

원격 스캐너를 이용한 알루미늄 레이저 용접에 대한 생산 공정 최적화 설계

김 동 윤* · 박 영 환**†

*부경대학교 대학원 생산및자동화공학과

**부경대학교 기계공학과

The Design of Manufacturing Process Optimization for Aluminum Laser Welding using Remote Scanner

Dongyoon Kim* and Young Whan Park**†

*Dept. of Manufacturing and Automation Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : parkyw@pknu.ac.kr

(Received November 29, 2011 ; Revised December 12, 2011 ; Accepted December 16, 2011)

Abstract

In this study, we conducted laser welding by using remote scanner that is 5J32 aluminum alloy to observe the mechanical properties and optimize welding process parameters. As the control factors, laser incident angle, laser power and welding speed were set and as the result of weldability, tensile shear tests were performed. ANOVA (Analysis of Variation) was also carried out to identify the influence of process variables on tensile shear strength. Strength estimation models were suggested using regression analysis and 2nd order polynomial model had the best estimation performance. In addition optimal welding condition was determined in terms with weldability and productivity using objective function and fitness function. Final optimized welding condition was laser power was 4 kW, and welding speed was 4.6 m/min.

Key Words : Aluminum laser welding, Remote scanner, Strength estimation, Process parameters optimization

1. 서 론

최근 자동차 배기가스의 규제가 한층 심하게 강화되고 있으며, 자동차의 연비효율을 높이기 위한 연구의 중요성이 강조되고 있다. 그러므로 최근 자동차 관련 기술개발의 동향은 연비 향상, 공기 저항 감소를 위한 새로운 차체 디자인 및 재료의 경량화 등이 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진 효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 이를 통해 연비 향상을 도모할 수 있으므로, 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다. 그러므로 알루미늄 혹은 마그네슘 합

금과 같은 경량 재료를 차량에 적용하는 방법이 주로 사용된다. 알루미늄 합금의 경우 열전도도가 크고 녹는 점이 낮기 때문에 고 에너지 열원인 레이저 용접을 실시하며¹⁾, 접합성 개선 및 강도 향상을 위한 연구가 진행 중이다²⁻⁵⁾. 자동차 재료뿐만 아니라 공정부분에서도 많은 연구를 하고 있다. 자동차 차체 용접에서 사용되고 있는 기존의 저항 점용접을 기초로 한 자동차 설계 및 생산방식에서 저항 용접기의 기하학적 구조와 용접 특성으로 인해 적용 범위가 한정적이며, 용접 효율이 낮음에 따라 경제적, 기술적 한계에 도달 하였다. 따라서 자동차의 경량화, 안전도 향상, 생산성을 달성하기 위하여 원격 스캐너 레이저 용접 기술이 자동차 업계의

핵심 기술로 대두되고 있으며, 원격 스캐너 레이저 용접 시스템을 구축하기 위한 연구가 진행 중이다^{6,7)}.

레이저 용접에 영향을 미치는 요인은 다양하다. 이러한 다양한 인자들은 서로 복잡하게 연관되어 있으므로 최적의 용접 조건을 얻는 것은 어려운 일이다. 그러나 생산 현장에 적용하기 위하여 생산성과 용접성을 모두 고려하여 용접 조건을 최적화 하여야 한다. 최적화하기 위해 우선 레이저 가공 변수들 간의 상관관계와 예측모델링이 필요하며, 예측모델링을 통하여 용접조건을 최적화 하는 과정이 필요하다. 최적화 과정에 대한 많은 연구가 진행 중이다^{8,9)}.

본 연구에서는 알루미늄 5J32 합금의 원격 스캐너를 이용한 겹치기 용접을 실시하였고, 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장강도를 살펴보았다. 그리고 전단 인장강도에 대한 예측 모델인 회귀모델을 제안하였다. 또한 공정라인에 적용하기 위해 용접성과 생산성을 고려한 적합도 함수를 이용하여 최적화를 실시하였다.

2. 실험

실험에 사용된 레이저와 용접 헤드는 모두 Trumpf사의 최대 출력 4 kW인 디스크 레이저(disk laser)와 스캐너(scanner) 방식의 원격 용접 헤드를 사용하였다. 판재로는 알루미늄 합금인 5J32, 두께 1.6 mm를 이용하였다. 5J32의 합금은 Al-Mg계 합금으로 고용강화와 가공경화에 의해 강도가 향상된 재료이다¹⁰⁾. 화학적 조성은 Table 1와 같다. 용접 시편은 Fig. 1와 같으며, 판재의 크기는 100 mm × 125 mm 로 겹침의 길이가 40 mm이며 용접 길이는 80 mm로 용접을 실시하였다. 겹침 길이는 40 mm 로 한 이유는 본 용접의 대체 공정인 저항 점 용접의 전단 인장시험을 수행하기 위해 KS 규격에 정한 대로 따르기 위해서 이다.

Table 1 Chemical composition of AA5J32 (wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
0.03	0.08	0.33	0.01	5.60	0.01	Re

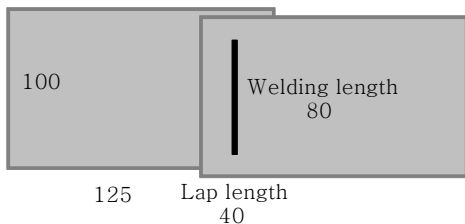


Fig. 1 Geometry of the specimen

Table 2 Laser weld experiment condition

Levels	0	1	2
Angle (°)	0	8	16
Laser power (kW)	3	3.4	4
Welding speed (m/min)	3	4	5

실험은 실험계획법(design of experiment)에 의하여 진행되었다. 일반적으로 실험계획법에 의해 사용되는 방법은 삼원 배치법(3^k factorial value)을 이용하여 전수 실험을 수행하였다¹¹⁾. 용접 공정 변수는 조사각(laser incident angle), 레이저 출력(laser power), 용접속도(welding speed)를 사용하여 용접특성을 확인 하였다. 용접 조건은 Table 2 와 같다. 또한 반복회수는 3회로 총 27개 조건에 81회 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 전단 인장강도

알루미늄 5J32에 대한 원격 스캐너 레이저 용접의 공정변수에 대한 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장시험을 실시하였다. 원격 스캐너 레이저 용접은 현재 생산 라인에서 사용되는 저항 점용접을 대체하는 공정이며, 알루미늄 합금은 탄소강을 대체하는 재료이므로 시험 시편은 기존의 인장시험 방법인 KS B 0851 (저항 점 용접 및 프로젝션 용접 이음의 전단 시험에 대한 시험편 치수 및 시험 방법) 으로 시험 시편을 제작 하였고, 용접부의 강도 적정성을 판단하기 위하여 ISO 규격 KS B ISO14373(저항 용접 - 비도금 및 도금 탄소강의 점용접 절차)을 이용하여 허용 인장강도를 7,400 N으로 선정하였다. Fig. 2는 인장 전단시험의 결과를 나타낸 것이다. 레이저 출력이 커지고, 용접속도가 감소할수록 전단 인장 강도는 증가하였다. 그 이유는 모재에 대한 입열량이 충분하게 되고 비드의 깊이 및 폭이 커지기 때문이다. Fig. 3은 인장 전단 시험 시 파단형태이다. 전단 인장강도가 9,000 N 이상일 경우 Fig. 3(a)와 같은 형태로 용접부 혹은 HAZ (heat affected zone)에서 파단이 발생하였고, 9,000 N 미만일 경우에는 Fig. 3(b) 와 같이 계면 파단이 발생하였다.

3.2 공정변수의 분산분석

각 공정변수가 용접 특성에 얼마나 큰 영향을 주는지

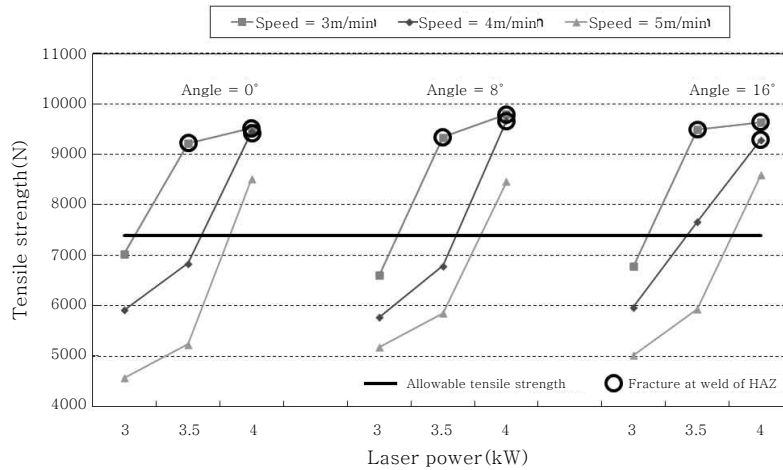


Fig. 2 Result of tensile test

Table 3 ANOVA for tensile shear strength about welding parameters

Factor	Sum of square ($\times 10^3$)	Degree of freedom	Mean square ($\times 10^3$)	F0	F(0.05)
Angle	965.41	2	482.71	2.08	3.13
LP	148690.87	2	74345.44	320.72	3.13
WS	65233.15	2	32616.57	140.70	3.13
Angle \times LP	996.11	4	249.09	1.07	2.51
Angle \times WS	422.11	4	105.53	0.4	2.51
LP \times WS	18646.57	4	4661.64	20.11	2.51
Angle \times LP \times WS	1758.98	8	219.87	0.95	2.07
Error	12517.37	54	231.80		
Total	24923.06	80			

를 정량적으로 파악하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석이란 실험 결과의 제곱합(sum of square)을 인자(factor), 오차(error)와 교호작용을 포함한 요인(source) 별로 분해하고, 오차에 대한 각 용인간의 비(ratio)를 통하여 결과에 대한 영향력을 규명하는 분석법이다¹¹⁾. 'Angle'은 조사각도, 'LP'는 레이저 출력, 'WS'는 용접속도를 나타낸 것이다. 그리고 '×'는 교호작용(interaction)을 의미한다. F₀는 평균 제곱의 비로서 에러의 평균 제곱에 대한 인자의 평균 제곱의 비로서 나타내고, 이 값이 클수록 영향력이 크다는 것을 의미한다. 그리고 F(0.05)은 F-검정(F-test)의 유의 수준(level of significance)을 나타내는 것으로 95%의 유의 수준을 의미한다. 그러므로 F₀가 F(0.05)보다 큰 경우, 요인이 결과에 영향을 주는 인자라는 것을 통계적으로 검증하게 된다¹¹⁾.

Table 3은 전단 인장강도의 영향을 주는 공정변수에 대한 분산분석을 하였다. 그 결과 레이저 출력이 전단

인장강도에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그리고 용접속도의 F₀값이 F(0.05)보다 크기 때문에 전단 인장강도에 유의한 인자라고 할 수 있다. 또한 레이저 출력과 용접속도에 대하여 교호작용도 발생하는데 그 이유는 레이저 출력이 증가하고 용접속도가 감소할수록 강도가 커지기 때문이다. 이외의 요소들은 강도에 영향을 미치지 않는 것을 분산분석표에서 알 수 있다.



(a) Fracture at weld of HAZ



(b) Fracture at interface

Fig. 3 Fracture types after tensile test

4. 전단 인장강도 예측 모델

4.1 표준화(normalizing)

실제의 데이터로부터 각각의 값을 계산하므로, 이를 이용하여 모델을 세우는 경우 각 값들에 대한 중요도가 변화된다. 그러므로 각 입력인자의 가중치를 일정하게 하기 위하여 각 특정 인자를 0~1 사이의 값으로 표준화를 하여야 한다. 표준화를 위한 식은 식(1)와 같다.

$$x_n = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

식(1)에서 x_n 은 표준화된 인자이고 x 는 공정변수의 인자인 조사각, 레이저 출력, 용접속도이다. x_{\max} 는 각 요인의 최대 수준 값이고, x_{\min} 는 각 요인의 최소 수준 값이다.

4.2 회귀모델

용접 공정변수에 따른 전단 인장강도를 예측할 수 있는 3가지 회귀 모델을 구성하였다. 첫 번째 Model I 은 회귀선이 선형이고 표준화된 입력인자들 간의 다중 선형 회귀 모델 (multiple linear regression model) 식으로 정의 하였다. 다중 선형 회귀 모델로 제안된 모델 식은 식(2) 과 같다. 두 번째 Model II 은 회귀선이 선형이고 입력인자들 간의 항이 2차인 2차 다항 회귀 모델(second order polynomial regression model) 이며, 식(3)로 정의 하였다. 그리고 Model III은 회귀선에 대해서 비선형이며 입력인자들 간의 비선형 회귀 모델 (multiple nonlinear regression model) 이며 식(4) 과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_1x_2 \\ & + \beta_5x_1x_3 + \beta_6x_2x_3 + \beta_7x_1^2 + \beta_8x_2^2 + \beta_9x_3^2 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1\ln x_1 + \beta_2\ln x_2 + \beta_3\ln x_3 \tag{4}$$

식(2),(3),(4)에서 x_1, x_2, x_3 는 입력인자로서 조사각, 레이저 출력, 용접속도다. \hat{y} 는 출력인자로서 각각의 모델에 의해 예측된 전단 인장강도이다. 그리고 β_0 는 y 의 절편이고, $\beta_1 \sim \beta_9$ 는 입력 인자의 계수 값이다.

Table 4, 5 그리고 6에서 각각의 회귀모델 계수값을

Table 4 Coefficients for Model I

β_0	β_1	β_2	β_3
145.53	16.57	3313.92	-1099.07

Table 5 Coefficients for Model II

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
7113.43	121.49	1126.13	-1352.05	5.72
β_5	β_6	β_7	β_8	β_9
65.65	214.93	-30.15	155.09	-13.80

Table 6 Coefficients for Model III

β_0	β_1	β_2	β_3
6756.90	240.63	2924.96	-1953.98

표현하였다. 각 입력 인자가 전단 인장강도에 미치는 영향력으로는 레이저 출력과 용접속도가 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 그리고 조사각, 레이저 출력은 양의 효과, 용접속도는 음의 효과를 나타내었다.

4.3 각 모델의 예측성능 비교

제안된 3가지의 회귀 모델에 대한 결정계수(Coefficients of determination) 및 평균 오차율(Average error rate)을 이용하여 예측모델의 성능을 정량적으로 평가하여 보았다. 결정계수와 평균 오차율의 식은 (5)과 (6)와 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \tag{5}$$

$$AER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \tag{6}$$

여기서 R^2 은 결정계수 이고, i 는 데이터의 번호이다. n 는 데이터의 총 수이다. y 는 실제 측정된 전단 인장 강도 값이고, \bar{y} 는 y 의 평균값이다. 그리고 \hat{y} 는 예측 모델에 의해 계산된 값이고, $\bar{\hat{y}}$ 는 \hat{y} 의 평균값이다. 그리고 결정계수의 값은 1 에 가까울수록 예측성능이 우수하며, 평균 오차율은 0 에 가까울수록 그러하다.

Table 7에서 각각의 모델의 예측성능을 비교해본 결과 제안된 3가지 모델은 예측성능이 우수한 것을 알 수

Table 7 Coefficients of determination and average error rate for each model

	Model I	Model II	Model III
Coefficients of determination	0.91	0.92	0.88
Average error rate(%)	5.9	5.8	7.2

있었다. 그 중 Model II인 2차 다항 회귀 모델(Second order polynomial regression model)의 결정 계수는 0.92, 평균 오차율은 5.8 %로 예측능이 가장 우수하였다.

5. 공정변수 최적화

알루미늄의 모재가 자동차 차체에 적용되기 위해서는 용접성, 성형성, 그리고 도장성이 요구된다. 용접성은 용접 후 기계적 강도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 그리고 산업현장에서 실제 차체에 적용되면 가장 중요한 부분은 생산성이다. 그러므로 새로운 모재가 생산라인에 적용되기 위해서 용접성 및 생산성을 고려해야 된다. 하지만 용접성을 만족하기 위하여 레이저 출력을 높이는 것은 한계가 있어 용접속도를 줄여야 한다. 하지만 용접속도를 감소하면 생산성의 문제를 야기하므로 최적화가 필요하다.

최적화를 하기 위하여 용접성을 나타내는 전단 인장강도와 생산성을 의미하는 용접속도의 목적함수(objective function)를 이용하여 적합도 함수(fitness function)를 정의 하였다. 두 개의 목적함수의 차수가 다르기 때문에 앞 절에서 살펴 본 표준화를 실시하였다. 그리고 전단 인장강도의 경우 회귀 모델 중 예측 능력이 가장 우수한 2차 다항 회귀모델(second order polynomial regression model)을 이용하였다. 식(7), (8)의 경우는 강도와 용접속도를 나타낸 목적함수이다. 그리고 식(9)에서 가중치를 곱하여 적합도 함수를 정의하였다. 식(7)는 전단 인장강도의 목적 함수이며 허용 인장강도인 7,400 N 이상일 경우 중요치 1.4 를 더 곱하여 표현하였다.

식(9)에서 w_{TS} , w_{WS} 는 각 목적 함수에 대한 가중치의 값을 나타내었다. 본 연구에서는 전단 인장강도에 70의 가중치를, 생산성을 나타내는 용접속도의 경우 30의 가중치를 두었다. 그 이유는 생산 공정라인에서 생산성이 뛰어나도 용접성을 만족하지 못하면 제품으로써 가치가 떨어지기 때문에 용접성의 경우 생산성보다 20의 가중치를 더 두었다.

$$obj_{TS} = \begin{cases} 1.4 \times \frac{x_{TS} - 4000}{7400 - 4000} & (x_{TS} \geq 7400) \\ 1.0 \times \frac{x_{TS} - 1000}{7400 - 1000} & (4000 \leq x_{TS} < 7400) \\ 0 & (x_{TS} < 4000) \end{cases} \quad (7)$$

$$obj_{WS} = \begin{cases} \frac{x_{WS} - 3}{5 - 3} & (3 \leq x_{WS} \leq 5) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

$$fitness = (w_{TS} \ w_{WS}) \cdot \begin{pmatrix} obj_{TS} \\ obj_{WS} \end{pmatrix} \quad (9)$$

전단 인장강도와 용접속도의 목적함수를 이용한 적합도 함수를 Fig. 3, 4 와 같이 나타내었다. Fig. 3에서 허용 인장강도를 만족할 경우 중요치를 곱하였기 때문에 비선형적으로 증가하였다.

적합도 함수를 살펴본 결과 용접성만 고려할 경우 4 kW, 3 m/min에서 전단 인장강도가 가장 높았지만 생산성까지 같이 고려한 경우 4 kW, 4.6 m/min에서 적합도의 값이 가장 높은 것으로 보아 용접성과 생산성 두 가지를 모두 고려 할 경우의 최적점이다. 그때의 적합도 함수로는 140.1이었고, 2차 다항 회귀 모델로 얻어진 예측된 전단 인장강도의 값은 8,457 N이었다.

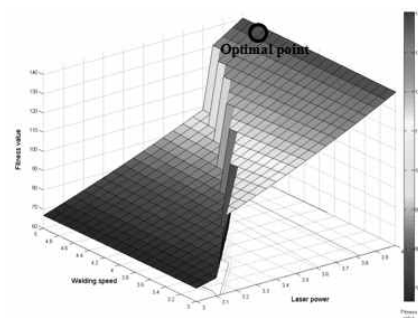


Fig. 3 Surface of fitness value

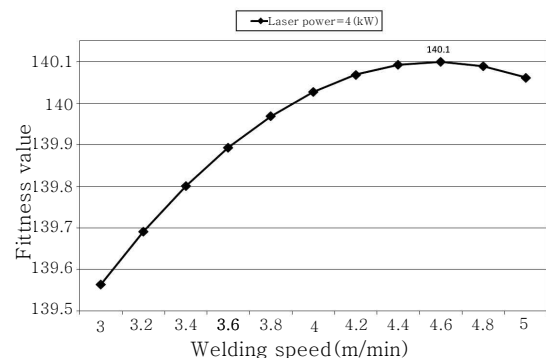


Fig. 4 Fitness value(4 kW)

6. 결 론

차량 경량화에 사용되는 알루미늄 합금인 5J32의 원격 스캐너를 이용한 레이저 용접을 수행하였다.

1) 용접성의 기계적 특성을 알아보기 위하여 전단 인장강도를 측정해본 결과 레이저 출력이 높고 용접속도가 낮으면 입열량이 많아져 전단 인장강도가 증가하였다. 그리고 9,000 N이상일 경우 용접부 파단이 발생하였다.

2) 전단 인장강도에 영향을 미치는 요인을 정량적으로 평가하기 위하여 분산분석을 실시하였으며, 3가지의 요인 중 레이저 출력과 용접속도가 전단 인장강도에 영향을 미치는 요인으로 판단하였고 교호 작용이 발생하였다.

3) 회귀 모델을 이용하여 전단 인장강도를 예측할 수 있는 3가지 모델링을 제시하였고, 그 중 2차 다항 회귀 모델의 결정계수가 0.92, 평균 오차율은 5.8 %로 가장 우수한 것을 판단하였다.

4) 생산성과 용접성을 고려하여 적합도 함수를 이용하여 최적점을 살펴 본 결과 레이저 출력이 4 kW, 용접속도는 4.6 m/min 의 경우 적합도의 값이 140.1으로 가장 높았으며 그 때 예측된 전단 인장강도는 8,457 N 이었다.

후 기

본 연구는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임. (No.2010-003259)

참 고 문 헌

1. G. Matchers : The Welding of Aluminum and Its Alloys, Woodhead Publishing Ltd, 2002

2. S. Katayama : Applications of Laser in Welding, International Symposium on Combustion Engine and Marine Engineering, 43-9 (2003), 17-23

3. K. D .Choi, Y. N. Ahn, C. H. Kim : Crack Susceptibility Reduction and Weld Strength Improvement for Al Alloy 5J32-T4 by using Laser Weaving Method, Journal of KWJS, 27-4 (2009), 370-375 (in Korean)

4. J. Rapp, C. Glumann, F. Dausinger, H. Hugel : Laser Welding of Aluminum Lightweight Materials: Problems, Solutions, Readiness for Application, Journal of Optical and Quantum Electronics, 27-12 (1995), 1203-1211

5. H. C. Yoo, H. T. Kim : Recent Technological Tendency of Joining for Light Aluminium Alloy, Journal of KWJS 29-3 (2011), 4-13 (in Korean)

6. J. Suh, M. Y. Lee, B. H. Jung, M. J. Song, H. S. Kang, J. O. Kim : Remote Welding Components using CO₂ Laser and Scanner, Journal of KWJS, 26-5 (2008), 506-509 (in Korean)

7. A. Klozbatch, L. Morgenthal, E. Beyer : Laser Welding on the Fly with Coupled Axes Systems, Conference on International Congress on Applications of laser & Electro-Optics, 15-18 (2001), 64-70

8. P. K. Palani, N. Murugan : Optimization of Weld Bead Geometry for Stainless Steel Cladding Deposited by FCAW, Journal of Materials Processing Technology, 190-3 (2007), 291-299

9. Y. W. Park, S. H. Rhee : Estimation of Weld Bead Size in CO₂ Laser Welding by using Multiple Regression and Neural Network, Journal of Laser Applications, 11-3 (1999), 140-150

10. H. I .Lee, Y. S. Han, D. H. Kim, W. T. Kim : The Understanding and Utilization of Aluminum Application Technologies, The Korea Metal Journal, 2005

11. C. Douglas : Design and Analysis of Experiments 7th edition, WILEY, 2009