

브라운관 전자총 부품의 펄스 Nd:YAG 레이저 용접에 관한 연구 (I) - 빔의 출력특성과 광학변수 -

김 종 도* · 하 승 협** · 조 상 명***

*한국해양대학교 기관시스템공학부

**부경대학교 대학원 생산가공공학과

***부경대학교 재료공학부 생산가공공학과

A Study on Pulsed Nd:YAG Laser Welding of Electron Gun in Braun Tubes (I) - Characteristics of Beam Output Energy and Optical Parameters -

Jong-Do Kim*, Seung-Hyup Ha** and Sang-Myung Cho***

*Division Marine Engineering System, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Graduate school, Dept. of Production and Joining Eng. Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

***Div. of Materials Science & Eng., Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

Abstract

During laser spot welding of the braun tube electron gun, phenomena such as serious spattering and oxidative reaction, etc. were occurred. The spatter occurred from weld pool affects the braun tube, namely it blocks up a very small hole on the shadow mask and causes short circuit between two poles of the electron gun. We guessed that high power density and oxidative reaction are main sources of these problems. So, we studied to prevent and to reduce spatter occurring in spot welding of the braun tube electron gun using pulsed Nd:YAG laser. The characteristics of laser output power was estimated, and the loss of laser energy by optical parameter and spatter was measured by powermeter. The effects of welding parameters, laser defocused distance and incident angle, were investigated on the shape and penetration depth of the laser welded bead in flare and flange joints. From these results, the laser peak power was a major factor to control penetration depth and to occur spatter. It was found that the losses of laser energy by optic parameter and stuck spatter affect seriously laser weldability of thin sheets. The deepest penetration depth is gotten on focal position, and a "bead transition" occurred with a slight displacement of focal position relative to the workpiece surface and the absorption rate of the laser energy is affected by the shape factor of the workpiece. When we changed the incident angle of laser beam, the penetration depth was decreased a little with increasing of the incident angle, and the bead width was increased. The spattering was prevented by considering laser beam energy and incident angle.

(Received January 22, 2002)

Key Words : Pulsed Nd:YAG laser, Spot welding, Peak power, Spatter, Braun tube

1. 서 론

고에너지 밀도의 레이저 가공기술은 자동차, 발전 플랜트 및 우주 항공 등의 대형 구조물 산업분야에서 초소형 제품 및 IC회로와 같은 소형화, 고집적화가 요망

되는 전자부품 및 정밀 기계산업분야에 이르기까지 폭넓은 범위에서 적용되고 있다¹⁻⁵⁾. 특히, 레이저빔은 코히런트(coherent)한 고에너지밀도의 광 열원으로 그 가공분야는 집합가공을 비롯하여 절단(cutting), 드릴링(drilling), 에브리이션(ablation) 등의 제거가공, 그리고 표면합금화와 박막성형에 의한 표면개질 등 그

적용 범위가 더욱더 확대되고 있다^{5,6)}. 특히, YAG 레이저를 이용한 용접에서는 광 화이버(optical fiber)로 빔을 전송할 수 있는 특성을 이용하여 원자로의 증기 발생기 세관의 보수 용접에도 적용되고 있으며, 자동라인에서의 적용이 용이하다¹⁾.

레이저빔 열원은 타 열원에 비해 양호한 집광성에 의한 정밀·미세 가공과 어스펙트 비(aspect ratio)가 큰 깊은 용입용접이 가능하다. 또한 고속·저입열 용접으로서 주변부의 열 영향부가 좁고, 결정립의 조대화 정도가 적으므로 고품질의 용접이음이 얻어진다. 그 외에 비접촉 가공이므로 공구의 마모와 오손이 없으며, 고순도의 재료도 순도를 저하시키지 않고 가공할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 재료의 종류와 그 표면상태에 따라 레이저빔의 반사, 흡수, 투과 정도가 크게 다르고, 깊은 용입용접의 경우 기공(blow hole)이 발생하기 쉽다^{7,8)}. 또한 레이저 유기 플라즈마(laser induced plasma) 또는 플룸(plume)에 의한 빔 흡수나 산란 등의 영향을 받게 되는 등의 단점⁹⁻¹¹⁾도 가지고 있다. 레이저빔 열원을 이용한 용접시 몇몇 단점이 있지만, 용접 중에 용접변수의 적절한 제어로 단점을 어느 정도는 보완할 수 있고, 타 열원에 비해 많은 장점을 가지고 있기 때문에 현재 산업분야에서는 그 적용분야가 더욱더 넓어지고 있는 추세이다.

본 연구에서 다루고 있는 브라운관내 전자총 부품은 펄스 Nd:YAG 레이저로 용접을 행하고 있으며, 브라운관의 외관과 내부 구조의 개략도를 Fig. 1에서 보여 주고 있다. 전자총의 레이저 용접 중에 발생된 다량의 스패터(spatter)가 고전압이 걸리는 전자총 전극 내부로 유입되거나 전극 사이에 부착되어 단락(short)현상과 섀도우 마스크(shadow mask)의 구멍을 막아서 화상이 났지 않는 성능상의 문제점을 일으키고 있다.

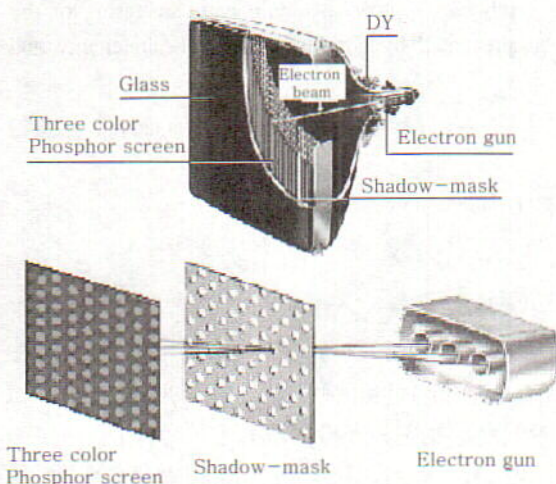


Fig. 1 Structure of braun tube

이와 같은 문제점들은 브라운관 전자총 부품의 레이저 용접시에 최적의 조건을 설정하여, 플라즈마 등의 부가적인 가공변수의 영향을 억제하고 레이저 용접부의 용접 메카니즘과 용융특성을 이해함으로써 용접 중 발생할 수 있는 결함의 저감 및 방지가 가능할 것으로 사려된다.

본 연구에서는 전자총 부품의 레이저빔 점용접시 사용되는 레이저빔의 출력특성을 조사하고 그에 따른 용접성 평가와 그리고 전자총 부품에 악영향을 미치는 스패터의 발생원인을 규명하여 빔의 조사각도, 초점위치, 그리고 보호글래스 등의 광학변수에 대한 용접특성을 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 전자총 전극 부품인 두께 0.33mm의 오스테나이트계 스테인리스강 STS 304L을 사용하였다. 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

브라운관 전자총의 외관과 그 전극의 레이저 점용접 부위를 Fig. 2에 나타낸다. 용접 이음형상은 두 전극을 맞대었을 때 용접 부위가 오목한 형상의 플레어 이음부(flare joint)와 돌출되어 있는 플랜지 이음부(flange joint)이다. 이와 같은 두 가지의 이음부에 대해서 레이저빔의 비초점거리(f_0)와 조사각도(α)의 변화에 따른 용접특성을 검토하였다.

2.2 실험방법

레이저 점용접시 사용한 용접장치는 펄스 Nd:YAG 레이저 용접기이다. 레이저빔의 발전파장(λ)은 1.064 μ m

Table 1 Chemical composition of STS304L (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
STS304L	0.05	1	2	0.04	0.03	8	18	Bal.

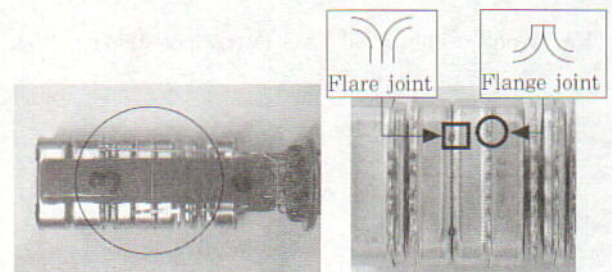


Fig. 2 Laser spot welding points of electron gun in braun tube

이며, 최대 출력에너지는 50J/p(펄스 폭 10ms 기준)이다. 출사 집광렌즈의 초점거리는 $f=70\text{mm}$ 이며, 집광광학계 선단과 피용접재의 초점위치까지의 거리(working distance)는 56mm이다.

브라운관용 전자총 부품의 레이저 용접시 현장에서 이용되고 있는 출사 집광광학계의 한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 현장의 집광광학계는 상하 및 좌우의 비초점거리와 조사각도를 조절할 수 있는 구조로 되어 있다. 이러한 집광광학계를 재현하기 위하여 본 연구에서는 용접지그(jig)에 마이크로미터와 각도기를 부착하여 레이저빔의 비초점거리와 조사각도를 변화시켜 레이저빔의 출력특성에 따른 용입특성을 검토하였으며, 또한 출사 집광광학계, 보호글래스 재질, 그리고 거기에 부착된 스패터(spatter)에 의한 빔 에너지 손실을 추정하여 용접성에 미치는 영향을 검토하였다. 이때의 집광광학계 조정 모식도와 비초점거리를 변화시켰을 때의 레이저빔의 번 패턴(burn pattern)을 각각 Fig. 4에 나타내었다. 플레어 이음부와 플랜지 이음부에 대하여 비초점거리(f_d)를 $0 \sim \pm 6\text{mm}$ 로 변화시키고, 레이저빔 조사각도는 $0 \sim 25^\circ$ 까지 변화시켰다. 번 패턴으로부터, 빔

웨이스트(waist)인 초점위치에서 가장 빔의 직경이 작고 에너지가 집중되어 있음을 알 수 있으며, 정상적이지만 레이저빔의 에너지가 가우스(Gauss) 분포를 하고 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 빔의 출력특성에 따른 용입특성

레이저빔을 열원으로 하는 가공에서 그 성능에 영향을 미치는 요인 중 레이저빔에 관련된 것들에는 가공물의 빔 흡수능에 영향을 주는 레이저빔의 파장, 에너지의 대소를 정하는 출력, 펄스출력에 있어서 듀티(duty)와 주파수, 그리고 에너지의 강도분포를 나타내는 빔 모드(beam mode) 등이 있다.

먼저, 본 연구에서는 펄스 Nd:YAG 레이저빔의 출력특성을 평가하고 이에 따른 용입특성을 알아보았다.

Fig. 5는 레이저 첨두출력(peak power, W)에 미치는 램프전압과 빔 조사시간(τ)의 영향을 나타낸다. 펄스 레이저빔의 기본 출력특성은 레이저 매질의 여기 램프전압을 증가시킬수록 첨두출력이 증가하는 경향을 보이고, 동일한 여기용 램프전압에서 레이저빔의 조사시간이 짧아질수록 첨두출력은 크게 됨을 알 수 있다. 여기서 첨두출력은 $J(\text{Joule}) = W(\text{Watt}) \times S(\text{second})$ 의 기초식으로부터 계산할 수 있다. 이는 레이저 용접시 용융깊이와 용융액의 스패터 현상에 지대한 영향을 미치는 인자이기 때문에 출력 설정에 있어서 램프전압과 빔의 조사시간을 적절하게 설정해야한다⁴⁾.

Fig. 6은 점용접부의 용입깊이에 미치는 빔 출력에너지의 영향에 대하여 검토한 결과를 나타낸다. 동일한 조사시간에서 램프전압이 증가할 수록 빔의 출력에너지(J)와 첨두출력(W)은 높게 되고, 재료내의 용융깊이는 비례하여 깊게 된다. 300V 이상의 출력에서는 스패터 현상과 용융액의 자기연소(self-burning)현상이 관찰

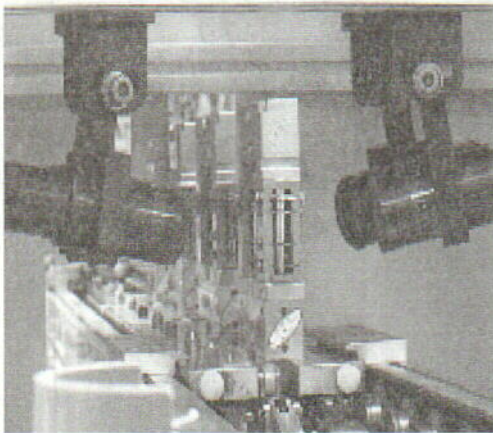


Fig. 3 Situation of laser welding in production line

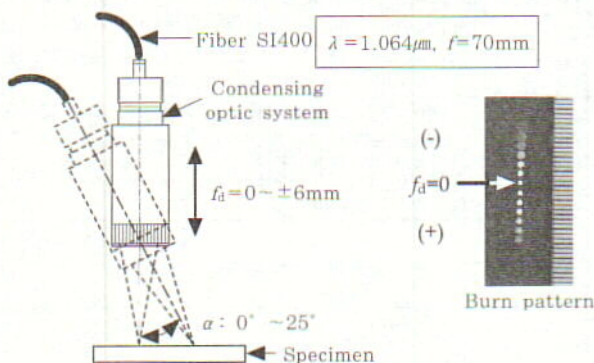


Fig. 4 Schematic diagram for adjustment of condensing optic system and burn pattern

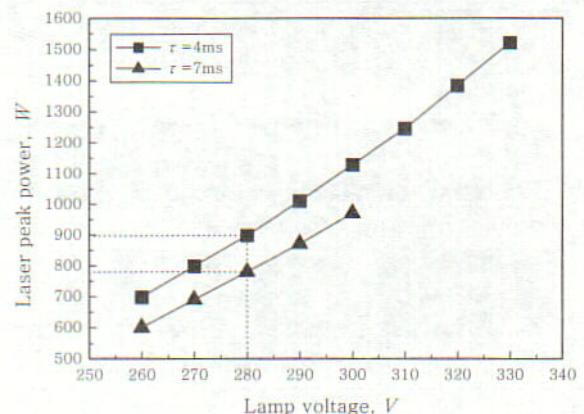


Fig. 5 Effect of lamp voltage and irradiation time on laser peak power

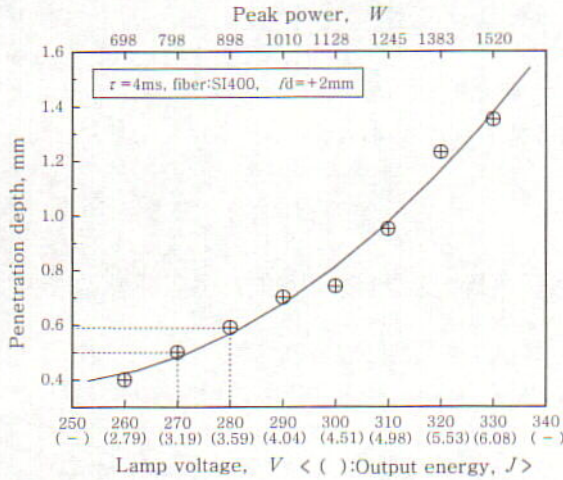


Fig. 6 Effect of laser output energy on penetration depth

되었으며, 330V에서는 스파터 발생으로 인하여 험핑비드(humping bead)가 나타났다. 그리고 Fig. 6에서 점선으로 나타낸 것처럼 램프전압을 270V에서 280V로 10V 증가시켰을 때 출력 에너지는 0.4J 정도 상승하고, 이에 따른 피용접재의 용융깊이는 약 0.09mm (90 μ m) 정도의 변화를 보이고 있다. 소출력 레이저를 이용한 박판의 용접인 경우에는 이와 같은 미소한 전압차이에도 용융깊이는 박판의 두께대비 크게 변할 수 있으며, 이것은 출력의 제어가 부적절한 경우 박판의 관통이나 스파터의 발생으로 이어질 수 있음을 보여주는 것이다. 브라운관 전자총 부품에 적용되는 박판의 자동화 용접공정에서 램프노후에 따른 빔의 출력저하에 각별히 유의해야 될 부분이라 할 것이다.

Fig. 7에는 램프전압과 빔의 조사시간을 변화시켰을 때 전자총 부품인 플레어 이음형상의 전극과 D-conductor 용접부의 매크로단면 관찰결과를 (a)와 (b)에 각각 나타낸다. (a)로부터, 램프전압이 증가함에 따라 침투출력 및 조사에너지의 증가로 인해 용융깊이가

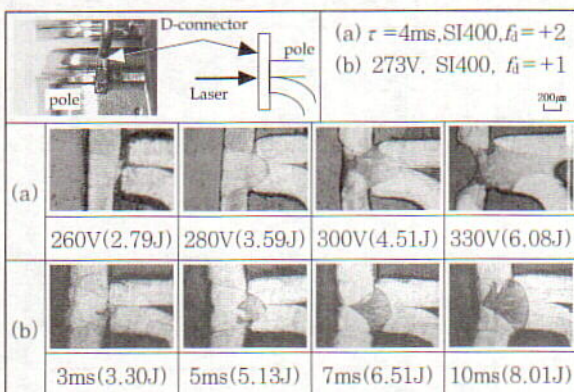


Fig. 7 Cross-section of welds by various lamp voltage and irradiation time

급격하게 깊어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나, (b)의 일정 램프전압에서 빔의 조사시간을 증가시킨 경우에는 다른 양상이 관찰되었다. 즉, Fig. 5의 결과와 같이 일정 램프전압에서 빔의 조사시간이 길어지게 되면 침투출력이 저하하게 되어 용융깊이는 알아져야하나 거의 일정하며 용융부가 넓어지는 형상의 변화를 보이고 있다. 이것은 침투출력이 용융깊이에 미치는 주 지배인 자이기는 하지만 조사시간의 증가에 따른 입열 에너지 증가로 인하여 용융지내의 대류현상과 열전도특성에 의해 용융부의 폭이 넓어지는 것으로 판단된다.

3.2 빔의 에너지 손실에 미치는 광학변수의 영향

레이저 발전기로부터 방사되는 빔의 에너지는 광학부품에 소량 흡수되어 손실되며 그 정도는 소출력인 경우 박판의 레이저 용접인 경우에 용접결과에 영향을 미칠 수 있다¹²⁾.

YAG 레이저 용접시 고려해야할 광학변수로서는 레이저 매질의 여기광원 관련 및 집광계, 광화이버 특성 등 여러 가지를 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 출사 집광광학계와 보호글래스 자체흡수에 의한 에너지 손실, 그리고 보호글래스를 통하는 빔 경로상에서의 스파터 부착에 따른 에너지 손실 등의 광학변수의 영향에 대해 알아보았다.

Table 2에는 집광광학계의 장착유무에 따른 전압별 빔의 에너지 손실 값을 나타내고, 이를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다. 빔 에너지의 예측시 집광된 빔은 파워미터의 감광부를 손상시키기 때문에 집광광학계를 장착했을 때와 장착하지 않았을 때 파워미터와의 거리는 각각 95mm, 40mm로 하였다. 이때 거리에 따른 빔의 에너지 차는 거의 없었다.

집광광학계에 의한 빔 손실은 평균 0.45J 정도이며 램프전압이 높을수록, 즉 출력에너지가 클수록 손실정

Table 2 Loss of laser beam energy by condensing optic system

Output energy (J)	Value of output energy (J)		Loss of optic sys. (A-B)
	A: With condensing optic system (Distance between optic sys. and powermeter: 95mm)	B: No condensing optic system (Distance between fiber and powermeter : 40mm)	
Lamp voltage (V)			
260	3.87	4.20	-0.33
270	4.42	4.81	-0.39
280	5.00	5.45	-0.45
290	5.62	6.11	-0.49
300	6.25	6.80	-0.55

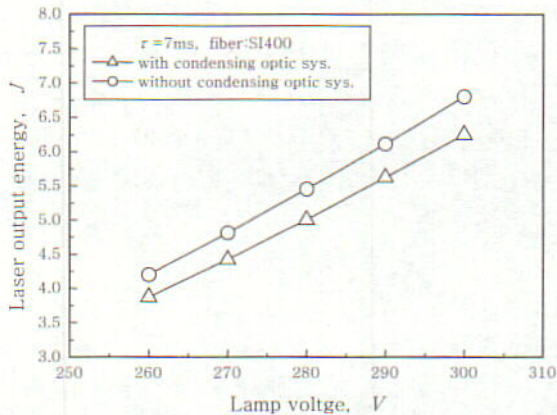


Fig. 8 Loss of laser beam energy by condensing optic system

도가 크게 되는 경향을 나타내었다. 이 에너지 손실은 Fig. 6에서도 설명하였듯이 작은 에너지라도 용접성(용입깊이)에 크게 영향을 미칠 수 있다는 것을 고려해볼 때 집광광학계에 의한 빔에너지 손실 또한 무시할 수 없을 정도의 에너지라는 것을 알 수 있다.

Table 3에는 출사 집광광학계용 보호글래스와 실험 실용 슬라이드 글래스의 재질에 따른 투과 에너지 손실 정도, 그리고 보호글래스에 스패터가 부착됨으로서 발

생되는 에너지 손실정도를 계측하기 위하여 사용한 레이저 조사조건을 나타내고, Fig. 9에는 각 조건에서의 에너지 손실정도를 계측한 결과를 나타낸다. 집광광학계용 보호글래스와 일반실험용 슬라이드 글래스를 이용하여 레이저빔을 투과시켰을 때 손실되는 에너지는 보호글래스의 경우 조사되는 에너지의 약 7~8%(0.14~0.74J), 슬라이드 글래스의 경우 약 8~10%(0.16~0.93J)이었다. 재질에 따른 투과율의 차이가 1~2% 정도의 차이라면 비용절감 차원에서 볼 때 값싼 슬라이드 글래스를 집광광학계용 보호글래스와 대체하여도 무방하다고 사려된다. 또한, 보호글래스 사용 후에 스패터의 부착정도에 따른 빔 에너지 손실은 레이저빔이 통과하는 광로 ①, ②, ③ 세 부분에 걸쳐 측정된 결과 14~34%에 까지 이르렀다. 보호글래스 표면의 스패터 부착 유무에 따른 투과 에너지를 비교해보면 스패터만에 의한 에너지 손실은 그 부착정도에 따라 최소 8%~최대 27%에 이르고 있다. 이러한 에너지 손실은 브라운관 전자총 박판의 부품에 적용되는 소출력 레이저일 수록 용입깊이에 민감하게 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

External view	Position	Weld condition	Measured energy (J)	Energy loss of protecting glass and spattered-particles	Energy loss only by spattered-particles
 Protecting glass(new)	①	A	8.26	0.74J, (8.2%)	-
		B	5.55	0.49J, (8.1%)	-
		C	1.88	0.14J, (6.9%)	-
 Slide glass	①	A	8.07	0.93J, (10.3%)	-
		B	5.43	0.61J, (10.1%)	-
		C	1.86	0.16J, (7.9%)	-
 Protecting glass(used)	①	A	7.55	1.45J, (16.1%)	0.71J, (7.9%)
		B	5.04	1J, (16.6%)	0.51J, (8.5%)
		C	1.73	0.29J, (14.4%)	0.15J, (7.5%)
	②	A	7.30	1.70J, (18.9%)	0.96J, (10.7%)
		B	4.77	1.27J, (21.0%)	0.78J, (12.9%)
		C	1.56	0.46J, (22.8%)	0.32J, (15.9%)
	③	A	5.92	3.08J, (34.2%)	2.34J, (26.0%)
		B	4.04	2J, (33.1%)	1.51J, (25.0%)
		C	1.33	0.69J, (34.2%)	0.55J, (27.3%)

Fig. 9 Loss of laser beam energy due to the quality of the material of protecting glass and stucked spatter on protecting glass of optic system

Fig. 10에는 보호글래스에 부착한 스패터의 SEM사진과 EDS 성분분석 결과를 나타낸다. 스패터는 약 100 μ m 전후의 크기이며, 입자의 성분은 주로 합금원소인 Cr, Fe 등이며, 비산도중에 산화되어 O의 성분도 검출되고 있다. 이러한 결과로부터 스패터는 용융부로부터 합금원소의 증발에 의한 것이 아니고, 용액의 일부가 비산하여 부착된 것임을 알 수 있다.

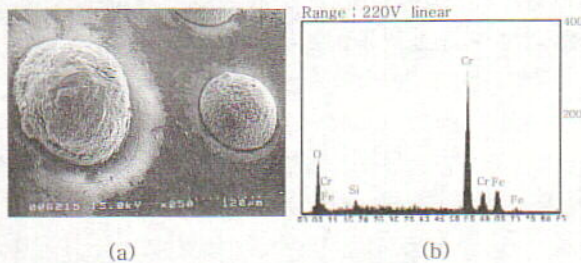


Fig. 10 SEM photograph(a) and EDS analysis(b) of the stuck spatter on protecting glass

3.3 접합부의 형상과 비초점거리에 따른 용입특성

Fig. 11에는 플레어 이음부의 전극에 대해서 집광렌즈의 비초점거리(f_d)를 -3mm~+3mm 범위로 변화시켰을 때의 용접부 단면을 나타낸다. 용융단면형상은 빔의 집광 및 반사형태가 용융단면에 그대로 재현되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 초점에서는 좁고 깊은 용입이 얻어지고 비초점거리로 갈수록 용융단면 폭은 넓어지면서 용입깊이는 얕아지는 특성을 보이고 있다. 특히, $f_d = +1$ mm와 $f_d = -3$ mm에서는 용융비드폭이 비드표면보다 아래가 오히려 넓은 형상을 보이고 있다.

Fig. 12에는 플레어 이음부에 대한 레이저빔의 조사 및 흡수 개념도를 나타낸다. 초점부근에서 용접부로의 빔 에너지 흡수가 용이한 구조임을 알 수 있으며, 비초점거리 (\pm)영역으로 벗어날수록 전극에 와닿는 빔의

STS304L (0.33mm), 233V, SI400, $\tau = 10$ ms, $\alpha = 0$

Cross section of weld			
f_d (mm)	-3	-2	-1
Cross section of weld			
f_d (mm)	0	+1	200 μ m

Fig. 11 Effect of beam defocused distance on penetration depth in flare joint

면적이 상대적으로 크게되고 전극의 곡률반경을 가진 모서리에서 반사되어 접합부로의 에너지 흡수가 나빠지게 되며 그 정도는 -보다 +쪽이 크다는 것을 알 수 있다. 또한 $f_d = -3$ mm와 $f_d = +1$ mm에서 입사빔이 곡률부에서 반사되어 비드의 아래 부분이 넓어지는 메커니즘을 이해할 수 있다.

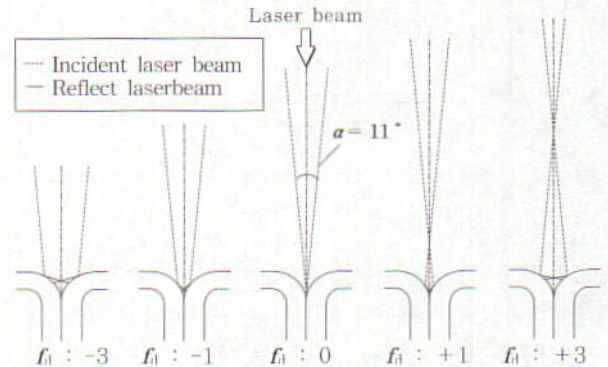


Fig. 12 Schematic diagram of laser beam absorption for defocused distance variation

비초점거리 변화에 따른 비드의 형상과 용입의 변화는 레이저 용접에서만 볼 수 있는 특별한 것으로 이를 "비드전이(bead transition)"라고도 한다¹³⁻¹⁵. 비초점거리가 (+) 값보다는 (-) 영역에서 보다 넓은 범위에 걸쳐 안정된 용접이 이루어지고 용접가능 영역이 넓은 것을 알 수 있다. 이는 (-)영역의 f_d 범위에서는 집광된 초점이 재료내부에 위치함으로 해서 재료표면으로부터 용융현상이 내부로 진행할수록 빔이 집광되는 형태로 되어, 동일한 (\pm)비초점거리에서 (-)쪽이 에너지밀도가 높아지기 때문에 (+)영역보다 깊은 용입을 얻을 수 있게 되는 것이다. 이러한 결과는 플랜지 이음의 전극에 대해서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 13에는 플레어 이음부와 플랜지 이음부의 용입깊이를 비교한 결과를 나타낸다. 플레어 이음의 경우는 용입깊이를 정량적으로 측정하기가 어려운 점이 있어서 주어진 그림과 같이 두 이음형상에 대해서 각각 용입깊이를 정의하고 측정하였다. 플레어 이음부의 경우가 플랜지 이음의 경우보다 깊은 용입이 얻어지고 있음을 정성적으로나마 알 수 있다. 이는 이음부의 형상에 따른 빔의 흡수 메커니즘 차이에 기인한다.

3.4 빔의 조사각도 변화에 따른 용접특성

Fig. 14에는 플레어 이음부의 전극 맞대기 용접부에 대해서 빔의 조사각도(α)를 0~14° 범위로 변화시켰을 때의 용접부 단면을 나타낸다. 용융단면의 형상은

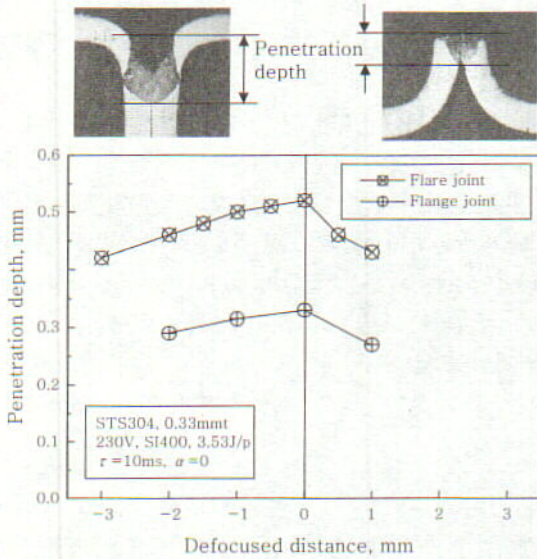


Fig. 13 Comparison of penetration depth for flare joint and flange joint

STS304L (0.33mmt), 260V, 5.19J/p, $\tau=10ms$, SI400, $f_a=0$				
	0°	2°	3.5°	
	5°	7.5°	11°	14°

Fig. 14 Cross-section of weld by incident angle(α) of laser beam

조사각도가 증가할수록 용접부가 기울어져 나타나고 용입깊이는 얕아지며 전극배면에는 합금원소의 증발 반조력(recoil force)에 의한 입자의 비산현상은 관찰되지 않고 있다. 조사각도 20°와 25°에서는 레이저빔이 전극표면으로부터 대다수 반사되어 용접이 이루어지지 않았다. 용입방향은 빔의 조사각도가 0~약 8°까지는 전극의 맞대기 이음 방향으로 진행되므로 다소 과출력의 빔이 조사되더라도 전극내부로의 스패터 유입은 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 그러나 조사각도 11°이상에서는, 용융단면의 형상으로부터 알 수 있듯이, 용융부의 중심이 접합해야 할 전극의 중앙부에서 완전히 벗어나 있으며 출력이 높아질 경우 전극배면으로 용액의 비산현상에 의해 전극내부에 스패터가 부착될 가능성이 있음을 보여주고 있다. 재료 내부로의 스패터 현상은 재료내부에 형성된 키홀의 방향이 전극 중앙부

에서 벗어나 전극 내부 쪽으로 향하고 레이저빔 출력이 과도할 경우에만 발생할 것으로 예상된다.

그래서, 현장에서의 광학계 배치 등 주위의 여건을 고려하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 빔의 조사각도인 약 5°에 대해서, 램프전압을 증가시켜서 출력 에너지의 변화에 따른 전극내부로의 입자 비산 가능성에 대하여 검토하고 그 실험결과를 Fig. 15에 나타내었다. 그림 중에 표시된 a~d의 기호는 각각 용접비드의 전면과 배면에 형성된 결함의 형상과 위치를 용접단면에 나타내고 있다. 램프 전압이 증가할수록, 즉 침투출력과 조사 에너지가 크게 됨에 따라 전극의 용접비드 형상은 전면과 배면에서 점차 큰 차이를 보이고 있다. 우측에 제시된 용접부 단면관찰로부터 배면으로 용액이 증발 또는 비산하여 전극의 두께가 얇아지거나 전극배면에는 스패터가 부착되어 있으며 비드의 심한 험평현상을 보이고 있는 가운데 국부적으로는 구멍을 형성하고 있다. 이것은 용융부내에서 급격한 합금원소의 증발 반조력에 의해 형성된 키홀의 선단부가 전극의 두께 부분을 관통하여 용액이 전극 내부로 비산하게 된 결과로 판단된다. 용접후 외관상 결함이 발견되지 않았더라도 후공정과정에서 결함이 노출되는 것은 이러한 배면의 스패터 부착에 의한 것이 주 원인이 되며, 수백 메타에 이르는 로봇에 의한 자동 온라인 공정에서는 특히 유념하여야 할 가공 제어인자임을 알 수 있다.

그러나 Fig. 14에서도 알 수 있듯이, 용접단면이 전극두께 방향으로 모두 용융되었다 하더라도 항상 전극내부로 용액입자가 비산하는 것은 아니다. 적절한 레이저 출력으로 에너지밀도를 조절하여 용융부내에 형성되는 키홀의 깊이를 제어한다면 전극배면으로의 비산현상을 막을 수 있으며, 용액의 표면장력에 의해 용접부의 전면 및 배면에 있어서 험평비드가 없는 건전한 용접결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 플레어 이음의 전극의

Incident angle (α)	Front bead	Back bead	Cross section of weld
5°			
	318V, 10ms, 11.65J/p		
5°			
	346V, 10ms, 15.26J/p		

Fig. 15 Cross section of weld by laser power variation in incident angle. 5°

경우에도 동일한 실험을 한 결과 조사 각도 0~20° 까지 용접이 가능하였으며, 돌출된 형상이기 때문에 레이저빔 조사각도의 영향은 크게 받지 않았다.

4. 결 론

브라운관 전자총 부품의 펄스 Nd:YAG 레이저 점용접에 있어서 용접성에 영향을 미치는 빔의 출력특성과 광학변수에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 펄스 레이저빔의 기본 출력 특성은 레이저 매질의 여기 램프 전압을 상승시킬수록, 그리고 조사시간을 길게 할수록 거의 비례 관계로 증가하며, 펄스 빔의 침투 출력은 동일 램프 전압에서 레이저 조사시간을 짧게 할수록 크게 되었다. 또한, 레이저빔의 침투출력은 피용접재의 용융깊이를 지배하는 인자이며, 출력에너지는 용융비드폭을 넓히는 인자임을 확인하였다.

2) 출사 집광광학계에 의한 빔 에너지 손실은 램프전압이 높을수록 즉, 출력 에너지가 클수록 크게 되었다. 이러한 손실 정도는 소출력의 레이저를 이용한 박판의 용접에 있어서 재료의 용융 특성에 큰 영향을 주게 된다.

3) 보호 글래스에 의한 조사 에너지의 손실은 약 7~8%이며, 보호글래스 표면에 부착된 스페터만에 의한 에너지 손실은 부착정도에 따라 다소 차이가 있으나 대략 8~27%에 이르렀다. 자동화 공정에서 보호글래스의 정기적인 소재와 점검이 요구된다. 또한, 레이저 메이커에서 제안하는 보호글래스와 일반 실험용 슬라이드 글래스의 빔에 대한 투과비율을 비교할 때 다소 가격이 낮은 슬라이드 글래스의 사용도 가능하였다.

4) 초점거리 변화에 따른 용접성 평가에서 초점위치에서 가장 깊은 용입을 얻을 수 있으며, 비초점거리가 (+)영역보다는 (-)영역에서 보다 넓은 범위에 걸쳐서 안정된 용접이 이루어지며 용접가능 영역이 넓다. 즉, (-)영역에서는 초점이 재료내부에 위치함으로써 용융이 진행될수록 에너지가 집광되는 형태로 되어, 동일한(±)의 비초점거리에서 (-)쪽의 에너지 밀도가 높아지기 때문에 (+)영역보다 깊은 용입을 얻을 수 있다. 또한, 동일한 에너지 조건에서 플레어 이음부의 전극이 플랜지 이음부의 전극보다 빔 흡수가 양호하여 보다 용입이 깊고 (-)영역으로의 용접가능 영역이 넓다.

5) 레이저빔의 조사각도를 변화시킬 때 피용접재의 형상인자에 의해 빔 에너지 흡수상태가 달라지게 된다. 플레어 이음부인 전극의 레이저 용접시 빔 에너지와 조사각도를 동시에 고려할 경우, 0~약 8° 까지, 플랜지 이음부의 전극은 0~20° 까지 전극내부로의 스페터 용입을 방지할 수 있다.

6) 플레어 이음부의 전극용접에 있어서, 과도한 조사각도에서 출력을 높일 경우 배면으로 용액이 증발 또는 비산하여 전극의 두께가 얇아지거나 전극배면에는 스페터가 부착되며, 비드의 심한 험핑현상 및 구멍이 뚫려지게 된다. 이것은 용융부내에서 급격한 합금원소의 증발 반조력에 의해 형성된 기공의 선단부가 전극의 두께부분을 관통하여 용액이 전극내부로 비산하게 된 결과이다. 이것은 외관상 결함이 없으나 후공정과정에서 결함이 검출되는 원인이 되며 자동공정에서 주된 용접제어인자임을 알 수 있다.

후 기

본 연구결과는 산·학 협동에 의한 성과의 일부이며, 삼성 SDI DC 사업부 용접 TFT팀원의 적극적인 협조에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. T. Ishide, Y. Nagura et al. : High power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants, Laser Advanced Materials Processing, 2(1992), 957-962
2. Jong-Bong Lee, Hee-Dong Park : Current Status of Tailored Blank Technology, Journal of KWS, 18-3(2000), 266-272
3. Jong-Do Kim, Young-Sik Kim : The State of In-Process Quality Monitoring Technology in Laser Welding, Journal of KWS, 18-4(2000), 433-440 (in Korean)
4. Seung-Hyup Ha, Woo-Young Yang, Myung-Do Kim, Jong-Do Kim, Snag-Myung Cho, Young-Sik Kim : Pulsed Laser Weldability of Electron Gun Parts in Braun Tubes(Report I) - Characteristics of Beam Output Energy and Optical Parameters -, Preprints of the national meeting of autumn in KWS, 36(2000), 268-270 (in Korean)
5. Isumu Miyamoto : Recent Status of Laser Materials Processing in Japanese Industry, ICALEO'98, Laser Institute of America, 16-19(1998), Section A 122-131
6. M.R.H. Knowles, G. Rutterford et al. : Sub-micron and High Precision Micro-machining Using Nanosecond Lasers, ICALEO'98, Laser Institute of America, 16-19(1998), Section E 112-120
7. J. Xie and A. Kar. : Laser welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation, Journal of America Welding Society, (1999), 343-348
8. Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, Yoshiaki Arata : The Role of Assist Gas in CO₂ Laser Welding. -Laser Welding of Metal (Rept. 3)-, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 3-2(1985), 276-283 (in Japanese)

9. Takuomi Maiwa, Isamu Miyamoto and Kiyokazu Mori : Properties of keyhole plasma in CO₂ Laser Welding, ICALEO'95, Laser Institute of America, (1995), 708-717
10. Susumu Tsukamoto, kazuo Hiraoka, Yoshikazu Asai, Hirosada Irie : Characteristics of Stable Induced Laser Plasma, ICALEO'96, Laser Institute of America, 81(1996), Section B 76-85
11. R. Fabbro : Beam-plasma Coupling in Laser Material Processing, LAMP, (1992), 305-310
12. Steen, W. M. : Laser Materials Processing. New York N.Y Springer-Verlag, 1991
13. Yoshiaki Arata, Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, Fumimaru Kawabata : Laser Welding of Metal-Effect of Focussing Optics on Bead Form-, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 49-10(1980), 687-692 (in Japanese)
14. E. A. Metzbower : Absorption in the Keyhole, ICALEO'97, (1997), Section G 16-25
15. Hiroshi Maruo, Isamu Miyamoto, Fumimaru Kawabata, Yoshiaki Arata : Laser Welding of Metal -Effect of Traveling Velocity on Bead Shape-, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 50-4(1981), 404-409 (in Japanese)