

# 액체 추력기용 내열합금 소재에 대한 용접 특성 연구

유상현\* · 이제훈\* · 김정오\* · 김정훈\*\* · 이재원\*\*

## Welding Properties of Heat-resistant Alloys for Liquid Thruster

SangHyun Ryu\* · JaeHoon Lee\* · JeongO Kim\* · JungHun Kim\*\* · JaeWon Lee\*\*

### ABSTRACT

In this work, Inconel 600, Inconel 625 and Haynes 230 are welding using Nd:YAG laser and electron beam. These heat-resistant alloys are typically used for the liquid thruster. To examine, the affects of experimental parameters on weld ability, the plate welding of these materials were carried out using both Nd:YAG laser and electron beam. Also, the micro-structure, micro-hardness, and tensile strength of the specimens were analyzed. From the analysis of the experimental results of laser and electron beam welding, we have obtained the optimal welding conditions.

### 초 록

본 연구에서는 액체 추력기에 적용될 내열합금 소재인 Inconel 600, Inconel 625, Haynes 230에 대해 Nd:YAG 레이저 용접 및 전자빔 비드 온 플레이트 용접을 수행하였다. 레이저 용접과 전자빔 용접 시 각각의 변수가 용접비드 형상에 미치는 영향을 분석 하였으며 용접 조건들이 용접성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 조직, 미세경도 및 인장강도 등의 실험을 하였다. 또한, 레이저와 전자빔 용접 실험 결과를 분석하여 최적의 용접방법과 조건을 도출하였다.

Key Words: Nd:YAG laser, laser welding(레이저용접), liquid thruster(액체 추력기), electron beam welding(전자빔용접), heat-resistant alloy(내열합금)  
Inconel 600, Inconel 625, Haynes 230, monopropellant thruster(단일 추진제 추력기)

### 1. 서 론

인공위성의 자세제어(attitude control), 궤도수정, 위치 유지(station Keeping) 및 발사체의 요,

피치, 롤 제어에 사용되는 소형 액체추진기관인 추력기는 비행체의 주추진이 목적이 아닌 제어 용도로 사용된다. 이러한 추력기는 추진제의 종류에 따라 단일추진제 추력기와 이원추진제 추력기로 구분된다.

Figure 1은 다목적실용위성(KOMPSAT)의 액체 추진시스템으로서 단일추진제 시스템을 응용한

\* 한국기계연구원 정보장비연구센터  
\*\* (주) 한화대전공장 개발부  
연락처, E-mail: jaholee@kimm.re.kr

1Lbf급 추력기를 보여준다. 이와 같은 단일추진제 추력기(monopropellant thruster)는 산화제의 개입 없이 추진제와 촉매의 화학적 반응에 의하여 고온/고압의 가스를 발생시켜 노즐을 통하여 추력을 얻는 방식으로 고도의 내열성, 고강도 및 경량화를 요구하기 때문에 이에 대응하는 용접법으로 전자빔 용접(electron beam welding)을 적용하고 있다.<sup>[1][2]</sup>

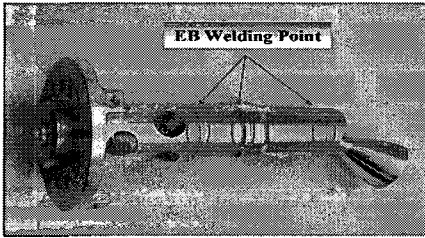


Fig. 1 Monopropellant Thruster (1Lbf)

기술선진국에서는 항공우주 산업과 관련하여 전자빔 용접에 관한 수많은 연구가 행해져 왔으나 특수 분야의 적용이 대부분이기 때문에 공개된 기술은 그리 많지 않은 실정이다. 또한, 국내의 항공우주 산업에서 전자빔 용접 기술 및 적용 사례 등을 살펴볼 때, 고부가가치 소재에 대한 신기술 관련 연구가 시급히 요구되고 있기 때문에 용접변수와 용입 특성에 대한 많은 자료가 요구되고 있다.<sup>[3]</sup> 그리고 레이저 용접은 열 영향부가 적으며, 비 접촉 가공기술로 재료의 오염을 방지할 수 있다. 또한, 펄스폭, 펄스에너지, 용접속도 등의 다양한 변수들을 활용하여 원하는 용접특성을 얻을 수 있는 장점들을 가지고 있다.

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저와 전자빔을 이용한 용접 기술을 인공위성 추력기 개발에 적용하기 위한 기초연구로서 추력기 가공 소재로서 널리 사용되는 Inconel 600, Inconel 625, Haynes 230 판재를 가지고 비드 온 플레이트(bead on plate) 용접을 수행하였으며, 용접 시편의 비드형상 및 미세조직을 관찰하고 기계적 특성 등을 평가하여 최적의 용접 조건을 구하는데 목적이 있다.<sup>[4][5]</sup>

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 실험장치

본 연구에 사용된 실험재료는 Inconel 600, Inconel 625, Haynes 230을 사용하였고 내부 표면에 이물질을 완전히 제거하기 위하여 아세톤으로 약 10분간 초음파 세척한 후 용접을 실시하였으며 재료성분은 Table 1, Table 2 및 Table 3 와 같다.

실험 장치로는 Fig. 2 (a)에서 보는 바와 같이 250W급 Lumonics Nd:YAG Laser 와 저배율 현미경을 통한 접합부 관측이 가능하고 xy-table에 의한 단순이동 방식이 가능한 기존의 6kW, 100mA급 전자빔 용접기 (b)를 사용하였다.

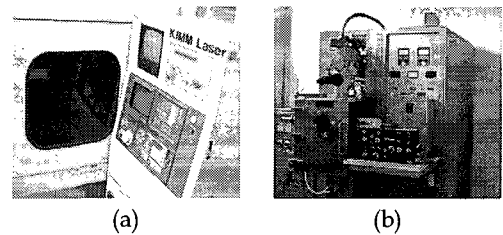


Fig. 2 Photos of (a) Lumonics Nd:YAG Laser and (b) Electron Beam Welding system.

Table 1 Chemical compositions of Inconel 600 (%)

Al	Si	C	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
0.26	0.2	0.13	0.25	15.66	0.33	9.24	73.74
S	Cu	Nb		Ta		Co	
0.002	0.09	0.05		<0.01		0.044	

Table 2 Chemical compositions of Inconel 625 (%)

Al	Si	Ta	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
0.21	<0.5	0.007	0.29	22.2	3.64	60.98	3.43
C	Mn	P	S	Co	Mo	Nb+Ta	
0.034	0.07	0.004	0.002	0.03	9.07	3.44	

Table 3 Chemical compositions of Haynes 230 (%)

Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	W
0.72	23.3	0.53	1.48	61.5	12.6

### 2.2 실험과정

Nd:YAG 레이저와 전자빔을 이용하여 빔을 금속 시편에 직접 조사하는 비드 온 플레이트 용접을 실시

하였으며 용접샘플은 아세톤으로 초음파 세척하여 이 물질을 완전히 제거 후 지그로 고정시켜 용접 중 열 팽창에 의한 변형이 발생되지 않도록 하였다.

본 실험의 변수로는 Table 4 및 Table5에 나타냈으며 비드 온 플레이트 용접 후 실험재료 뒤 표면의 용융상태 또는 표면의 변색 및 용융흔적을 관찰하였다. 광학현미경의 조직 관찰을 위해 용접방향에 수직으로 비드단면을 절단하고 마운팅 프레스로 마운팅 하였으며 마운팅된 용접 시편의 비드 절단면에 대해 샌드페이퍼로 연마 후 최종적으로 알루미늄 분말 수용액을 사용하여 폴리싱 하였다. 에칭은 HCl, HNO<sub>3</sub> 혼합용액을 사용하였고 침적 시간은 재료의 부식상태를 관찰하면서 조절하였다.

에칭 된 용접비드 단면은 광학현미경을 사용하여 용접부의 용융깊이를 나타내는 용입깊이와 용접부의 상부에서 용융부의 폭을 나타내는 비드 폭을 검사하였고 용접부와 열 영향부의 열 영향 정도를 알아보기 위해서 미세조직 검사와 마이크로 비커스 경도측정을 하였다. 또한, 인장강도 시험위해 시편 규격을 KS 7호 형에 맞추어 제작하였으며, 인스트론사의 만능시험기 (모델 4484)을 이용하여 인장강도 시험을 하였다. 인장강도 시험에는 용접실험 변수들에 대해 용입깊이와 비드폭을 검사한 결과로부터 심 용입이 가능한 용접 조건으로부터 실시하고 이를 모재 강도와 비교하였다.

Table 4 Experimental parameters for laser welding

Parameter	Range
Laser power (W)	69-191
Pulse energy (J)	14-30
Welding speed (m/min)	0.1-0.4
Pulse width (ms)	4-20
Repetition rate [Hz]	5-15

Table 5 Experimental parameters for electron beam welding

Parameter	Range
Focusing current (mA)	292-545
Beam current (mA)	6-12
Accelerating voltage (kV)	20~60
Welding speed (m/min)	0.83-1.66

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Nd:YAG 레이저 용접 변수에 따른 용입깊이, 비드폭의 변화

Figure 3는 반복율 5Hz, 펄스에너지 14J, 레이저 출력 69W, 용접속도가 0.1m/min 로 동일할 때 펄스폭 변화에 대한 그래프이다. 펄스폭은 4 - 20ms까지 2ms 씩 증가시켜 실험하였으며 펄스폭이 증가할수록 용입 깊이는 감소하였다. 이는 펄스폭의 증가로 침투출력과 펄스당 에너지의 감소로 인한 것으로 판단되어진다.

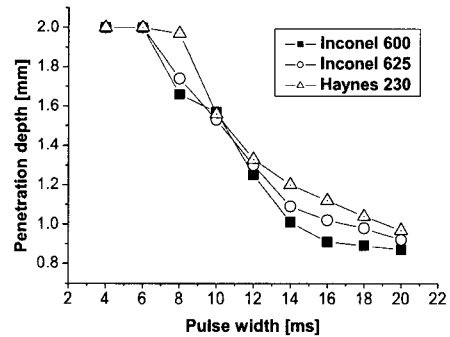


Fig. 3 Penetration depth for laser welding versus pulse width

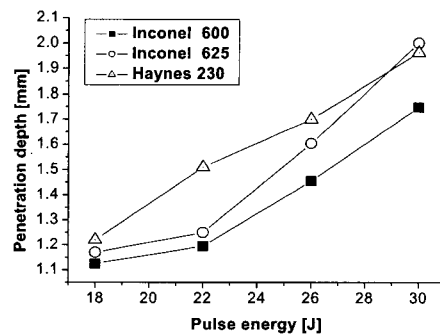


Fig. 4 Penetration depth for laser welding versus pulse energy (Repetition rate 5Hz, Pulse width 20ms, Welding speed 0.1m/min)

Figure 4는 용접속도가 0.1m/min일 때 레이저의 펄스 에너지가 커짐에 따라 용입깊이가 증

가되는 것을 보여주고 있다. 이는 펄스 에너지의 증가에 따라 침투출력과 모재에 전달되는 입열량이 증가하기 때문인 것으로 보여 진다.

Figure 5 a,b,c는 용접속도 변화에 따른 용접 단면 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 용접 속도가 증가할수록 용입깊이와 비드폭이 점차 감소된 것을 알 수 있다. 이는 모재에 전달되는 단위 길이당 입열량이 감소하기 때문에 용입깊이와 비드폭은 점차 감소되는 것이라 판단되어 진다.<sup>[6]</sup>

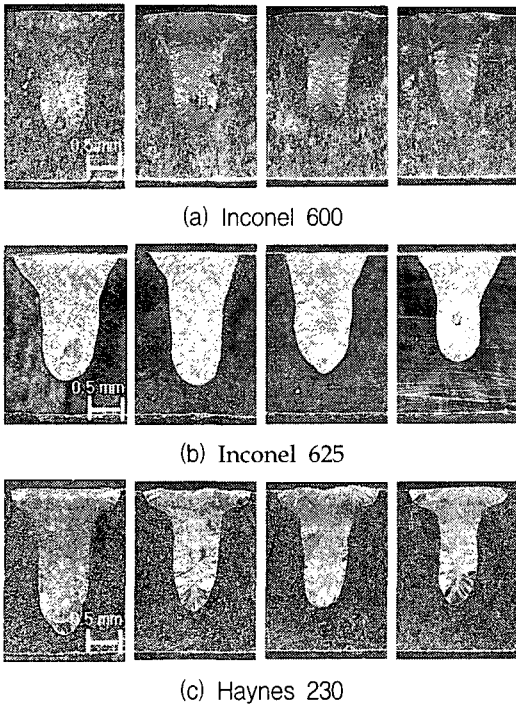


Fig. 5 Cross section of laser welding bead as welding speed  
(a) Inconel 600 (b) Inconel 625  
(c) Haynes 230

### 3.2 Electron beam 용접 변수에 따른 용입깊이, 비드폭의 변화

Figure 6는 focusing current 528mA , beam current 6mA , accelerating voltage 60kv로 동일할 때 용접속도 변화에 따른 용접단면이다. 용접

속도는 0.83 - 1.66m/min까지 변화를 주었으며 결과적으로 용접속도가 증가함에 따라 모재에 전달되는 단위 길이당 입열량이 감소되기 때문에 용입깊이는 감소하였다.

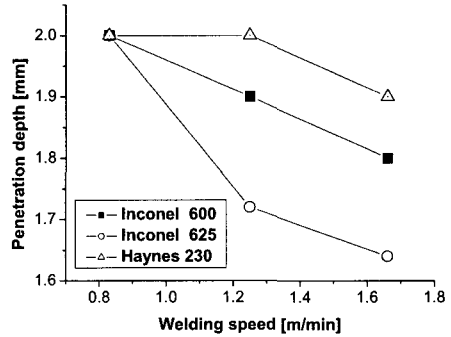


Fig. 6 Relationship between welding speed and penetration depth for electron beam welding (focusing current 528mA, beam current 6mA, accelerating voltage 60kv)

Figure 7는 Input power는 360W로 동일하고 용접속도가 1.25m/min일 때 가속전압의 증가에 따른 용입깊이의 증가를 나타낸 그래프이다. 이것은 단위 길이당 입열량이 증가되어 용입깊이가 증가된 것으로 사료된다.

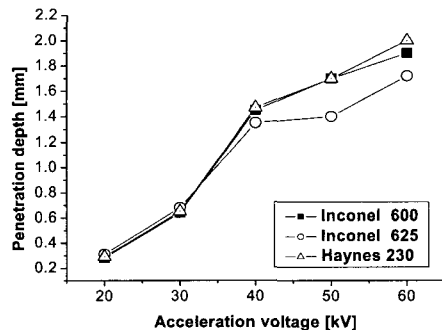


Fig. 7 Relationship between Accelerating voltage and penetration depth

Figure 8은 beam current 6mA, accelerating voltage 60kV, welding speed 1.25m/min,

focusing current 505mA 일 때의 초점 위치에서 focusing current를 10mA씩 올릴 때마다 Z축을 10mm 간격씩 올려 실험한 그래프이다.

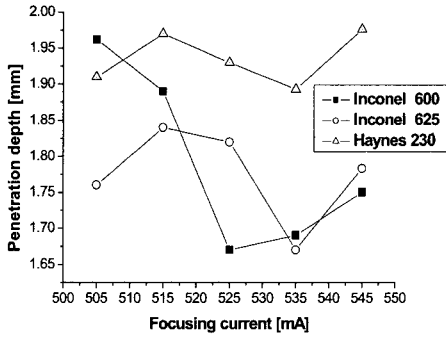


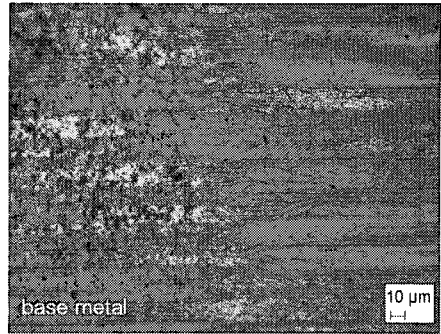
Fig. 8 Relationship between focusing current and penetration depth (Beam Current 6mA, accelerating voltage 60kV, welding speed 1.25m/min)

### 3.3 미세조직

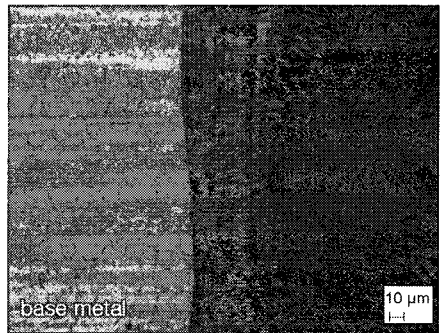
용접부 및 열 영향부의 건전성을 확인하고 열 영향 정도를 관찰하기 위하여 광학현미경을 이용하여 촬영한 것이다. Fig. 9는 레이저 용접시 Inconel 600 용융부에서 균열이 발생된 것을 보여주었고 이에 대해 명확한 사실은 규명되고 있지 않으나 고온에서 연성이 부족한 저융점 불순물이 생긴 결정립계가 수축 응력에 의해 발생하는 고온균열이라 생각되어진다. Fig. 10에서는 보시는 바와 같이 모재부와 용융부 경계면에서의 열 영향부는 매우 좁게 나타났으며 열 영향부에서의 균열은 찾아볼 수 없었다.



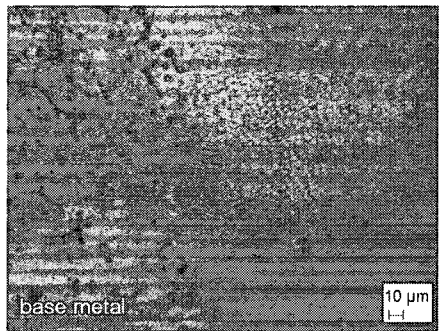
Fig. 9 cracks in cross-section of weld zone by laser welding (Inconel 600)



(a)



(b)



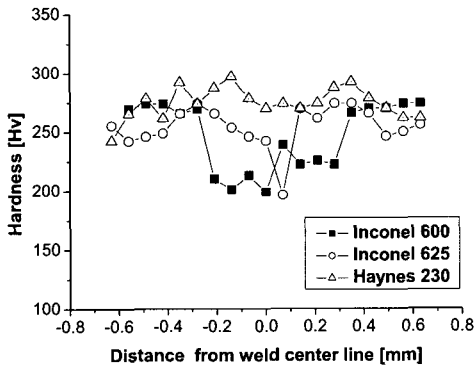
(c)

Fig. 10 The micrographs of the fusion zone, the heat-affected zone and base metal  
 (a) HAZ of inconel 600 by E.B welding  
 (b) HAZ of inconel 625 by E.B welding  
 (c) HAZ of Haynes 230 by E.B welding

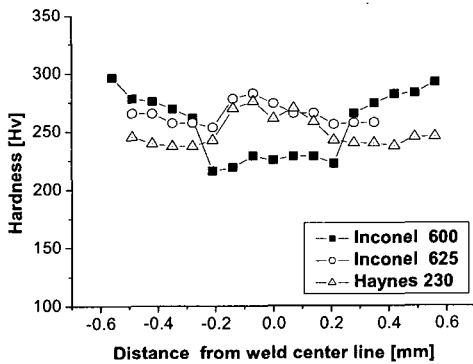
### 3.4 경도 시험

용접부, 열 영향부 및 모재의 경도 변화를 알아보기 위해서 matsuzawa사의 JP/MMI-7 마이크로 비커스

경도계를 사용하여 경도측정을 하였다. 경도 측정시 하중은 0.05kg 이었으며 각각 시험편에 대해 표면으로부터 1.0mm 부근을 용접부 중심으로부터 0.07mm 간격으로 횡단면을 따라 측정하였다. Table 6은 모재 부분에서 미세경도의 평균값을 나타낸 것이며 Fig. 11은 양호한 용입 현상을 보인 조건에 대한 미세경도 분포를 나타낸 것이고 Fig. 12는 미세경도 측정 시 금속 표면에 생긴 압입자국을 나타낸 것이다.



(a) Specimen of laser welding.



(b) specimen of electron beam welding.

Fig. 11 Hardness test

- (a) repetition rate 5Hz, pulse energy 14J, laser power 69W, welding speed 0.1m/min, 8Hz
- (b) sector height 52.9%, pulse width 10ms, pulse energy 14J, repetition rate 15Hz, laser power 191W, welding speed 1.25m/min

Table 6 Micro-Vickers hardness of heat resistant alloys.

materials for experiments	base metal Hardness(Hv)
Inconel 600	274
Inconel 625	257
Haynes 230	255

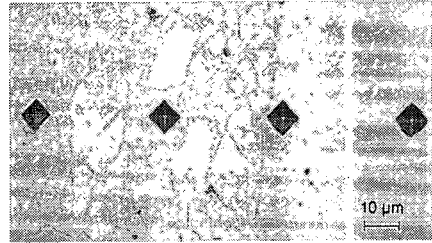


Fig. 12 Marks on the surface of micro-hardness test

### 3.4 인장강도 시험

열 영향부위에서의 미세균열과 강도변화를 알아보고 용접부에서의 강도를 측정하기 위하여 두께 2mm 시험편을 가지고 인스트론사의 만능재료시험기 4484를 사용하여 인장강도 실험을 하였다.

Table 7 tensile strengths of heat resistant alloys.

	Inconel 600	Inconel 625	Haynes 230
base metal (2mm)	862.705 MPa	870.862 MPa	851.616 MPa
Laser welding (1mm)	713.988 MPa	826.362 MPa	695.122 MPa
Laser welding (2mm)	335.683 MPa	891.604 MPa	751.782 MPa
Electron beam (2mm)	841.020 MPa	872.315 MPa	855.084 MPa

시험편은 KS 7호형 규격에 맞추었으며 시험편을 치공구로 고정된 후 인장 시험기의 척에 장착하고, 1.0

mm/min의 인장속도로 정하중시험을 하여 시편이 완전히 분리될 때까지 실험하여 최대하중을 파괴 값으로 정하였다. Table 7에서 인장강도 결과를 나타내었다.

#### 4. 결 론

인공위성 추력기 개발에 적용할 내열합금 소재인 Inconel 600, Inconel 625 및 Haynes 230 판재를 가지고 레이저 및 전자빔 용접 시험을 한 후 용입깊이, 비드폭을 측정하고 미세조직, 미세경도 및 인장강도 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 레이저 용접 시 펄스폭 및 용접속도의 증가에 따라 용입깊이와 비드폭은 감소되었고 펄스에너지의 증가에 따라 용입깊이와 비드폭은 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 전자빔 용접 시 용접속도와 가속전압의 증가에 따라 용입깊이와 비드폭은 증가되었으며 각 시편의 두께가 2mm일 때 최적의 용접조건은 Focusing current 528mA, Beam Current 6mA, Accelerating voltage 60kV, Welding speed 0.1m/min 이었다.
- 3) 양호한 용입현상을 보인 시편의 용접부 미세경도 값은 Inconel 600은 226(Hv), Inconel 625는 245(Hv), Haynes 230은 272(Hv)로 나타났다.
- 4) 미세조직 관찰 결과 레이저 및 전자빔 용접부에서의 열 영향부는 매우 좁게 나타났고 레이저 용접 시 Inconel 600 용접부에서는 개재물이나 크랙이 발견되었다.

5) Inconel 625, Haynes 230 두 종류 시편의 인장강도 시험 결과, 모재에 대해 인장강도 값이 80% 이상의 인장강도 값을 얻었다.

#### 후 기

본 연구는 다목적실용위성 개발사업 6차년도 협약에 근거하여 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. "다목적실용위성 2호 추진계 개발사업" 과제 2차년도 연차보고서(2001), p.105~107
2. 대한용접학회 92 특별강연 및 추계학술발표 개요집, p. 165-167, 1992
3. Soo-khwan Kim, Young-Gak Kweon, Dae-Up Kim, "Electron Beam Welding in the Aero space Industry, 대한용접학회지 제18권, 제6호(2000)
4. C. Daws, CEng, "Laser Welding", Abington publishing, 16-30 (1992)
5. Metal Handbook Ninth Edition, Vol.13, p.142
6. W.J. Han, J.G. Byeon, K.S. Park "Welding characteristics of the Inconel plate using a pulse Nd:YAG laser beam", Journal of Materials Processing Technology 113 (2001) 234-237