

DC fuse electric resistance spot welding process condition optimization using design of experiment method for electric vehicle and energy storage system

Joon Hwang[†] and Seung-Woo Ra^{*}

Department of Aeronautical and Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea

**Department of Secondary Battery Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea*

(Received March 16, 2026)

(Revised March 23, 2026)

(Accepted March 24, 2026)

Abstract In this study, we developed an automated process technology for the electric resistance spot welding process of direct current fuses (DC fuses), the demand of which is rapidly increasing due to the growing global demand for carbon neutrality and the expansion of the development and utilization of electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESS). To improve the productivity and quality of DC fuse manufacturing, we defined key process variables for the spot resistance welding process, such as welding current, pressure, and welding time. We analyzed the effects of each variable on the heat generation characteristics and melting zone shape during welding. Based on this, we established weld quality evaluation criteria, and through data-driven design of experiments (DOE) and experimental analysis, we derived optimal process conditions and identified defect types and causes. In this experiment, we measured the tensile strength, weld nugget size, and melting degree (no melting, normal melting, and over-melting) at eight points on the upper and lower slopes of the DC fuse (a total of 32 points) using the three-factor, four-level orthogonal array (L16(4³)) method. Through analysis of each main effect and interaction effect, the optimal operating conditions satisfying the tensile strength (1.53 kgf) and weld nugget size (1.47 mm) specifications were identified: a welding current of 6.5 kA, an applied pressure of 1.75 kgf/cm², and a welding time of 1.5 seconds. Furthermore, the strong interaction between current and time confirmed that heat input balance is a key factor in weld quality, with applied pressure playing a supplementary role in stabilizing this balance. Based on this, an automated point resistance welding system was designed and an integrated architecture of mechanical, electrical, instrumentation, and data/MES was established to enable current-time-based heat input control and applied pressure stabilization. A real-time production process monitoring system was established, and a prototype capable of process sequence control was manufactured and successfully tested in the field. This study is expected to contribute to increased corporate sales by enabling high-reliability quality control and enhanced productivity through precision welding of plate-shaped DC fuse elements. Furthermore, the results of this study are expected to contribute to improving the technological level required for the development of electric vehicles and energy storage systems (ESS).

Key words Electric vehicle, Electric energy storage system, Battery Protection Unit, DC FUSE, Resistance Spot Welding Automation Process

실험계획법을 이용한 전기차(EV) 및 에너지저장장치(ESS)용 DC FUSE 전기저항 스폿용접 공정조건 최적화

황준[†], 이승우^{*}

한국교통대학교 항공·기계설계학과, 충주, 27469

*한국교통대학교 이차전지공학과, 충주, 27469

(2026년 3월 16일 접수)

(2026년 3월 23일 심사완료)

(2026년 3월 24일 게재확정)

요약 본 연구에서는 전 세계적으로 탄소중립을 위한 시장요구가 더욱 높아지고 있으며, 전기차(EV: Electric Vehicle) 및 에너지저장장치(ESS: Energy Storage System)의 개발과 활용이 확대됨에 따라 수요가 급증하고 있는 DC FUSE 전기저항 스폿용접 자동화 공정기술개발을 수행하였다. DC FUSE 제조생산성과 품질향상을 위해 스폿용접공정의 용접전류, 가압력, 용접시간을 주요 공정변수를 정의하고, 각 인자가 용접중 발열 특성 및 용융부 형상에 미치는 영향을 분석하였다.

[†]Corresponding author
E-mail: jhwang@ut.ac.kr

이를 바탕으로 용접품질평가기준을 확립하고, 불량 유형과 원인을 데이터 기반으로 실험계획법 수립과 실험분석을 통해 공정최적화 조건을 도출하였다. 본 실험에서는 3인자 4수준 직교배열법(L16(4³))을 적용하였으며, DC FUSE 4개면 상·하 총 8개소(32포인트)의 인장강도, 용접너깃크기, 용융수준(미용융, 정상, 과용융)을 측정하였다. 각 주효과도와 교호효과도 분석을 통해 용접 전류 6.5 kA, 가압력 1.75 kgf/cm², 용접시간 1.5 s의 조합이 인장강도(1.53 kgf)와 용접너깃크기(1.47 mm) 규격을 만족하는 최적 운전 조건으로 도출할 수 있었다. 또한, 전류·시간 간의 강한 교호작용은 열입력 균형이 용접품질의 핵심임을 보여주며, 가압력은 이를 안정화시키는 보조적 인자로 작용함을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 스폿저항용접 자동화 시스템을 설계하고, 전류-시간 중심의 열입력 제어와 가압력 안정화가 될 수 있도록 기계부, 전장부, 계측부, 데이터/MES 통합 아키텍처를 구성하였다. 공정시퀀스 제어가 가능하도록 구성하여 실시간 생산공정 실시간 모니터링 시스템 구축과 시제품제작을 통해 현장적용 TRYOUT을 정상적으로 수행하였다. 본 연구를 통해 박관성형부품인 DC FUSE 엘리먼트의 정밀용접이 가능해짐에 따른 고신뢰도 품질관리와 생산성 증대가 가능해짐에 따라 기업매출증대 효과를 가져올 것으로 기대하며, 향후 전기차 및 ESS 개발에서 요구되는 기술수준 제고에 본 연구 결과를 활용하고자 한다.

1. 서 론

글로벌 시장에서 기후변화에 대응하기 위한 기술수준의 지속적인 상승과 전 세계적으로 탄소중립을 위한 시장요구조건이 더욱 높아짐에 따라 전기차(EV: Electric Vehicle) 및 에너지저장장치(ESS: Energy Storage System) 개발과 활용을 통한 에너지 활용 최적화가 전 세계적으로 활발히 진행중에 있다[1,2].

전기차(EV) 및 하이브리드 전기차(HEV) 퓨즈(Fuse)는 Fig. 1과 같이 과부하 및 단락과 같은 전기적 고장으로부터 전기차의 전기회로, 전기장비 및 배터리를 보호하는데 있어 필요한 핵심 부품이다[3,4]. 전기차의 전기회로는 직류(DC) 전압을 사용하며, EV Fuse는 통상 500~1,000 Vdc 정격을 갖고 있다. EV Fuse의 정격전압은 Fuse가 작동하도록 설계된 최대 전압이며, 최대 정격 전압보다 낮은 전압에서도 정상적으로 작동해야 한다. 또한, EV Fuse는 차량주행중에 가해지는 진동, 온도, 습

도 변화에 견고하게 견딜 수 있도록 신뢰성 높게 제작되어야 한다. EV에는 고용량 배터리팩, 전기모터, 전력변환장치 및 배터리 충전장비 등을 보호하기 위한 다양한 사양의 특수 FUSE도 필요로 하며, 고신뢰도 안전과 작동을 위한 제품설계 및 제조공정이 운영되어야 한다.

탄소중립(Net-Zero)과 친환경 에너지 정책을 강화하는 글로벌 트렌드 속에서 ESS는 재생에너지의 변동성을 완화하고, 전력망의 안정성을 높이며, 에너지 효율성을 극대화하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 특히, 에너지믹스(energy mix) 정책확대와 기술성장에 따른 다양한 발전원(원자력, 수력, 원자력, 신재생에너지)으로부터 생산되는 전력의 활용과 안정적인 전력 공급을 위한 ESS의 역할과 중요성이 더욱 강조되며, 이에 따라 정부 및 민간 기업의 대규모 투자가 이어지고 있다. 글로벌 ESS 시장 규모는 지속적으로 확대되고 있으며, 시장 조사 기관들은 향후 수년 내 연평균 두 자릿수 성장률을 기록할 것으로 전망하고 있다. 특히, 전기차 및 충전 인프라, 주택·



Fig. 1. DC Fuse specification for Electric Vehicle.

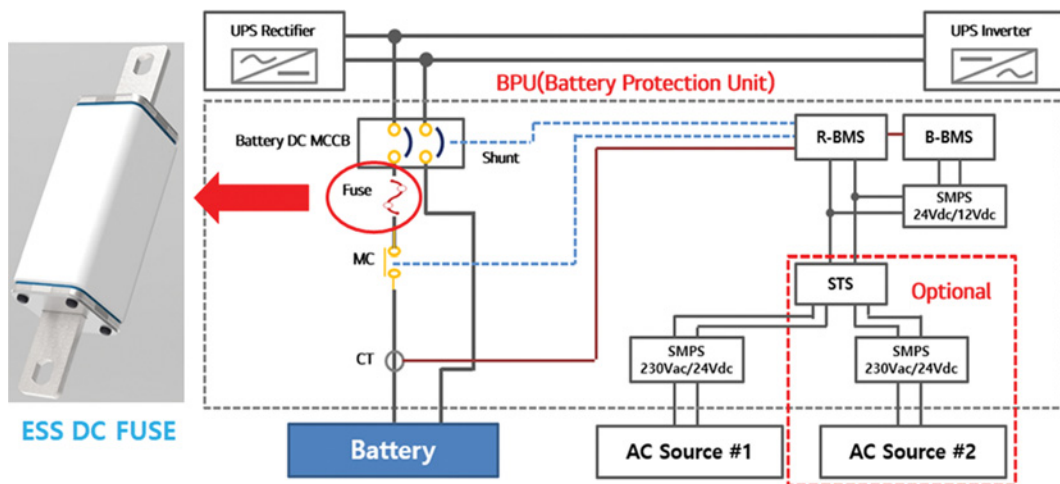


Fig. 2. Specific Architecture of BPU (Battery Protection Unit) and ESS DC Fuse.

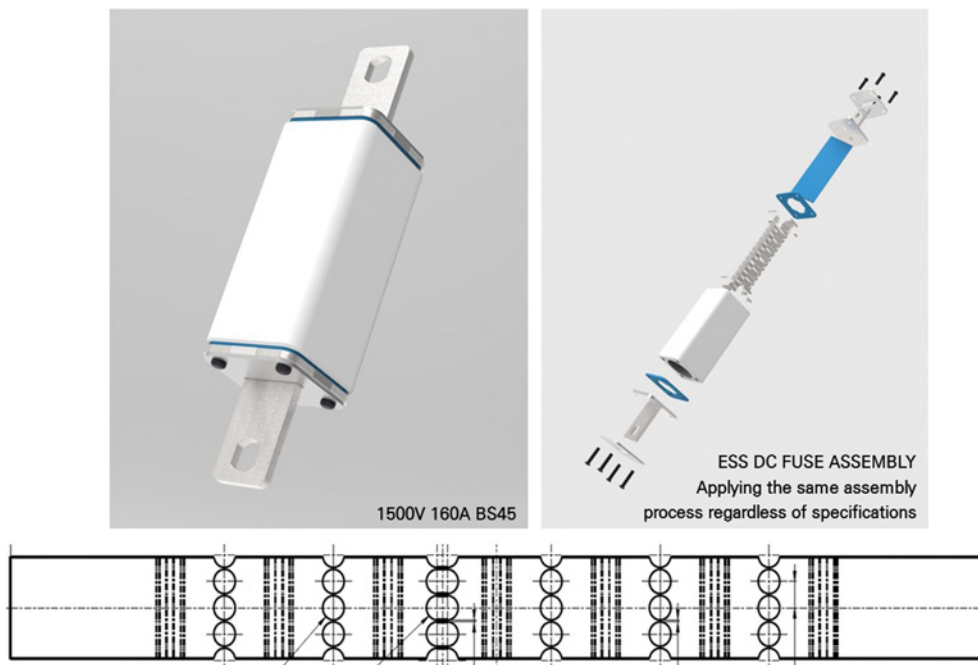


Fig. 3. ESS BPU DC FUSE Elements geometry and Assembled Features.

산업용 에너지 저장 장치, 대규모 전력망 연계형 ESS의 도입이 가속화되면서 고출력·고효율·고안전성 ESS 기술의 수요가 급증하고 있다.

ESS는 배터리 셀과 배터리 모듈, 그리고 이를 제어하고 보호하는 다양한 전력 변환 장치로 구성되며, ESS의 안정성과 효율성을 보장하기 위해서는 내부 구성요소의 신뢰성이 매우 중요하며, BPU(Battery Protection Unit) (Fig. 2) ESS 시스템 내에서 배터리 팩을 보호하고, 전압과 전류를 조절하며, 비정상적인 상황에서 안전하게 시스템을 차단하는 핵심적인 역할을 수행한다. BPU는 과전류 보호, 과충전 및 과방전 방지, 온도 감지 및 조절 등의 기능을 수행하며, 이를 통해 배터리의 수명을 연장하

고 시스템의 안전성을 확보하기 때문에 ESS가 고출력·대용량화됨에 따라 그 역할이 더욱 중요해지고 있다.

현재 참여기업의 DC FUSE 제조 공정은 수동/반자동 공정에 의해 이루어지고 있어, 공정 PQCD(생산성/품질/원가/납기) 측면에서 안정화가 이루어지지 못한 상태이며, 향후 양산 물량 증가에 대비한 스폿 용접공정 자동화시스템 개발과 빠른 현장적용을 통해 신뢰성 높은 제조공정 셋업과 공정 안정화가 시급히 요청되고 있다.

전기저항스폿용접 공정: DC FUSE Elements 저항 리드탭(Fig. 3) 전기저항스폿용접

- DC FUSE Elements Lead tab 용접 사양:
 - 스폿용접 포인트: 32개 포인트(상단 16개소, 하단



Fig. 4. Current spot welding process of BPU DC FUSE Elements by manual work.



Fig. 5. Welding nugget defects of welding process by current manual work process.

16개소)

- 용접소재 사양: 두께: 65 μm , 폭: 12.2 mm, 길이 132 mm, 무게: 1.12 g

- DC FUSE Elements 저항값 관리 스펙: $5.903 \text{ m}\Omega \pm 4\%$

※ DC FUSE Elements는 두께 65 μm 초박판 알루미늄을 스폿용접하여 저항 리드탭을 제작해야 하므로, 박판 용접시 다양한 용접제조 불량 발생됨.

DC FUSE는 EV 및 ESS 시스템에서 과전류 및 단락 (Short Circuit) 상황이 발생했을 때 신속하게 회로를 차단하여 화재 및 폭발 위험을 방지하는 핵심 보호 장치이며, ESS는 기존의 AC 기반 전력망과 달리 DC(직류) 전압을 직접 저장하고 변환하는 특성을 가지므로, DC FUSE는 고전압·대용량 환경에서도 안정적으로 작동해야 한다[5,6]. 현재 상용화된 DC FUSE는 제조공정에서 품질 균일성 문제, 고 제조비용, 내구성 한계 등의 문제를 안고 있으며, 대량생산 시 일관된 성능을 유지하는 데 어려움을 겪고 있다(Fig. 4, Fig. 5).

이러한 한계를 극복하고 차세대 시장의 요구사항을 충족시키기 위해, 본 연구에서는 DC FUSE의 핵심제조공정인 스폿 전기저항(electric resistance spot welding) 용

접공정을 개선하여 품질 안정성 확보, 생산 비용 절감, 고성능·고신뢰성 제품생산을 목표로 한다.

이를 통해 고신뢰도의 EV 및 ESS 시장에서의 글로벌 경쟁력을 확보하고, 시스템의 안전성과 효율성을 극대화하는 제조공정기술을 제공하고자 한다.

2. DC FUSE Elements 스폿저항용접 공정변수와 용접품질 상관성 분석

DC FUSE Elements는 전류가 직접 흐르는 전도체로서, 용접 품질은 전체 퓨즈의 전기적 안정성과 내구성에 결정적인 영향을 주기 때문에 저항용접 공정에서의 공정 변수제어와 용접품질 균일성 확보는 제품 신뢰성 향상의 핵심 요소로 작용하고 있다[7]. 본 연구에서는 DC FUSE Elements의 저항용접 공정을 대상으로 용접전류, 가압력, 용접시간의 세 가지 주요 공정변수를 정의하고, 각 인자가 발열 특성 및 용융부 형상에 미치는 영향을 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 용접품질의 평가 기준을 확립하고, 불량유형과 원인을 데이터 기반으로 연계 분석함으로써 후속 실험계획법을 위한 기초정보를 도출하였다.

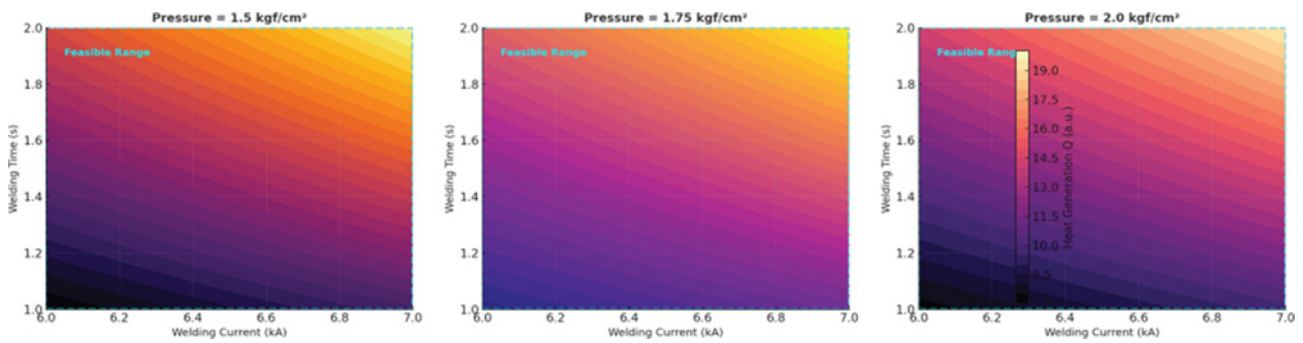


Fig. 6. Correlation between welding process variables (current and time) and heat generation according to changes in applied pressure.

Table 1
Analysis of causes and quality impacts by welding defects type

Defect type	Process parameters and welding status	Welding quality
Low welding nugget fusion	<ul style="list-style-type: none"> • Low current (I↓) or short welding time (T↓) → Insufficient heat generation, resulting in insufficient molten metal formation. • Excessive welding pressure (P↑) → excessively reduces contact resistance, inhibiting heat generation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Increased electrical resistance, decreased mechanical strength, and unstable current conduction due to imperfect bonding.
Over welding nugget fusion	<ul style="list-style-type: none"> • Excessive current (I↑) or excessive time (T↑) → Excessive heat generation, expansion of the molten zone, and instability of metal flow. • Pressure is insufficient (P↓) → contact resistance increases, causing local overheating. 	<ul style="list-style-type: none"> • Terminal part deformation, nugget asymmetry, surface cracks and reduced durability due to excessive expansion of molten metal.
Spatter	<ul style="list-style-type: none"> • Combined conditions of excessive current (I↑) and insufficient pressure (P↓) → Local current concentration and explosive melting occur. • Overheating due to excessive time (T↑) → Increased metal scattering during. 	<ul style="list-style-type: none"> • Surface damage, poor appearance, electrode contamination and poor reproducibility due to molten metal splash.

DC FUSE Elements의 저항용접은 전극 간 접촉 저항에 의해 발생하는 저항 발열($Q = I^2 \cdot R \cdot T$)을 이용하였고, 용접 전류는 용융부의 형상 및 너짓 크기를 결정하는 주요 인자로 전류 부족 시 미용융이 발생하며, 과전류 시 과용융 및 스파터가 발생한다. 가압력은 전극 간 접촉면 저항과 발열 균일성에 영향을 미치는 인자로 압력이 너무 낮으면 기공 및 불균일 용융이 발생하고, 너무 높으면 발열량이 감소해 용융이 불완전해지게 된다. 용접시간은 용융 깊이와 열 확산 범위를 결정하는 변수로 시간이 짧으면 접합이 불완전하고, 너무 길면 과열로 균열이나 열변형이 발생할 수 있다(Fig. 6). 이상의 세 변수는 개별적으로 작용하기보다는 발열량을 매개로 상호 복합적인 영향을 주며, 세 인자의 균형 제어가 용접 품질 균일성 확보의 핵심 인자이다.

생산라인에서 수집한 불량 샘플(120개)을 분석한 결과, Table 1에 나타난 바와 같이 용접부에서 관찰되는 주요 불량은 미용융, 과용융, 스파터 3가지로 확인되었으며, 이들은 모두 용접 시 발열량의 불균형 제어에서 기인하며, 용접공정변수의 변화가 용융부의 형상, 접합 강도, 전기적 저항 등에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 다음 단계에서는 이러한 공정인자 간 상호작용 관계를 정량적으로 분석하기 위해 실험계획법을 적용하고,

세 변수의 주효과 및 교호작용을 체계적으로 검증하고자 한다.

3. DC FUSE Elements 저항용접 조건 표준화 및 최적화 방안 연구

DC FUSE Elements 저항용접공정조건과 온도분포 특성변화 예측을 통한 적정 너짓(nugget) 형성을 위한 용접전류, 압력, 통전시간 등의 최적용접조건을 도출하고, 용접조건 표준화에 활용하였다.

- 저항용접 발열량 $Q = I^2 RT$ (I: 전류, R: 저항, T: 전류인가시간)
- 저항용접 공정조건: 전류, 압력(압입 스트로크), 통전시간, 온도 등

스폿 저항용접 전극 수명은 용접 생산성, 품질과 밀접한 연관성을 가지고 있으며, 전극 수명향상과 교체 주기 연장을 위해 전류, 압력, 통전시간, 전극 냉각 등을 공정변수로 하는 실험분석을 통해 최적조건을 도출하였다.

본 실험계획에서는 저항용접공정의 품질 변동을 지배하는 세 가지 제어인자인 용접 전류(I), 가압력(P), 용접 시간(T)을 요인으로 채택하였다(Table 2).

Table 2
Control factors and levels for electric resistance spot welding condition

Control factors	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
welding current (kA)	6.0	6.3	6.5	6.8
applied force (kgf/cm ²)	1.50	1.65	1.70	1.75
welding time (s)	1.0	1.35	1.7	1.9

수준은 각 인자당 4 수준으로 설정하여, 주효과의 곡선성(비선형)과 교호작용의 존재 여부를 통계적으로 탐지할 수 있도록 하며, 수준 간 간격은 현행 운전범위(안

전·양산 적용 가능 영역)를 기준으로 균등 또는 준균등 배치하였다. 상호작용을 정량적으로 분석하기 위해 Table 3과 같이 L16(4³) 직교배열법을 적용하였고, 각 실험 조합은 랜덤 순서로 반복 수행하여 실험 순서에 따른 체계적 오차를 최소화하였다. Figure 7과 같이 실험을 통해 측정된 반응 특성은 저항 용접부의 인장강도(규격: 1.2 kgf 이상)와 너깃 사이즈(규격: 1.75 mm 이하)이며, DC FUSE 4개면의 상·하 총 8개소(32포인트)를 측정하여 평균값을 산출하였다.

전류는 6.0 kA 이하에서는 미용융(Underweld) 현상이,

Table 3
Design of experimental results for electric resistance spot welding

No	welding current (kA)	applied force (kgf/cm ²)	welding time (s)	tensile strength (kgf)	nugget size (mm)	Welding quality status decision
1	6.0	1.50	1.0	1.08	1.20	NG (underweld)
2	6.0	1.65	1.3	1.22	1.45	OK
3	6.0	1.70	1.5	1.25	1.55	OK
4	6.0	1.75	1.8	1.20	1.68	critical
5	6.3	1.50	1.3	1.28	1.38	OK
6	6.3	1.65	1.5	1.36	1.52	OK
7	6.3	1.70	1.8	1.31	1.70	critical
8	6.3	1.75	1.0	1.20	1.40	OK
9	6.5	1.50	1.5	1.45	1.60	OK
10	6.5	1.65	1.8	1.38	1.75	NG (overweld)
11	6.5	1.70	1.0	1.40	1.38	OK
12	6.5	1.75	1.3	1.53	1.47	OK (optimal)
13	6.8	1.50	1.8	1.35	1.82	NG (spatter)
14	6.8	1.65	1.0	1.28	1.50	OK
15	6.8	1.70	1.3	1.33	1.65	critical
16	6.8	1.75	1.5	1.36	1.73	NG (overweld)

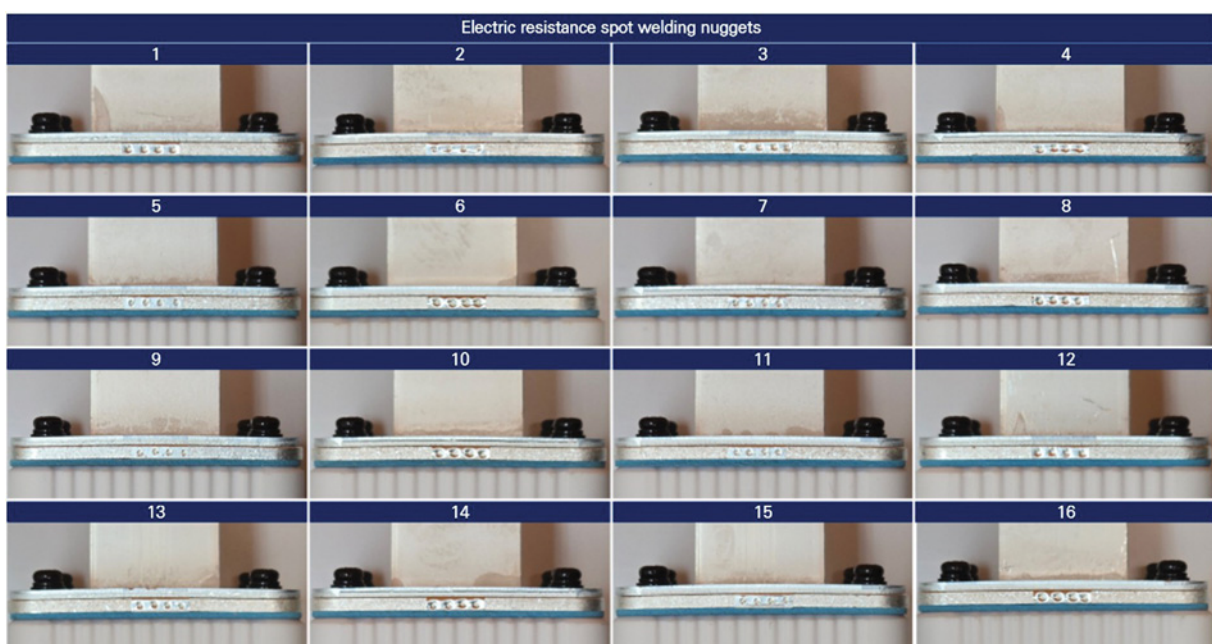


Fig. 7. Experimental nugget images of DC FUSE elements electric resistance spot welding.

6.8 kA 이상에서는 과용융(Overweld) 및 스패터(Spatter) 발생이 관찰되므로 6.0~6.8 kA 범위 내에서 실험을 수행하였고, 가압력은 1.5 kgf/cm² 이하에서 기공·접촉불량 위험이 상승하고, 1.8 kgf/cm² 이상에서는 과도한 압력

으로 발열량이 저하되어 미용융 경향이 나타나며, 시간은 1.0 s 부근에서는 용융깊이 부족, 1.8 s 이상에서는 과열로 인한 균열 및 스패터 발생 가능성이 높아졌다.

실험계획법을 통해 얻은 데이터를 각 인자의 독립적

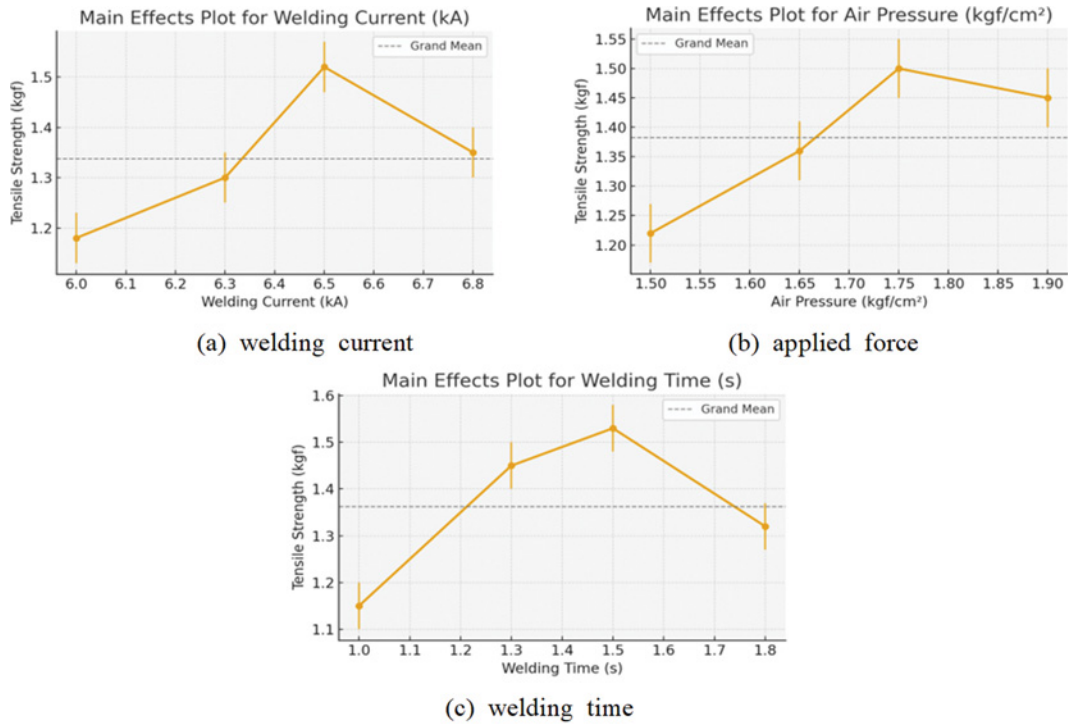


Fig. 8. Main effect on tensile strength of DC FUSE elements electric resistance spot welding.

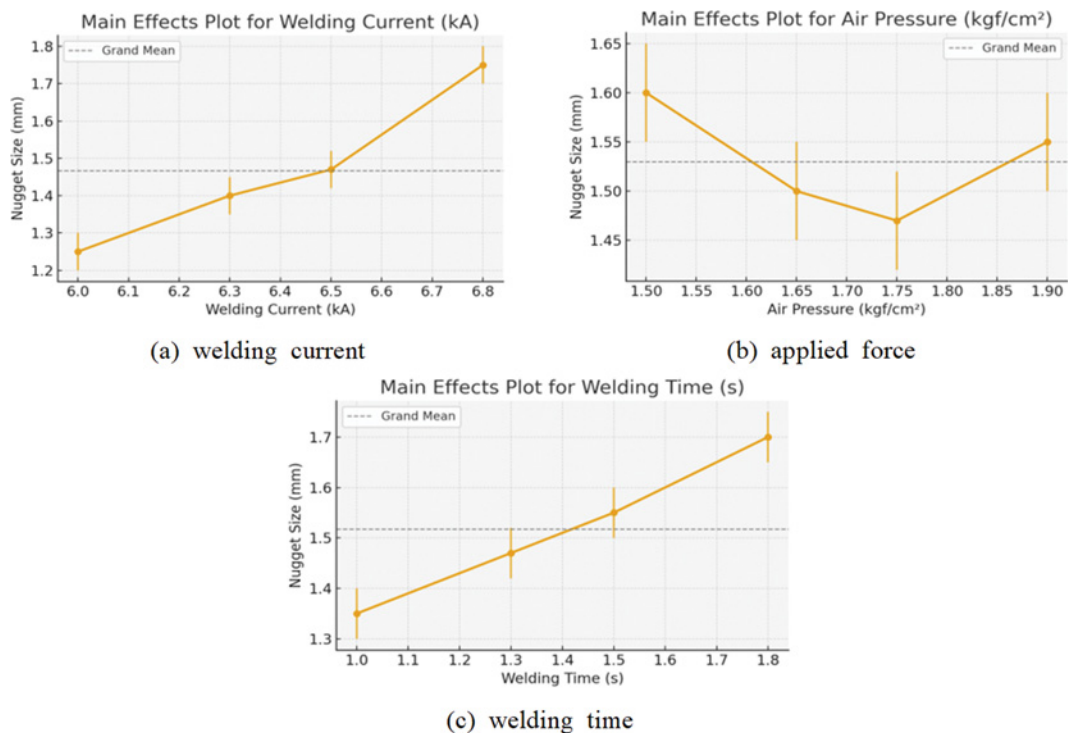


Fig. 9. Main effect on nugget size of DC FUSE elements electric resistance spot welding.

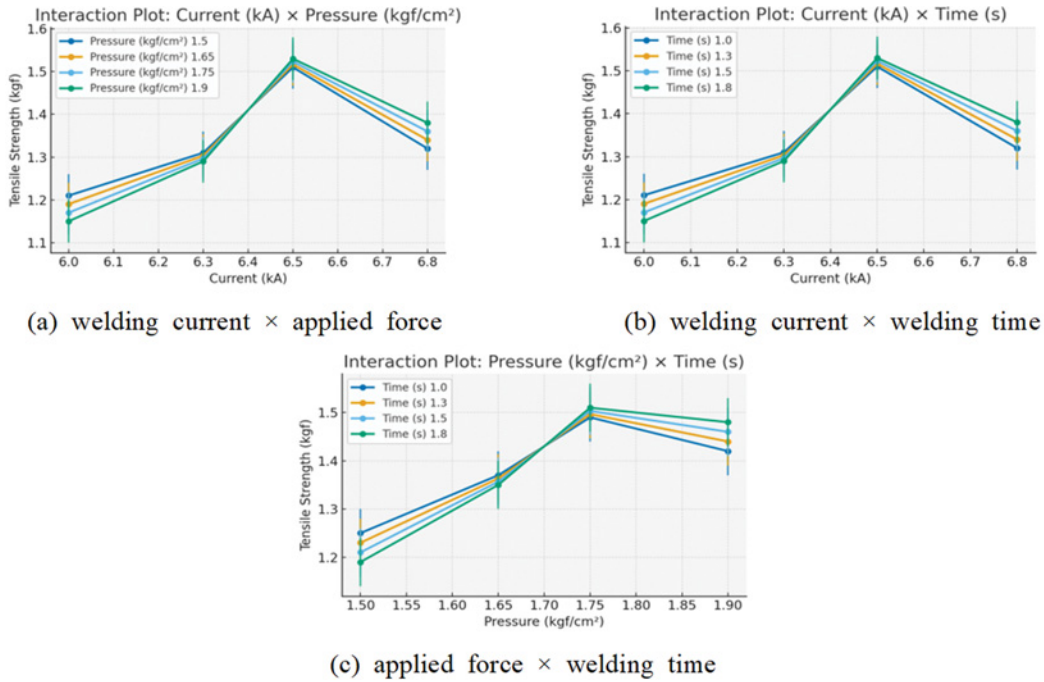


Fig. 10. Interaction effect on tensile strength of DC FUSE elements resistance spot welding.

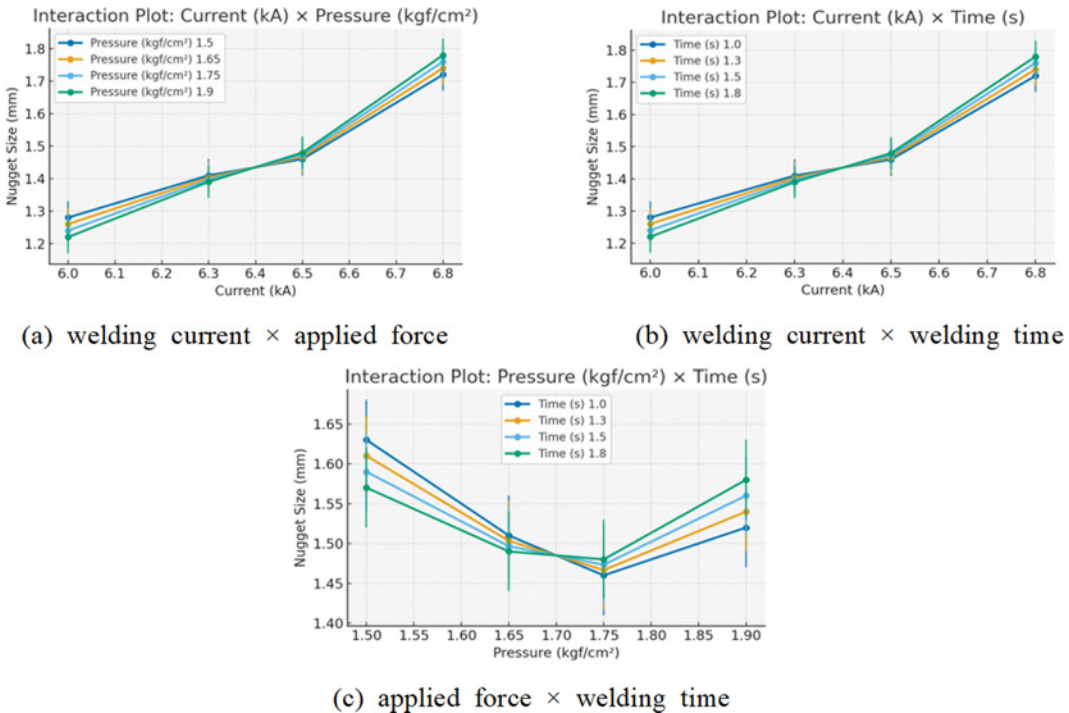


Fig. 11. Interaction effect on nugget size of DC FUSE elements resistance spot welding.

효과를 추정하기 위해서 저항값과 절단하중에 대한 주효과도를 그려서 Figs. 8~11에 각각 나타내었다. 주효과도에서 직선의 기울기가 급할수록, 즉 수평선과 이루는 사이 각이 클수록 효과가 크다고 할 수 있다. 인자의 수준에 변화에 따른 다른 인자의 효과를 알아보기 위하여 저항값과 절단 하중에 대한 교호효과도를 살펴보았다. 교

호효과도에서 교호효과 유무를 파악하는 방법은 두 직선이 이루는 사이 각을 이용하여 교호 효과 크기를 추정할 수 있다. 사이 각이 클수록 교호 효과가 크고, 두 직선이 평행에 가까우면 가까울수록 교호효과는 작다고 판단할 수 있으며, 완전 평행이라면 교호효과는 없다고 말할 수 있다.

Table 4
ANOVA results on tensile strength of electric resistance spot welding nugget

Source	DF	SS	MS	F-value	P-value	Significance
Welding Current (A)	3	0.145	0.0483	42.5	0.0002	Significant
Air Pressure (B)	3	0.059	0.0197	17.3	0.0021	Significant
Welding Time (C)	3	0.087	0.0290	25.4	0.0009	Significant
A × B	3	0.012	0.0040	3.5	0.081	Marginal
A × C	3	0.026	0.0087	7.2	0.026	Significant
B × C	3	0.008	0.0027	2.2	0.165	Not significant
Error	4	0.0045	0.0011	-	-	-
Total	22	0.341				

Table 5
ANOVA results on cutting pressure value of electric resistance spot welding nugget

Source	DF	SS	MS	F-value	P-value	Significance
Welding Current (A)	3	0.238	0.0793	51.8	0.0001	Significant
Air Pressure (B)	3	0.048	0.0160	10.5	0.007	Significant
Welding Time (C)	3	0.132	0.0440	29.7	0.0005	Significant
A×B	3	0.021	0.0070	4.6	0.064	Marginal
A×C	3	0.029	0.0097	6.8	0.031	Significant
B×C	3	0.010	0.0033	2.3	0.159	Not significant
Error	4	0.006	0.0015	-	-	-
Total	22	0.484				

DOE 결과 전반에서, 용접 전류 6.5 kA, 가압력 1.75 kgf/cm², 용접시간 1.5 s의 조합이 인장강도(1.53 kgf)와 너깃 크기(1.47 mm) 모두 규격을 만족하는 최적인전조건으로 도출하였다. 전류와 시간 간의 강한 교호작용은 열입력 균형이 용접 품질의 핵심임을 보여주며, 가압력은 이를 안정화시키는 보조적 인자로 작용함을 알게되었다. 따라서 향후 공정제어 시스템은 전류-시간 피드백 루프를 중심으로 구성하고, 가압력은 일정 범위(1.7~1.8 kgf/cm²) 내에서 자동 보정되도록 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

L16(4³) 실험계획 결과를 기반으로, 각 공정 인자(용접 전류, 가압력, 용접시간)가 반응 특성(인장 강도, 너깃 크기)에 미치는 통계적 유의성을 검증하기 위해 분산분석(ANOVA)을 Table 4와 Table 5에 각각 나타낸 바와 같이 수행하였다. 유의수준은 $\alpha = 0.05$ (95% 신뢰수준)로 설정하였으며, 요인 간 주효과(Main Effect)와 교호작용(Interaction)을 각각 평가하였다.

ANOVA 결과, 인장강도와 너깃 크기 모두에서 전류(A)와 시간(C)이 가장 유의한 영향을 미치는 주요 인자로 확인하였다. 특히 A × C 교호작용이 두 반응 특성 모두에서 공통적으로 유의성을 보여, 전류-시간 간 열입력 균형이 용접 품질의 핵심 제어 변수임을 통계적으로 입증할 수 있다.

이에 따라 최적 공정조건은 전류 6.5 kA, 가압력 1.75 kgf/cm², 시간 1.5 s로 확정하였으며, 이 조건에서 두 반

응 특성이 동시에 규격을 만족한다는 것이 실험 및 통계 분석을 통해 검증할 수 있었다.

4. DC FUSE Elements 전기저항스폿용접 자동화 공정 레이아웃 설계

본 시스템은 DC FUSE Element의 전기저항스폿용접을 안정적으로 수행하기 위해 전류-시간 중심의 열 입력 제어와 가압력의 안정화 역할이 가능한 전기저항스폿용접 자동화 공정장비에 대한 설계를 추진하였으며, 전체 스폿용접 자동화공정 레이아웃도를 Fig. 12와 같다. 전장부(용접전원·PLC·HMI), 계측/모니터링부(WET-4000S), 데이터/MES 연계를 하나의 통합 아키텍처로 구성하였으며, 실험계획법을 통해 확립된 운전조건을 용접설비 파라미터·인터록·알고리즘에 내재화하고, 모니터링부는 전류/전압/공압/생각수온도 4채널 실시간 측정과 상·하한 감시, RS-232/TCP 통신, SD 저장, 시퀀스 트리거(상승·하강) 설정을 기본으로 하여, 품질일관성을 확보하고자 하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 전기차 및 에너지저장장치 개발과 활용

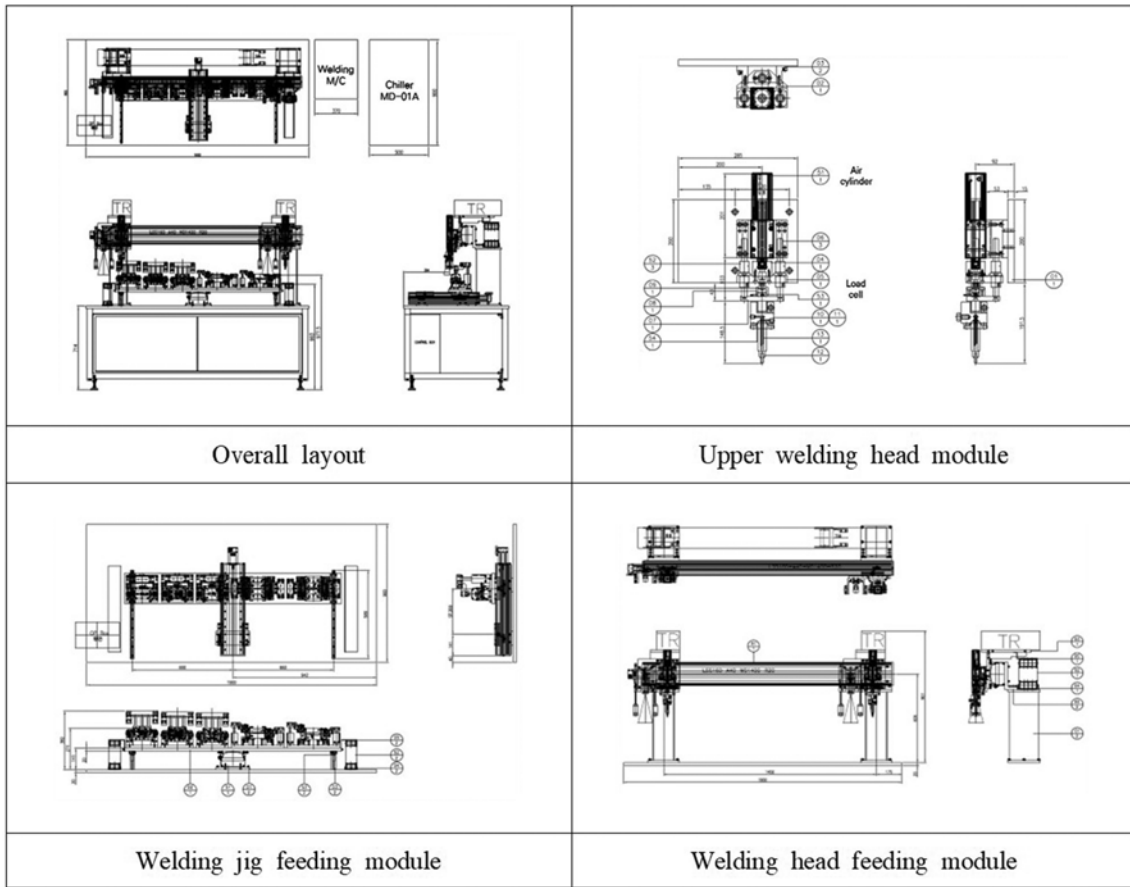


Fig. 12. Overall framework layout design for DC FUSE elements electric resistance spot welding automation process.

이 확대됨에 따라 그 수요가 급증하고 있는 DC FUSE 전기저항 스폿용접 자동화 공정기술개발을 위해 실험계획법을 이용하여 DC FUSE 제조생산성과 품질향상을 위해 스폿저항용접공정의 용접전류, 가압력, 용접시간을 주요 공정변수를 정의하고, 각 인자가 용접중 발열 특성 및 용융부 형상에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 바탕으로 용접품질평가 기준을 확립하고, 불량 유형과 원인을 데이터 기반으로 실험계획법 수립과 실험분석을 통해 공정최적화 조건을 도출하였다. 3인자 4수준 직교배열법을 적용하였으며, DC FUSE 4개면 상·하 총 8개소(32 포인트)의 인장강도, 용접너깃크기, 용융수준(미용융, 정상, 과용융)을 측정하였다. 각 주효과도와 교호효과도 분석을 통해 용접 전류 6.5 kA, 가압력 1.75 kgf/cm², 용접시간 1.5 s의 조합이 인장강도(1.53 kgf)와 용접너깃크기(1.47 mm) 규격을 만족하는 최적 운전 조건으로 도출할 수 있었다. 또한, 전류·시간 간의 강한 교호작용은 열 입력 균형이 용접품질의 핵심임을 보여주며, 가압력은 이를 안정화시키는 보조적 인자로 작용함을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 스폿저항용접 자동화 시스템을 설계하고, 전류·시간 중심의 열입력 제어와 가압력 안정화가 될 수 있도록 기계부, 전장부, 계측부, 데이터/MES

통합 아키텍처를 구성할 수 있었다. 본 연구를 통해 박관성형부품인 DC FUSE 엘리먼트의 정밀용접이 가능해짐에 따른 고신뢰도 품질관리와 생산성 증대가 가능해짐에 따라 기업매출증대 효과를 가져올 것으로 기대하며, 향후 전기차 및 ESS 개발에서 요구되는 기술수준 제고에 본 연구 결과를 활용하고자 한다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-11-004-03).

References

[1] M. Kesic, C. Chen and A.C. Knoll, “Battery-Management-Systems, VDE Fact sheet”, Version 09/2021 (2021).
 [2] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A.K. Srivastava and P. Famouri, “Battery energy storage systems: A review of

- energy management systems and health metrics”, *Energies* 17 (2024) 1250.
- [3] A. Kurkin, A. Chivenkov, D. Aleshin, I. Trofimov, A. Shalukho and D. Vilkov, “Battery management system for electric vehicles: Comprehensive review of circuitry configuration and algorithms”, *World electric vehicle journal* 117 (2025) 451.
- [4] Y. Zhang, J. Su, L. Zheng, R. Li, B. Yu and W. Shang, “Analysis of high-voltage DC fuse’s ageing characteristics under the overload pulse current carrying mode and the caused short-circuit failure in seriesresonant converter power source”, *Electrical Power and Energy Systems* 117 (2020) 105604.
- [5] G. Rajasekar and G. Gurusami, “Optimization of resistance spot welding parameters in uncoated cold-rolled steel by using taguchi method”, *Indian Journal of Science and Technology* 18 (2025) 1087.
- [6] Y. He, K. Yang, X. Wang, H. Huang and J. Chen, “Quality prediction and parameter optimisation of resistance spot welding using machine learning”, *Appl. Sci.* 12 (2022) 9625.
- [7] J. Chen, Z. Huang, K. Kuang and J. Chen, “Fuse welding and tin integration automatic machining device”, *Journal of physics: conference series*, 2022 International Conference on Intelligent Equipment and Data Processing (IEDP 2022) Guangzhou, China, Vol. 2435 (2023), No. 012003.