하는 방법을 제시하였다[11]. Shin 등은 파우치 셀의 다적층 포일에 대해 레이저 용접과 초음파 용접을 비교 평가하고[12], Kumar 등은 공정 선택 시 기계적 강도와 전기저항, 생산성 간 상충 관계를 분석하였다[13]. Reinhimer 등은 알루미늄(Al) 소재를 대상으로 다층 박판(30 ㎛, 40장)의 파이버 레이저 겹치기 용접 실험을 통하여 펄스 조건에 따른 용입, 비드 폭, 인장전단강도 변화를 분석하였다[14]. 그 외 Cu-Al의 이종금속 레이저 용접[15-17], 레이저 용접에서의 고속 용접속도에 대한 분석[18] 연구가 있다.

그러나, 전기 자동차용 Cu 적층 포일-탭 구조를 대상으로 하는 IR 레이저 용접에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 주요 설계 인자에 따른 접합부 기계적 특성의 관계를 정량적으로 규명함으로써, 설계 단계에서 물리적인 실험 없이도 설계 인자 조합에 대한 기계적 특성의 수치적 추정이 필요하다. 구체적으로, 적층 포일과 탭 접합부의 설계 인자(탭 두께, 포일 두께, 적층수)와 인장전단강도간 관계를 설명할 수 있는 실증적인 분석이 필요하다.

본 연구에서는 파우치 및 각형 이차전지에 사용되는 음극 집전체인 Cu 적층 포일과 음극 터미널인 Cu 탭 간 접합구조를 대상으로 IR 레이저를 적용하여 겹치기 용접 실험을 수행하고, 주요 설계 인자인 탭 두께, 포일 두께 및 적층 수에 따른 기계적 특성인 인장전단강도의 변화 특성을 분석한다. 그리고 선형 회귀 분석을 통하여 설계 인자와 인장전단강도 사이의 정량적 관계를 확인한다. TruDisk 8000 설비에서 IR 디스크 레이저를 이용하고, 탭 두께는 0.4, 0.5, 0.6 mm, 포일 두께는 5, 6, 8 ㎛, 적층 수는 5, 10, 20개 조건에서 용접 실험을 진행하였다.

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

2. 실험 방법

본 실험의 목적은 파우치 및 각형전지에 사용하는 탭의 두께, 집전체인 포일 두께 및 포일 적층 수에 따른 인장전단강도의 정량적인 관계를 분석하는 것이다. 주요 설계 인자에 대한 인장전단강도의 정량적 상관성을 파악함으로써 설계 단계에서 적합한 설계 인자를 결정하기 위함이다. 본 장에서는 시편 구성 및 재료, 장비 및 운영 조건, 용접 비드 관찰, 인장 시험 조건을 설명한다.

2.1 시편 구성 및 재료

시험 시편은 파우치 및 각형 이차전지 셀 구조를 모사한 적층 상태의 포일과 탭과의 겹치기 구조로 제작하였다. Fig. 1은 제작된 시험 시편을 도식화한 것으로서, 측면과 정면의 형상이다. Fig. 1 (a)에서, 상부인 윗면은 니켈(Ni) 코팅이 없는 Cu 탭이고 하부인 아랫면은 Cu 포일이다. 이 둘을 고정 지그로 고정하여 IR 레이저를 통해 레이저를 조사하면 열전달에 의하여 탭-포일의 순서로 용접이 가능하다. 이렇게 형성된 용입을 통해 기계적 특성을 확보한다. Fig. 1 (b)에서, 탭 및 포일의 크기를 파악할 수 있다. 그리고 실제 용접된 길이는 20 mm로서, 전체 실험에 적용한 레이저 빔이 조사된 영역은 동일하다.

Table 1은 Cu 탭과 포일의 주요 사양을 나타낸다. 탭과 포일의 두께에 대한 포일의 적층 수에 따른 인자로 구분하였다. 3개의 설계 인자에 각 3개의 값이 존재하므로 27개의 실험 조건 조합이 발생 가능하다. 그러나 실험 환경의 제약 및 비용 문제 등으로 인하여 13개의 실험 조건 조합에 대하여 실험을 실시하였다 (Table 3 참고). 또한 실험의 재현성을 위하여 조건별 2~3회 반복 실험하였다. 다만, 실험 중 일부 조건에서 측정 오류가 발생하였으며, 측정 오류가 발생한 조건은 결측치로 간주하여 평균 계산에서 제외되었다. 설정 범위의 적정성을 위하여 선행 연구의 Al/Cu 다층 포일-탭 구조 및 초음파 금속 용접용 Cu 포일-Ni 도금 스트립 구조의 두께·적층 수 범위와 유사하게 설정하였다[19].

2.2 레이저 용접 장비 및 조건

Fig. 2는 실험에 사용된 레이저 용접 장비를 도식화한 것이다. 레이저 용접을 위하여 TruDisk 8000 디스크 레이저와 PFO 33 스캐너 헤드를 사용하였다. 레이저 용접은 리튬 이온 배터리(lithium ion battery) 제작 과정에서 Cu와 같은 고반사 및 고전도성 소재를 접합하는 데 있어 유용하다. 그 이유는 용접 모양이 종형태로 형성되는 가우시안(Gaussian) 패턴을 갖기 때문이다. IR 레이저는 면적당 에너지 출력이 크기 때문에 최고 출력 밀도를 갖는다[11]. TruDisk 8000은 멀티 빔 모드 레이저 시스템이나, 본 실험에서는 코어 출력 100% 및 링 출력 0%로 설정된 IR 레이저가 출사되도록 하였다. 포커스 렌즈를 통해 출사된 레이저 빔은 작업대(workpiece)에 집중하게 된다. Fig. 3은 작업대에 위치한 시편 장착 상태를 나타낸다. 작업대 중앙부의 시편에 위치해서 20 mm 거리를 용접한다.

Table 2는 레이저 용접 조건을 나타낸다. Table 2에 설정된 파라미터는 모두 고정값이다. 초점거리(focal length)는 200~340 mm 범위 내에서 265 mm 로 선택하여 진행하였다. 이는 선행 연구의 레이저 용접 실험 조건을 벤치마킹한 것이다[12,13]. 그리고

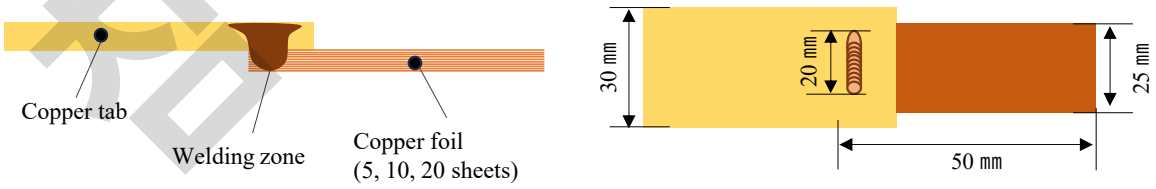


Fig. 1 Schematic diagram of specimen, (a) side view, (b) top view

Table 1 Specification of specimen

Material of tab	Dimension of tab (W×L×t)	Material of foil	Dimension of foil (W×L×t)	Number of foils in stack(n)	Weld length
C1020	40×30×0.4 mm 40×30×0.5 mm 40×30×0.6 mm	Electrolytic (copper) foil, ≥99.9 wt.%	50×25×0.005 mm 50×25×0.006 mm 50×25×0.008 mm	5 10 20	20 mm

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

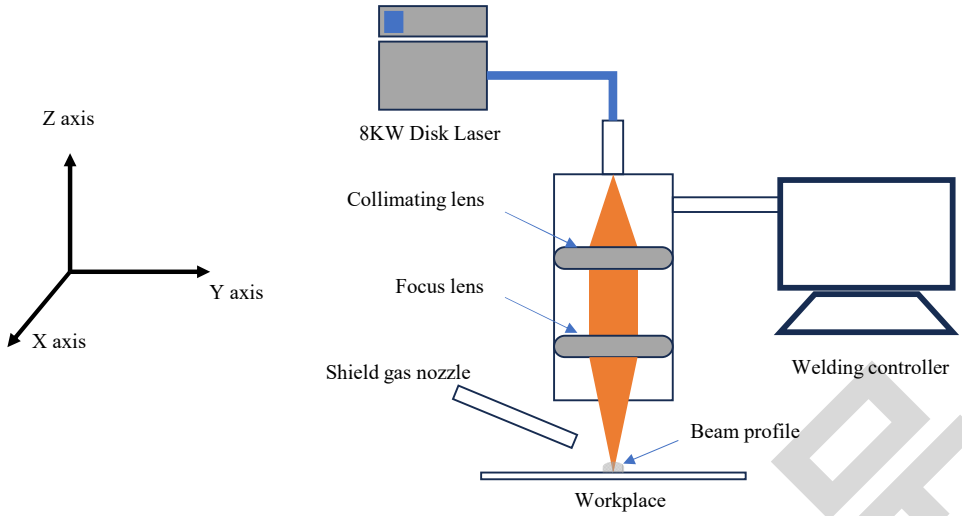


Fig. 2 Schematic diagram of laser welding equipment

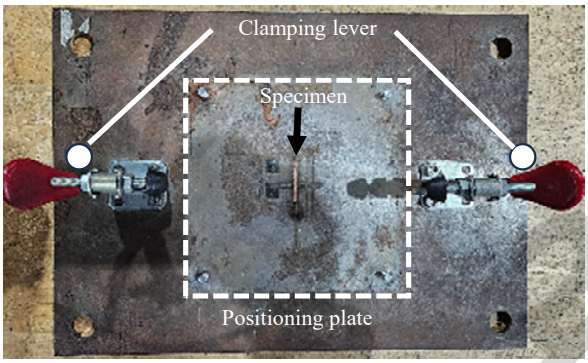


Fig. 3 Jig system

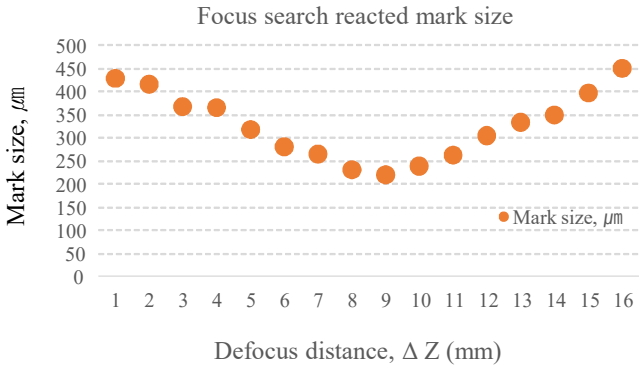
평균 레이저 출력(average power) 1.6 kW, 이송 속도(welding speed) 250 mm/s, 전송 파이버의 케이블의 직경(2-in-1 laser light cable core diameter)은 50 ㎛로 설정하였다. 여기서 평균 레이저 출력은 설정 출력으로서, 일정하게 출사 되는 레이저 출력을 대변한다. TruDisk 8000 장비는 최대 출력이 8 kW까지 가능하나, Cu 탭과 포일 용접의 실험 조건에 부합하도록 평균 레이저 출력을 1.6 kW으로 설정하였다. 적층된 포일과 탭은 별도의 지그를 제작하여 고정식 틀 안에서 고정하여 노출된 20 mm 구간을 용접하였다.

Fig. 4는 최적의 초점 위치를 찾는 과정이다. 아노다이징 처리된 알루미늄 플레이트 상에 -ΔZ ~ +ΔZ 구간의 축 방향으로 이동시키며 가장 작게 반응한 마크가 형성된 위치(ΔZ=0)를 기준으로 확인하였다. 이때 관찰된 반응 마크의 크기는 초점 위치 탐색 정렬(alignment) 목적의 지표로 사용되었으며, 플레이트의 열반응 및 출력에 의하여 달라진다. Fig. 4 (a)와 같이, 초점 높이를 조절하면서 측정한 레이저 빔 직경은 1 mm 간격으로 +Z축 7 mm, -Z축 8 mm 범위에서 각각 1 mm씩 이동하여 가장 작은 사이즈의 빔을 찾았다. 코어의 파이버(core diameter) 50 ㎛, 링의 파이버(ring diameter) 200 ㎛ 조건에서 시준 거리(collimation length) 140 mm, 초점거리 265 mm이므로 빔 사이즈는 약 400 ㎛까지 가능하다. 본 실험에서는 코어 출력만을 사용하였고 이론적인 빔의 사이즈는 100 ㎛ 이지만, 출력에 따라 플레이트의 표면의 열영향으로 마크 직경은 200~450 ㎛ 범위로 나타났다. 실험 결과, 초점 위치 219 ㎛ 일 때 가장 작은 마

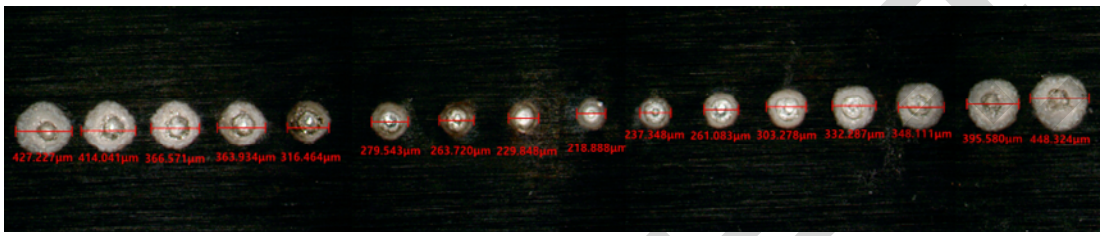
Table 2 Laser welding condition for Cu tab-foil joints

Parameter	Unit	Setting parameter (fixed values)
Maximum power	W	8000
Average power	W	1600
Operation mode	-	Continuous wave
Wavelength	nm	1030
2-in-1 laser light cable core/ring diameter	㎛	50/200
Collimation length	mm	140
Focal length	mm	265
Welding speed	mm/s	250
Shield gas flow rate (N_2)	L/min	20

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.



(a)



(b)

Fig. 4 Determination of focal position, (a) diameter of reacted mark sizes on △ Z positions, (b) optical images of reacted marks on △ Z positions

크가 형성되는 것으로 확인되었다. Fig. 4 (b)는 아노다이징 처리된 알루미늄 플레이트에 조사한 해당 용접조건의 빔의 사이즈를 광학현미경으로 확인한 결과이다.

2.3 용접 후 외관 관찰

용접 후 각 시편의 탭의 전면(front)과 이면(rear)을 광학 카메라 및 현미경으로 촬영하였다. Fig. 5는 Cu 탭과 포일의 용접 후 전면 및 이면 모습이다. 탭이 포일 위에 얹혀져 용접된 상태를 확인할 수 있다. 이를 통하여 용접에 의한 비드의 연속성, 미용접 및 관통(burn-through)으로 인한 핀홀(pinhole)의 유무가 관찰 가능하다. 전면에서는 용접 비드면에 열산화(oxidation)를 판단할 수 있다. 이면에서는 미용접(unwelded) 구간, 관통 여부, 비드면의 산화 흔적을 중심으로 관찰하였다 (Fig. 7 참고).

2.4 인장전단강도 측정

본 연구에서는 용접부의 기계적 특성을 평가하기 위한 공정 품질 인자로 인장전단강도를 채택하였다. 인장전단강도(tensile shear strength)는 이차전지 접합부에서 포일 파손 및 전기적 접촉 불량을 방지하는 데 직접적으로 관련된 지표이다. 그리고 레이저 출력과 용접 속도와 같은 주요 공정변수의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 지표이기도 하다. 선행 연구에서도 이차전지 셀 접합을 위한 레이저 및 초음파 용접 공정에서 인장전단강도가 품질 평가 지표로 활용된 바 있다[14,19].



(a) (b)

Fig. 5 Images of welded Cu foils and tabs, (a) front, (b) rear

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

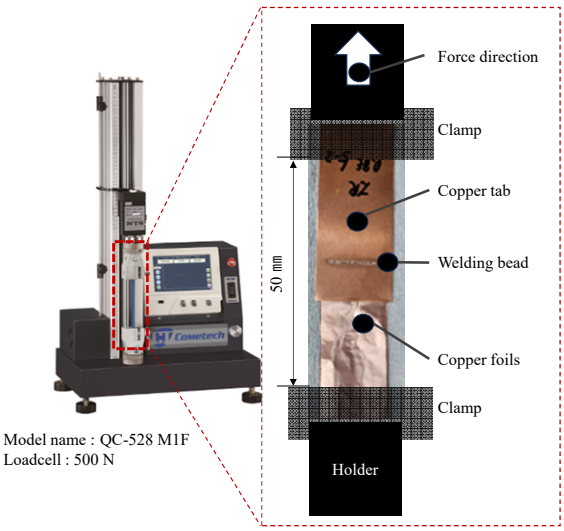


Fig. 6 Tensile shear strength test equipment and specimen

인장전단강도 측정시 QC-5281MF 인장 시험 설비(로드셀, 500 N)를 이용하였다. Fig. 6은 인장전단강도 측정 설비와 시편을 나타낸다. 시편은 용접부가 길이 방향으로 인장력을 받도록 인장시험기 클램프에 고정하였다. 하부는 고정시킨 상태로 상부를 상승시키면서 인장속도 50 mm/min 조건에서 시험하였다. 측정항목은 최대 인장전단강도(kgf)이며, 실험의 재현성과 균일성을 확인하기 위하여 실험 조건별 2~3개 시험편의 인장전단강도를 측정하였다. 푸시풀게이지(push pull gauge)로 용접부의 직접적인 인장전단강도(파단강도)를 측정하고, 상하부 지그(jig)에 시료가 체결 상태에서 용융부가 떨어질 때까지 상부 지그를 상승시키면서 측정값 중에 가장 큰 값을 시료의 인장전단강도로 기록하였다. 이는 원통형 이차전지 저항용접 공정 최적화 연구에서 사용한 평가 방식과 유사하다[20].

이러한 측정을 통하여 인장전단강도 데이터를 수집하였다. 단, 탭과 포일의 용접상태가 정상적이지 않은 샘플은 오류로 간주하여 데이터 수집에서 제외되었다. 인장전단강도 측정시 파단 위치는 탭과 포일 사이의 용접부에서만 파단되는 것을 육안으로 확인하였다.

3. 실험 결과

2장의 실험 방법을 통하여 실제 시편을 제작하고 인장전단강도를 측정하였다. 본 장에서는 용접 비드 외관과 인장전단강도 측정 등 실험 결과를 설명한다.

3.1 용접 비드 외관

Fig. 6은 용접 후 전면 및 용접 비드부를 광학 카메라 및 현미경으로 이미지이다. 용접 비드부의 길이는 20 mm이고, 배율은 200 배이다. 본 연구에서는 비드 외관을 기반으로 미용접, 관통(또는 핀홀), 스패터 및 열변색 영역 등의 불량 존재 유무 및 빈도를 종합하여 정상(good)과 비정상(bad)의 판정 기준으로 설정하였다. 정상의 기준은 용접 비드면에 미용접, 관통, 스패터(spatter)가 없고 표면상 열산화가 매우 적은 외관으로 판정하였다. 관찰 결과, Cu 포일 5장, 탭 두께 0.4 ~ 0.5 mm 조건에서는 미용접 및 관통 결함은 관찰되지 않았다. 또한, 국부적인 스패터가 발생하였으나 비드면에 걸쳐 있지 않은 영역에 형성되었고 열변색 또는 산화가 제한적인 수준이어서 Good으로 판정하였다. 반면, 탭 두께 0.6 mm 조건에서는 비드 길이 방향으로 열변색 및 산화 영역이 넓고 뚜렷하게 형성되어 Bad로 분류하였다. 이는 초기 용접 풀(pool)이 충분히 형성되어야 하나, 탭의 두께가 증가함에 따라 용접시 발생하는 열전달 속도의 차이로 인한 것으로 판단된다.

포일 두께가 두꺼워질수록 탭의 두께가 증가하더라도 비드면의 산화는 덜 관찰되었다. 이는 용접 빔이 직접적으로 먼저 탭 표면에 조사되면서 용융 풀이 형성되고 이후 포일의 두께에 따른 영향은 탭의 두께보다 얇은 수준의 수 ㎛로 열전달에 차이가 별로 없기 때문인 것으로 판단된다. 적층 수가 증가함에 따라 용접 비드와 궤적에서의 열영향은 미비한 것으로 관찰되었다. 이를 통해 열영향은 탭의 두께에 따른 영향이 주요인으로 보인다. 이는 레이저 용접시 초기 Cu 소재의 높은 열전도율과 낮은 상온 흡수율 때문에 깊은 용입 용접 프로세스에 도달하기 위해서는 높은 레이저 출력 강도가 요구되기 때문이다[3,4].

3.2 인장전단강도 측정 결과

Table 3은 인장전단강도 측정 결과를 나타낸다. 2.1절에 언급한 대로, 13개 실험 조건에 대해 측정된 최대 인장전단강도(kgf)의 평균값을 정리한 것이다. 실험 조건당 2~3회 반복 측정이 실시되었으며, 일부 실험 조건에서 발생한 측정 오류는 결측치로 간주하여 평균 계산에서 제외하였다.

인장전단강도시험 결과는 이차전지의 설계 인자 중 Cu 탭의 적층수(n)와 탭 두께가 레이저 용접에 따른 접합부 최대 인장전단강도와 밀접한 연관성을 보여준다. 특히, Cu 포일의 적층 수 증가 효과는 크게 나타난다. 적층수가 5 일 때, 인장 하중은 0.135 ~ 1.103 kgf 범위로 나타난다. 이는 탭 두께 0.4, 0.5, 0.6 mm로 증가할수록 최대 인장전단강도가 증가하는 경향이 확인된다. 탭 두께 0.5 mm, 포일 두께 5 ㎛

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

Table 3 Measurement result of tensile shear strength on experimental trials

Trial no.	Thickness of tab (mm)	Thickness of foil (㎛)	Number of foils in stack (n)	Tensile shear strength (kgf)
1	0.4	5	5	0.243
2	0.4	6	5	0.135
3	0.4	8	5	0.653
4	0.5	5	5	0.638
5	0.5	6	5	0.442
6	0.5	8	5	0.348
7	0.6	5	5	0.845
8	0.6	6	5	1.103
9	0.6	8	5	0.635
10	0.5	5	10	2.810
11	0.5	6	10	2.303
12	0.5	5	20	10.787
13	0.5	6	20	9.570

조건에서, 적층 수 5는 0.638 kgf, 적층수 10은 2.810 kgf, 적층 수 20 은 10.787 kgf로 급격하게 증가한다. 이는 포일의 적층 수 증가에 따라 탭과 포일 간 용접 유효 면적 확대가 기여 요인으로 해석된다. 각 층의 계면 면적은 증가하지 않았으나, 적층 수 증가에 따라 다층의 계면 면적이 증가하여 용접 유효 면적이 증가한 것이다. Cu 포일 6 ㎛ 조건에서도 적층 수 10은 2.303 kgf, 적층수 20은 9.570 kgf로 유사한 증가가 관찰되었다. 본 실험을 통하여 적층 수가 인장전단강도를 증가시키는 주요 설계 인자임을 확인하였다.

3.3 인장전단강도 회귀모델

본 연구에서는 Cu 탭과 포일 간 레이저 겹침 용접을 실시하였으며 공정 품질을 확인하기 위하여 기계적 성능인 인장전단강도를 측정하였다. 이차전지의 설계 단계에서 인장전단강도의 예측을 위하여, 측정 결과를 기반으로 설계 인자인 탭 두께, 포일 두께, 포일 적층수에 따른 최대 인장전단강도의 정량적 관계를 다변량 선형 회귀모델을 통하여 규명하였다. 다변량 회귀모델을 통해 설계 인자의 인장전단강도에 대한 회귀계수( )를 도출하고, 설계 인자와 인장전단강도 관계의 해석력을 제공하고자 한다. 또한 선형 회귀모델은 설계 인자와 인장전단강도 간 1차원적인 정량적 영향성을 제공하므로 기계 학습 기법을 적용한 모델로의 확장을 가능하게 한다. 일반적인 n개 변수에 대한 다변량 선형 회귀모델은 식(1)과 같다. Y는 종속변수로 인장전단강도이며, β_i는 i번째 계수(β_0는 상수항)로서, χ_i는 독립변수로 탭 두께, 포일 두께 및 포일 적층 수이며, ϵ는 오차항이다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \epsilon \quad (1)$$

상기의 회귀모델 도출하기 위하여 SPSS Statistics version 27 분석 도구를 활용하였다. Table 3의 데이터를 이용하여 독립변수 3개에 대한 선형 회귀 모델을 도출하였다. 식(2)는 탭 두께(χ_1), 포일 두께(χ_2), 포일 적층수(χ_3)에 따른 인장전단강도(Y)에 대한 선형회귀 모델이다.

$$Y = -3.781 + 2.314x_1 - 0.0110x_2 + 0.626x_3 \quad (2)$$

인장전단강도는 kgf, 탭 두께는 mm, 포일 두께는 ㎛, 적층 수는 개 단위를 갖는다. 전체 데이터셋에 대한 결정계수는 R^2 = 0.975로서, 선형회귀 예측값과 실측값 간 관계를 잘 설명하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 인장전단강도의 실측값과 예측값을 비교한 그래프이다. 이처럼 단순한 선형 회귀식으로도 추정이 잘되므로 설계 예측 효과가 크다고 판단된다. 식 (2)의 변수별 회귀계수의 크기를 통해 선형성을 추정할 수 있다.

- 탭 두께 계수: 탭 두께가 1 mm 증가할 때마다 인장전단강도는 2.314 kgf 증가한다.
- 포일 두께 계수: 포일 두께가 1 ㎛ 증가할 때마다 인장전단강도는 0.011 kgf 감소한다.
- 포일 적층 수 계수: 포일이 1 장씩 증가할 때마다 인장전단강도는 0.626 kgf 증가한다.

상기 결과를 통해, 포일 적층수가 공정품질의 기계적

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

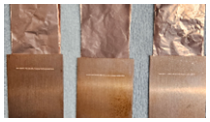
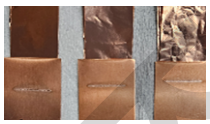
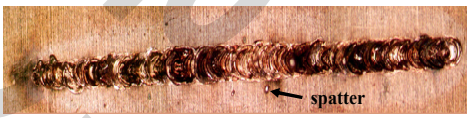
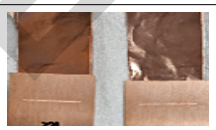
Design factor (t: thickness, n: number of foils)	Top view after welding	Image for welding bead (X 200)	Unwelded/ Burn-through/ Spatter	Oxidat -ion	Bead quality
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.4 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	O	Bad
Foil (t) : 6 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	O	Bad
Foil (t) : 8 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 5sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	O	Bad
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 10sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 10sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.5 mm n : 20sheets			Unwelded X Burn through X Spatter O	X	Good
Foil (t) : 5 ㎛ Tab (t) : 0.6 mm n : 20sheets			Unwelded X Burn through X Spatter X	X	Good

Fig. 7 Welding bead images

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

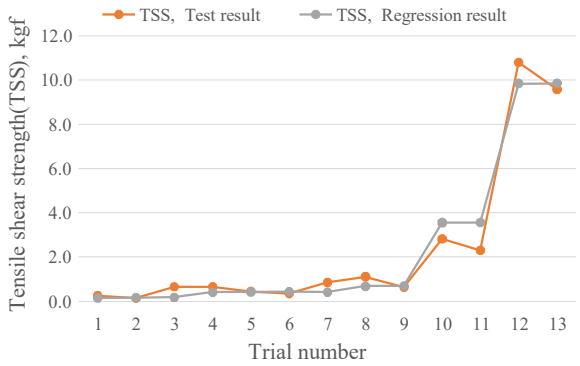


Fig. 8 Comparison between real and predicted tensile shear strength values

특성을 나타내는 최대 인장전단강도에 가장 큰 영향을 미친 것으로 파악하였다. 탭 두께는 0.1 mm씩 변경되는 것을 감안하면 실질적으로는 포일 적층 수의 회귀계수가 가장 크다. 포일 적층 수는 인장전단강도와 양의 관계를 가진다. 이는 포일 적층 수가 많을수록 유효 접합면적이 증가하고 하중이 분산되어 인장전단강도가 증가하기 때문이다. 그리고 탭 두께도 인장전단강도에 직접적인 영향을 미친다는 것을 파악하였다. 유효 용접 용입은 탭과 포일 간 상호작용에 영향을 주는데, 탭 두께가 증가할수록 용접시 변형이 덜 발생하고 용접부 접촉상태에서 용접의 안정성이 확보되어 인장전단강도에 비례적인 영향을 미치기 때문이다.

4. 실험 고찰

본 연구에서는 IR 레이저를 이용한 탭-적층 포일의 겹치기 용접을 수행하였고 설계 인자인 탭 두께, 포일 두께 및 적층 수가 용접 비드 외관과 접합부 인장전단강도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 장에서는 3장에서 제시한 실험 결과를 열전달 및 하중 전달 메커니즘 관점에서 해석하고, 설계 예측을 위해 도출한 선형 회귀모델의 의미와 적용 범위를 논의한다.

4.1 비드면 열영향의 원인 해석

레이저 에너지는 우선적으로 상부에 위치한 탭 표면에 조사되며, 이후 열전도로 전달될 수 있을 뿐만이 아니라 키홀 형성 후 복사로도 전달될 수 있다. 이러한 구조적 특성으로 인하여 탭은 접합구조에서 1차적으로 열을 흡수하게 되며, 비드 외관에서 관찰되는 열산화는 포일 두께 및 적층 수와 대비하여 탭 두께에 더 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 탭 두께가 증가할수록 동일한 용접 조건에서도 탭 내부로 확산되는 열량과 열용량이 증가하여 용융풀의 체류시간이 길어진다. 그 결과 상부 비드 주변의 열영향 영역이 상대적으로 확대된 것으로 해석할 수 있다.

반면, 포일 두께 및 적층 수 변화는 레이저가 직접 조사되지 않는 하부 구조에서의 2차적인 열전달에 의한 반응 요인이다. 따라서 외관상 열산화는 그 차이가 제한적으로 나타났을 가능성이 크다. 이는 포일 조건의 영향이 외관보다는 용융 용입, 접합폭과 같은 내부 접합 형상에 더 밀접하게 관련되어 있음으로 인장강도에 영향을 미쳤을 것을 시사한다. 따라서 본 결과는 포일 설계 인자보다는 탭 설계 인자에 따라 용접 외관이 달라질 수 있음을 의미한다.

4.2 인장전단강도 변화의 메커니즘 해석

실험결과의 파단 위치는 용접 라인(fusion line)을 따라 진행되었다. 포일 적층 수 증가에 따라 인장전단강도가 증가하는 경향은 적층 수가 증가하면서 하중을 지지하는 포일의 장수가 많아지므로 하중을 분담하여 응력 집중이 완화되는 하중 분산 효과가 발생한 결과로 해석할 수 있다. 이는 파단결과를 통해 포일과 탭 간 경계인 용접 비드 상에서 파단을 통해 확인할 수 있었다.

또한 적층 수 증가는 탭과 포일 사이의 실제로 용융, 결합되는 유효 접합면적의 확대가 됨으로 인장전단강도 증가에 유효하게 기여하였을 것으로 판단된다. 다만, 탭 두께의 증가는 열영향에 따른 결함 발생의 가능성도 존재한다. 탭 두께에 의한 효과는 인장전단강도의 증가만으로 단순 해석하기 보다는 열적 영향을 감안할 필요가 있다. 포일 두께의 영향이 상대적으로 제한적으로 나타난 것은 포일 두께 변화가 내부 용입 형상의 유의미한 변화로 이어지기까지 민감도가 낮았을 것으로 추정된다. 이는 단면 형상 관찰 및 파단 모드에 대한 정밀 분석을 통해 규명될 수 있을 것이다.

4.3 선형 회귀모델 해석과 적용 범위

본 연구에서 선형회귀를 이용한 이유는 한정적인 실험 내에서 각 설계 인자의 계수를 도출함으로써 설계인자가 접합부 인장전단강도에 미치는 상대적 기여도를 정량화하고 기계적 성능 수준을 판단하기 위함이다. 회귀모델의 높은 결정계수(R^2)는 인장전단강도가 주요 설계 인자의 선형 조합에 의하여 설명될 수 있다는 것을 의미한다. 특히, 회귀계수 분석 결과를 통해 포일 적층수의 영향이 가장 컸으며, 탭 두께가 그 다음 수준의 영향을 갖고 포일 두께의 영향은 상대적으로 작다는 점을 확인하였다.

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

다만, 본 회귀모델은 IR 레이저 조건과 본 연구에서 설정한 설계 인자 범위내에서 한정적인 해석결과로 공정변수 및 다른 모드(듀얼, 그린 레이저) 조건에서 결과가 달라질 가능성이 있다[6]. 그리고 실험의 수가 적어 향후 증량 검토를 통한 추가 검증이 필요하다. 본 모델은 이차전지에서 사용하는 IR 레이저 조건 하에서 설계 초기 단계에서의 설계 인자에 따른 영향성을 설정하고 이를 스크리닝(screening)하는 실용적 방법으로써 활용 가치가 있다.

5. 결 론

본 연구는 이차전지 설계에 중요한 Cu 탭과 적층 포일간 겹침 구조를 갖는 원통형, 파우치형 및 각형 전지에서 적용하는 레이저 용접 조건의 설계 인자가 접합부의 기계적 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고 설계 예측을 위한 기초 모델을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) IR 레이저 용접에서 용접 비드의 열영향을 외관 분석한 결과, 탭이 1차 열을 흡수하는 제품 구조의 영향으로 탭 두께의 변화에 상대적으로 민감하고 포일 두께 및 적층수 변화에는 덜 민감한 것으로 나타났다. 이는 외관 판단만으로는 내부 접합 결과값과 상관성이 높다고 결론짓기는 어렵다는 점을 시사한다.

2) 접합부 인장전단강도는 설계 인자 중 포일 적층수의 영향이 지배적이며, 적층 수 증가는 유효 접합면적 확대와 하중 분산효과를 통해 기계적 성능 확보에 핵심적인 역할을 하는 것으로 해석한다. 탭 두께도 기여하나, 포일 적층 수에 비해 상대적으로 적게 기여하는 것으로 판단된다.

3) 설계 인자와 인장전단강도 간 관계를 선형 회귀모델로 정량화 함으로써, 설계 초기 단계에서 활용 가능한 기계적 성능 예측 방법을 제시하였다. 이는 IR 레이저 조건에서 탭과 포일 접합부 설계 시의 설계 인자에 따른 영향성을 우선 선택할 수 있는 가능성을 제시한다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫 번째, IR 레이저 용접 조건에서 실험한 결과로서 용접 접합부의 용융 용입 정도, 접합 폭, 접합 심도 그리고 전기저항(접합부 저항) 특성까지는 평가되지는 못하였다. 두 번째는 설계 인자에 따른 기계적 특성(최대 인장전단강도)의 관계에 대해 용접 공정변수인 용접 출력, 속도 및 초점거리 등을 감안한 통합 예측 모델로의 개발은 이루어지지 못하였다. 향후에는 그린 레이저 용접에서의 Cu 탭과 적층 포일간 용접 접합 특성을 정량적으로 규명할 예정이다. 나아가 공정 조건과 품질의 상관성을 도출하여 머신러닝 기반 예측 및 최적화 기법을 도입한 지능형 품질 관리 체계를 포함하는 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2024년 과학기술정보통신부 디지털분야글로벌연구지원사업의 지원을 받아 수행되었음(과제명: 지능형 첨단제조를 위한 Human-in-the-Loop 산업 메타버스 기술 개발, 번호: RS-2024-00411653).

ORCID: Sung-Kab Kim: https://orcid.org/0009-0008-4869-7413
ORCID: Seung-Jun Shin: https://orcid.org/0000-0002-3587-5507

References

1. M. E. McGovern, D. D. Bruder, E. D. Huemiller, T. J. Rinker, J. T. Bracey, R. C. Sekol, and J. A. Abell, A Review of Research Needs in Nondestructive Evaluation for Quality Verification in Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing, *J. Power Sources.* 561 (2023) 232742. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232742
2. A. Das, D. Li, D. Williams, and D. Greenwood, Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing, *World Electric Vehicle J.* 9(2) (2018) 22. https://doi.org/10.3390/wevj9020022
3. S. Engler, R. Ramsayer, and R. Poprawe, Process Studies on Laser Welding of Copper with Brilliant Green and Infrared Lasers, *Physics Procedia.* 12 (2011) 339-346. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.142
4. J. Ning, L. J. Zhang, L. L. Zhang, J. Long, X. Q. Yin, and S J. Na, Effects of Power Modulation on Behaviours of Molten Pool and Keyhole During Laser Arc Hybrid Welding of Pure Copper, *Mater. Des.* 194 (2020) 108829. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108829
5. D. Y. Kim and Y. H. Park, The Design of Manufacturing Process Optimization for Aluminum Laser Welding Using a Remote Scanner, *J. Weld. Join.* 29(6) (2011) 702-707. https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.6.702
6. A. Olowinsky, C. Spurk, J. Helm, and A. Gillner, Laser-Based Joining of Electrode Stacks for Automated Large Scale Production of Li-Ion Battery Cells, *Energy Technol.* 11 (2023) 2200770. https://doi.org/10.1002/ente.202200770
7. S. W. Britten, L. Schmid, T. Molitor, and M. Rütering, Blue High-Power Laser Sources for Processing Solutions in E-Mobility and Beyond, *Procedia CIRP.* 94 (2020) 592-595. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.082
8. S. Jabar, V. V. Pamarthi, Q. Hayat, M. H. Khan, H. R. Kotadia, and P. Franciosa, A Review of Beam Shaping Approaches for Near-Infrared Continuous-Wave Laser Welding in E-Mobility Applications, *Opt. Laser Technol.* 192 (2025) 114000.

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.

https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.114000
9. S. Duraisamy, A. Horovistiz, A. Bastos, B. Mascate, and J. M. S. Dias, Electron Beam Welding Parameters for Copper and Dissimilar Copper Joints: Review, Research Gaps, and Future Challenges, *J. Adv. Joining Processes.* 12 (2025) 100350.
https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100350
10. S. Grabmann, C. Bernauer, L. Wach, M. Leeb, and M. F. Zaeh, A Method for the Reproducible and Accurate Determination of Electrical Resistances Based on Multi-Layer Joints in Lithium-Ion Batteries, *Appl. Energy.* 349 (2023) 121613.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121613
11. S. Kamat, W. Cai, T. J. Rinker, J. Bracey, L. Xi, and W. Tan, A Novel Integrated Process-Performance Model for Laser Welding of Multi-Layer Battery Foils and Tabs, *J. Mater. Process. Technol.* 320 (2023) 118121.
https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118121
12. S. M. Shin and D. C. Kim, Weldability Evaluation According to Alignment Conditions of Horn and Anvil in Ultrasonic Welding Process for Multilayer Battery Cell, *J. Weld. Join.* 39(5) (2021) 552-557.
https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.5.12
13. N. Kumar, V. V. Pamarthi, and A. Das, Investigating Laser and Ultrasonic Welding of Pouch Cell Multi-Foil Current Collectors for Electric Vehicle Battery Fabrication, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 134 (2024) 2497-2511.
https://doi.org/10.1007/s00170-024-14281-5
14. E. N. Reinhimer, F. Fetzer, R. Weber, and T. Graf, Benefit of High Feed Rates on the Process Efficiency in Laser Beam Welding, *Procedia CIRP.* 94 (2020) 718-721.
https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.127
15. S. J. Hwang, T. W. Kim, W. S. Jeon, and J. P. Jeong, Al-Cu Electrode Laser Welding for Rechargeable Battery, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 26(4) (2019) 1-6.
https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.4.001
16. M. J. Kang, W. S. Choi, and S. H. Kang, Ultrasonic and Laser Welding Technologies on Al/Cu Dissimilar Materials for the Lithium-Ion Battery Cell or Module Manufacturing, *J. Weld. Join.* 37(2) (2019) 52-59.
https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.8
17. K. D. Lee, S. H. Kang, M. J. Kang, S. Yi, S. K. Hyun, and C. H. Kim, Modeling of Laser Welds Using Machine Learning Algorithm, Part I: Penetration Depth for Laser Overlap Al/Cu Dissimilar Metal Welds, *J. Weld. Join.* 39(1) (2021) 27-35.
https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.3
18. S. Grabmann, M. K. Kick, C. Geiger, F. Harst, A. Bachmann, and M. F. Zaeh, Toward the flexible production of large format lithium ion batteries using laser based cell internal contacting, *J. Laser Appl*. 34 (2022) 042017.
https://doi.org/10.2351/7.0000778
19. S. M. Shin, S. W. Nam, J. Y. Yu, J. Y. Park, and D. C. Kim, Ultrasonic Metal Welding of Multilayered Copper Foils to Nickel-Plated Copper Sheet in Lithium-Ion Battery Cell, *Metals.* 11 (2021) 1195.
https://doi.org/10.3390/met11081195
20. J. S. Chung, S. S. Park, J. H. Kim, H. M. Kwon, H. M. S. H. Hong, and M. K. Lee, Process Optimization for Improving Resistance Welding Quality of Cylindrical Secondary Battery, *J. Korean Soc. Qual. Mang.* 48(1) (2020) 69-86.
https://doi.org/10.7469/JKSQM.2020.48.1.69

본 논문은 독자의 이해를 돕기위하여 영문논문을 국문으로 번역하여 게재한 논문입니다. 저자는 본 논문으로 연구업적과 같은 실적에 중복으로 지원받거나 인정받을 수 없음을 알려드립니다.