연 구 논 문

STS 304L의 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접조건이 용접부 형상에 미치는 영향

이형근* · 석한길** · 한현수*** · 박울재*** · 홍순복***

*한밭대학교 신소재공학부 생산가공공학과
**삼척대학교 자원 · 재료금속공학부 재료금속공학과
***한국원자력연구소 하나로이용연구단

Effects of the Welding Parameters on the Weld Shape in Nd:YAG Laser Welding of STS 304L

Hyoung Keun Lee*, Han Gil Suk**, Hyon Soo Han***, Ul Jae Park*** and Soon Bok Hong***

*Dept. of Welding and Production Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea
**Dept. of Materials and Metallurgical Engineering, Samcheok National University, Samcheok 245-080, Korea
***Hanaro Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract

The control of the weld bead shape is important in laser welding of the small parts. The effects of laser welding parameters on the weld bead shape in the pulsed Nd:YAG laser welding of STS 304L material were investigated. Shielding gas type, flow rate, pumping voltage, pulse frequency, pulse width, focal position and overlap distance were selected as laser welding parameters. Experiments were designed and conducted using the Taguchi method which was a statistical experimental method. The weld bead width, penetration, area and aspect ratio were measured and analysed as the weld bead shape properties and the welding parameters were optimized to maximize the weld aspect ratio. Weld aspect ratio were greatly affected by the pulse width, pumping voltage and pulse frequency, and somewhat by the overlap distance, and little by the shielding gas type, flow rate and focal position. A confirmation experiment were conducted using the optimized welding parameters.

* Corresponding author : leehk@hanbat.ac.kr (Received August 25, 2003)

Key Words : Nd:YAG laser welding, Stainless steel, Welding parameters, Weld aspect ratio, Optimization, Taguchi method

1. 서 론

레이저 용접은 레이저 빔을 매우 작은 크기로 집속시켜 큰 에너지 밀도를 얻을 수 있으며, 환경 친화적이며, 전자기장의 간섭을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있기 때문에 최근 들어 급격히 확산되고 있는 용접기술이다. 많은 종류의 레이저가 공업적으로 사용될 수 있으나, 용접에서는 주로 CO_2 혹은 Nd:YAG 레이저가 가장 많이 사용되고 있다[1].

특히 Nd:YAG 레이저는 CO_2 레이저에 비하여 파장이 짧기 때문에 금속에 대한 흡수율이 크며, 집속 빔의 크기가 작기 때문에 작은 부품의 용접에 더욱 유리하다[2]. 본 연구에서도 Ir-192 의료용 선원(radiation source)을 STS 304L 재질의 소형 캡슐 내에 밀봉하기 위하여 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접의 적용을 목적으로 예비적인 연구를 수행하였다. 방사선원을 소형 캡슐 내에 밀봉용접하기 위해서는 핫셀(hot cell) 내에서 장시간 작업해야 하기 때문에 안정된 용접조건 범위를 산출하는 것이 중요하다. 따라서 우선적으로 STS 304L의 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접변수들이 용접부의 형상에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 하

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

였다. 레이저 용접변수들이 용접부 형상에 미치는 영향에 대한 연구결과들이 발표되고 있으나[3-5], 여기서 요구되는 낮은 출력범위의 전도성 용접 영역에서 STS 304L의 펄스형 Nd:YAG 용접에 대한 결과는 찾기가 어렵다.

본 연구에서는 STS 304L 판재의 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접변수들이 용접부의 형상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 적절한 용접부 형상을 얻기 위하여 용접변수들을 최적화하고자 하였다. 용접변수들의 영향과 최적화는 최근 들어 많이 응용되고 있는 통계적인 실험계획법인 다꾸찌(Taguchi) 방법을 사용하여 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 레이저 출력특성의 분석

본 연구에 사용된 레이저 용접장치는 플래쉬 램프(flash lamp) 펄스형 Nd:YAG 레이저이다. Nd:YAG 레이저 장치의 사양은 Table 1에서 보여준다. 공진기를 통과한 레이저 빔은 코어 직경 600 ㎛의 광섬유를 통하여 전달되며, 유효초점거리 75 mm의 광학렌즈에 의해 집속된다.

시험편에 집속된 레이저 빔의 출력은 용접특성에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 우선적으로 Nd-YAG 레이저 가공기의 출력특성을 분석하였다. 출력특성은 펌핑전압(pumping voltage), 펄스 주파수(pulse frequency), 펄스 폭(pulse width)에 따라 레이저 평균출력을 측정하였다. 측정결과는 3 차 방정식으로 회귀분석하였으며, 평균출력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Average Power(W)} = 510.07 - 5.3924\,V + 0.018447\,V^2 - 0.0000212\,V^3 - 15.356\,P + 0.07177\,V*P + 0.000136\,V^2*P + 1.9529\,P^2 - 0.01601\,V*P^2 + 0.09430\,P^3 - 3.8773\,H + 0.000366\,V*H + 0.0000552\,V^2*H - 4.1273\,P*H + 0.03001\,V*P*H - 0.05627\,P^2*H + 0.03691\,H^2 - 0.000194\,V*H^2 - 0.000905\,P*H^2 + 0.0000734\,H^3$$

(V : pumping voltage(V), P : pulse width (msec), H : pulse frequency(Hz)) (1)

Fig. 1에서는 본 연구에서 사용된 펄스 폭(15, 20 28 Hz)에 대하여 펌핑 전압과 펄스 폭에 따른 평균출력을 3 차원 곡면으로 보여준다. 각각의 레이저 용접조건에 대한 레이저 평균출력은 이 회귀식을 사용하여 산출하였다.

Table 1 Nd:YAG laser welding system used in this work

Characteristics	Performance Range
Type	Flash lamp pulsed Nd:YAG
Wavelength	1.064 ㎛
Out power	400 W max.
Pumping voltage	400 V max.
Frequency range	single - 100 Hz
Pulse width	80 ㎲ - 10 ms
Optical fiber delivery	600 ㎛ SI type
Effective focal length	75 mm

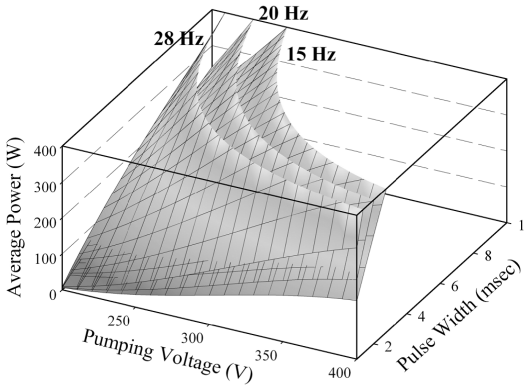

Fig. 1 Plots showing the average output power with the changes of the pumping voltage and pulse width at the pulse frequency of 15, 20 and 28 Hz

2.2 레이저 용접변수가 용접 단면 형상에 미치는 영향

실제 Ir-192 의료용 선원을 STS 304L 캡슐 내에 밀봉하기 위한 레이저 용접은 핫셀 내에서 자동화된 공정으로 수행된다. 본 연구는 예비적인 연구로서 STS 304L의 펄스형 Nd:YAG 레이저 용접에서 용접변수들이 용접부의 단면 형상에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자하였다. 따라서 레이저 용접은 직접 캡슐에 적용하지 않고, 두께 1 mm의 STS 304L 판재 위에 약 30 mm의 길이로 레이저 빔을 조사함에 의해 수행하였다. 캡슐에 적용되기 위해서 용접부의 단면 형상은 용접 비드 폭이 1 mm 이하, 용입깊이가 0.4 mm 이상이 요구되며, 스패터(spatter)가 없고, 용접 비드 외관이 미려할 것이 요구된다. 용접부 단면 형상의 분석을 위해서는 용접부를 절단, 정밀연마, 에칭 후 얻은 광학현미경 사진을 화상처리 소프트웨어를 사용하여 용접 비드 폭, 용입깊이, 용접부 단면적, 어스펙트 비(aspect

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

ratio)를 측정하였다. 용접단면의 측정방법에 대한 도식적인 설명은 Fig. 2에 나타내었다.

레이저 용접변수들로는 보호가스 종류, 보호가스 유량, 펌핑 전압, 펄스 주파수, 펄스 폭, 레이저 초점위치, 펄스 겹침간격을 선정하였다. 각 용접변수들에 대한 실험범위는 예비실험을 통해 스패터가 발생하지 않는 범위를 설정하였다. 실험은 직교배열표를 사용한 다꾸찌 실험계획법을 사용하였다[5]. 직교배열표는 1 개의 2 수준 변수와 7 개의 3 수준 변수를 동시에 실험할 수 있으며, 교호작용이 모든 열에 고르게 분산되어 교호작용의 영향이 가장 적은 L18 직교배열표를 사용하였다. Table 2에서는 용접변수들과 이들의 수준을 보여준다. 용접변수 7 개를 2 수준에 1 개, 3 수준에 6 개를 배치하고, 실험의 적합성을 판단하기 위하여 3 수준의 1 개 열(column)에는 용접변수를 배치하지 않고 에러(error)로 남겨 두었다. Table 3에서는 L18 직교배열표에 배치된 각 실험조건을 보여준다. 실험순서는 난수표를 사용하여 무질서하게 하였다. 용접속도는 각 용접조건에서 주어진 펄스 주파수와 펄스 겹침간격을 유지하도록 설정하였다(용접속도(mm/min) = 주파수(Hz) × 겹침간격(mm) × 60). 각 실험조건에 대한 평균출력, 펄스당 에너지와 펄스당 출력은 식(1)에 의하여 산출하였다. 각 조건에 대하여 3 회의 실험을 수행하였다.

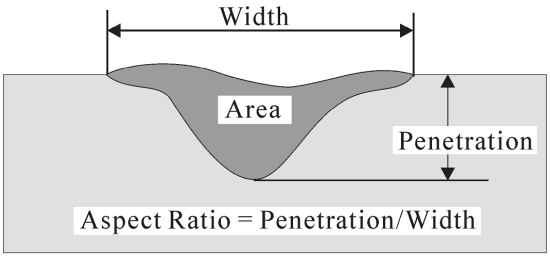

Fig. 2 Schematic diagram explaining the analysis methods of weld cross section

Table 2 Laser welding parameters and their levels

Chr.	Parameter	1	2	3
A	Shielding gas type	Ar	He	
B	Shielding gas flow rate (l/min)	15	20	25
C	Pumping voltage (V)	228	240	250
D	Pulse frequency (Hz)	15	20	28
E	Pulse width (msec)	0.8	1.0	1.2
F	Focal position (mm)	0	-0.7	-1.4
G	Overlap distance (mm)	0.12	0.20	0.27

Table 3 Experimental arrangements of the welding parameters on a L18 orthogonal array

No.	A	B	C	D	E	F	G	Welding speed (mm/min)	Average power (W)	Energy /pulse (J)	Power /pulse ($Wx10^3$)
1	Ar	15	228	15	0.8	0	0.12	108	10.3	0.7	0.9
2	Ar	15	240	20	1	-0.7	0.2	240	37.9	1.9	1.9
3	Ar	15	250	28	1.2	-1.4	0.27	453.6	87.7	3.1	2.6
4	Ar	20	228	20	1	-1.4	0.27	324	26.8	1.3	1.3
5	Ar	20	240	28	1.2	0	0.12	201.6	71.7	2.6	2.1
6	Ar	20	250	15	0.8	-0.7	0.2	180	23.7	1.6	2.0
7	Ar	25	228	15	1.2	-0.7	0.27	243	27.8	1.9	1.5
8	Ar	25	240	20	0.8	-1.4	0.12	144	24.7	1.2	1.5
9	Ar	25	250	28	1	0	0.2	336	68.2	2.4	2.4
10	He	15	228	28	1	-0.7	0.12	201.6	38.6	1.4	1.4
11	He	15	240	15	1.2	-1.4	0.2	180	37.3	2.5	2.1
12	He	15	250	20	0.8	0	0.27	324	33.5	1.7	2.1
13	He	20	228	28	0.8	-1.4	0.2	336	23.0	0.8	1.0
14	He	20	240	15	1	0	0.27	243	27.3	1.8	1.8
15	He	20	250	20	1.2	-0.7	0.12	144	62.4	3.1	2.6
16	He	25	228	20	1.2	0	0.2	240	38.0	1.9	1.6
17	He	25	240	28	0.8	-0.7	0.27	453.6	39.26	1.4	1.7
18	He	25	250	15	1	-1.4	0.12	108	35.0	2.3	2.3

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 3은 각 레이저 용접조건에 따른 용접 단면적의 광학현미경 사진을 화상처리한 예를 보여준다. 용접 비드 폭, 용입깊이, 단면적 및 어스펙트 비는 화상처리 소프트웨어를 사용하여 측정하였다. 모든 측정결과들은 Table 4에 종합적으로 정리하였다. 용접 비드 폭, 용입깊이, 단면적에 대해서는 평균값으로 분석하였으며, 어스펙트 비에 대해서는 평균값과 S/N 비(Signal to Noise Ratio)로 분석하였다. 어스펙트 비는 규정된 비드 폭 내에서 클수록 좋기 때문에, 망대특성(Larger the Better type)에 따라 S/N 비를 다음의 식에 의해 계산하였다[5].

$$\text{S/N Ratio} = -10 \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right),$$

n : 반복수, yi : 측정치 (2)

Table 4의 실험결과들을 정리하여 각 레이저 용접조건이 용접 비드 폭, 용입깊이, 단면적에 미치는 영향은 Fig. 4에 나타내었다. 용접 비드 폭, 용입깊이 및 단면적 모두 펌핑 전압, 펄스 폭, 펄스 주파수에 가장 큰 영향을 받았다. 펌핑 전압이 높을수록, 펄스 폭이 길수록, 펄스 주파수가 높을수록 용접 비드 폭, 용입깊이,

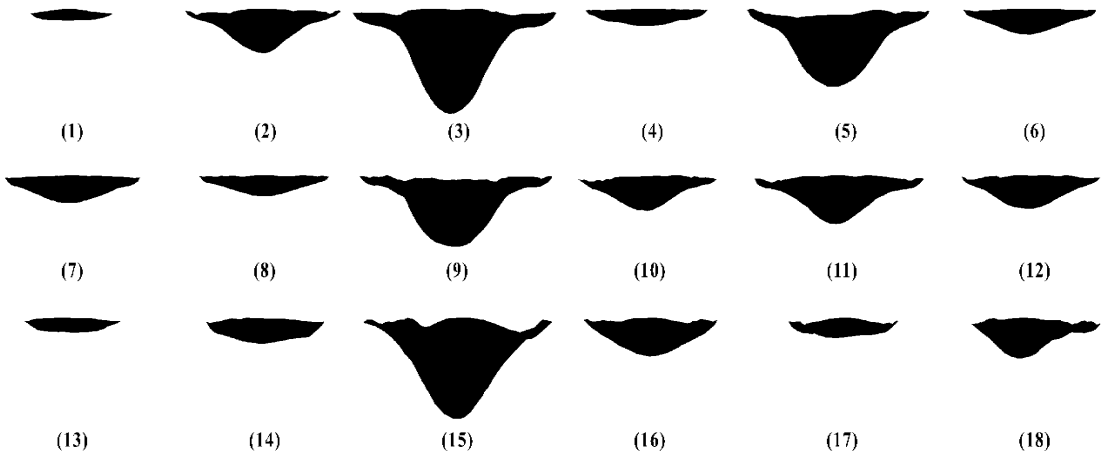

Fig. 3 Weld cross section images for the welding conditions

Table 4 Analysis results for the weld width, penetration, area, aspect ratio and overlap

No.	Weld width (mm)				Weld penetration (mm)				Weld area (mm^2)				Aspect ratio					Weld overlap (%)
	1	2	3	Aver	1	2	3	Aver	1	2	3	Aver	1	2	3	Aver	SN	
1	0.40	0.37	0.38	0.38	0.036	0.028	0.030	0.03	0.011	0.011	0.011	0.011	0.090	0.074	0.079	0.08	-21.9	68.8
2	0.69	0.71	0.69	0.70	0.166	0.157	0.162	0.16	0.057	0.057	0.059	0.058	0.241	0.220	0.235	0.23	-12.7	71.3
3	0.91	0.93	0.90	0.91	0.435	0.374	0.299	0.37	0.155	0.155	0.118	0.143	0.480	0.400	0.333	0.40	-8.2	70.4
4	0.56	0.56	0.54	0.56	0.077	0.058	0.053	0.06	0.024	0.024	0.022	0.023	0.138	0.104	0.097	0.11	-19.2	51.4
5	0.92	0.83	0.88	0.88	0.316	0.285	0.286	0.30	0.113	0.113	0.122	0.116	0.344	0.341	0.323	0.34	-9.5	86.4
6	0.61	0.61	0.56	0.59	0.121	0.091	0.069	0.09	0.035	0.035	0.029	0.033	0.199	0.150	0.122	0.16	-16.6	66.3
7	0.63	0.62	0.52	0.59	0.101	0.096	0.063	0.09	0.040	0.040	0.025	0.035	0.161	0.155	0.122	0.15	-16.9	54.1
8	0.58	0.60	0.60	0.59	0.082	0.073	0.066	0.07	0.029	0.029	0.026	0.028	0.141	0.123	0.111	0.12	-18.2	79.7
9	0.87	0.88	0.77	0.84	0.288	0.262	0.224	0.26	0.105	0.105	0.092	0.101	0.333	0.297	0.289	0.31	-10.3	76.2
10	0.65	0.64	0.64	0.64	0.159	0.120	0.119	0.13	0.044	0.044	0.042	0.044	0.244	0.188	0.186	0.21	-13.9	81.3
11	0.72	0.77	0.73	0.74	0.183	0.169	0.152	0.17	0.069	0.069	0.061	0.067	0.254	0.218	0.208	0.23	-13.0	73.0
12	0.63	0.63	0.52	0.59	0.116	0.119	0.060	0.10	0.046	0.046	0.025	0.039	0.184	0.188	0.116	0.16	-16.4	54.4
13	0.52	0.44	0.30	0.42	0.062	0.044	0.036	0.05	0.018	0.018	0.008	0.015	0.118	0.099	0.120	0.11	-19.1	52.5
14	0.55	0.54	0.46	0.52	0.116	0.082	0.063	0.09	0.036	0.036	0.024	0.032	0.211	0.151	0.137	0.17	-16.0	47.8
15	0.82	0.86	0.85	0.84	0.347	0.359	0.323	0.34	0.145	0.145	0.134	0.141	0.421	0.416	0.382	0.41	-7.8	85.8
16	0.63	0.61	0.51	0.58	0.174	0.136	0.089	0.13	0.052	0.052	0.032	0.046	0.275	0.221	0.175	0.22	-13.4	65.8
17	0.56	0.51	0.48	0.52	0.099	0.064	0.053	0.07	0.024	0.024	0.021	0.023	0.175	0.126	0.110	0.14	-17.7	47.6
18	0.70	0.59	0.70	0.66	0.154	0.126	0.146	0.14	0.048	0.048	0.059	0.051	0.219	0.215	0.209	0.21	-13.4	81.9

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

단면적은 증가하였다. 이러한 펌핑 전압, 펄스 폭 및 펄스 주파수는 레이저 평균출력을 결정하는 용접변수들에 해당한다.

Fig. 5에서는 각 레이저 용접변수가 어스펙트 비의 평균값과 S/N 비에 미치는 영향을 나타내었다. 어스펙트 비의 평균값과 S/N 비에 미치는 용접변수들의 영향은 거의 같은 경향을 나타내었다. Fig. 4에서와 마찬가지로 레이저 평균출력의 크기를 결정하는 펌핑 전압, 펄스 주파수, 펄스 폭이 어스펙트 비에 가장 큰 영향을 미쳤다. 펌핑 전압이 높을수록, 펄스 주파수가 클수록, 펄스 폭이 클수록 어스펙트 비는 증가하였다. 어스펙트 비의 크기는 평균출력의 크기에 크게 의존하는 것으로 보인다.

어스펙트 비에 미치는 용접변수들의 영향을 좀 더 정량적으로 분석하기 위하여 어스펙트 비의 평균값과 S/N 비에 대해서 분산분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 실시하였다. S/N 비에 대한 분산분석 결과는 Table 5에서 보여준다. 여기서 분산값(V)이 작은 즉 효과가 작은 용접변수들인 보호가스 종류, 보호가스 유량, 초점위치는 오차항으로 풀링(pooling)하였다. 유의수준(α)를 각각 0.05, 0.01로 하였을 때 F-분포표로부터 F(2, 9 ; 0.05) = 4.26, F(2, 9 ; 0.01) = 8.02 이다. 분산분석 결과에서 F_0와 비교하면 펄스 폭, 펌핑전압, 펄스 주파수는 유의수준 1 %에 유의하며, 겹침간격은 유의수준 5 %에 유의한 것으로 판명되었다. 각 용접변수의 중요도는 기여율(percentage

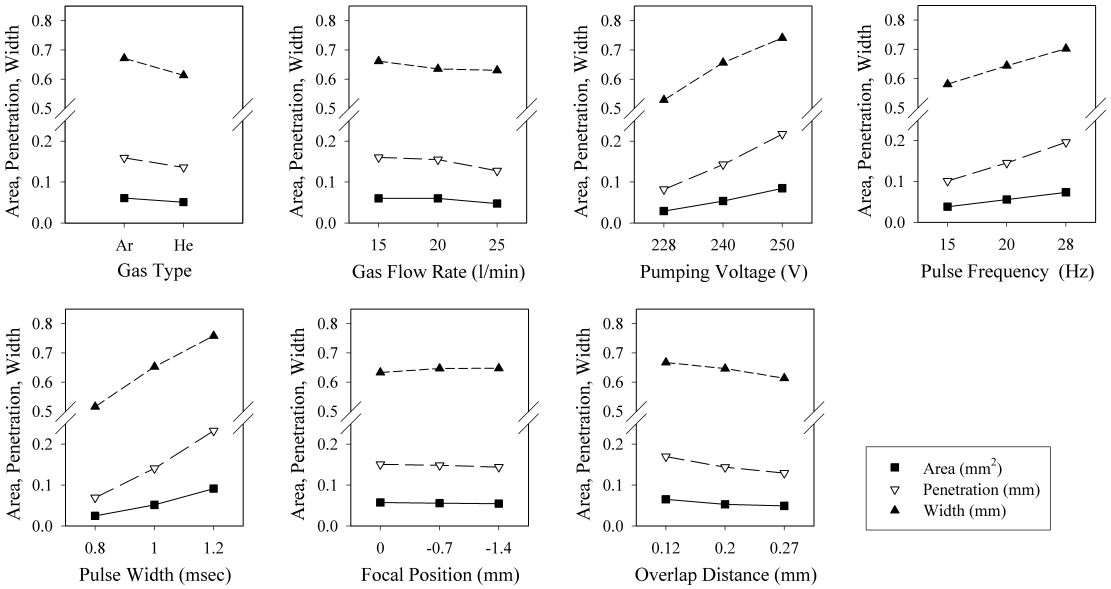

Fig. 4 Effects of the laser welding parameters on the weld width, penetration and area

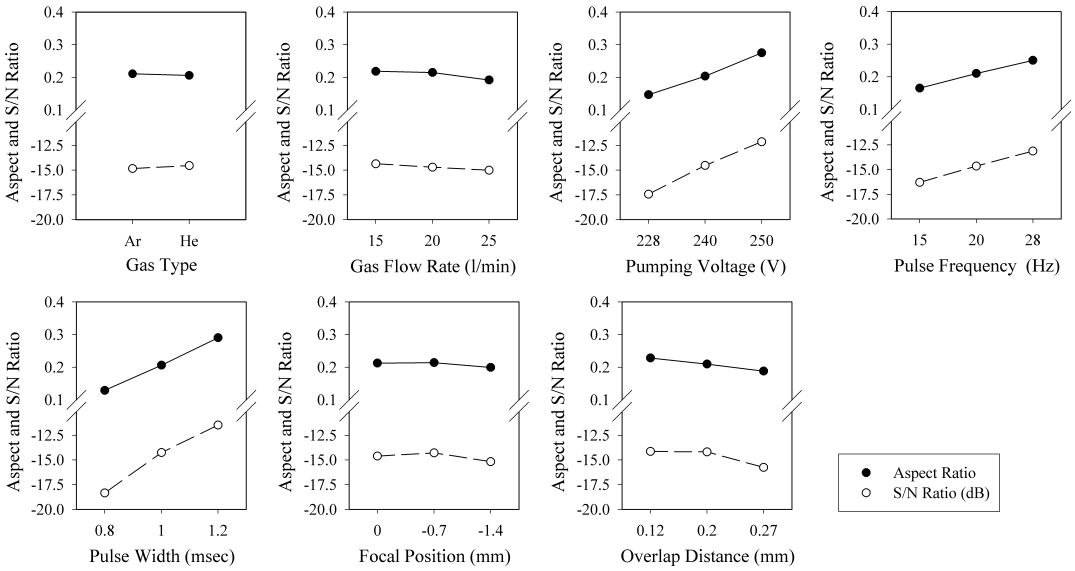

Fig. 5 Effects of the laser welding parameters on the weld aspect ratio and S/N ratio

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Table 5 ANOVA for S/N ratios of the weld aspect ratio

Chr.	Parameter	D_f	SS	V	F_o	R_o(%)
A	Shielding gas type	(1)	0.40	0.40	-	-
B	Shielding gas flow rate (l/min)	(2)	1.27	0.63	-	-
C	Pumping voltage (V)	2	84.48	42.24	64.35	30.39
D	Pulse frequency (Hz)	2	30.40	15.20	23.15	10.63
E	Pulse width (msec)	2	142.82	71.41	108.79	51.71
F	Focal position (mm)	(2)	2.41	1.20	-	-
G	Overlap distance (mm)	2	10.07	5.03	7.67	3.20
I	ERROR	(2)	1.15	0.58	-	-
e	error	(2)	0.68	0.34		
(e)	pooled error	(9)	(5.91)	(0.66)		4.08
	Total	17	273.67			100.0

D_f : Degree of freedom(parentheses mean pooled), SS : Sum of square, V : Variance, F_o : F value, R_o : Percentage contribution

contribution)의 크기에 의해 판단할 수 있다. 주어진 조건 범위 내에서 펄스 폭과 펌핑 전압의 기여율의 합이 약 80%를 차지하며, 이들의 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 주파수의 영향도 상당히 크며, 겹침간격은 약간의 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 어스펙트 비의 평균값에 대한 분산분석 결과도 이와 유사하며, 분석결과는 생략하였다.

실험결과를 검토하면 용접 비드 폭이 증가하면 용입깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서는 용접 비드 폭과 용입깊이의 상관관계를 그래프로 표시하였다. 또한 어스펙트 비에 가장 큰 영향을 미치는 용접변수들인 펄스 폭, 펌핑 전압 및 펄스 주파수는 레이저 평균출력을 결정하는 인자이다. 따라서 어스펙트 비는 레이저 평균출력에 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 그러나 레이저 평균출력과 어스펙트 비 사이에는 기대만큼 큰 상관관계를 가지지 못하였다. 반면 레이저 펄스당 에너지와 어스펙트 비 사이에 더 큰 상관관계가 있음을 알 수 있었다. Fig. 7에서는 레이저 펄스당 에너지에 따른 어스펙트 비의 상관관계를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 점선은 95% 신뢰구간을 나타낸다. 펄스당 에너지가 증가할수록 어스펙트 비가 증가하는 것을 보여준다. 결국 어스펙트 비를 증가시키기 위해서는 출력을 증가시켜야 하며, 출력이 증가하면 동시에 용접 비드 폭이 넓어진다. 따라서 적절한 용접부 단면 형상을 얻기 위해서는 이들 사이에 적절한 조정이 필요하다.

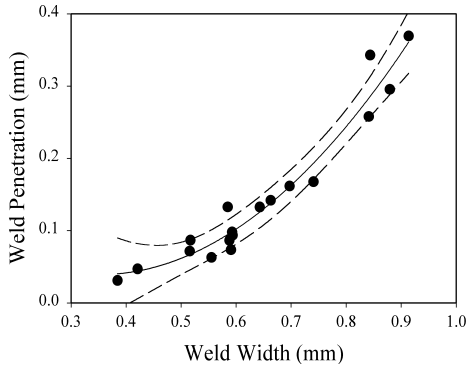

Fig. 6 Correlation between weld width and weld penetration

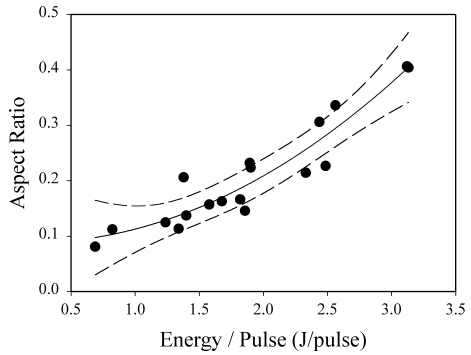

Fig. 7 Effects of the energy/pulse on the weld aspect ratio

4. 최적 레이저 용접조건의 도출과 확인실험

Table 5의 S/N 비의 분산분석 결과로부터 유의한 용접변수들인 펄스 폭, 펌핑 전압, 펄스 주파수 및 겹침간격을 각각 1.2 msec, 250 V, 28 Hz, 0.12 mm로 설정하였다. CO_2 레이저 용접에서는 보호가스로서 Ar 가스에 비해 He 가스는 용접부의 단면 형상에 큰 영향을 미친다고 보고되어 있으나[7], 본 연구에서는 보호가스 종류는 어스펙트 비에는 큰 영향을 비치지 않았다. 그러나 Ar에 비해 He 가스가 플라즈마 형성이 작았으며, 비드 외관이 우수하기 때문에 보호가스로는 He 가스를 선정하였다. 보호가스 유량은 경제성을 고려하여 낮은 조건인 15 l/min을 선정하였다. 초점위치는 일반적으로 표면 아래 위치하는 것이 용입이 깊은 것으로 알려져 있으나[2], 여기서는 거의 영향이 없었다. 이것은 아마 초점위치의 변화범위를 작게 설정한 때문으로 보인다. 초점이 표면에 위치하는 경우에 평균출력이 증가하면 스패터 발생의 경향이 강하여 초점위치는 -1.4 mm를 선정하였다. 선정된 최적의 용접조건은 Table 6에 정리하였다.

이러한 선정된 레이저 용접조건 하에서 어스펙트 비

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Table 6 Optimized laser welding condition

Welding parameters							Analysis results		
Shielding gas type	Shielding gas flow rate (l/min)	Pumping voltage (V)	Pulse frequency (Hz)	Pulse width (msec)	Focal position (mm)	Overlap distance (mm)	Weld width (mm)	Weld penetration (mm)	Aspect ratio (mm)
He	15	250	28	1.2	-1.4	0.12	0.90	0.41	0.45

의 기대값을 분산분석 결과로부터 추정하였다. Table 6의 레이저 용접조건 하에서 95% 신뢰구간에서 어스펙트 비를 추정한 결과 0.42 ± 0.05로 추정되었다. 선정된 용접조건 하에서 1 회의 확인실험을 수행하였으며, 용접부의 단면사진은 Fig. 8에서 보여준다. 용접단면의 분석결과 용접 비드 폭은 0.90 mm, 용입깊이는 0.41 mm, 어스펙트 비는 0.45를 얻었다. 얻어진 어스펙트 비는 추정구간 내에 들어오므로 실험결과는 타당한 것으로 판단된다. 소형 캡슐의 레이저 용접에서는 크기 효과로 인하여 열전달 현상이 다르기 때문에, 현재의 결과를 직접적으로 소형 캡슐의 용접조건으로 사용할 수는 없으나, 여기서 정량적으로 분석된 용접변수들의 영향을 캡슐의 용접에 활용하고자 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 레이저 용접변수들로서 보호가스 종류, 보호가스 유량, 펌핑 전압, 펄스 주파수, 펄스 폭, 초점위치 및 펄스 겹침간격이 용접부의 단면 형상에 미치는 영향을 L18 직교배열표에 의한 다구찌 실험계획법을 사용하여 정량적으로 분석하였다.

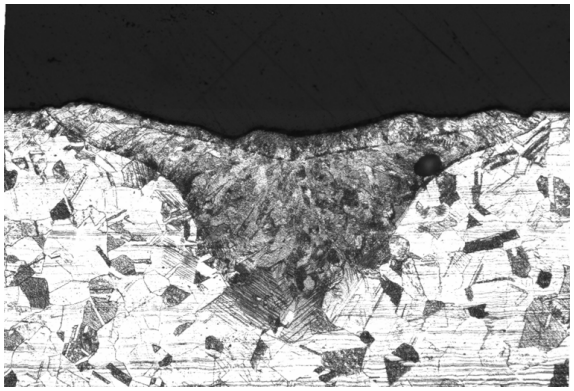

Fig. 8 Optical micrograph showing the cross section of the weld bead welded with the optimized welding condition

1) 용접 비드 폭, 용입깊이, 용접 단면적 및 어스펙트 비에 펄스 폭과 펌핑 전압이 매우 큰 영향을 미쳤으며, 주파수도 상당히 큰 영향을 미쳤다. 겹침간격은 약간의 영향을 미쳤다. 반면 보호가스의 종류, 보호가스 유량, 초점위치는 거의 영향을 미치지 않았다.

2) 어스펙트 비와 펄스당 에너지 역시 거의 직선적인 상관관계에 있으며, 펄스당 에너지가 증가할수록 어스펙트 비는 증가하였다. 용접 비드 폭과 용입깊이는 거의 직선적인 상관관계를 가졌다.

3) 비드폭, 용입깊이, 어스펙트 비의 S/N 비를 분산분석한 결과로부터 현재 사용한 실험조건 범위 내에서 최적의 레이저 용접조건을 도출하였다. 또한 확인실험을 수행하였으며, 그 결과는 분산분석 결과의 기대치와 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. J. F. Ready : Industrial applications of laser, Academic Press, 1997
2. W. W. Duley : Laser Welding, John Wiley & Sons, Inc., 1999
3. K. C. Kim and J. H. Heo : Effects of process parameters on bead formation in Nd:YAG laser welding of thin steels, Journal of KWS, **19-3** (2001), 317~324 (in Korean)
4. Y. F. Tzeng : Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam welding process, Journal of Materials Processing Technology, **102** (2000) 40~47
5. W. S. Chang and S. J. Na : A study on heat source equations for the prediction of weld shape and thermal deformation in laser microwelding, Metall. Mater. Trans. B, **33-5** (2002) 756~763
6. P. J. Ross : Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill, 1996
7. A. M. El-Batahgy : Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels, Materials Letters, **32** (1997) 155~163

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.