

# 다구찌 방법을 이용하는 전기강판 코일 연결용 레이저 용접 공정의 최적화

신중한<sup>\*,\*\*,#</sup>, 김도희<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>국립공주대학교 기계자동차공학부, <sup>\*\*</sup>국립공주대학교 미래융합공학과

## The Optimization of Laser Welding Process for Electrical Steel Coil Joining Using the Taguchi Method

Joong-Han Shin<sup>\*,\*\*,#</sup>, Do-Hee Kim<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National UNIV.,

<sup>\*\*</sup>Department of Future Convergence Engineering, Kongju National UNIV.

(Received 01 July 2022; received in revised form 19 July 2022; accepted 09 August 2022)

### ABSTRACT

Laser welding has attracted great attention as a tool used to join electrical steel coils. In this study, laser butt welding for electrical steel coil joining was conducted using the Taguchi method. It was found that structural defects such as void sand cracks were not produced in welds. This indicated that the performance of laser welding in electrical steel was excellent. According to the Taguchi analysis, the total welding quality index (TWQI) considering the bead height and roughness and tensile strength of the weld joint was almost evenly affected by laser power, welding speed, and focal position. The optimum welding conditions to maximize the TWQI were a laser power of 1220W, welding speed of 90 mm/s, and a focal position of 1mm. The regress model predicting the TWQI was also developed using the surface response method. We found that the model predicts measured values with an average error of 16.36%.

**Keywords :** Laser Welding(레이저 용접), Electrical Steel(전기강판), Taguchi Method(다구찌방법)

### 1. 서 론

전기강판 (electrical steel) 혹은 규소강판은 일반 탄소 강판에 비해 규소 (Si) 함량이 많은 합금으로 우수한 전기적, 자기적 특성으로 인하여 다양한 전기모터, 발전기 및 변압기의 코어(core) 재료로

많이 사용되고 있다<sup>[1,2]}</sup>.

모터 코어는 두께가 매우 얇은 박판형태의 전기강판 코어 낱장들이 다수 적층된 구조로 제작된다<sup>[3,4]}</sup>. 낱장 전기강판 코어들은 코일 형태의 전기강판이 프레스 장비에 공급된 후 편칭을 통해 얻어진다. 이때 코어 부품 생산 속도를 높이기 위해 선행 코일의 끝단과 후행 코일의 앞단을 맞대기 형태로 접합 (혹은 연결) 하여 연속적으로 프레스 장비에 전기강판 코일을 공급하는 것이 필요하다.

# Corresponding Author : [jhshin@kongju.ac.kr](mailto:jhshin@kongju.ac.kr)

Tel: +82-41-521-9254

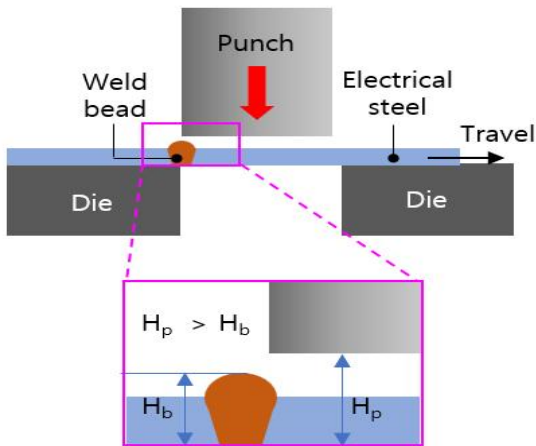


Fig. 1 Press(or punching) process of electrical steel coil ( $H_b$ : bead height,  $H_p$ : punch height)

코일의 이송 중 인장응력에 의해 접합부가 파손되지 않기 위해서는 접합부의 적절한 강도가 요구되며, 접합부 비드 높이는 코일 이송 중 Fig. 1에 보이는 바와 같이 프레스 펀치 하단부에 걸리지 않도록 펀치 높이보다 낮게 유지되어야 한다.

전기강판을 접합하기 위한 방법으로는 일반적으로 플래시 버트(butt) 용접<sup>[5]</sup>, 아크 용접<sup>[6,7]</sup>, 레이저 용접<sup>[8-10]</sup> 등이 있다. 작은 크기(수십에서 수백 마이크로미터)의 빔 스폿(spot)을 이용하는 레이저 용접의 경우 플래시 버트 용접 및 아크 용접 대비 용접에 이용되는 입열량이 적어 열영향부가 작게 형성되며, 용접 후 뒤틀림 등의 변형이 적어 상대적으로 두께가 얇은 판재들의 정밀한 맞대기 용접에 유리하다<sup>[11,12]</sup>. 또한, 레이저 용접은 자동화 및 빠른 용접 속도로 코일 연결시간을 상당히 단축할 수 있어 전기강판 코어 제조를 위한 프레스 공정의 생산성을 크게 향상시킬 수 있는 방법으로 주목을 받고 있다.

레이저 용접 공정에서 우수한 용접부 확보를 위해서는 주요 공정변수인 레이저 출력, 용접 속도 및 빔 초점 위치 등이 용접부 품질에 미치는 영향에 대한 많은 평가가 필요하다. 특히, 각 공정 변수마다 여러 조건에서 평가가 이루어질 경우 많은 시간과 비용이 필요한데, 이러한 시간과 비용은 실험 계획법(design of experiment, DOE)을 이용하

는 평가를 통해 최소화시킬 수 있다. 특히, 다구찌(Taguchi) 실험 계획법은 직교배열표를 이용하여 실험 횟수는 최소화하면서 최적의 공정 조건 및 공정에 큰 영향을 주는 변수를 파악하는데 용이하다<sup>[13,14]</sup>.

Dhanaraj<sup>[15]</sup> 등은 고강도 알루미늄 합금(AA7075-T6)의 레이저 맞대기 용접 공정을 최적화시키기 위해서 다구찌 실험을 수행하였다. 결과에 따르면, 용접부의 인장강도 및 경도를 최대화시키는 최적화 공정변수는 0.9kW의 레이저 출력, 8mm/s의 용접 속도 및 1000Hz의 펄스 반복률인 것으로 확인되었다.

Jin<sup>[16]</sup> 등은 다구찌 방법을 이용하여 타이타늄(Ti) 소재의 레이저 겹치기 용접 공정에서 용접 변수가 용접부 인장강도에 미치는 영향을 분석하였다. 인장강도에 큰 영향을 주는 변수는 레이저 출력과 보호가스였으며, 보호가스는 시편 상부 표면보다 하부 표면에 공급될 경우 인장강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 이용하여 전기강판 코일 연결용 전기강판의 레이저 맞대기 용접 실험을 진행하였다. 레이저 출력, 용접속도 및 초점 위치가 비드 높이, 비드 표면 조도 및 인장강도로 표현되는 용접부 품질에 미치는 영향을 분석하였으며, 이를 통해 최적 공정 조건 및 용접 품질에 큰 영향을 주는 공정 변수를 확인하였다. 또한, 다구찌 실험 결과 및 반응 표면법을 이용하여 용접부 품질을 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 재료 및 장치

용접 시편으로는 3.5% 규소가 첨가된 0.5mm 두께의 박판 무방향성 전기강판 ((주) 포스코)을 사용하였다. 레이저 절단기를 이용하여 전기강판을 절단 후 (폭: 80mm, 길이: 120mm) 실험에 사용하였다. 용접 실험에는 1080nm 파장의 연속파 파이버 레이저(Raycus, RFL-C2000X)가 사용되었다. 레이저 빔은 빔 전달 광학 파이버를 통해 용접 헤드로

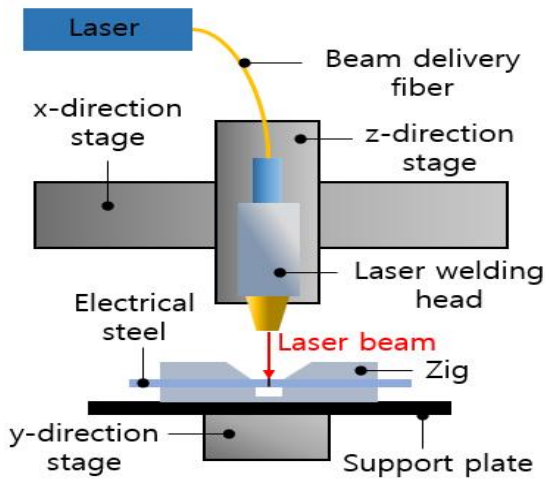


Fig. 2 Schematic diagram of laser welding experiment

전달되며, 용접 헤드에 장착된 초점 렌즈(200mm 초점 거리)를 통과한 후 최종적으로 용접 시편에 조사된다.

시편 표면에서의 레이저 빔의 스폿 크기는 약 100 μm이며, 레이저 용접은 맞대기 용접 형태로 진행되었다. Fig. 2는 레이저 용접실험의 개략도를 보여준다.

## 2.2 분석 방법

용접부 단면의 형상 분석 및 비드 높이 측정은 광학현미경(OLYMPUS, BH2-UMA)을 이용하여 진행하였다. 비드 높이는 용융부내 최 저점과 최 고점의 높이차로 정의하였다. 용접부 단면 분석을 위해 용접부 절단 및 용접 단면부가 노출되도록 시편을 마운팅 하였다. 노출된 용접 단면부는 탄 화규소 페이퍼(400~2000grit)로 그라인딩 후 다이아몬드 서스펜션 (3~1 μm 입자크기)을 이용하여 연마작업 되었으며, 연마된 용접 단면부는 최종적으로 Nital 5% 용액을 이용하여 10~15초 동안 화학적으로 식각처리 되었다.

비드의 표면 조도 분석은 디지털 현미경(Leica, DVM6 A)을 이용하여 진행되었다. 용접 방향을 따라 시편 중앙부 2.5mm 길이에 대한 비드 표면 프로파일을 측정 후 해당 구간에 대한 평균 조도 (Rq 값)를 얻었다. 용접시편의 인장시험을 수행하

기 위해 와이어 방전가공을 통해 ASTM E8M 규격을 따르는 인장시험 시편들을 제작하였다. 인장 시험은 만능재료시험기(Shimadzu, AG-250kNX)를 이용하여 진행하였으며(10mm/min의 크로스 헤드 속도 적용), 각 공정 조건당 3개의 시료에 대한 인장시험이 이루어졌다.

## 2.3 다구찌 실험 설계

본 연구에서는 Table 1에서 보이는 바와 같이 3 인자(factor) 4수준(level)계의 다구찌 실험이 고려되었다. Table 1에 보이는 바와 같이, 용접 공정에 영향을 미치는 인자들은 레이저 출력, 용접 속도 및 초점 위치로 구성된다. 3인자 4수준계의 다구찌 직교배열표를 이용하여 총 16번의 실험을 진행하는 실험 배치를 설계하였으며, 각 실험별 공정 조건은 Table 2에 보인다.

다구찌 실험에서는 SNR(signal to noise ratio)을 이용하여 최적 공정 조건 및 실험 인자들이 공정에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 용접 품질을 공정 결과물로 정의하여 SNR을 계산하였다. 용접 품질 값이 높을수록 좋은 특성을 가지므로 망대특성(larger-the-better)에 해당되는 SNR 식을 이용하였다. 식 (1)은 망대특성에 해당되는 SNR 식을 보여준다.

$$SNR = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

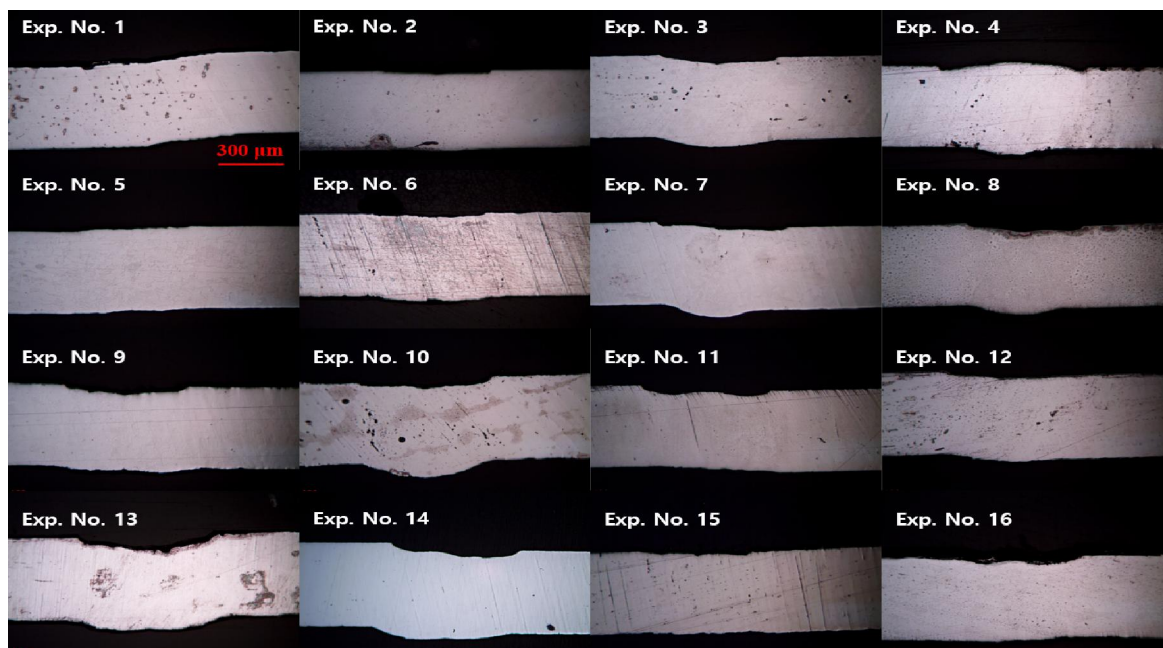
위 식에서  $n$ 은 반복 실험 횟수를 나타내며,  $y_i$ 는 공정의 결과물인 용접 품질 값을 의미한다. 본 연구에서는 각 공정 조건별 실험이 1회 이루어졌으므로  $n$ 값은 1이다.

Table 1 Factors of laser welding experiments and their levels

Factor	Level			
	1	2	3	4
Laser power (W)	1100	1160	1220	1280
Welding speed (mm/s)	70	80	90	100
Focal position (mm)	0	1	-1	-2

**Table 2 Experimental layout based on Taguchi matrix (3 factors and 4 levels)**

Exp. No.	Factor		
	Laser power (W)	Welding speed (mm/s)	Focal position (mm)
1	1100	70	0
2	1100	80	1
3	1100	90	-1
4	1100	100	-2
5	1160	70	1
6	1160	80	0
7	1160	90	-2
8	1160	100	-1
9	1220	70	-1
10	1220	80	-2
11	1220	90	0
12	1220	100	1
13	1280	70	-2
14	1280	80	-1
15	1280	90	1
16	1280	100	0



**Fig. 3 Cross section of weld**

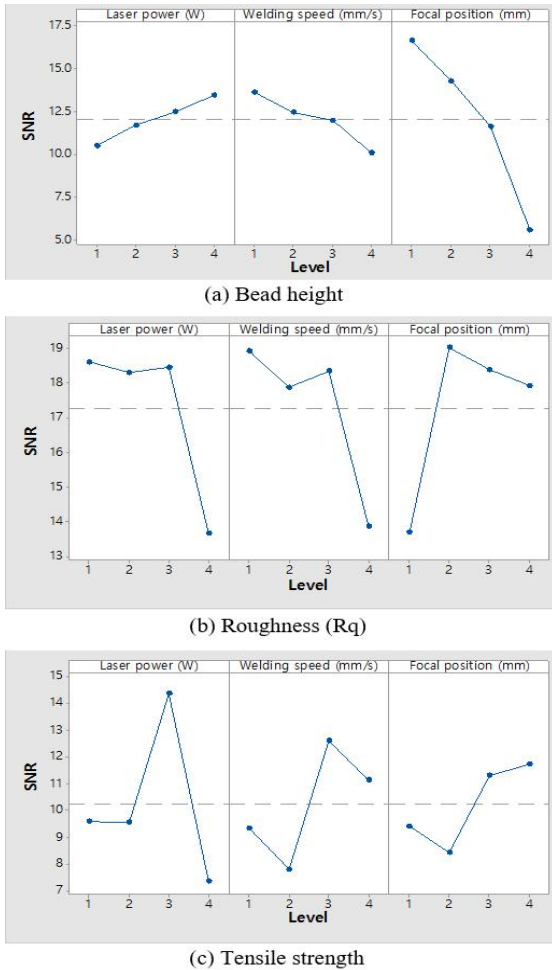


Fig. 4 SNR analysis for IWQI

용접 품질을 구성하는 항목으로 비드 높이, 비드 표면 조도 및 인장강도 값이 사용되었다. 용접 품질 값을 1~10 사이의 값으로 지수화시키기 위해 위 항목에 대한 실측값들을 표준화시켰다. 가장 나쁜 품질이 1, 가장 우수한 품질은 10, 나머지 품질들은 1~10 사이의 값을 가지도록 하였다. 비드 높이와 표면 조도는 값이 가장 작은 경우 품질 값을 10으로 하였으며, 인장강도는 가장 큰 값을 가지는 경우 품질 값을 10으로 정하였다.

위 내용을 바탕으로 비드 높이, 비드 표면 조도 및 인장강도에 대한 개별 용접 품질 지수 (individual weld quality index, IWQI)를 계산하는

식은 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$IWQI_i = 1 + \frac{9|x_i - x_{\min}|}{|x_{\max} - x_{\min}|} \quad (2)$$

위 식에서  $i$ 는 1부터 16 (마지막 DOE 실험 번호)까지이며,  $x$ 는 실측값에 해당된다( $x_{\max}$ 와  $x_{\min}$ 는 각각 실측값 중 최대값과 최소값을 의미).

IWQI 이외에도, 본 논문에서는 3개의 IWQI 항목들의 합으로 정의되는 종합 용접 품질 지수(total weld quality index, TWQI)에 대한 분석도 진행되었다. 다구찌 실험에서 나온 결과들의 통계적 분석을 위해 본 연구에서는 MINITAB 소프트웨어를 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접 품질에 대한 다구찌 분석

Fig. 3은 각 실험에서 얻은 전기강관 맞대기 용접 단면부를 보여준다. 용접부 식별을 위해 Nital 용액을 이용한 식각 작업을 진행하였으나, 전기강관 레이저 용접에 대한 다른 연구들<sup>[3,4]</sup>과 마찬가지로 용접부가 확실히 드러나는 결과는 얻지 못하였다. 그림에서 보이는 바와 전반적으로 균열 및 기공과 같은 용접부 결함은 관측되지 않았으며, 이를 바탕으로 전기강관의 레이저 맞대기 용접성이 양호한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 인자수준에 따른 IWQI SNR 분석 결과를 보여준다. 참고로, 지수화를 하기 전 비드 높이, 조도 및 인장강도의 실측값 범위는 각각 522.5~597.3  $\mu\text{m}$ , 0.43~1.38  $\mu\text{m}$  및 346.86~355.6 MPa에 해당된다. Fig. 4(a)에 보이는 바와 같이, 비드 높이의 경우 초점 위치, 용접 속도 및 레이저 출력 순으로 비드 높이에 큰 영향 (SNR 변화가 큰 순서)을 주는 것으로 확인되었으나, 초점 위치 대비 용접 속도 및 레이저 출력은 그 영향 정도가 미비하였다. 상대적으로 비드 높이에 큰 영향을 미치는 초점 위치의 경우, -2mm 조건 (Exp. No. 4, 7, 10 및 13)에서는 비드가 공통적으로 하부표면 아래로 돌출된 형태를 보이는 것이 확인되었으며, 이로 인

하여 해당 조건들에서 높은 비드 높이를 유발하게 되었다. 반면에, 초점 위치가 0mm (Exp. No. 1, 6, 11 및 16) 인 경우 비드 표면이 평평하거나 상부 비드 표면이 용접시편 표면보다 함몰된 형태를 보였는데, 이로 인하여 낮은 비드 높이가 얻어졌다.

Fig. 4(b)에 나타나듯이, 표면 조도에 대한 세 가지 인자의 영향은 모두 비슷한 수준임을 알 수 있다. 특이한 사항으로는 16번째 실험에서는 평균 조도 값인  $0.65 \mu\text{m}$  대비 상당히 큰 조도 값( $1.38 \mu\text{m}$ ) 이 유발되었다. 16번째 실험에서는 가장 높은 레이저 출력, 가장 빠른 용접 속도 및 0mm의 초점 위치가 사용되었다. 높은 레이저 출력 및 0mm의 초점 위치 (초점 위치가 0mm인 경우 시편 표면에서 빔 스폿 사이즈가 최소화되어 가장 높은 빔 강도를 얻음) 는 용융지(melt-pool)의 온도 증가 및 난류 유동을 유발하며, 빠른 용접속도 역시 용융지의 안정화를 떨어뜨리는 요인으로 작용했을 것으로 판단된다. 이러한 이유로, 16번째 실험에서 거친 비드 표면이 형성되었을 것으로 판단된다.

인장강도의 경우 레이저 출력, 용접 속도 및 초점 위치 순으로 영향이 높은 것으로 확인되었다. 레이저 출력, 용접 속도는 용접 단위 길이당 입열량과 관련되는 인자들로 용접부의 결정 크기 및 모양 등 미세조직에 큰 영향을 준다. 일반적으로 용접부의 인장강도는 용접부 미세조직에 큰 영향을 받기 때문에 레이저 출력 및 용접 속도가 인장강도에 상대적으로 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다.

Table 3은 인자 수준에 따른 TWQI SNR 분석 결과를 보여준다. 용접 속도, 레이저 출력 및 초점 위치 순으로 TWQI에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나(델타값이 큰 순서), 용접 속도와 초점

위치의 델타 값 차이가 13% 수준으로 인자에 따른 TWQI 영향 정도 차이가 크지 않은 것으로 분석되었다. IWQI에 대한 SNR 분석에 따르면, 초점 위치는 비드 높이에는 가장 큰 영향을 주었으나 인장강도에는 가장 적은 영향을 미쳤다. 반대로, 레이저 출력의 경우 비드 높이에 가장 적은 영향을 주었으나 인장강도에는 가장 큰 영향을 유도하였다. 용접 속도의 경우 전반적으로 모든 IWQI에 중간수준의 영향을 주었는데, 이로 인해 모든 용접 품질 항목을 고려한 TWQI에 대해서는 인자별 영향 정도 차이가 크지 않았다.

TWQI에 대한 SNR분석 결과를 바탕으로, TWQI에 대한 가장 높은 SNR을 유도하는 최적 공정 조건 및 해당 조건들의 TWQI에 대한 주요한 효과를 Table 4에 나타내었다.

### 3.2 TWQI에 대한 반응표면 회귀식

레이저 출력, 용접 속도 및 초점 위치와 같은 주요 인자들 이외에도 각 인자들의 제곱항 및 인자들 사이의 교호작용 역시 용접 품질에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 다양한 인자들이 TWQI에 미치는 효과를 파악하기 위해 다구찌 실험 결과를 바탕으로 TWQI에 대한 반응표면 회귀 모델식을 아래와 같이 구하였다.

$$\begin{aligned}
 TWHQI = & - 975 + 1.321A + 5.14B - 9.2C - \\
 & 0.000432A^2 - 0.006B^2 - 1.22C^2 - \\
 & 0.00353A \times B + 0.0051A \times C + \\
 & 0.057B \times C
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

식 (3)에서 A는 레이저 출력, B는 용접 속도, C는

**Table 3 SNR analysis for TWQI and rank of effects**

Level	Laser power	Welding speed	Focal position
1	23.66	24.92	24.29
2	24.63	23.66	24.97
3	25.27	25.14	24.36
4	22.89	22.73	22.83
Delta <sup>a</sup>	2.37	2.42	2.14
Rank <sup>b</sup>	2	1	3

<sup>a</sup>Difference between the highest and lowest SNR

<sup>b</sup>Larger delta has a higher rank

**Table 4 Optimum welding conditions and their main effect on the TWQI**

Factor	Optimum level	Main effect on the TWQI
Laser power	3 (1220W)	Increase of SNR for bead height, roughness and tensile strength
Welding speed	3 (90mm/s)	Increase of SNR for roughness and tensile strength
Focal position	2 (1mm)	Increase of SNR for bead height and roughness

**Table 5 Measured and predicted value for TWQI**

Exp. No.	Factor			TWQI		
	A Laser power (W)	B Welding speed (mm/s)	C Focal position (mm)	Measured	Predicted	% Error
1	1100	70	0	15.46	13.97	9.64
2	1100	80	1	20.35	17.29	15.04
3	1100	90	-1	14.26	17.15	20.27
4	1100	100	-2	12.00	11.98	0.17
5	1160	70	1	16.28	19.31	18.62
6	1160	80	0	18.11	21.28	17.49
7	1160	90	-2	13.54	12.96	4.31
8	1160	100	-1	21.14	16.94	19.84
9	1220	70	-1	22.77	20.34	10.68
10	1220	80	-2	13.46	13.86	2.97
11	1220	90	0	26.19	20.04	23.49
12	1220	100	1	14.08	18.47	31.20
13	1280	70	-2	16.82	14.69	12.68
14	1280	80	-1	10.87	16.31	50.06
15	1280	90	1	21.11	16.67	21.02
16	1280	100	0	9.83	10.25	4.28
Average						16.36

초점 위치를 나타낸다. Table 5는 THQI에 대한 실험값과 식 (3)부터 얻은 예측값을 보여준다. 12 및 14번 실험을 제외하는 대부분의 실험에서 실험 값과 예측 값의 오차는 25% 아래 수준을 유지하고 있다. 전체 실험에 대한 평균 오차는 16.36%인 것으로 확인되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하여 전기강판 코일 연결시 필요한 레이저 맞대기 용접 실험을 수행하였다. 용접 단면부 분석 결과, 대부분의 실험 조건에서 기공이나 균열 등의 구조적인 결함이

발견되지 않았으며, 이를 통해 전기강판에 대한 레이저 맞대기 용접성이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

TWQI의 SNR을 분석한 결과, 레이저 출력, 용접 속도 및 초점 위치가 유사한 수준으로 용접 품질에 영향을 주는 것으로 나타났으며, TWQI를 개선 시키는 최적 공정 조건으로는 1220W의 레이저 출력, 90mm/s의 용접 속도 및 1mm의 초점 위치가 확인되었다.

반응 표면 분석법을 통해 TWQI를 예측할 수 있는 회귀 모델식을 구하였으며, 회귀식은 평균 16.36% 오차 수준에서 실측값을 예측할 수 있는 것으로 확인되었다.

## 후 기

“이 논문은 2021년도 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원 (No. 20017251) 및 2021년도 교육부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 지원으로 수행되었습니다. (No. 2021RIS-004).”

## REFERENCES

- Oda, Y., Kohno, M. and Honda, A., "Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, No. 20, pp. 2430-2435, 2008.
- Mehdi, M., He, Y., Hilinski, E. J., Kar, N. C. and Edrisy, A., "Non-oriented electrical steel with core losses comparable to grain-oriented electrical steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 491, pp. 165597, 2019.
- Xi, C., Wang H., Wu, Y. and Wang, H., "Joining of the Laminated Electrical Steels in Motor Manufacturing: A Review," *Materials*, Vol. 13, No. 20, pp. 4583, 2020.
- Cui, R. and Li, S., "Pulsed laser welding of laminated electrical steels," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 285, pp. 116778, 2020.
- Shi, S. C., Wang, W. C. and Ko, D. K., "Influence of Inclusions on Mechanical Properties in Flash Butt Welding Joint of High-Strength Low-Alloy Steel," *Metals*, Vol. 12, No. 2, pp. 242, 2022.
- Vourna, P. and Ktena, A. "Metallurgical, Mechanical and Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets in TIG and PLASMA Welding," *Key Engineering Materials*, Vol. 543, pp. 479-482, 2013.
- Hasanniah, A. and Movahedi, M., "Gas tungsten arc lap welding of aluminum/steel hybrid structures," *Marine Structures*, Vol. 64, pp. 295-304, 2019.
- Hong, K.M. and Shin, Y. C., "Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 245, pp. 46-69, 2017.
- Park, J. S., Woo, I. S. and Lee, J. B., "Effect of Laser Welding Variables on the Formability of Si Added Steel Welds," *Journal of Korean Welding and Joining Society*, Vol. 24, pp. 15-21, 2006.
- Mostaan, H., Saeedpour, P., Ahmadi, H. and Nouri, A., "Laser welding of dual-phase steels with different silicon contents: Phase evolutions, microstructural observations, mechanical properties, and fracture behavior," *Material Science and Engineering: A*, Vol. 811, pp. 140974, 2021.
- Assunç~ao, E., Quintino, L. and Miranda, R., "Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, pp. 123-131, 2010.
- Oladimeji, O. O. and Taban, E., "Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys," *Welding in the World*, Vol. 60, pp. 415-457, 2016.
- Naik, A. B. and Reddy, A. C., "Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA)," *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 8, pp. 327-339, 2018.
- Song, H., Dan, J., Li, J., Du, J., Xiao, J. and Xu, J., "Experimental study on the cutting force during laser-assisted machining of fused silica based on the Taguchi method and response surface methodology," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 38, pp. 9-20, 2019.
- Dhanaraj, P. S. and Rathinasuriyan, C., "Optimization of fiber laser welding parameters for high strength aluminium alloy AA7075-T6," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 52, pp. 283-289, 2022.
- Jin, B. J., Park, M. H., Yun, T. J., Kim, I. S., Park, K. Y., Kim, Y. and Yang, H. J., "Optimization of Disk Laser Welding Parameters in Pure Ti Using Taguchi Method," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 36, pp. 34-40, 2018.