다구찌방법을 이용한 순수 Ti에서 디스크레이저 용접변수 최적화

진병주* · 박민호** · 윤태종** · 김일수**,[†] · 박기영* · 김 용* · 양해진*

*고등기술연구원 로봇/생산기술센터

**목포대학교 공과대학 기계공학과

Optimization of Disk Laser Welding Parameters in Pure Ti Using Taguchi Method

Byeong-Ju Jin*, Min-Ho Park**, Tae-Jong Yun**, Ill-Soo Kim**,[†], Ki-Young Park*,
Young Kim*, and Hae-Jin Yang*

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Eng., Yongin, 17180, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo Univ., Mokpo, 58554, Korea

[†]Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received August 23, 2017 ; Revised October 17, 2017 ; Accepted November 1, 2017)

Abstract

The stability of industry market is also diversifying and being demanded with the concept of selecting lightweight and high strength materials. The titanium materials have been come into the spotlight as materials that meet these needs. Primarily, it affects the improvement in performance of industrial energy products such as plate heat exchangers. Therefore, It is necessary to use disk laser welding, which has the best beam characteristic among industrial lasers to contribute in the production. However, the researches of titanium materials have only been limited to achieve optimal results in implementing to the industry. In this study, an experimental method was established by using the orthogonal array table in the Taguchi method, and the SNR is output to the tensile strength. The experimental results has been employed for the influence of laser welding parameters on the weld shape, quality and mechanical properties of 0.6 mm thick lap joints of titanium alloy Ti (ASTM-B265 Grade 1) welded with a new generation disk laser TRUMPF TRUDISK 3302, emitting at 1030 nm, with maximum output power 3.3 kW at circular laser beam spot. As a result, the optimal welding parameters for the lap welding of pure titanium material were predicted as the welding speed of 2m/min, the laser power of 1.5 kW, the top shielding gas flow rate of 30 ℓ/min and the bottom shielding gas flow rate of 10 ℓ/min.

Key Words : Disk laser welding, Taguchi method, Ti weldments, Taguchi analysis, Lap joint

1. 서 론

고체 레이저 중 하나인 Ytterbium doped Yttrium Aluminum Garnet (Yb:YAG)의 매질은 주로 고출력 레이저에 사용되고 있고 흡수 밴드폭이 930nm에서 945nm로 InGaAs계의 레이저 다이오드에 의한 발진이 용이하다. 1030nm 파장대의 레이저 활성 이온 중 Yb:YAG 매질은 양자효율이 91%로 상위 레이저 준위 에너지의 10% 정도 밖에 열로 전환되지 않아 열적 손

실이 적으며, 가장 적게 열을 발생하는 특징을 가지고 있다¹⁾. 디스크 레이저 용접은 이러한 특성을 가진 Yb:YAG 매질을 사용함으로써 고출력 레이저의 소형화가 이루어지고 있어²⁾ 디스크 레이저 용접은 아크용접보다 상대적으로 입열량이 적어 좁은 영역을 정밀하게 용접할 수 있으며, 변형이 거의 발생하지 않는다. 또한 빠른 용접속도로 인해 생산성을 증가시킬 수 있어 실시간 제어 및 자동화가 용이하므로 디스크 레이저 용접은 Ti 박판을 용접하기에 적합한 용접기술이라고 할 수 있다³⁻⁶⁾.

다구찌 방법의 시초인 Taguchi는 생산제조와 최적화 기법에서 일반적으로 널리 사용되어지는 다구찌 실험계획법을 통해 강건한 설계를 할 수 있는 방안에 대해 제안되었다⁷⁻¹¹⁾.

본 논문에서는 순수 Ti를 사용한 겹치기 이음부 형태를 갖는 시험편을 제작하여 용접공정 변수 변화에 따른 디스크 레이저 용접 실험을 수행하였다. 레이저 용접에서 용접품질에 가장 많은 영향을 미치는 용접조건인 이송속도, 레이저의 출력, 상·하 보호가스 유량을 제어 변수로 선정하고 출력변수는 용접 시험편의 기계적 성질을 선정하였다. 이러한 용접 조건을 바탕으로 다구찌 방법에서 제안된 실험계획법인 직교배열법으로 수립하여 9개의 조건으로 계획하였으며, 잡음인자에 대해 판단하기 위해 4회 반복실험을 수행하여 총 36회의 실험을 수행하였다. 수행된 용접실험 결과를 이용하여 인장강도와 경도시험을 실시 및 분석하고, 순수 Ti 박판이 주로 사용되는 판형열교환기¹²⁾의 환경에 맞춰 용접부 인장강도를 목적함수로 하여 다구찌 분석을 통한 Ti 소재에서 디스크 레이저 용접의 최적화된 용접변수를 예측하였다.

2. 실험 계획

2.1 다구찌 실험계획

디스크레이저 용접공정에 사용된 실험에서 용접품질에 관련된 용접공정 변수가 많으므로 일반적으로 주로 사용되는 완전요인배치법으로는 모든 실험을 할 수가 없기 때문에 적은 수의 실험으로도 많은 효과를 찾으려는 목적으로 수행되어지는 다구찌 실험계획법의 직교배열표를 이용하여 실험계획을 수립하였다. 직교배열표는 각 열이 직교가 되게 미리 만들어 놓은 표이므로 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 동일한 횟수로 나타나도록 구성되어있다. 그러므로 인자의 수가 많은 경우에 주 효과와 기술적으로 의미 있는 2인자 교호작용을 검출하고, 기술적으로 의미 없는 2인자 교호작용 및 고차의 교호작용에 관한 정보를 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 특성을 지녔다⁸⁾.

실험계획은 내측배열과 외측배열로 구분하였고 내측배열에는 제어할 수 있는 제어인자를 배치하였다. 제어인자로는 레이저의 출력, 이송속도, 상부 보호가스 유량, 하부 보호가스 유량으로 총 4개의 공정변수를 선정하였으며, 각 변수는 예비실험을 통해 대략적인 데이터 값을 구성하고 3수준에 대한 실험계획을 수립하였다. 외측배열에는 4번의 반복실험을 수행하여 제어할 수 없는 공정변수에 대한 용접 품질의 영향을 최소화하였으

Fig. 1 The detailed configuration of the device for laser welding

Table 1 Welding parameters and their levels for the experiments

Welding parameter				Unit	Level		
					-1	0	1
Control factor	A	Welding speed		m/min	2	3	4
	B	Laser power		kW	1.1	1.3	1.5
	C	Shielding gas flow rate	Top	ℓ/min	10	20	30
	D		Bottom	ℓ/min	10	20	30
Noise factor	• Repeated experiment : 4 times						
Fixed variable	• Shielding gas : Ar 99% • Wave length : 1,030 nm • Shielding gas Nozzle angle : 60°						

Table 2 Design of experiment conditions for experiment using taguchi method

		Control factor(Inner arrays)				Outer arrays			
Factor arrangement		A	B	C	D				
Parameter		Welding speed	Laser power	Shielding gas					
				Top	Bottom				
Level	-1	2	1.1	10	10	Specimen			
	0	3	1.3	20	20	P1	P2	P3	P4
	1	4	1.5	30	30				
Case No.		Variable				Measured data in experimental			
1		2	1.1	10	10				
2		2	1.3	20	20				
3		2	1.5	30	30				
4		3	1.1	20	30				
5		3	1.3	30	10				
6		3	1.5	10	20				
7		4	1.1	30	20				
8		4	1.3	10	30				
9		4	1.5	20	10				

며, 구성된 실험 장치는 Fig. 1에 실험 조건에 대한 수준과 변수들을 Tables 1~2에 나타내었다.

3. 용접 실험 방법

3.1 실험 장치 구성

순수 Ti(ASM-B265 Grade 1) 소재의 용접공정을 최적화하기 위하여 디스크 레이저 용접실험을 수행하였다. 실험에 사용되는 장비는 TRUMPF社 TruDisk 3302모델의 3.3 kW급 디스크레이저 용접기, Yaskawa 회사의 6축 로봇, 시편의 산화와 열변형을 방지하기 위한 퍼징 및 지그 장치, 원격 조정 장치로 구성되었다. Fig. 2는 본 연구를 위하여 디스크 레이저 용접 장치의 전체시스템을 나타낸다. 레이저 용접장치의 주요사양은 Table 3에 정리하였다.

3.2 실험 재료 및 방법

용접실험에 사용된 모재는 판형열교환기에 주로 사용되는 순수 Ti 재료의 평판을 사용하였으며, 두 종류의 모재 모두 150×100×0.6mm 규격의 겹치기 용접 시험편을 제작 하였다.

본 연구는 기존의 사용되는 판형열교환기의 가스켓 방식의 고질적인 문제인 세척과 고압에서 사용이 어렵다는 단점을 해결하기 위하여, 내부에 고압이 발생되어도 판형열교환기의 용접접합면이 파손되지 않는 품질을 확보하기 위하여 레이저 용접공정 최적화 구현을 위하여 겹치기 용접 실험을 수행하였다.

시험편의 용접하고자 하는 평면에 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결합의 원인이 되지 않도록 Ethyl Alcohol 과 Sand Paper를 이용하여 시험편을 용접시험을 수행

Fig. 2 Experimental setup for disk laser welding

Table 3 Specification of disk laser

Equipment	Specifications
Laser type	CW Ytterbium disk laser
Model	Trudisk 3302
Wavelength	1,030 nm
Maximum laser power	3.3 kW

Fig. 3 A schematic diagram for disk laser welding process

Fig. 4 Specification of lap welding specimen

하기 전에 닦아내었다. Figs. 3~4는 디스크 레이저 용접 공정 개략도 및 겹치기 용접 시험편의 규격을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 표면비드 분석 결과

순수 Ti(ASM-B25 Grade 1)은 레이저 용접 공정 중 대기와 충분한 차폐가 이루어지고 있지 않으면 비드 표면의 산화 및 질화가 이루어지므로 기계적 물성치의 검출 실험하기 전, 육안검사를 통해 용접품질을 우선적으로 판단해야한다. 일반적으로 Ti 용접은 대기 중 300℃ 이상에서 쉽게 산화 및 질화가 이루어지고 산화정도에 따라서 비드 표면의 색이 변화한다. 은색, 옅은 금색은 오염되지 않은 건전한 용접부로 판단하고 주홍색, 청색, 옅은 청색까지는 용접부의 연성이 조금 떨어지지만 전체적인 품질의 이상이 없다고 판단한다. 그리고 청백색, 암회색, 백색, 황백색은 용접부에서 산화 및 질화의 진행이 상당부분 이루어져 취약한 용접부로 판단된다¹³⁾.

실험결과를 분석한 결과, 수립된 실험계획 조건에서 순수 Ti의 레이저 용접은 사전 용접실험을 통해 용접변수들의 범위를 적정수준으로 계획되어 있어 대부분 조

건에서 시편의 뒷면까지 완전한 용입이 이루어졌으나, 낮은 출력과 빠른 이송속도에서는 후면 시험편까지 충분한 용입이 이루어지지 않은 것은 실험결과(Case 4, Case 7)를 통해서 확인할 수 있었다. 디스크 레이저 용접공정에서 용입이 이루어지지 않아 접합 결함은 Case 4에서 2회 Case 7에서 4회 발생된 것은 실험결과를 통해서 확인할 수 있다. 또한, 상부 실드가스의 유량이 낮은(Case 1, Case 6, Case 8)에서는 용접공정시 비드면에 산화 및 질화가 많이 이루어져 다른 용접비드에 비해 산화와 질화가 많이 이루어진 결과확인 할 수 있었다. 또한, 용접 단면을 분석하여 확인한 결과 용입 부족으로 인한 결함 외에 용접결함은 확인 할 수 없었고 그 결과를 Table 4 표면비드 분석에서 확인 할 수 있었다.

Table 4 Results of disk laser welding for weld zone

Case No.	Specimen	
	Bead surface	Penetration aspect of bead
1	Top	
	Back	
2	Top	
	Back	
3	Top	
	Back	
4	Top	
	Back	
5	Top	
	Back	
6	Top	
	Back	
7	Top	
	Back	
8	Top	
	Back	
9	Top	
	Back	

4.2 인장시험 결과

접치기 디스크 레이저 용접공정에서 다구찌 실험계획으로 수립한 케이스별로 Ti 소재 시험편에 대하여 인장강도 특성을 비교·분석하기 위하여 인장시험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 인장강도 시험은 레이저용접을 이용하여 용접한 Ti 시험편의 적용처인 판형열교환기에서 전열판 내부의 유체의 이동에 의해 전단면에 하중을 가한다고 판단하여 인장시험을 선정하였으며, 모재의 인장강도를 용접품질의 평가기준으로 제시하였다. 또한 인장시험의 적정성을 판단하기 위해 동일한 조건에서 용접된 시험편을 12회에 걸쳐 인장시험을 수행하여 평균값을 구하였다. 접치기 용접이음 인장시험편의 형상은 3mm이하의 박판에 사용되는 기준인 KS 13 B호를 기준으로 시험하였다.

인장강도 값은 실험계획표에서 레이저 출력이 높은 값에서 인장강도 값이 높은 것을 확인하였고(Case 2, Case 3, Case 5, Case 9) 레이저 출력이 보통이거나 레이저 출력과 이송속도가 낮은 경우(Case 1, Case 6, Case 8) 모재의 인장강도인 240MPa보다 낮은 인장강도 값으로 측정되었다. 또한, 레이저 출력이 낮고, 이송속도가 높은 경우(Case 4, Case 7) 용입이 후면비드까지 도달하지 못하거나 간헐적으로 용입이 되어 접합이 이루어지지 않은 것을 반복실험을 통해 확인하였다. 인장시험 결과는 반복실험을 통해 측정한 값의 평균값을 케이스별로 Fig. 5 그래프에 나타내었다.

4.3 경도시험 결과

디스크 레이저 용접으로 인한 강도저하 또는 상승의 원인을 비교·분석하기 위하여 용접공정 변수의 변화에 따라 용접을 수행한 시험편의 일부를 절단(2mm×2mm)하여 경도시험을 실시하였다. Wire Cutting으로 전단된

Fig. 5 Variation of tensile strength for welding conditions

Fig. 6 Measured location of hardness

시편은 모재부, 용융부, 열영향부를 포함하고 있으므로 이를 확인하기 위해 비커스경도계(SHIMADZU社)를 사용하여 각 관측지점의 경도를 측정하였다.

이 때 사용된 하중은 0.1N이었으며, 제어변수에 따른 용접부의 경도 특성을 비교하기 위해 시험편 중앙으로부터 0.15mm간격으로 측정하였으며, 0.15mm의 간격은 비커스 경도계의 측정 과정에서 모재의 이동으로 인해 얻을 수 있는 부정확한 경도데이터 획득을 최소화하기 위해 최적의 간격을 적용하였다. 또한, 경도 측정결과와 정확성과 용접부, 열영향부, 모재의 범위를 확인하기 위해 중앙부를 포함하여 양쪽으로 5곳씩 총 11지점의 경도를 측정하여 평균치를 비교하였으며 Fig. 6는 시험편의 경도측정 위치를 나타낸다.

디스크 레이저를 이용해 다구찌 실험계획법에서 9가지의 조건으로 4회 반복 실험한 경도 평균값에 대한 용

접부의 경도 실험 결과는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 Ti 에서 용접부에서 경도 값이 가장 크고 열영향부, 모재 순서로 경도 값이 낮아지는 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 상부의 보호가스 유량이 충분한 경우 용접부의 경도값은 160Hv~180Hv사이 값으로 검출되었다. 그러나 Case 1, Case 6, Case 8과 같이 상부의 실드가스 유량이 적을 경우(10 l/min), 대기와의 차폐가 충분히 이루어지지 못하여 용접공정중에 비드에서 다른 조건에 비해 산화 및 질화가 더 진행되어 용접부에 경화가 발생된 것을 그래프를 통해 확인 할 수 있었다. 특히, Case 6의 경우 적정속도에서 출력은 높으나 보호가스의 유량이 충분하지 않아 열영향부의 면적이 넓어져 다른 실험조건에 비해 넓은 부분까지 높은 경도값이 측정되었다. 또한, Case 7은 용접속도는 빠르고 레이저출력이 낮아 용접비드의 폭이 좁고 용접부에 레이저 열원의 영향이 미비하여 모재와 유사한 경도 값이 도출되었다.

4.4 다구찌 분석

다구찌 실험계획을 통해 용접실험을 수행하여 획득한

Fig. 7 Hardness distribution in different case

Table 5 Results of tensile strength and SNR

Case No.	Tensile strength(MPa)				SNR (dB)
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	
1	227.13	223.97	210.80	222.23	47.14
2	274.73	266.30	265.07	253.83	48.45
3	247.26	270.57	264.50	275.13	48.19
4	201.3	40.3	defect	216.47	37.81
5	273.23	272.97	253.97	268.50	48.52
6	231.43	215.57	215.00	247.57	47.14
7	Welding defect				-
8	198.33	219.67	221.43	180.33	46.26
9	271.50	247.50	268.17	271.80	48.44

Table 6 Response for signal to noise ratio

Level	Welding speed	Laser power	Shielding gas flow rate	
			Top	Bottom
1	47.93	42.48	46.84	48.03
2	44.49	47.75	44.90	47.80
3	47.35	47.92	48.36	44.09
Delta	3.44	5.45	3.46	3.94
Rank	4	1	3	2

각 조건에서 획득된 인장강도 결과 데이터를 다구찌 분석을 위해 다구찌 분석과 같이 망대특성으로 하여 예비 실험에서 측정된 인장강도 값을 SNR(Signal to noise ratio)로 구하여 Table 5에 나타내었다.

SNR분석을 통해 다구찌 실험계획에서 수립한 수준 간 차이를 Delta값을 구하여 정의하였고 인장강도에 영향을 끼치는 인자는 분석하였다. 그 결과 레이저의 출력, 하부 보호가스 유량, 상부 보호가스 유량, 이송 속도순으로 인장강도에 영향을 미치는 것으로 판단하였으며 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 다구찌 방법에서 SNR을 분석하여 최적의 제어변수를 예측할 수 있는데 Fig. 8은 SNR을 각 용접조건에 적용하여 계산된 최적값을 나타낸다. SNR분석을 통한 결과 이송속도 2 m/min, 레이저 출력 1.5 kW, 상부 보호가스 유량 30 ℓ/min, 하부 유량 10 ℓ/min일 때 최적의 인장강도 결과값이 나오는 것으로 예측되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 순수 Ti에서 레이저 용접으로 용접공

Fig. 8 Results of main effect plot of SNR by tensile strength

정 수행 후 획득한 데이터를 기반으로 최적의 인장강도 값을 갖는 용접변수 예측 연구를 수행하였다. 디스크레이저 용접공정의 제어변수를 입력변수로 설정하고 기계적 성질 중 인장강도 값을 출력변수로 설정하여 다구찌 방법을 이용한 인장강도에 대한 최적 용접변수 예측을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 인장강도 값은 실험계획표에서 레이저 출력이 높은 값에서 인장강도 값이 높은 것을 확인하였고(Case 2, Case 3, Case 5, Case 9) 레이저 출력이 보통이거나 레이저 출력과 이송속도가 낮은 경우(Case 1, Case 6, Case 8) 모재의 인장강도인 240MPa보다 낮은 인장강도 값으로 측정되었다. 또한, 레이저 출력이 낮고, 이송속도가 높은 경우(Case 4, Case 7) 용입이 후면비드까지 도달하지 못하거나 간헐적으로 용입이 되어 접합이 이루어지지 않은 것을 반복실험을 통해 확인하였다.

2) 상부의 보호가스 유량이 충분한 경우 용접부의 경도값은 160Hv~180Hv사이 값으로 검출되었다. 그러나 Case 1, Case 6, Case 8과 같이 상부의 실드가스 유량이 적을 경우(10 ℓ/min), 대기와의 차폐가 충분히 이루어지지 못하여 레이저 용접공정중 비드표면에서 다른 조건에 비해 산화 및 질화가 더 진행되어 용접부에 경화가 발생된 것으로 사료된다.

3) 다구찌 기법에서 실험계획방법인 직교배열표를 사용하여 디스크 레이저 용접실험결과를 기초로 망대특성 SNR을 도출하여 잡음인자에 대한 영향을 일차적으로 판단하고 입력변수의 조건이 적정하면 SNR을 이용해 최적의 용접 조건을 예측하였다.

다구찌 실험계획법을 통해 산출된 SNR 데이터로 예측할 수 있는 최적의 입력변수는 단일 대상의 출력변수를 목표로만 수행할 수 있어 단일 목적 최적화에는 용이하나 여러 목적변수의 최적화에는 한계가 있어 새로운 최적화 기법의 적용에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2015R1D1A3A01020246)

ORCID: Byeong-Ju Jin : <http://orcid.org/0000-0001-7829-7949>
ORCID: Ill-Soo Kim : <http://orcid.org/0000-0002-9936-6760>

References

1. De Loach L. D., Payne S. A., Chase L. L., Smith L. K., Kway W. L., and Krupke W. F., Evaluation of absorption and emission properties of Yb 3^+ doped crystals for laser applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29(4) (1993), 1179-1191
<https://doi.org/10.1109/3.214504>
2. Dong J., Bass M., Mao Y., Deng P., and Gan F., Dependence of the Yb 3^+ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet, *JOSAB*, 20(9) (2003), 1975-1979
<https://doi.org/10.1364/josab.20.001975>
3. C. H. Kim, J. H. Kim, H. S. Lim, J. H. Kim, Investigation of laser remote welding using disc laser, *Journal of Materials Processing Technology*, (2008)
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.165>
4. C. H. Oh, Laser science, *Du Yang Sa*, (2005)
5. Hitz, Introduction to laser technology, *Cheong Moon Gak Publisher*, (2006)
<https://doi.org/10.1002/0471723126>
6. John F. Ready, Industrial application of lasers, *Cheong Moon Gak Publisher*, (2005)
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-583960-0.x5001-1>
7. William C. Parr, Taguchi G., Introduction to quality engineering: designing quality into products and processes, (1989) <https://doi.org/10.2307/1268824>
8. Thomas R. Bement, Ross P. J., Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design, (1989)
<https://doi.org/10.2307/1268823>
9. Sang Heon Lim, Dong Keun Park and Choon Man Lee, A Study on the Optimal Cutting Condition of High Speed Feeding Type Laser Cutting Machine by Taguchi Method, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 21(6) (2009), 77-83
10. Jong Pyo Lee, Ill Soo Kim, Ji Hye Lee, Min Ho Park, Young Soo Kim and Cheol Kyun Park, An Experimental Study on Optimizing for Tandem Gas Metal Arc Welding Process, *Journal of Welding and Joining*, 32(2) (2014), 148-154
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.2.22>
11. Hyun Ho Na, Ill Soo Kim, Ji Sun Kim and Ji Hye Lee, A Experiment Study for Selection of Welding Condition of fillet Welded Structure, *Journal of KWJS*, 29(4) (2011), 41-47 <https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.4.403>
12. Jung-Kyu Kim, Jae-Hong Park, Sung-Youl Cho, Myeong-Kuk Yang, In-Eun Hur, Seong-Kyu Ko, Hyug-Lim and Yong-Ik Hyun, A Study of Heat Transfer Performance of Large Area Plate Heat Exchanger with Snake Pattern, *Proceedings of the KFMA Annual Meeting*, (2009), 571-576
13. Boyer R. R. and Rosenberg, H. W., Beta Titanium Alloys in the 1980s, *AIME*, (1984)